

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Roberta Rodrigues Roubuste

**AVALIAÇÃO NA QUALIDADE DA COLAGEM E DESEMPENHO DE
PAINÉIS *Cross Laminated Timber* (CLT) PRODUZIDOS COM MADEIRA
DE *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda***

Santa Maria, RS
2022

Roberta Rodrigues Roubuste

AVALIAÇÃO NA QUALIDADE DA COLAGEM E DESEMPENHO DE PAINÉIS
*Cross Laminated Timber (CLT) PRODUZIDOS COM MADEIRA DE *Eucalyptus grandis**
*e *Pinus taeda**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Clovis Roberto Haselein

Santa Maria, RS
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Roubuste, Roberta Rodrigues
AVALIAÇÃO NA QUALIDADE DA COLAGEM E DESEMPENHO DE
PAINÉIS Cross Laminated Timber (CLT) PRODUZIDOS COM
MADEIRA DE Eucalyptus grandis e Pinus taeda / Roberta
Rodrigues Roubuste.- 2022.
58 p.; 30 cm

Orientador: Clovis Roberto Haselein
Coorientador: Elio José Santini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2022

1. Laminação cruzada 2. Painéis de madeira 3.
Poliuretano I. Haselein, Clovis Roberto II. Santini,
Elio José III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ROBERTA RODRIGUES ROUBUSTE, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Roberta Rodrigues Roubuste

AVALIAÇÃO NA QUALIDADE DA COLAGEM E DESEMPENHO DE PAINÉIS
*Cross Laminated Timber (CLT) PRODUZIDOS COM MADEIRA DE *Eucalyptus grandis**
*e *Pinus taeda**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2022:



Documento assinado digitalmente
CLOVIS ROBERTO HASELEIN
Data: 23/02/2022 14:54:50-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Clovis Roberto Haselein, Dr. (UFSM) – Videoconferência
(Presidente/Orientador)



Documento assinado digitalmente
DANIELA SILVA LILGE
Data: 23/02/2022 12:08:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Daniela Silva Lilge, Dra. (UNIPAMPA) – Videoconferência



Documento assinado digitalmente
Silviana Rosso
Data: 23/02/2022 14:23:04-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Silviana Rosso, Dra. (UNIPAMPA) – Videoconferência

Santa Maria, RS, Brasil
2022

Dedico este trabalho aos meus pais José e Cláudia. Vocês são a minha fortaleza e inspiração.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida, proteção e oportunidades concedidas ao longo da minha caminhada.

Aos meus pais, José e Cláudia, por sempre desejarem o melhor para mim, por não terem medido esforços para garantir a minha educação, por todo amor, compreensão, exemplo e apoio em todas as etapas da minha vida. Sem vocês eu não chegaria até aqui, minha gratidão por tudo. Às minhas irmãs, Eduarda e Gabriela, pelo carinho, paciência e união, que contribuíram para que esse sonho tornasse realidade. À minha avó Nely pelo carinho e apoio.

Ao meu orientador, professor Dr. Clovis Roberto Haselein, pelo apoio, oportunidade e ensinamentos tanto no desenvolvimento deste estudo, como também nas aulas da graduação, que serviram de inspiração para eu seguir na pesquisa. Obrigada por ter confiado em mim.

Às professoras Dra. Daniela Silva Lilge e Dra. Silvana Rosso, por aceitarem em fazer parte da minha banca examinadora, pela disponibilidade e contribuições essenciais para a melhoria deste trabalho.

Às colegas Laura, Luciane e Maiara, que foram o meu primeiro contato para eu integrar no Laboratório de Produtos Florestais, e me ajudaram com muito carinho, disponibilidade e parceria. Aos colegas e amigos da pós-graduação, Alexsandra e Mateus, pela parceria, contribuições e descontração.

Aos técnicos do Laboratório, Fabiana, Nelson e Tarso, por toda contribuição e ajuda no desenvolvimento dos trabalhos, e pela troca de ideias sempre fundamentais.

De forma muito especial, ao Guilherme, Fabio e Kássya, pela amizade de todos os dias, pelo apoio, incentivo, paciência e motivação, tenho certeza que não chegaria até aqui sem a ajuda de vocês. Por terem me auxiliado desde o início na montagem dos painéis, até os testes realizados, e por deixarem tudo mais fácil e divertido. A Nadia, por toda troca de conhecimento, parceria e amizade, sempre me ajudando e escutando com disponibilidade.

Ao Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária, aos funcionários Jeferson, Leandro, Vanderlei, ao pesquisador Cleber e ao diretor Ricardo, pelo auxílio e obtenção da matéria-prima para a realização deste estudo.

À empresa Jowat do Brasil Ltda, por disponibilizar o adesivo Poliuretano monocomponente Jowapur® 687.22 de forma gratuita para a pesquisa. Agradeço ao gerente técnico Bernardino, por toda atenção, paciência, ajuda e ensinamentos para a colagem.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal pela oportunidade, e aos professores pelos ensinamentos e formação.

À CAPES, pelo auxílio financeiro a este estudo.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

AVALIAÇÃO NA QUALIDADE DA COLAGEM E DESEMPENHO DE PAINÉIS Cross Laminated Timber (CLT) PRODUZIDOS COM MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*

AUTORA: Roberta Rodrigues Roubuste
ORIENTADOR: Clovis Roberto Haselein

O objetivo do presente estudo é avaliar a qualidade da colagem das lamelas dos painéis CLT com o uso do adesivo poliuretano monocomponente produzidos com madeira de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* e também a mistura das espécies. O material utilizado para a pesquisa foi coletado no Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária (DDPA), Santa Maria, RS. Após o abate das árvores, as mesmas passaram por processo de desdobro em tábuas e foram transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais da UFSM. Esse material foi armazenado em câmara climatizada com temperatura e umidade relativa controlada até atingir o equilíbrio higroscópico, com teor de umidade de em torno 12%. Após esse período, as lamelas foram seccionadas nas dimensões finais para montagem dos painéis CLT, em 1,6 x 10 x 50 cm, espessura, largura e comprimento, respectivamente. Realizou-se ensaios das propriedades físicas da madeira: massa específica a 12%, massa específica básica e teor de umidade. Além disso, as lamelas foram classificadas de forma visual e mecânica (MOE) para melhor disposição na confecção dos painéis. Os painéis foram montados em três camadas, e cada camada com a disposição de cinco lamelas, em um total de 10 painéis (quatro painéis de *E. grandis*, quatro painéis de *P. taeda* e dois painéis da mistura das espécies). Avaliou-se as propriedades de massa específica, teor de umidade e os ensaios para avaliação da qualidade da colagem, conforme a norma americana ANSI (2019): cisalhamento na linha de cola e delaminação. Os resultados mostraram que as propriedades físicas da madeira mostraram-se superiores para *E. grandis* em comparação com *P. taeda*, corroborando com a literatura. A classificação visual e mecânica permitiu a seleção das peças e organização de lamelas com maior qualidade fosse alocadas nas camadas externas dos painéis, e com propriedades inferiores nas camadas internas. Os painéis produzidos com a madeira de *E. grandis* e com a mistura das espécies apresentaram propriedades adequadas e mostrando que pode ser uma alternativa viável do seu uso na confecção desses painéis. A massa específica da madeira e dos painéis, MOE, resistência ao cisalhamento na linha de cola por compressão e também a ausência de delaminação indicam resultados melhores para a madeira de painéis CLT produzidos com *E. grandis*, indicando que a colagem foi melhor em comparação aos painéis montados com madeira pura de *P. taeda*. Nessa perspectiva, ressalta-se a importância de estudos futuros com a projeção de painéis CLT em grandes dimensões, com o intuito de avaliar as suas propriedades de tal forma como são confeccionados comercialmente.

Palavras-chave: Laminação cruzada. Painéis de madeira. Poliuretano.

ABSTRACT

EVALUATION IN THE QUALITY OF GLUING AND PERFORMANCE OF *Cross Laminated Timber* PANELS (CLT) PRODUCED WITH WOOD OF *Eucalyptus grandis* and *Pinus taeda*

AUTHOR: Roberta Rodrigues Roubuste
ADVISOR: Clovis Roberto Haselein

The objective of the present study is to evaluate the bonding quality of the lamellas of CLT panels with the use of single-component polyurethane adhesive produced with *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda*, and also a mixture of the species. The material used for the research was collected at the Department of Diagnosis and Agricultural Research (DDPA), Santa Maria, RS, Brazil. After felling the trees, they were cut into planks and transported to the Forest Products Laboratory at UFSM. This material was stored in a climate chamber with controlled temperature and relative humidity until it reached hygroscopic equilibrium, with a moisture content of around 12%. After this period, the lamellae were sectioned into the final dimensions for assembling the CLT panels, at 1,6 x 10 x 50 cm, thickness, width, and length, respectively. The physical properties of wood were tested: density at 12%, basic density, and moisture content. In addition, the lamellae were visually and mechanically (MOE) classified for better arrangement in the making of the panels. The panels were assembled in three layers, and each layer with the arrangement of five lamellae, in a total of 10 panels (four panels of *E. grandis*, four panels of *P. taeda*, and two panels of the mixture of species). We evaluated the properties of specific mass, moisture content, and tests to evaluate the quality of gluing, according to the American ANSI (2019): shear at the glue line and delamination. The results showed that the physical properties of wood were superior for *E. grandis* compared to *P. taeda*, corroborating the literature. The visual and mechanical classification allowed the selection of pieces and the organization of lamellas with higher quality to be placed in the outer layers of the panels, and with lower properties in the inner layers. The panels produced with *E. grandis* wood and with a mixture of species showed adequate properties, showing that it can be a viable alternative for use in the manufacture of these panels. The specific mass of the wood and of the panels, MOE, shear strength at the glue line by compression and also the absence of delamination indicate better results for the wood of CLT panels produced with *E. grandis*, indicating that the gluing was better compared to panels assembled with pure *P. taeda* wood. In this perspective, the importance of future studies with the projection of CLT panels in large dimensions is emphasized, in order to evaluate their properties in such a way as they are made commercially.

Keywords: Cross laminating. Wood panels. Polyurethane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspecto geral das árvores selecionadas de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i> . A e B: Madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> . C e D: Madeira de <i>Pinus taeda</i> . E: Toras transportadas para a serraria do DDPA para o processo do desdobro.	25
Figura 2 – Tábuas de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i> em processo de secagem na câmara climatizada.	26
Figura 3 – Gabarito para classificação visual das lamelas através da medição de nós.	29
Figura 4 – Ensaio de flexão estática. A: Máquina Universal de Ensaios. B: Corpo de prova com a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> em teste de flexão estática. C: Corpo de prova com a madeira de <i>Pinus taeda</i> em teste de flexão estática.	31
Figura 5 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowatpur® 687.22.	32
Figura 6 – Etapa de prensagem dos painéis.	33
Figura 7 – Aspecto geral do painel com a indicação da confecção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento e delaminação.	35
Figura 8 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.	35
Figura 9 – Cisalhamento na linha de cola em corpo de prova.	36
Figura 10 – Etapas do ensaio de delaminação.	37
Figura 11 – Classificação visual da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	40
Figura 12 – Classificação visual da madeira de <i>Pinus taeda</i>	41
Figura 13 – Massa específica a 12% (ME 12%) dos painéis. CLT 1: Painel de eucalipto puro. CLT 2: Painel de pinus puro. CLT 3: Painel com a mistura das espécies (eucalipto nas camadas externas e pinus no miolo).	43
Figura 14 – Teor de umidade dos painéis. CLT 1: Painel de eucalipto puro. CLT 2: Painel de pinus puro. CLT 3: Painel com a mistura das espécies (eucalipto nas camadas externas e pinus no miolo).	43

Figura 15 – Aspecto geral dos corpos de prova após ensaio de cisalhamento e ruptura total da linha de cola. **A:** Painéis CLT de *Eucalyptus grandis*. **B:** Painéis CLT de *Pinus taeda*. **C:** Painéis com a mistura das espécies.....46

Figura 16 – Aspecto geral dos corpos de prova do ensaio de delaminação. **A:** Amostra de CLT de *Eucalyptus grandis* sem delaminação. **B:** Amostra de CLT de *Pinus taeda* com delaminação. **C:** Amostra de CLT misto das espécies sem delaminação.....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limitações permitidas para a presença de nós de acordo com as classes	29
Tabela 2 – Resultados da massa específica aparente (M_{eap}), massa específica básica (M_{eb}) e teor de umidade da madeira (TU) de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i>	38
Tabela 3 – Classificação visual das lamelas de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i>	40
Tabela 4 – Módulo de elasticidade (MOE) através da flexão estática das lamelas de <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Pinus taeda</i>	41
Tabela 5 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola dos painéis CLT e falha na madeira.....	45
Tabela 6 – Ensaio de delaminação nos painéis CLT.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	A MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill.....	16
2.2	A MADEIRA DE <i>Pinus taeda</i> L.	17
2.3	HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE <i>Cross Laminated Timber</i> ...18	
2.4	SELEÇÃO DAS LAMELAS: CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA.....19	
2.5	ADESIVO	20
2.6	PROCESSO DE FABRICAÇÃO E PRENSAGEM.....22	
2.7	PERSPECTIVAS DE USO DO CLT NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA23	
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	MATÉRIA-PRIMA	24
3.2	SECAGEM DAS TÁBUAS	25
3.3	MASSA ESPECÍFICA A 12%, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA	26
3.4	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	28
3.5	CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS.....28	
3.6	ADESIVO	32
3.7	PRENSAGEM DOS PAINÉIS.....33	
3.8	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS.....34	
3.9	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COLAGEM DOS PAINÉIS 34	
3.9.1	Cisalhamento na linha de cola e percentual de falha na madeira	35
3.9.2	Delaminação	36
3.10	ANÁLISE ESTATÍSTICA	37

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	MASSA ESPECÍFICA A 12%, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA	38
4.2	CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS.....	39
4.3	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS.....	42
4.4	CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA DOS PAINÉIS DE CLT E FALHA NA MADEIRA.....	45
4.5	DELAMINAÇÃO.....	48
5	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas no Brasil, em sua maioria, destacam-se em plantios de espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, uma vez que a madeira produzida é destinada para diversos setores, dentre eles a indústria de papel, celulose, painéis de madeira, pisos laminados e carvão vegetal. A grande demanda por produtos de origem madeireira tornou-se como principal fonte de recursos nas regiões do país, principalmente no sul e sudeste brasileiro.

Embora haja uma grande quantidade e variedade de espécies que são cultivadas no Brasil, ainda predomina a construção convencional, ou seja, as obras residenciais de alvenaria e concreto, visto que a madeira basicamente é usada para forros, pisos e infraestrutura de cobertura. Ainda que seja subutilizada pela construção civil, cabe salientar que a madeira possui diversos benefícios ao meio ambiente, apresenta caráter natural e renovável, necessita de baixo consumo energético para produção e a sua aplicação no sistema construtivo impossibilita a liberação de dióxido de carbono (CO₂), e sendo assim, considerada uma alternativa positiva e eficiente no combate ao efeito estufa.

A potencialidade na utilização da madeira está diretamente relacionada à obtenção do conhecimento a respeito das suas propriedades tecnológicas, as quais influenciam na qualidade e na destinação correta dos materiais de acordo com as propriedades requeridas. (GALLIO *et al.*, 2016).

Neste sentido, os produtos resultantes da industrialização da madeira são materiais que em sua maioria visam à redução da madeira a frações ou componentes apropriados, para depois correlaciona-los por meio de cola, objetivando maior desempenho estrutural (PALMA; BALLARIN, 2011). No que diz respeito ao processo de produção de painéis de madeira, qualquer espécie pode ser utilizada, desde que as propriedades físicas e mecânicas obtidas estejam de acordo com as normas de comercialização (LIMA *et al.*, 2013).

Nessa perspectiva, torna-se fundamental introduzir inovações que modifiquem a atual forma da construção, possibilitando o desenvolvimento progressivo da tecnologia e a modernização da indústria. Dentre as tecnologias industrializadas em madeira, pode-se destacar o *Cross Laminated Timber* (CLT), ou também denominado de madeira laminada colada cruzada (MLCC), sendo considerado como uma inovação tecnológica mundial, uma vez que suas características permitem a produção de edificações de madeira por meio de painéis, tanto em paredes como em lajes (ECKER; MIOTTO; TURMINA, 2017).

Os painéis CLT caracterizam-se como um produto constituído por camadas de lamelas de madeira coladas perpendicularmente entre si. A produção deste tipo de material, com as

lâminas cruzadas, proporciona a redução dos efeitos de inchamento e retração e também resulta em uma estrutura com elevada resistência em suas diferentes direções (BRANDNER, 2013).

Os painéis CLT apresentam vantagens em relação à madeira maciça e seus derivados reconstituídos, como a estabilidade dimensional devido à baixa absorção de umidade, bom desempenho acústico, conforto térmico e proteção frente à ação do fogo (FPINNOVATIONS, 2011). Referente às características construtivas dos painéis CLT, destaca-se o processo da montagem que é relativamente rápido, leveza estrutural, e também por se tratar de um material sustentável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da colagem das lamelas dos painéis *Cross Laminated Timber* (CLT), produzidos com madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, com o uso do adesivo poliuretano monocomponente.

1.1.2 Objetivos específicos

Produzir painéis CLT com madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*, formando chapas puras de cada uma das espécies e com a mistura das espécies;

Selecionar as lamelas para a produção dos painéis CLT por meio da classificação visual e mecânica (MOE);

Verificar a eficiência da colagem das lamelas dos painéis CLT em ensaios definidos pela norma americana ANSI/APA PRG 320 (2019);

Determinar as propriedades físicas e mecânica (MOE) da madeira e dos painéis CLT;

Avaliar a perspectiva de implantação dos painéis CLT no cenário brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* W. Hill

A área ocupada por florestas plantadas de espécies do gênero *Eucalyptus* no Brasil, em 2018, totalizou cerca de 5,7 milhões de hectares, em que esta área está distribuída principalmente nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%). O crescimento médio da área de eucalipto, nos últimos sete anos, foi de aproximadamente 1,1% ao ano, sendo que o crescimento foi dominado pelo Mato Grosso do Sul, que apresentou uma média de taxa de crescimento ao ano de 7,4% (IBÁ, 2019).

Conforme Santos, Auer e Jr (2001), o gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, possui em torno de 600 espécies e subespécies, apresentando uma ampla distribuição mundial, com eficiente crescimento em diversas circunstâncias edafoclimáticas, ultrapassando as das regiões de origem. O uso do eucalipto em plantios florestais no Brasil tem sido extensivamente em razão de caracterizar-se pelo rápido crescimento, elevada produtividade, aptidão de adaptação e aplicação para obtenção de diferentes produtos (MORA; GARCIA, 2000).

O gênero *Eucalyptus* apresenta-se como uma alternativa positiva para a indústria madeireira, porém, as espécies desse gênero possuem algumas limitações inerentes à madeira proveniente de florestas de crescimento rápido (GONÇALEZ *et al.*, 2006). Conforme os mesmos autores, os principais problemas relacionados à madeira de eucalipto são as deformações e rachaduras, defeitos que resultam de características desfavoráveis em relação às espécies do gênero, como por exemplo, presença de níveis altos de tensão de crescimento, tendência ao colapso e também elevada retratibilidade.

Eucalyptus grandis caracteriza-se por ocupar a maior área de florestas plantadas no Brasil. A espécie apresenta elevado potencial de produção e tecnológico, de forma que a sua madeira é utilizada principalmente na indústria de papel e celulose, produção de painéis de fibra e aglomerados, fabricação de móveis, e também como lenha e em serraria (IBÁ, 2015; LOPES *et al.*, 2011; SOARES; CARVALHO; VALE, 2003; SOUZA *et al.*, 2004). Ademais, *E. grandis* destaca-se pelo incremento volumétrico que é superior às outras espécies do mesmo gênero, e a sua maior produtividade ocorre em razão do desenvolvimento de híbridos e clonagem de árvores selecionadas (MORA; GARCIA, 2000).

A madeira de *E. grandis* é considerada medianamente leve e de fácil trabalhabilidade em operações de usinagem, possui baixa estabilidade dimensional e considerada de

permeabilidade elevada (CARVALHO, 2000). A produção de sementes, híbridos e clones da espécie está diretamente relacionada com o setor de celulose, biomassa para energia e carvão vegetal (ABM, 2008). Conforme Arango (2004), a densidade básica da madeira de *E. grandis* pode variar entre 0,46 a 0,54g cm⁻³.

2.2 A MADEIRA DE *Pinus taeda* L.

No Brasil, os plantios de espécies do gênero *Pinus* ocupam uma área de aproximadamente 1,6 milhões de hectares, centralizando-se nos estados do Paraná (42%), Santa Catarina (34%), Rio Grande do Sul (12%) e São Paulo (8%). A área plantada com o gênero *Pinus*, nos últimos sete anos, permaneceu com estabilidade e também relacionada com o crescimento dos plantios nesses estados (IBÁ, 2019).

As espécies do gênero *Pinus*, pertencentes à família Pinaceae, caracterizam-se pela facilidade em adaptação nas regiões sul e sudeste brasileiro. Podem atingir altura de 25 a 30 metros, o tronco de casca com coloração marrom-avermelhado e número de três acículas por fascículo (LORENZI, 2000).

Em 1966, o gênero *Pinus* foi introduzido com a lei de incentivos fiscais determinada pelo governo federal, que objetivou a solução da escassez de matéria-prima e propôs a regulamentação da exploração e a utilização das florestas (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

Os plantios de espécies do gênero *Pinus*, atualmente, possuem a concepção de atividade que reduz a exploração extrativista das florestas nativas no Brasil, e, além disso, o aumento da sua produtividade é de extrema relevância para a redução constante das áreas designadas à atividade florestal (FERREIRA, 2005).

P. taeda é originária das planícies adjacentes ao Golfo do México e da Costa Atlântica ao sudeste dos Estados Unidos (MARCHIORI, 1996). Em relação à idade de corte ideal, quando se obtém uma maior quantidade de madeira adulta no que se refere à madeira juvenil, é uma situação a ser apontada nos estudos relacionados ao manejo de plantios da espécie (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Conforme Bendtsen e Senft (1986), a espécie atinge o tamanho para a comercialização de forma rápida. As árvores jovens são caracterizadas pela densidade, resistência e rigidez baixa em razão do maior ângulo de fibras curtas com paredes celulares finas.

Pinus taeda apresenta densidade entre 0,47 a 0,51 g cm⁻³, de forma que sua madeira é bastante utilizada nas indústrias madeireiras, construção civil, chapas, laminados, madeiras

reconstituídas e também na produção de celulose e papel (BORTOLETTO JR, 1993). A espécie caracteriza-se com resistência moderada ao choque, sua contração é considerada elevada, contudo apresenta estabilidade em processos de secagem, a resistência à degradação do cerne é de moderada a baixa e o alburno possui facilidade na impregnação de materiais preservativos (HASSEGAWA, 2003).

2.3 HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS DE *Cross Laminated Timber*

No início do século XX, o aço e o concreto tornaram-se estruturas com maior disponibilidade no mercado da construção civil, pelo fato de serem mais acessíveis economicamente, o que fez com que a madeira fosse substituída pelos mesmos. O interesse por estruturas de madeiras ressurgiu por volta dos anos 60, com a inserção dos produtos de madeira industrializada e, ainda, em meados dos anos 90 foi patenteado o CLT (JELEC; RAJCIC; VAREVAC, 2018).

Os painéis CLT foram denominados de “Brettsperholz (BSP)”, termo em alemão utilizado pelos engenheiros Dröge e Stoy, em 1981, para referir-se a painéis colados de forma cruzada para pontes. No ano de 2000, a expressão Brettsperholz foi traduzida por Schickhofer e Hasewend para o inglês (*Cross Laminated Timber-CLT*) (BRANDER *et al.*, 2016).

A primeira estrutura em CLT em nível mundial foi construída em 1993, por Schuler e Guyer, e a primeira construção com painel CLT engenheirado, como é utilizado atualmente no sistema construtivo, foi realizada por Moser (1995). Os painéis CLT demonstraram elevada eficiência em edifícios com mais de quatro andares no Japão e com a realização de testes de atividades sísmicas (CECCOTTI, 2008).

A introdução desse tipo de painel teve como intuito produzir um material com elevada resistência, durabilidade e versatilidade. A produção de painéis CLT foi realizada primeiramente na Áustria, Alemanha e Suíça, sendo que a sua normatização foi estabelecida no ano de 1998, na Europa, e aceita em 2008. Além disso, instituiu-se a norma EN 16351, que foi implantada em 2014 e dispõe sobre os aspectos técnicos para a produção dos painéis CLT (BRANDER *et al.*, 2016).

O avanço dos estudos e utilização desses painéis na construção civil se deu em razão das inúmeras vantagens que os mesmos proporcionam, como: elevado nível de pré-fabricação, redução no tempo de construção, possibilidade de construções de pavimentos distintos, isolamento térmico e acústico, além de contribuição com a sustentabilidade, uma vez que

esses painéis são fabricados com material renovável, proporcionando construções com menor geração de resíduos (FPINNOVATIONS, 2011).

Os painéis CLT caracterizam-se como um produto de madeira confeccionado no formato de placa podendo ser utilizado não somente como elemento de parede, como também de laje (BRANDNER, 2013). Esses painéis são compostos por camadas de lamelas de madeira orientadas transversalmente às camadas adjacentes. Essa laminação cruzada propicia a redução dos efeitos de retração e inchamento do material, proporcionando uma placa com elevada resistência (KUILEN *et al.*, 2011).

Atualmente, além da Áustria, Alemanha e Suíça, os países como a Suécia, Noruega, Reino Unido, Estados Unidos, Canadá e Austrália também têm voltado à produção desse tipo de painel (CREPELL; GAGNON, 2010). No Brasil, o uso dos painéis CLT tem sido aplicado em residenciais unifamiliares, geralmente de até dois pavimentos em razão do elevado custo inicial. Além disso, a utilização desse material no país vem sendo analisada através de pesquisas acadêmicas e também comerciais com o objetivo de avaliar o seu potencial e comportamento (FELIX, 2020).

Segundo Silva, Chirinéia e Barros (2016), há algumas situações que podem destacar-se como problemáticas na aplicação dos painéis CLT no Brasil, como por exemplo, a necessidade de criação de normas específicas, investimento em infraestrutura de produção, mão de obra qualificada. Também seria essencial que as indústrias que fabricam CLT sejam próximas dos plantios florestais, com a finalidade de redução dos custos com transporte e também a aceitação desta nova tecnologia por parte de projetistas e clientes.

2.4 SELEÇÃO DAS LAMELAS: CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA

Segundo Brandner (2013), a etapa de maior importância da montagem dos painéis CLT consiste na classificação visual e mecânica das lamelas. A classificação visual caracteriza-se em categorizar a madeira em classes de qualidade, com o objetivo de descartar peças de madeira com defeitos acima dos autorizados, como por exemplo, as fendas, nós, rachaduras, encurvamentos, encanoamentos, dentre outros.

Na confecção do CLT é possível utilizar lamelas que tenham uma maior quantidade de presença de nós, por exemplo, respeitando o limite permitido, uma vez que essas peças com defeitos sejam dispostas nas camadas centrais dos painéis, pois o efeito cruzado na disposição das peças proporciona que esses defeitos não ocasionem na perda de resistência do material (PEREIRA, 2014).

Quanto à classificação mecânica, nos países como os Estados Unidos e Canadá, essa classificação é realizada durante o procedimento do desdobro, de forma que as serrarias são as responsáveis por esta etapa e as fábricas obtêm as peças com a classificação mecânica conforme suas finalidades (BRANDNER, 2013). No Brasil, ainda não é realizado esse processo nas serrarias, sendo portanto fundamental realizar essa classificação com equipamentos portáteis, por exemplo, ou também em ensaios laboratoriais, como a flexão estática para determinação do módulo de elasticidade (MOE) (PEREIRA, 2014).

Na etapa de classificação do material, salienta-se também o controle do teor de umidade das lamelas, pois o mesmo está diretamente relacionado a qualidade do processo de colagem do painel e irá influenciar no produto final (BRANDNER, 2013). Conforme o mesmo autor, a umidade das peças recomendada pela maioria dos adesivos a base de poliuretano, que são utilizados em larga escala na confecção do CLT, é de $12\% \pm 3\%$ para lamelas de madeira maciça.

2.5 ADESIVO

O processo de colagem da madeira é uma das etapas de maior importância na produção de compensados, aglomerados, painéis de fibras, dentre outros (SCHULTZ, 2008). Conforme o mesmo autor, uma colagem eficiente do material está diretamente relacionada às características físicas do adesivo, da madeira, dos métodos aplicados na colagem, e também das condições de utilização do produto.

Em relação às características da madeira, a idade da árvore utilizada no processo de colagem pode influenciar quanto à qualidade deste processo. Conforme Iwakiri (2005), os anéis de crescimento são relativamente espaçosos no lenho juvenil, possuindo densidade menor e uma maior porosidade, o que ocasiona em uma colagem com maior viabilidade, em comparação ao lenho adulto.

Os principais adesivos utilizados na colagem dos painéis CLT são o poliuretano de um componente (PUR), melamina-ureia-formaldeído (MUF) e os adesivos de polímero de emulsão isocianato (EPI) (BRANDNER *et al.*, 2016). A colagem da face lateral geralmente é realizada de forma mecânica e sem contato com as lamelas sobre um instrumento de passagem contínua em um suporte de posicionamento ou prensa em camadas pré-posicionadas.

De acordo com Brandner (2013), a colagem das faces estreitas das lamelas de uma mesma camada é optativa, uma vez que oferece benefícios em relação ao comportamento do

fogo, desempenho acústico e estanqueidade do ar. Contudo, esse procedimento pode proporcionar restrições devido às tensões internas em razão do inchaço e retração, ocasionados pela variação climática.

Conforme Chen (2011), a aplicação do adesivo deve ser feita de maneira uniforme sobre a superfície da madeira, pois pouco adesivo pode acarretar em uma ligação ineficiente e, em excesso, resulta em desperdício, podendo este escorrer para fora do painel.

Os adesivos a base de poliuretano monocomponente (PUR) são os mais utilizados no mercado europeu para a fixação dos elementos estruturais de madeira. Dentre as vantagens do adesivo PUR destacam-se a linha de cola incolor, fácil aplicabilidade de um adesivo monocomponente e o rápido endurecimento no intervalo de uma a três horas sem aplicação de calor (BODIG; JAYNE, 1993).

O adesivo PUR é fabricado sem a adição de solventes ou de formaldeído, sendo reativo à umidade e, devido à reação química, geralmente produz uma rápida formação de espuma durante o processo de cura (WANG; PIRVU; LUM, 2011). A aplicação do adesivo no painel deve ser realizada dentro do período recomendado da colagem, que é o período de tempo entre a aplicação e o início da cura do adesivo. O tempo de montagem varia para cada adesivo, sendo definido pelo fabricante, e comumente este período é inversamente proporcional ao aumento da temperatura do local da colagem (MOHAMMAD; GAGNON, 2010).

Os ambientes com umidade e temperatura controlados são os mais recomendados para a etapa de aplicação do adesivo no painel. É sugerível que todos os estágios de aplicação do adesivo sigam uma sequência de etapas para gerar um padrão de produção que reduza a probabilidade de falhas (MOHAMMAD; GAGNON, 2010).

Na montagem de camadas a fusão a quente (*hot melt*) comumente é utilizada para a colagem das bordas das lamelas. A aplicação é facilitada por meio de aberturas provenientes da fusão a quente, onde é aplicado o adesivo em pontos selecionados das bordas das lamelas (FILL, 2014).

A cada 100 cm da lamela, aplica-se uma linha de 5 cm de *hot melt*. Posteriormente, a colagem das lamelas nas bordas é realizada em camadas simples por meio de sapatas de prensa pneumáticas e cilindros de prensa (FILL, 2014). Além disso, a espessura da linha de cola não deve ser superior a 0,1-0,2 mm após a colagem dessa borda, pois este método garante que os espaços entre as lamelas sejam mantidos em um mínimo acabamento dos painéis CLT, propiciando uma fácil utilização do mesmo (FILL, 2014).

2.6 PROCESSO DE FABRICAÇÃO E PRENSAGEM

O processo de fabricação dos painéis CLT inicia-se com a seleção da madeira serrada, classificação visual e mecânica das lamelas secas e aplainamento das lamelas, seguido da realização de cortes ou emendas dentadas (*finger joints* - opcional) caso haja necessidade, colagem nas faces estreitas das lamelas de uma mesma camada (opcional), organização e colagem das camadas, prensagem do painel, acabamentos, embalagem e transporte (BRANDNER 2013; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Os painéis CLT são compostos por um número ímpar de camadas, geralmente de três a sete, e limite de espessura de 500 mm (KUILEN *et al.*, 2011). Segundo a FPInnovations (2011), a espessura das lamelas pode ser de 10 mm a 50 mm e a largura de 60 mm a 240 mm, sendo que as lamelas de uma mesma camada podem possuir larguras variáveis.

Já conforme a ANSI (2019), a espessura das lamelas deve estar entre 16 mm e 51 mm, sendo que a largura na direção principal deve ser maior que 1,75 vezes a espessura e na direção secundária maior que 3,5 vezes a espessura. A variação da espessura da lamela não deve exceder 0,2 mm ao longo da largura e 0,3 mm ao longo do comprimento.

As dimensões dos painéis podem variar de acordo com os fabricantes, mas as larguras mais usuais são de 0,6 m, 1,2 m e 3 m, podendo chegar a 5 m em casos específicos, enquanto o comprimento pode ser de até 18 m. Deve-se ressaltar que o transporte pode impor limitações ao tamanho do painel CLT (FPINNOVATIONS, 2011).

É fundamental a atenção e garantia de que todas as lamelas de uma mesma camada possuam a mesma espessura, para assegurar que durante a prensagem toda a superfície do painel esteja exposta a uma pressão uniforme. Ademais, uma pressão mínima deve ser aplicada no painel, sendo esta dependente do tipo de adesivo utilizado. Cabe salientar que o excesso de pressão provoca danos no material, como por exemplo, o esmagamento da estrutura da célula da madeira (BRANDNER, 2013).

Em termos de colagem do adesivo, a superfície de colagem deve estar aplainada e sem variações que possam interferir no processo da colagem (ANSI, 2019). Após a aplicação do adesivo, a etapa seguinte é a prensagem, em que o equipamento mais usual é a prensa hidráulica. Todavia, prensas a vácuo e de ar comprimido também são utilizadas, dependendo da espessura do painel e do adesivo utilizado (CREPELL; GAGNON, 2010).

O tempo de montagem e de prensagem é dependente da temperatura e da umidade. Sugere-se que durante a prensagem a temperatura ambiente seja superior a 15 °C, pois alguns

adesivos podem ter uma cura mais longa a baixas temperaturas (WANG; PIRVU; LUM, 2011).

2.7 PERSPECTIVAS DE USO DO CLT NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA

O avanço da produtividade dos painéis CLT em diversos países está relacionado com a simples trabalhabilidade, boa relação peso e resistência, soluções fáceis e eficientes de conexão entre peças, racionalização e redução de desperdício de matéria-prima, uso de sistemas automatizados e computadorizados no processo produtivo, rapidez de montagem, o que proporciona ganhos de produtividade e desempenho, além de custos competitivos com os materiais tradicionais da construção civil (PASSARELLI, 2013). Como é demonstrado no estudo de Terezo *et al.* (2020), que comprovaram menores custos em construções realizadas com CLT em relação à alvenaria.

Os painéis CLT destacam-se por sua elevada resistência mecânica, aparência, versatilidade e sustentabilidade. O seu desempenho mecânico, quando comparado aos sistemas construtivos tradicionais, como o concreto armado, mostra-se aceitável (BETETTE; CASTILHO, 2019). Conforme os mesmos autores, dentre as características desse material, pode-se destacar a resistência à compressão e tração, bom desempenho quando sujeito à atividade sísmica, capacidade de verticalização, leveza estrutural direcionada a partir do peso próprio a que o material se molda, bom desempenho térmico e acústico e durabilidade.

Além disso, esses painéis permitem a utilização de madeira de baixo valor agregado para uma aplicabilidade de grande valor agregado, contribuindo para uma melhor utilização dos recursos florestais (MALLO; ESPINOZA, 2015).

Conforme Brandner (2013), os painéis CLT podem resistir em torno de duas horas de ação do fogo, tempo considerável para evasão de moradores das edificações com segurança. O autor salienta que a utilização desses painéis possibilita uma construção simples, rápida e com redução de erros durante a montagem, uma vez que os mesmos chegam prontos ao local definitivo para serem fixados.

Em um estudo realizado por Almeida, Munis e Lara (2019) com corpos de prova de CLT, buscou-se realizar uma análise comparativa entre os corpos de prova produzidos em laboratório e o concreto, em relação a resistência à compressão paralela às fibras e à densidade. Após os ensaios, observou-se que o concreto era mais denso que o CLT, mostrando-se, da mesma forma, com mais resistência à compressão. Os autores salientaram

também os benefícios ambientais propiciados pelo CLT em comparação a estruturas de concreto, apesar dos valores de CLT serem relativamente menores que o concreto.

Cabe salientar que, em relação às mudanças climáticas e o esgotamento das fontes de energia não renováveis, é fundamental o estudo da madeira como material estrutural, já que a mesma apresenta uma diversidade de condições para abrandar os impactos causados pelo cenário da construção civil (ECKER; MIOTTO; TURMINA, 2017). Além disso, o Brasil, especificamente, apresenta áreas extensas de florestas tropicais e de reflorestamento que, se utilizadas adequadamente, tornam a madeira um material de grande viabilidade para ser utilizado no sistema construtivo.

Ademais, considerando o crescimento da utilização mundial do CLT, principalmente no Canadá, Estados Unidos, Japão e também no Brasil, é fundamental o desenvolvimento de uma normatização mundial dos painéis CLT, que compreenda o processo de produção, ensaios laboratoriais, cálculos, detalhamentos e execução (BRANDNER, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA-PRIMA

O material utilizado para a pesquisa foi coletado no Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária (DDPA), pertencente à Secretaria de Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural (SEAPDR), localizado no distrito de Boca do Monte, Santa Maria, RS. As tábuas de *Eucalyptus grandis* (eucalipto) e *Pinus taeda* (pinus) foram provenientes de árvores com idade de 15 anos e 25 anos, respectivamente, em que foram abatidas e desdobradas no DDPA três árvores de cada espécie, selecionadas de forma visual, onde foi observado o aspecto fitossanitário.

As árvores foram abatidas com auxílio de motosserra pela equipe do DDPA e as características como o diâmetro à altura do peito (DAP) e altura das árvores de eucalipto e pinus foram de aproximadamente 35 cm e 20 m; 40 cm e 22 m, respectivamente (Figura 1). Utilizaram-se as toras da base de cada árvore, de forma que as tábuas foram seccionadas em 2,5 cm de espessura, 12 cm de largura e 1,5 m de comprimento, e ainda verdes, foram transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais (LPF) da Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 1 – Aspecto geral das árvores selecionadas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*. **A e B:** Madeira de *Eucalyptus grandis*. **C e D:** Madeira de *Pinus taeda*. **E:** Toras transportadas para a serraria do DDPA para o processo do desdobro.



Fonte: A autora (2021).

3.2 SECAGEM DAS TÁBUAS

As tábuas de *E. grandis* e *P. taeda* foram dispostas na câmara climatizada do LPF, com a utilização de sarrafos de 2 cm para a separação do material e boa circulação de ar durante o processo de secagem (Figura 2). As condições da câmara foram controladas a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65\% \pm 2\%$.

As tábuas permaneceram nessa disposição no interior da câmara climatizada por um período de dois meses até atingir o equilíbrio higroscópico, com teor de umidade de aproximadamente 12%. Posteriormente ao processo de secagem, as tábuas foram seccionadas nas dimensões finais para a classificação visual e mecânica das lamelas e montagem dos painéis (1,6 x 10 x 50 cm), com auxílio de uma desgrossadeira, destopadeira e desempenadeira. Após isso, as lamelas foram levadas até a câmara climatizada e alocadas em prateleiras.

Figura 2 – Tábuas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* em processo de secagem na câmara climatizada.



Fonte: A autora (2021).

3.3 MASSA ESPECÍFICA A 12%, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

Confeccionaram-se 36 corpos de prova para a determinação da massa específica a 12% e massa específica básica da madeira de *E. grandis* e *P. taeda*, com base na norma NBR 7190 de 1997 e dimensões de 2 x 3 x 5 cm.

A massa específica a 12% foi calculada através das amostras climatizadas em câmara com temperatura e umidade relativa controlada, até a estabilização do teor de umidade em 12%. Posteriormente, determinaram-se os pesos dos corpos de prova e com auxílio de um paquímetro digital foram realizadas as medições de espessura, largura e comprimento das amostras para a determinação do volume (Equação 1).

$$ME_{12\%} = \frac{M_{12\%}}{V_{12\%}} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$ME_{12\%}$ = Massa específica a 12% de umidade ($g\ cm^{-3}$);

$M_{12\%}$ = Massa da amostra a 12 % de umidade (g);

$V_{12\%}$ = Volume da amostra a 12% de umidade (cm^3).

A massa específica básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, o qual se baseia no princípio de Arquimedes, em que a perda aparente de peso de um corpo imerso em líquido é igual ao peso do líquido deslocado, conforme a metodologia descrita por Vital (1984).

Inicialmente, os corpos de prova foram submergidos em água dentro de um becker e pesados em balança, e o volume foi determinado pela diferença de peso. Após isso, as amostras foram levadas à estufa para secagem até obter peso constante, a uma temperatura de $103\ ^\circ C \pm 2\ ^\circ C$. A massa específica básica foi obtida pela razão entre a massa seca e o volume saturado (Equação 2).

$$ME_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

ME_b = Massa específica básica ($g\ cm^{-3}$);

M_s = Massa seca da amostra (g);

V_{sat} = Volume saturado (cm^3)

Para a determinação do teor de umidade (TU) da madeira, confeccionaram-se 20 amostras controle da madeira de eucalipto e 20 amostras de pinus para a obtenção exata do TU. O teor de umidade inicial de cada amostra foi obtido através da Equação 3, em que as amostras úmidas foram secas em estufa a $103\ ^\circ C$ até a estabilização do peso.

$$TU = \frac{PU - PS}{PS} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

TU = Teor de umidade inicial (%);

PU = Peso úmido da amostra (g);

PS = Peso seco da amostra (g).

3.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os painéis CLT foram produzidos com lamelas da mesma espécie de madeira e com a mistura de *E. grandis* e *P. taeda*, representando três tratamentos (painéis de eucalipto puro – CLT 1, pinus puro – CLT 2 e painéis com a mistura da madeira de eucalipto nas camadas externas e com pinus no miolo – CLT 3). Foram confeccionados quatro painéis de eucalipto (CLT 1), quatro painéis de pinus (CLT 2) e dois painéis da mistura (CLT 3), em um total de 10 painéis.

As dimensões das lamelas para a montagem dos painéis foram de 1,6 x 10 x 50 cm, de espessura, largura e comprimento, respectivamente. Cada painel foi composto por três camadas de madeira, e cada camada disposta por cinco lamelas, totalizando 15 tábuas utilizadas por painel e com dimensão final de 4,8 x 50 x 50 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente).

Foram necessárias 60 lamelas de eucalipto para as camadas das capas e contracapas e 20 lamelas para as camadas do miolo, 40 lamelas de pinus para as camadas externas e 30 lamelas para as camadas do miolo, totalizando 80 lamelas de eucalipto e 70 lamelas de pinus utilizadas para a confecção dos painéis CLT.

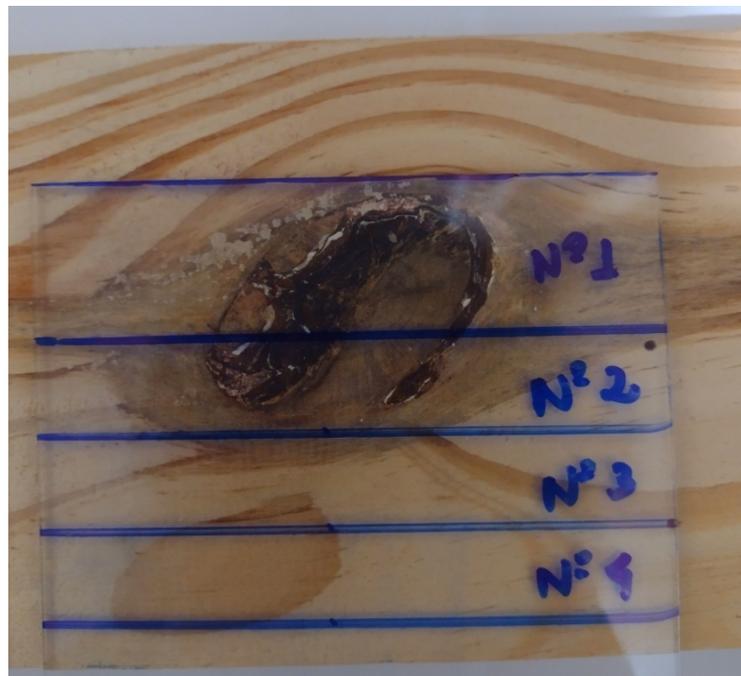
3.5 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS

De acordo com a norma americana ANSI (2019), recomenda-se que seja realizada uma classificação visual e mecânica das peças antes do processo de montagem dos painéis CLT. Para a classificação visual, considerou-se a metodologia de um estudo realizado por Neto (2011), que desenvolveu a classificação visual para a espécies de *Pinus* sp., *Lyptus* e *Teca*. Esta metodologia limita os defeitos da madeira como a presença de nós, fendas, rachaduras, encanoamento, torcimento, dentre outros. Nesta etapa, foi realizada inicialmente uma pré-seleção das tábuas, mantendo para a produção dos painéis peças sem nenhum defeito ou cujos defeitos fossem verificados em pequena quantidade.

As lamelas foram examinadas em suas quatro faces, avaliando os defeitos quando presentes na superfície de cada peça. Com o auxílio de um gabarito (Figura 3) que foi elaborado para a medição dos nós e bolsas de resina e rachaduras, as tábuas que apresentavam a presença de nós foram organizadas em grupos de classes (Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4), as quais possuem limitações quanto às dimensões desses defeitos (Tabela 1).

As peças que tinham a presença de rachaduras nas extremidades de cada lamela definiu-se um limite de até 20% do comprimento da peça, para não ter a possibilidade de afetar no comprimento total da tábua.

Figura 3 – Gabarito para classificação visual das lamelas através da medição de nós.



Fonte: A autora (2021).

Tabela 1 – Limitações permitidas para a presença de nós de acordo com as classes.

Classe visual	Limite de nós (% da largura da peça)
Nº1	25%
Nº2	40%
Nº3	55%
Nº4	70%

Fonte: Adaptado de Neto (2011).

A classificação mecânica das lamelas foi realizada com ensaios de flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade (MOE), e posterior distribuição dessas peças por grupos para a confecção dos painéis CLT. A norma adaptada utilizada neste ensaio foi a ASTM D 198 de 2015, em que, primeiramente, confeccionaram-se 10 corpos de prova com a madeira de cada espécie com as dimensões de 1,6 x 10 x 50 cm como amostras testes, nos quais foi aplicada carga máxima até a ruptura das peças.

Após isso, foi definido para as lamelas que seriam utilizadas na confecção dos painéis, uma aplicação de carga abaixo da ruptura na região elástica, que foi observada nas amostras testes, com o intuito de não haver a ruptura e perda do material e posterior uso nos painéis. Dessa forma, após a avaliação das amostras testes, todas as tábuas utilizadas na montagem dos painéis, a carga máxima aplicada definida para a madeira de eucalipto foi de 310 Kgf cm⁻² e de pinus foi de 280 Kgf cm⁻².

Os ensaios de flexão estática foram realizados na Máquina Universal de Ensaios pertencente ao Laboratório de Produtos Florestais da UFSM, com velocidade de 2 mm/minuto (Figura 4). Os dados obtidos do ensaio foram transferidos para o computador que contém um software específico relacionado aos testes de flexão estática.

A obtenção do MOE foi através da Equação 4:

$$MOE = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta P}{\Delta L} \times \frac{L^3}{b \times h^3} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

MOE = Módulo de elasticidade (Kgf cm⁻²);

ΔP = Variação de carga na região elástica (Kgf);

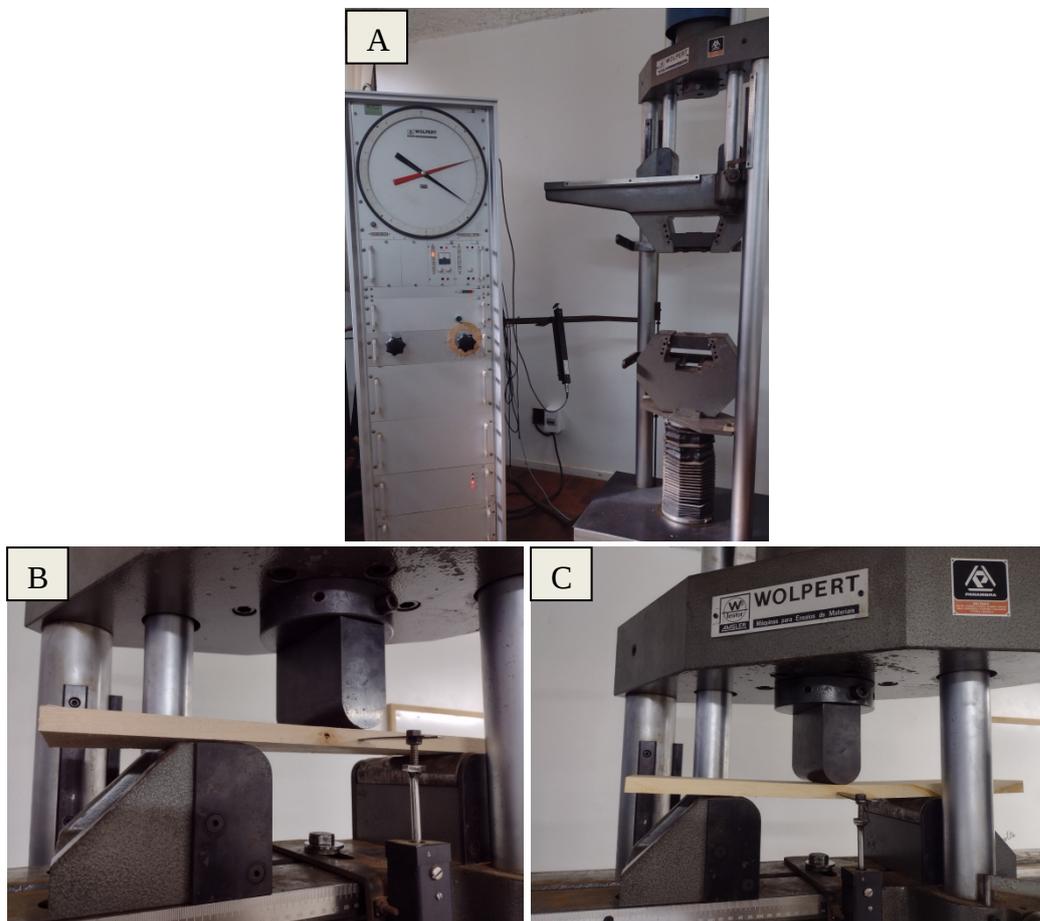
ΔL = Variação de deslocamento (cm);

L = Vão (cm);

b = Largura do corpo de prova (cm);

h = Altura do corpo de prova (cm).

Figura 4 – Ensaio de flexão estática. **A:** Máquina Universal de Ensaios. **B:** Corpo de prova com a madeira de *Eucalyptus grandis* em teste de flexão estática. **C:** Corpo de prova com a madeira de *Pinus taeda* em teste de flexão estática.



Fonte: A autora (2021).

As lamelas foram organizadas para o processo de montagem dos painéis de acordo com a classificação visual e mecânica, em que se distribuíram as peças com melhor classe visual e maiores MOE nas camadas externas dos painéis, e nas camadas internas utilizaram-se as lamelas com classe visual inferior e valores de MOE relativamente menores. Essa disposição das peças foi de acordo com a metodologia adotada por Bodig e Jayne (1982), em que as lâminas com melhores propriedades e aspecto visual devem ser alocadas nas capas dos painéis e as de menor qualidade e MOE posicionadas no miolo de cada painel.

3.6 ADESIVO

O adesivo utilizado para a montagem dos painéis consiste em um poliuretano monocomponente, com nome comercial Jowapur® 687.22 (Figura 5), o qual foi disponibilizado pela empresa Jowat do Brasil Ltda (Novo Hamburgo, RS).

Figura 5 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowapur® 687.22.



Fonte: A autora (2021).

Conforme informações do fabricante, as superfícies que serão aplicadas o adesivo devem estar limpas, sem resíduos de poeira. O tempo em aberto para manuseio com o adesivo é de 16 a 20 minutos a uma temperatura de 20 °C e umidade relativa do ar de 50%, e o tempo de prensagem de 55 a 60 minutos. A gramatura de aplicação recomendada pelo fabricante foi de 150 g/m² com utilização em somente um lado das faces. A empresa sugere que as tábuas estejam com teor de umidade no momento da colagem em 12% ± 2%. Desta forma, as lamelas utilizadas para a montagem dos painéis foram secas em estufa com circulação de ar, a uma temperatura de 40 °C por um período de quatro horas, e após esse processo, os painéis foram montados um por vez.

Ao final do processo de secagem, as lamelas de eucalipto e pinus apresentaram um teor de umidade médio de 12,3% e 11,9%, respectivamente. No processo de montagem dos painéis, o adesivo foi aplicado diretamente na superfície de cada lamela sob uma balança, o qual foi espalhado de forma manual nas faces e também nas laterais, com o auxílio de uma espátula de material plástico. Nessa etapa de produção dos painéis, a temperatura estava de aproximadamente 25°C e umidade relativa do ar de 60%.

3.7 PRENSAGEM DOS PAINÉIS

Após a montagem dos painéis, realizou-se a prensagem a frio em prensa hidráulica do laboratório por um período de 60 minutos, conforme recomendações do fabricante e de testes realizados com o adesivo (Figura 6). Para não haver deslocamento das lamelas durante a prensagem, os painéis foram montados sob uma chapa de ferro que continha esquadros laterais na altura do painel.

A pressão a utilizada foi de 1 N/mm² (10,1972 Kgf cm⁻²), a qual foi aplicada no cálculo da pressão manométrica a ser utilizada na prensa, em função da área do pistão e área dos painéis. Após esse processo da montagem e prensagem dos painéis, os mesmos permaneceram em câmara climatizada por um período de 60 dias até a realização dos ensaios.

Figura 6 – Etapa de prensagem dos painéis.



Fonte: A autora (2021).

3.8 MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS

A massa específica a 12% e o teor de umidade dos painéis foram baseadas na norma adaptada ASTM D 2395 de 2014, em que os corpos de prova foram dimensionados em 4,8 cm x 8 cm x 50 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). Conforme a norma

foram confeccionados quatro corpos de prova de cada um dos três tratamentos (eucalipto puro - CLT 1, pinus puro - CLT 2 e mistura das espécies - CLT 3).

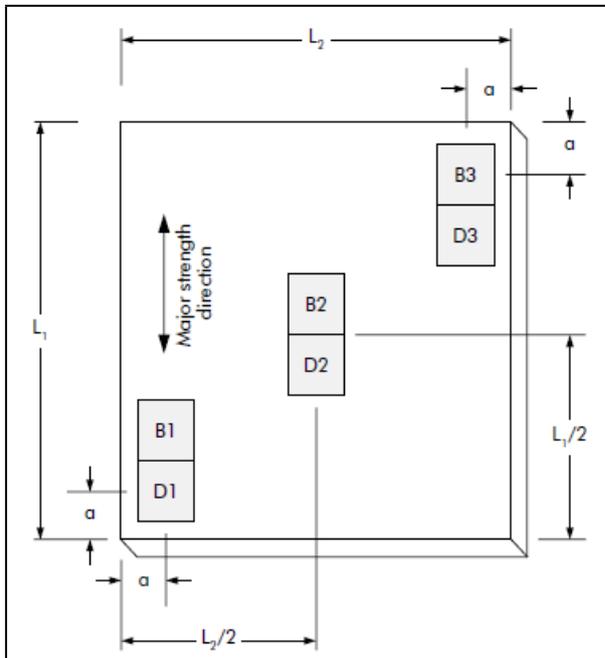
Quanto à massa específica a 12% de umidade dos painéis, os corpos de prova permaneceram em câmara climatizada até a obtenção do teor de umidade de aproximadamente 12%. Após isso, realizou-se a pesagem dos corpos de prova e com o auxílio de um paquímetro foram realizadas as medições de espessura, largura e comprimento. A massa específica foi determinada pela razão entre a massa e volume das amostras.

Na determinação do teor de umidade dos painéis CLT, utilizou-se o método gravimétrico. As amostras armazenadas em câmara climatizada foram pesadas em balança, e após isso, foram levadas a estufa a 103 °C para secagem até peso constante e realizadas as pesagens novamente e, assim, foram determinados os teores de umidade dos painéis de cada tratamento.

3.9 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE COLAGEM DOS PAINÉIS

Conforme a norma americana ANSI (2019), a qualificação da colagem dos painéis CLT é através dos ensaios de cisalhamento na linha de cola e delaminação. Para os ensaios foram utilizados de cada um dos tratamentos, dois painéis para a confecção dos corpos de prova, e de cada um dos painéis foram retirados três corpos de prova em diferentes posições conforme a Figura 7.

Figura 7 – Aspecto geral do painel com a indicação da confecção dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento e delaminação.



B: Teste de cisalhamento

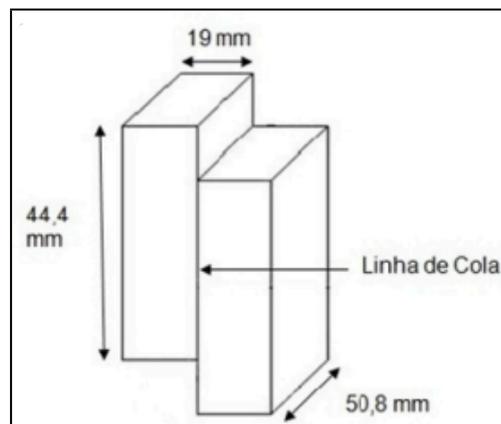
D: Teste de delaminação

Fonte: ANSI (2019).

3.9.1 Cisalhamento na linha de cola e percentual de falha na madeira

O ensaio de cisalhamento na linha de cola por compressão foi realizado de acordo com norma da ASTM D 905 de 2008 (Figura 8). Na confecção dos corpos de prova, definiu-se realizar o ensaio em somente uma linha de cola de cada amostra dos três tratamentos estudados (CLT 1, CLT 2 e CLT 3).

Figura 8 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.

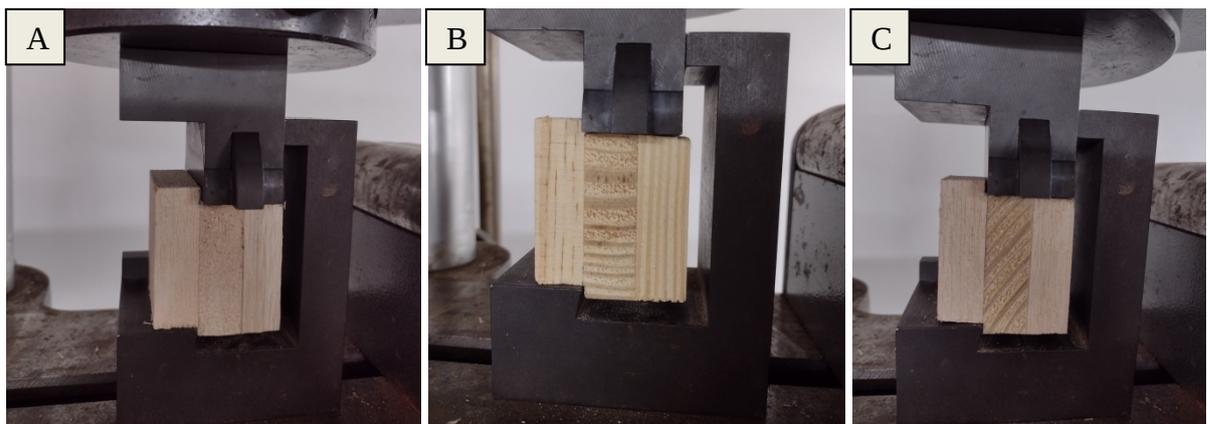


Fonte: Adaptado de Motta *et al.* (2014).

Os ensaios de cisalhamento foram realizados na Máquina Universal de Ensaios pertencente ao Laboratório de Produtos Florestais da UFSM, de forma que as leituras dos dados de carga máxima suportada de cada corpo de prova foram efetuadas no registrador localizado na parte frontal da Máquina. A quantidade total para cada tratamento (CLT 1, CLT 2 e CLT 3) foi de seis corpos de prova, os quais ficaram alocados na câmara climatizada até a execução deste ensaio.

A capacidade de força utilizada na Máquina de Ensaios foi de 2 toneladas e velocidade de 0,6 mm/minuto. A determinação da resistência ao cisalhamento foi através da razão entre a carga de ruptura (Kgf) pela área do corpo de prova com cola (cm²) (Figura 9).

Figura 9 – Cisalhamento na linha de cola em corpo de prova. **A:** Corpo de prova com madeira de *Eucalyptus grandis*. **B:** Corpo de prova com madeira de *Pinus taeda*. **C:** Corpo de prova com a mistura das espécies.



Fonte: A autora (2021).

A quantificação da porcentagem de falha na madeira foi determinada de forma visual após a ruptura total da linha de cola de cada corpo de prova. Para isto se utilizou um gabarito transparente dividido em quadrículas dispostas em 10 linhas e 10 colunas de 0,5 x 0,5 cm, sendo que cada quadrícula correspondia a 1% da área total avaliada.

3.9.2 Delaminação

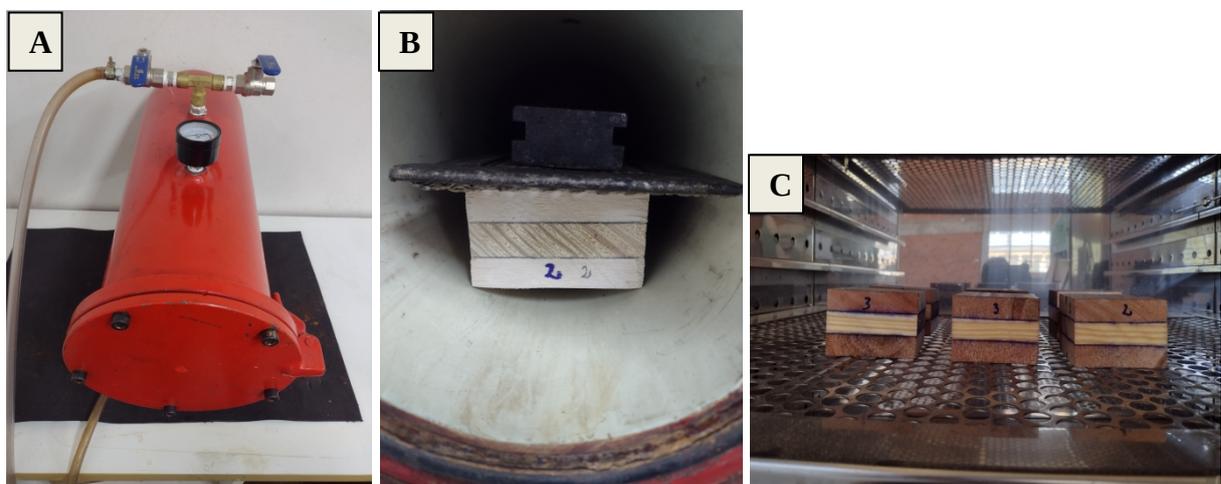
O ensaio de delaminação foi realizado de acordo com a norma americana ANSI (2019) e AITC T 110 (2007), em que a dimensão dos corpos de prova foi de 4,8 x 7,6 x 7,6 cm (espessura, largura e comprimento, respectivamente) e a quantidade total para cada tratamento (eucalipto puro – CLT 1, pinus puro – CLT 2 e mistura das duas espécies – CLT 3) foi de seis

corpos de prova, os quais ficaram armazenados em câmara climatizada até a realização do teste.

Inicialmente realizou-se uma marcação com lápis em cada linha de cola, com o objetivo de facilitar na verificação de aberturas. Os corpos de prova foram alocados em autoclave de laboratório, com a utilização de telas de arame e blocos de ferro para aplicação de peso sobre as amostras para a total exposição à água e pressão.

Na autoclave aplicou-se vácuo por um período de 30 minutos, e após isso, uma pressão de 8 bar por 2 horas, e esse ciclo foi realizado duas vezes. Após essa etapa, os corpos de prova foram levados à estufa com circulação de ar e temperatura de 70 °C por um período de 15 horas e distanciados por 5 cm (Figura 10). O objetivo deste ensaio é avaliar o comprimento de abertura das lamelas dos corpos de prova e verificar a qualidade da colagem.

Figura 10 – Etapas do ensaio de delaminação. **A:** Autoclave utilizada para o ensaio de delaminação. **B:** Corpo de prova no interior da autoclave. **C:** Amostras em processo de secagem em estufa.



Fonte: A autora (2021).

Posteriormente, mediu-se com o auxílio de paquímetro digital as delaminações que apareceram em cada corpo de prova. Conforme a norma, a delaminação total na linha de cola das amostras não deve exceder a 5% do comprimento total da linha de cola.

3.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos ao teste de Bartlett e Kolmogorov-Smirnov para verificar a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos erros, respectivamente. Contudo, foram

atendidas todas as pressuposições, não sendo necessário a transformação dos dados. Posteriormente, os mesmos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e, quando significativo, foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro para comparação das médias, empregando-se o software estatístico Sisvar 5.6 (FERREIRA, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MASSA ESPECÍFICA A 12%, MASSA ESPECÍFICA BÁSICA E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

A Tabela 2 demonstra os dados relativos das médias obtidas para a massa específica a 12% de umidade, massa específica básica e teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* utilizadas para o presente estudo.

Tabela 2 – Resultados da massa específica a 12% de umidade (ME 12%), massa específica básica (MEb) e teor de umidade (TU) da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*.

Espécie	Nº de corpos de prova	ME 12% (g cm ⁻³)	MEb (g cm ⁻³)	TU (%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	36	0,52	0,48	12,3
<i>Pinus taeda</i>	36	0,45	0,43	11,9

Dados obtidos a partir das médias de cada espécie.

Os resultados de massa específica a 12% para a madeira de *E. grandis* e *P. taeda* variaram de 0,49 g cm⁻³ a 0,54 g cm⁻³ e 0,43 g cm⁻³ a 0,47 g cm⁻³, respectivamente. Quanto à massa específica básica, a madeira de eucalipto foi de 0,45 g cm⁻³ a 0,49 g cm⁻³ e madeira de pinus foi de 0,40 g cm⁻³ a 0,44 g cm⁻³. De acordo com Huller *et al.* (2013), a madeira de eucalipto é classificada como de baixa densidade (madeira leve), assim como a madeira de pinus, com base na classificação de Durlo (1991).

Em um estudo realizado por Serpa *et al.* (2003) com *E. grandis*, *E. saligna* e *P. elliottii*, a massa específica básica para a madeiras das duas espécies de eucalipto mostraram-se superiores em comparação com a espécie de pinus, o que corrobora com os resultados encontrados no presente estudo. Além disso, Amorim, Gonzalez e Camargos (2013), avaliando as propriedades da madeira de *P. caribaea* e *E. grandis*, salientam que não somente

as propriedades físicas da madeira de eucalipto são relativamente maiores que de pinus, como também as propriedades mecânicas do material, como por exemplo os valores de módulo de elasticidade (MOE).

Os valores médios encontrados para as variáveis de ME 12% ($0,52 \text{ g cm}^{-3}$) e MEb ($0,48 \text{ g cm}^{-3}$) para a madeira de *E. grandis* foram semelhantes aos resultados encontrados por Eleotério *et al.* (2015), em que os autores determinaram a massa específica de diferentes espécies de eucalipto, e que para a madeira de *E. grandis* os valores obtidos de ME 12% foi de $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ e MEb a média de $0,46 \text{ g cm}^{-3}$. Chies (2005) e Melchiorretto e Eleotério (2003), em estudos com a espécie *P. taeda* encontraram médias de massa específica básica da madeira entre $0,37 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,42 \text{ g cm}^{-3}$, semelhante ao valor médio encontrado neste estudo ($0,43 \text{ g cm}^{-3}$).

Além disso, é importante ressaltar que pode haver alterações na massa específica da madeira relacionada à posição do tronco em que as amostras foram retiradas, como também a idade das árvores, disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, temperatura, dentre outros.

Quanto ao teor de umidade, o processo inicial de teor de umidade médio verificado para *E. grandis* e *P. taeda* após o abate foi de 108,14 % e 146,42%, respectivamente. Após o período de dois meses das lamelas em câmara climatizada, com temperatura e umidade relativa do ar controladas, as peças atingiram uma condição de equilíbrio de umidade, resultando em valores de 12,3% (eucalipto) e 11,9% (pinus).

É importante ressaltar que o controle do teor de umidade da madeira de forma adequada, influencia diretamente no processo de colagem, uma vez que se as peças estiverem com um teor de umidade elevado, há a redução do processo de absorção e evaporação da água do adesivo. Nesse sentido, é fundamental que se tenha o acompanhamento deste processo, e que madeira de acordo com as suas finalidades, esteja com teor de umidade conforme o sugerido, de $12\% \pm 3\%$.

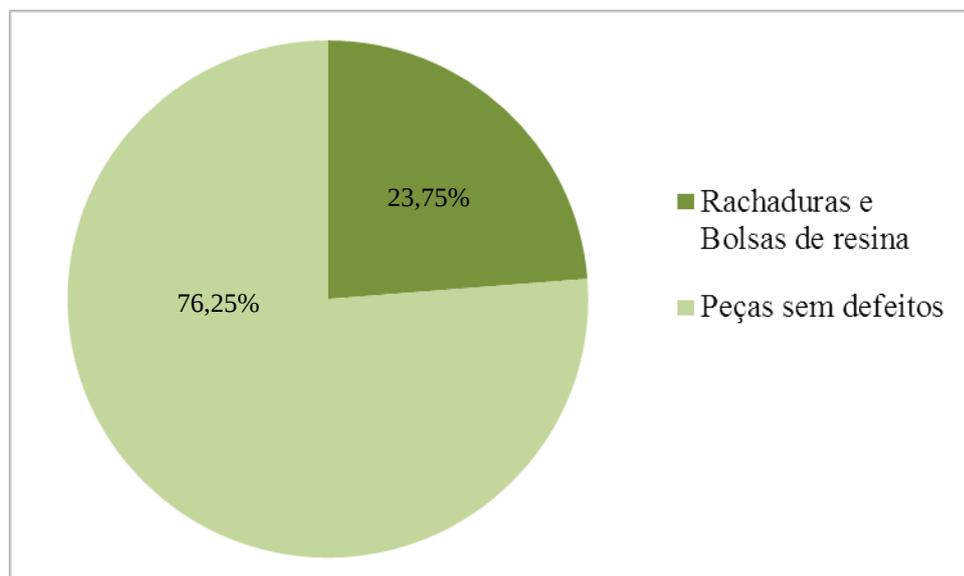
4.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS

Na etapa de classificação visual das peças, constatou-se que na madeira de *E. grandis*, em uma pequena quantidade do material utilizado para a montagem dos painéis, havia a presença de rachaduras nas extremidades de cada lamela e bolsas de resina nas laterais e superfície do material. Já para a madeira de *P. taeda*, o defeito visualmente verificado foi a presença de nós nas faces e lateral de cada lamela, concentrando-se essa quantidade nas classes de nº 1, 2 e 3, conforme estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação visual das lamelas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*.

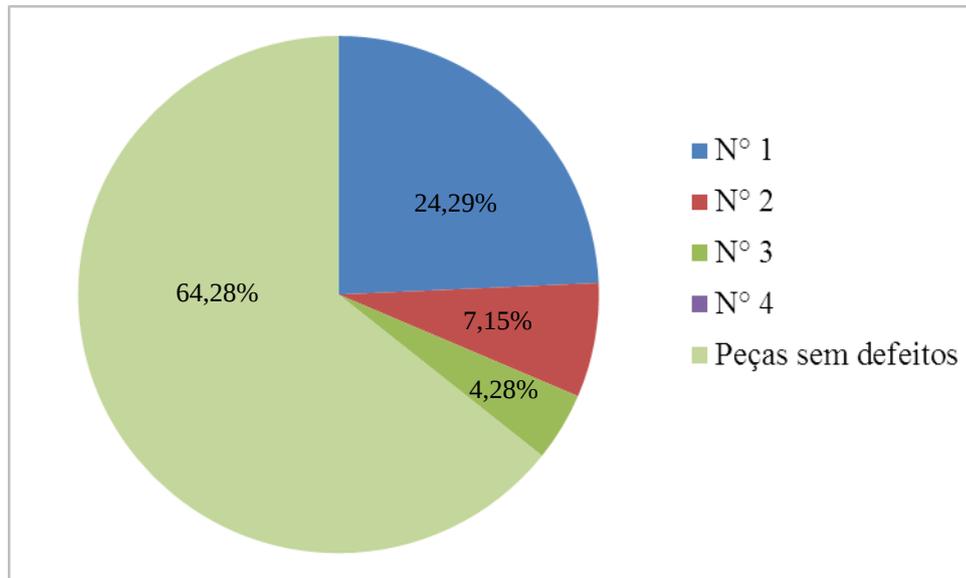
Classe visual	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus taeda</i>
Nº 1	-	17
Nº 2	-	5
Nº 3	-	3
Nº 4	-	-
Rachaduras e Bolsas de resina	19	-
Peças sem defeitos	61	45
Total	80	70

Nas Figuras 11 e 12 observa-se a organização das peças separadas por defeitos encontrados na classificação visual. No presente estudo, foi priorizado antes do processo de classificação das peças para a montagem dos painéis, uma pré-seleção do material disponibilizado, descartando lamelas que estavam com grande quantidade de defeitos presente, como nós, rachaduras e bolsas de resina.

Figura 11 – Classificação visual da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Fonte: A autora (2021).

Figura 12 – Classificação visual da madeira de *Pinus taeda*.



Fonte: A autora (2021).

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos das médias do módulo de elasticidade (MOE) através do teste de flexão estática. Os valores médios do MOE foram utilizados para a classificação mecânica das lamelas para a montagem dos painéis CLT, de forma que esses dados foram agrupados em ordem decrescente com o auxílio de uma planilha, e no momento da produção dos painéis, visando o melhor aproveitamento das peças, alocou-se as lamelas com maiores valores de MOE nas camadas externas do painel e valores menores foram dispostas na camada interna.

Tabela 4 – Módulo de elasticidade (MOE) através da flexão estática das lamelas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda*.

Espécie	MOE (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	12071,06
<i>Pinus taeda</i>	9801,29

Dados obtidos a partir da média de cada espécie.

A partir dos valores obtidos do presente estudo, as propriedades mecânicas da madeira como o MOE da madeira de *E. grandis* apresentaram-se superiores à madeira de *P. taeda*, corroborando o que é encontrado em diferentes trabalhos na literatura. Em um estudo

realizado por Vivian *et al.* (2021), com a madeira de *E. grandis*, o MOE obtido variou de 9926,2 MPa a 11834,1 MPa, semelhante ao valor encontrado no presente estudo (12071,06 MPa). A madeira de *E. grandis* apresentou também médias aproximadas do estudo por Crafford e Wessels (2016), que obtiveram resultados de flexão estática igual a 10627,1 MPa (MOE) para a mesma espécie.

Trianoski *et al.* (2014), avaliando as propriedades mecânicas de diferentes espécies de pinus tropicais, encontrou média de MOE para a madeira de *P. taeda* de 8234 MPa, valor próximo do resultado do presente estudo (9801,29 MPa). Haselein *et al.* (2000), estudando as propriedades estruturais da madeira de *P. elliotii*, apontam o MOE de diferentes espécies de pinus, e para *P. taeda* o valor do MOE encontra-se na faixa de 9652 MPa (98429 Kgf cm⁻²), semelhante ao resultado obtido para a mesma espécie estudada.

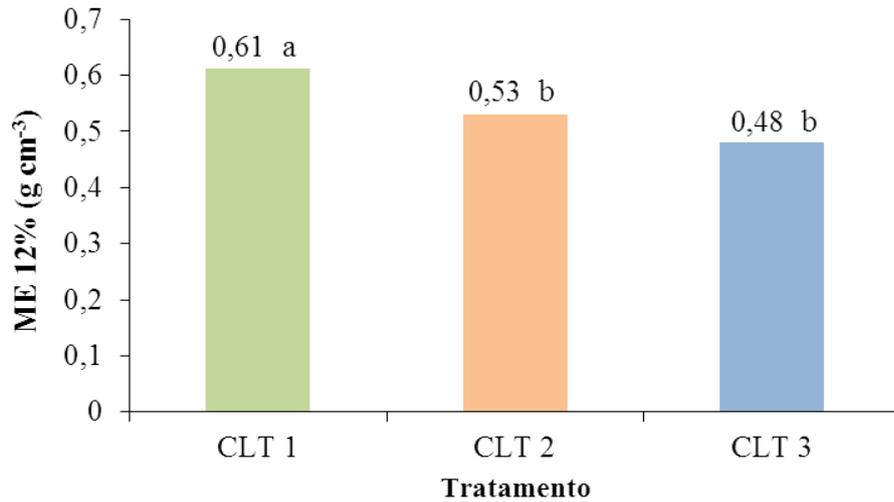
Conforme Moreschi (2012), a massa específica e MOE possuem elevadas correlações, de forma que em grande parte dos estudos, há uma relação direta entre essas variáveis, que quanto maior a massa específica da madeira, as suas propriedades mecânicas também são maiores.

É válido ressaltar a importância da realização da classificação visual e mecânica das lamelas para um bom desempenho e qualidade final dos painéis CLT. Essa seleção das tábuas por meio da classificação, possibilita que as peças com melhores propriedades e qualidade sejam alocadas em áreas de maior tensão, enquanto que as lamelas com classificação inferior em locais com tensões menores.

4.3 MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE DOS PAINÉIS

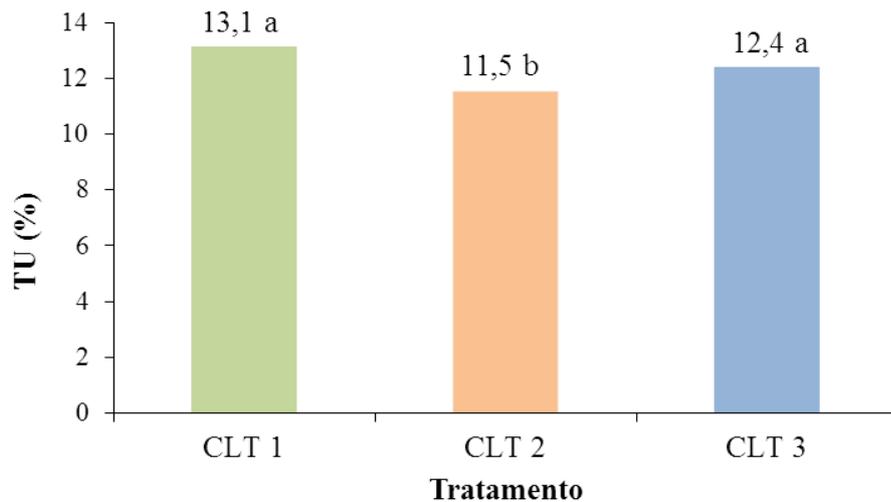
As Figuras 13 e 14 demonstram os valores médios obtidos para a massa específica a 12% e o teor de umidade dos painéis para os três tratamentos utilizados no presente estudo (CLT 1, CLT 2 e CLT 3).

Figura 13 – Massa específica a 12% (ME 12%) dos painéis. **CLT 1:** painel de eucalipto puro. **CLT 2:** painel de pinus puro. **CLT 3:** painel com a mistura das espécies (eucalipto nas camadas externas e pinus no miolo).



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Figura 14 – Teor de umidade dos painéis. **CLT 1:** painel de eucalipto puro. **CLT 2:** painel de pinus puro. **CLT 3:** painel com a mistura das espécies (eucalipto nas camadas externas e pinus no miolo).



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Conforme os resultados obtidos, os valores médios de massa específica aparente diferiram estatisticamente entre os tratamentos. Os painéis produzidos somente com lamelas de eucalipto (CLT 1) apresentaram valor médio maior em comparação com os demais tratamentos, o que pode estar relacionado com as propriedades físicas da espécie.

Em um estudo realizado por Garcia *et al.* (2021), cujo objetivo foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis CLT (ou também denominados de MLCC) produzidos com a madeira de seringueira, eucalipto e bambu, obteve-se para os painéis de eucalipto, um valor médio de densidade aparente de $0,65 \text{ g cm}^{-3}$, resultado semelhante ao encontrado com os painéis produzidos com a madeira de *E. grandis* do presente estudo.

Alencar (2015), avaliando as propriedades e viabilidade do uso dos painéis CLT, encontrou densidade aparente para painéis produzidos com madeira de *Eucalyptus* sp. de $0,37 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,74 \text{ g cm}^{-3}$, também em conformidade com o valor médio do tratamento CLT 1 deste estudo.

Os painéis produzidos somente com madeira de *P. taeda* apresentaram valor mínimo e máximo de $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,72 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente, em estudo realizado por Alencar (2015), corroborando com o valor médio do presente estudo de painéis produzidos com *P. taeda* ($0,53 \text{ g cm}^{-3}$). Almeida, Munis e Lara (2019), em estudos com CLT produzidos com madeira de *Pinus* sp., encontraram valor médio de densidade para os painéis de $0,45 \text{ g cm}^{-3}$, em comparação com o presente estudo o resultado é minimamente maior, porém, diversos fatores podem alterar as propriedades da espécie, como por exemplo, a idade das árvores, o teor de umidade, temperatura durante o processo de secagem, umidade relativa, os quais podem influenciar diretamente nas características de massa específica dos painéis CLT.

Iwakiri *et al.* (1995), em estudos com a avaliação das propriedades de painéis mistos, observaram que a mistura de espécies na produção de painéis, eleva as propriedades físicas e mecânicas deste material, e também apresenta-se dentro dos padrões solicitados para o seu uso. Nessa perspectiva, salienta-se que apesar do valor médio de massa específica aparente para os painéis mistos avaliados neste estudo ter sido inferior aos painéis puros, a mistura de madeira de espécies como o eucalipto e pinus é uma alternativa viável, visto que há uma elevada disponibilidade e plantios em larga escala dessas espécies, possibilitando avanços na literatura e também do aprimoramento por parte das empresas que produzem o CLT.

O teor de umidade médio dos painéis apresentou variação entre 11,5% e 13,1% para os três tratamentos. Os resultados obtidos de teor de umidade situaram-se na faixa de $12\% \pm 3\%$, conforme é recomendado pela NBR 7190 de 1997. Ainda, salienta-se que a madeira contendo

este teor de umidade de 12% no momento de montagem dos painéis, garante melhor desempenho na colagem entre as lamelas e também evita a possibilidade de variações na dimensão do material.

4.4 CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA DOS PAINÉIS CLT E FALHA NA MADEIRA

A Tabela 5 demonstra os valores médios de resistência ao cisalhamento na linha de cola por ensaio de compressão, em que foram testados os corpos de prova pertencentes aos painéis CLT nas linhas de colagem de eucalipto com eucalipto (CLT 1), pinus com pinus (CLT 2) e eucalipto com pinus (CLT 3) conforme já mencionado na Figura 9 acima, e também o percentual de falha na madeira em cada tratamento.

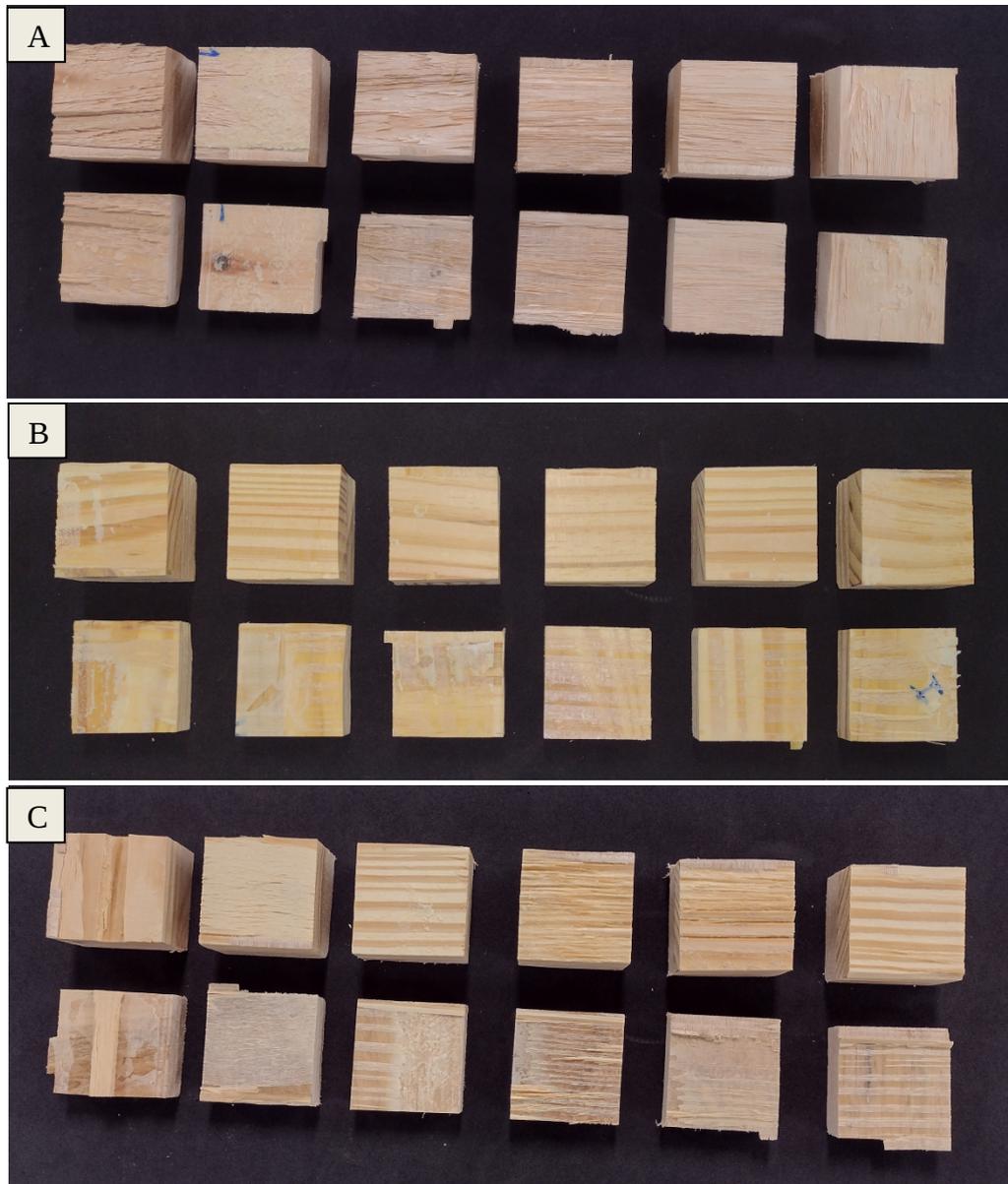
Tabela 5 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola dos painéis CLT e falha na madeira.

Tratamentos	Cisalhamento na linha de cola por compressão (Kgf cm⁻²)	Falha na madeira (%)
CLT 1	30,85 a	92,0 a
CLT 2	23,98 b	67,0 b
CLT 3	30,62 a	84,0 a

Médias nas colunas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os valores médios de resistência ao cisalhamento tiveram diferença estatística entre os tratamentos, de forma que para *E. grandis* e o tratamento da mistura das espécies os resultados foram superiores se comparados aos painéis puro de *P. taeda*, assim como para o percentual de falha na madeira (Figura 15). É válido ressaltar que as características da madeira, assim como o tempo de cura da cola e a pressão utilizada, são aspectos que podem influenciar no processo de colagem do painel e na qualidade do produto final (NASCIMENTO; GARCIA; DELLA LUCIA, 2013). Além disso, ressalta-se que durante o processo de montagem dos painéis, é fundamental o preparo e processamento da superfície das lamelas, para posteriormente haver uma boa interação entre o adesivo e a madeira.

Figura 15 – Aspecto geral dos corpos de prova após ensaio de cisalhamento e ruptura total da linha de cola. **A:** Painéis CLT de *Eucalyptus grandis*. **B:** Painéis CLT de *Pinus taeda*. **C:** Painéis com a mistura das espécies.



Fonte: A autora (2021).

Quanto aos resultados médios obtidos, o valor inferior do cisalhamento na linha de cola para o tratamento com pinus puro (CLT 2) em comparação com os demais, foi semelhante aos resultados encontrados em um estudo realizado por Pereira (2014), que desenvolveu um estudo de metodologia para painéis de madeira laminada colada cruzada fabricados com *P. elliottii*, em que obteve-se de valor de resistência ao cisalhamento uma

variação de 2,1 MPa (21,4 Kgf cm⁻²) a 5,2 MPa (53,0 Kgf cm⁻²), enquanto que para o presente estudo o valor encontrado foi de 23,98 Kgf cm⁻².

Na literatura, na maioria das situações, madeiras com maior densidade tendem a ter uma qualidade inferior na colagem. Contudo, é válido ressaltar que pode haver diferenças cruciais quanto a esses aspectos, como é o caso da colagem dos painéis CLT. A madeira de eucalipto, que apresentou maior densidade em relação ao pinus, obteve resultados superiores em relação ao pinus de menor densidade. Salienta-se que além de utilizar a massa específica de uma madeira, deve-se buscar por outros parâmetros para avaliar na qualidade da colagem, como por exemplo, porosidade, teor de umidade, resina, dentre outros.

As características exigidas de valores médios quanto à resistência ao cisalhamento para os painéis CLT, segundo a norma americana ANSI (2019), é de 2,4 MPa (24,4 Kgf cm⁻²) a 3,9 MPa (39,8 Kgf cm⁻²), uma vez que os resultados obtidos do presente estudo assemelham-se a essa exigência.

De acordo com os resultados do ensaio de cisalhamento na linha de cola por compressão, presume-se que a colagem foi bem realizada, e também o esperado era de que o percentual de falhas na madeira dos painéis com o tratamento de eucalipto puro (CLT 1) fosse superior aos demais, visto que para o CLT 1, a resistência ao cisalhamento obteve médias maiores (30,85 Kgf cm⁻²). Além disso, resalta-se que no tratamento com a mistura das espécies (CLT 3), os resultados médios tanto de cisalhamento na linha de cola, como falha na madeira também apresentaram valores excelentes, mostrando uma boa colagem entre os painéis mistos.

De forma geral, na literatura há diferentes estudos que relatam que a madeira de *Eucalyptus* sp. possui maior dificuldade no processo de colagem (DELLA LUCIA; VITAL, 1981). Além disso, madeiras que apresentam maior densidade, e com isso a porosidade é menor, podem também não proporcionar uma boa colagem. Porém, é válido ressaltar que pode haver madeiras menos densas e com maior nível de poros, e não haver uma colagem eficiente, se as condições de colagem não estiverem sob controle adequado ou também a superfície em que vai receber o adesivo estiver com alguma inativação, que pode ser resultante de processos de secagem ou também da ausência de processamento da madeira anterior a se realizar a colagem (HASELEIN; PAULESKI, 2003).

Na classificação do USDA (1987), a espécie *Pinus taeda* está apontada no grupo 3, em que se caracterizam madeiras que possuem uma colagem satisfatória com a utilização de adesivos com qualidade e condições no processo da colagem controladas.

Conforme Burger e Richter (1991), a madeira de *Pinus taeda* é considerada uma espécie resinosa, essa característica pode influenciar na qualidade da colagem, visto que a resina pode impedir o contato do adesivo com a madeira. Essa situação pode ser uma justificativa quanto aos resultados obtidos no presente estudo para os ensaios dos painéis CLT com madeira de *P. taeda*.

Além disso, quanto ao adesivo poliuretano utilizado na colagem dos painéis, em um estudo realizado por Bianchi (2020), que objetivou avaliar a delaminação e resistência da linha de cola de peças de madeira laminada colada, utilizando as espécies de pinus e eucalipto, os resultados obtidos quanto ao uso deste adesivo poliuretano monocomponente mostraram-se eficientes na colagem dos painéis de eucalipto e pinus, obtendo valores médios de resistência ao cisalhamento de 7,05 MPa e 6,16 MPa, respectivamente.

Quanto ao uso do adesivo poliuretano na colagem dos painéis CLT neste estudo, ressalta-se algumas das vantagens observadas neste produto, como a fácil aplicabilidade, a cura do adesivo é relativamente rápida e também possibilita a realização de prensagem sem a adição de calor (prensagem a frio). Contudo, para obter uma colagem com qualidade, é fundamental que se tenha cuidados quanto ao teor de umidade da madeira no momento de montagem dos painéis e a umidade relativa do ar, os quais desenvolvem papel fundamental na adesão do adesivo.

4.5 DELAMINAÇÃO

Na Tabela 6 são demonstrados os resultados do ensaio de delaminação em corpos de prova dos painéis CLT.

Tabela 6 – Ensaio de delaminação nos painéis CLT.

Corpo de prova	C. L 1 (mm)	C. L 2 (mm)	C. D 1 (%)	C. D 2 (%)	Limite de 5%
CLT 1.1	304,45	304,41	0	0	Ok
CLT 1.2	306,12	306,10	0	0	Ok
CLT 1.3	304,23	304,27	0	0	Ok
CLT 1.4	306,51	306,55	0	0	Ok
CLT 1.5	304,44	304,41	0	0	Ok
CLT 1.6	306,52	306,45	0	0	Ok
CLT 2.1	309,25	309,27	0	1,01	Ok
CLT 2.2	308,23	308,21	0	2,45	Ok
CLT 2.3	304,48	304,49	0,34	0	Ok

CLT 2.4	305,56	305,57	0	0	Ok
CLT 2.5	304,82	304,85	0	0,36	Ok
CLT 2.6	306,52	306,49	0	2,53	Ok
CLT 3.1	307,71	307,74	0	0	Ok
CLT 3.2	306,86	306,90	0	0	Ok
CLT 3.3	304,92	304,89	0	0	Ok
CLT 3.4	305,67	305,65	0	0	Ok
CLT 3.5	308,34	308,30	0	0	Ok
CLT 3.6	306,21	306,19	0	1,78	Ok

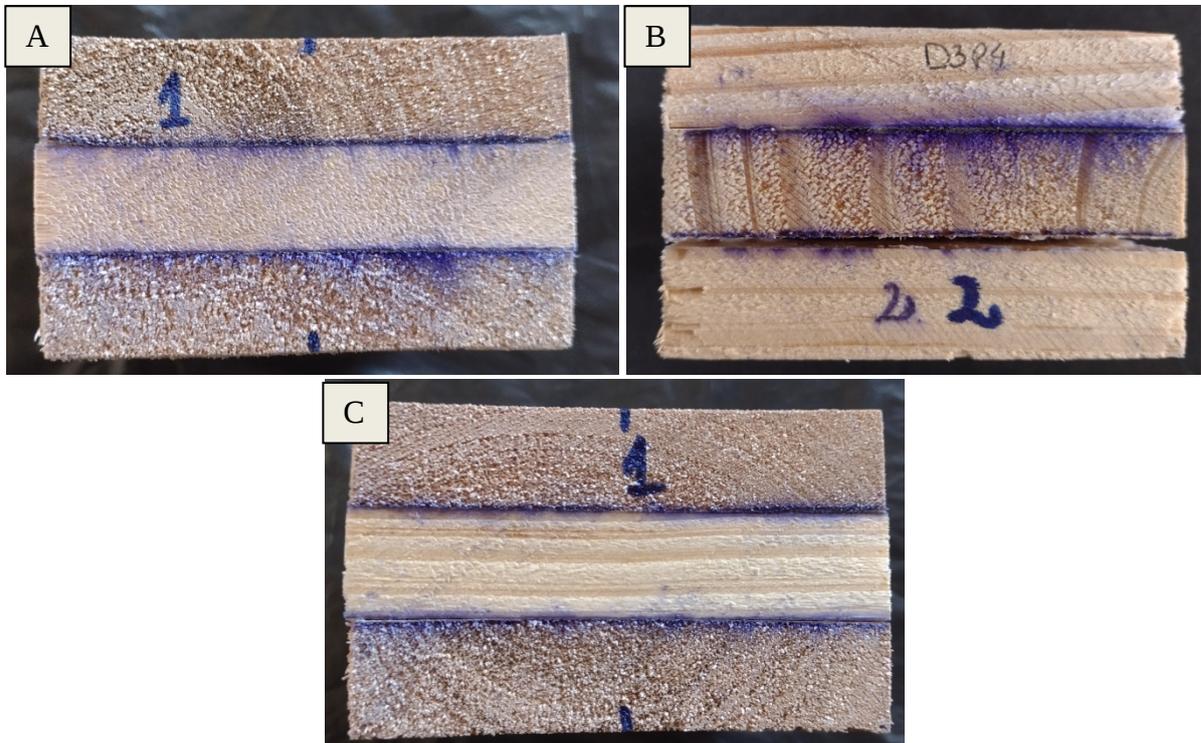
CLT 1.1 a CLT 1.6: Painéis de eucalipto puro, CLT 2.1 a 2.6: Painéis de pinus puro, CLT 3.1 a 3.6: Painéis da mistura das espécies, CLT C. L 1: Comprimento da linha de cola 1, C. L 2: Comprimento da linha de cola 2, C. D 1: Comprimento da delaminação da linha de cola 1, C. D 2: Comprimento da delaminação da linha de cola 2.

De acordo com os resultados obtidos do ensaio de delaminação, constatou-se que para os três tratamentos (eucalipto puro, pinus puro e mistura das espécies), foram atendidos os requisitos da norma AITC T 110 de 2007 do limite percentual de até 5% de delaminação do comprimento total da linha de cola (Figura 16). Os painéis compostos apenas com madeira de eucalipto não apresentaram nenhuma delaminação, demonstrando que a colagem das lamelas de eucalipto foram eficientes, assim como o tratamento misto das espécies, que apresentou delaminação em somente uma linha de cola.

No tratamento cujos painéis foram confeccionados apenas com pinus, embora tenham atendido ao limite de 5% de delaminação, a maior parte dos corpos de prova apresentou abertura nas linhas de colagem. Esse fato pode estar ligado a fatores durante o processo de montagem dos painéis, como por exemplo, a perda de pressão durante a prensagem, cura do adesivo, umidade relativa do ar, teor de umidade das lamelas, dentre outros.

Em um estudo realizado por Bianchi (2020), avaliando a colagem de madeira laminada colada com as espécies de eucalipto e pinus, constatou-se que o percentual de delaminação foi maior nos tratamentos utilizando madeira de pinus em comparação com ao eucalipto, o que corrobora com os resultados encontrados no presente estudo.

Figura 16 – Aspecto geral dos corpos de prova do ensaio de delaminação. **A:** Amostra de CLT de *Eucalyptus grandis* sem delaminação. **B:** Amostra de CLT de *Pinus taeda* com delaminação. **C:** Amostra de CLT misto das espécies sem delaminação.



Fonte: A autora (2021).

Conforme Segundinho *et al.* (2015), em um estudo com a avaliação do comportamento de vigas estruturais utilizando a madeira de *Acacia mangium* colada com adesivo poliuretano, foram obtidos resultados com percentual igual a zero para o ensaio de delaminação, conforme também observado para a maioria das amostras utilizadas neste estudo. Calil Neto *et al.* (2014), também observou um valor baixo de delaminação (0,5%) na pesquisa realizada com *Pinus* sp. na confecção de painéis CLT com aplicação de poliuretano.

De maneira geral, a colagem apresentou-se satisfatória para os diferentes tratamentos, o que pode estar diretamente relacionado ao sentido cruzado de disposição das lamelas, que proporciona ganhos na qualidade do produto final, como também diminui a possibilidade de deformações e retração nos painéis, aperfeiçoando as propriedades estruturais deste produto, tornando o CLT um material de grande viabilidade de uso no sistema construtivo (GIORGI, QUIRINO; MEIRELLES, 2020).

Além disso, pode-se destacar a eficiência do adesivo utilizado neste estudo, o poliuretano, que além de ser um produto de fácil aplicação sobre a superfície do material,

apresenta características como o isolamento acústico e térmico quando utilizado para fins estruturais (SOMARATHNA *et al.*, 2018).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos do presente estudo, pode-se concluir que:

Os painéis produzidos com a madeira de *Eucalyptus grandis* e mistos com as espécies apresentaram propriedades adequadas, mostrando que podem ser uma alternativa viável do seu uso na confecção desses painéis. Os ensaios realizados com amostras de madeira de *Pinus taeda*, embora tenham mostrado resultados inferiores quando comparado aos demais tratamentos, indicam a necessidade de aprofundamento do estudo das propriedades da madeira desta espécie quando aplicada na produção dos painéis CLT, e ainda, os resultados obtidos podem estar diretamente relacionados com a etapa de montagem, em que fatores como a umidade relativa, temperatura, prensagem ou também o adesivo utilizado podem ter influenciado na qualidade dos painéis.

A massa específica da madeira e dos painéis, MOE, resistência ao cisalhamento na linha de cola por compressão e também a ausência de delaminação indicam resultados maiores para os painéis CLT produzidos com a madeira de *Eucalyptus grandis*, demonstrando que a colagem foi melhor em comparação aos painéis montados com madeira pura de *Pinus taeda*.

Além disso, o percentual de falha na madeira mostrou-se superior a 90% para os painéis CLT com madeira de *Eucalyptus grandis*, e maior que 80% para os painéis produzidos com a mistura das espécies, em relação ao *Pinus taeda* (67%).

Nessa perspectiva, ressalta-se a importância de estudos futuros com a projeção de painéis CLT em grandes dimensões, com o intuito de avaliar as suas propriedades de tal forma como são confeccionados comercialmente.

Sugere-se também a produção de CLT com madeira de espécies pertencentes às regiões do Brasil, com a possibilidade de tornar este material como uma alternativa viável de inserir diferentes espécies locais, diante da grande disponibilidade de espécies madeireiras, por exemplo, tanto madeira de nativas como também de reflorestamento na sua produção, tornando o CLT como um produto global com o uso de matéria-prima regional.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.
- ALMEIDA, A. C. de.; MUNIS, R. A.; LARA, J. S. de. **Cross Laminated Timber vs concreto: Resistência mecânica a compressão paralela às fibras e densidade**. In: Tullio FBM. Pesquisa Científica e Inovação Tecnológica nas Engenharias. Atena Editora, 2019. p. 145-157.
- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T 110**. New York, 2007.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/APA PRG 320**: Standard for performance-rated cross-laminated timber. Tacoma, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**. Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2395**. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Philadelphia, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198**. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia, 2015.
- AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por calorimetria. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 461-466, 2013.
- ARANGO, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Nota técnica TR 04a: Biomassa da Madeira para siderurgia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de estruturas de madeira: Projeto NBR 7190/1997**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.
- BENDTSEN, B. A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and Loblolly pine. **Wood and Fibre Science**, v. 1, n. 18, p. 23-38, 1986.
- BETETTE, B. S. S.; CASTILHO, L. B. Uso de *Cross Laminated Timber* (CLT) em projetos estruturais. **Revista Artigos.Com**, v. 7, p. 1-7, 2019.

BIANCHI, N. A. **Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo.** 74 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites.** Nova York, 1982.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites.** Nova York: Krieger Publishing, 1993. 712 p.

BORTOLETTO JR, G. **Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de Pinus na construção civil.** 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

BRANDNER, R. **Production and technology of cross-laminated wood (CLT): State of the art report.** In: Focus solid wood solutions - European Conference on Cross Laminated Wood (CLT), p. 3-36, 2013.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331-351, 2016.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira.** São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CALIL NETO, C. *et al.* Analysis of specie: treatment: adhesive combinations for glulam purpose. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, n. 1, p. 41-47, 2014.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha.** 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.

CECCOTTI, A. New technologies for construction of medium-rise buildings in seismic regions: the XLAM case. **Structural Engineering International**, v. 18, n. 2, p. 156-165, 2008.

CHEN, Y. **Desempenho estrutural do sistema de madeira laminada cruzada com base em caixa usado em aplicações de piso.** 237 p. Tese de Doutorado, Universidade da Colúmbia Britânica, Vancouver, 2011.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CRAFFORD, P. L.; WESSELS, C. B. The potential of young, green finger-jointed *Eucalyptus grandis* lumber for roof truss manufacturing. **Southern Forests**, v. 78, n. 1, p. 61-71, 2016.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. **Cross laminated timber: a primer**. In: Report Special Publication 52, FPInnovations, Pointe-Claire, QC, 2010.

DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Avaliação da qualidade de juntas coladas de madeira de três espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 2, n. 5, p. 172-180, 1981.

DURLO, M. A. **Tecnologia da madeira: peso específico**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1991. 29 p. (Série Técnica, v. 8).

ECKER, T.; MIOTTO, J. L.; TURMINA, G. Painéis de madeira laminada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. **Science & Engineering Journal**, v. 26, n. 1, p. 17-25, 2017.

ELEOTÉRIO, J. R. *et al.* Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 329-336, 2015.

EN 16351 – **Timber Structures: Cross Laminated Timber- Requirements**. Cômite Europeu de Normatização (CEN), Bruxelas, Bélgica, 2014.

FELIX, P. M. de. A. C. **Parâmetros projeto para segurança contra incêndio do sistema construtivo em Cross Laminated Timber (CLT)**. 201 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

FERREIRA, R. A. **Análise genética e seleção em testes dialélicos de *Pinus taeda* L.** 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FILL – **Report on finger-jointing technology, use of HotMelt and surface gluing technology in CLT production**. FILL Ltd, 2011.

FPINNOVATIONS. **Introduction to cross-laminated timber**. CLT Handbook: cross laminated timber. Québec: Canadian. cap. 1, 2011.

GALLIO E. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* et Cambage. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 244-250, 2016.

GARCIA, H. V. S. *et al.* Desempenho de painéis de madeira laminada colada cruzada constituídos com eucalipto, seringueira e bambu. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. 1-12, 2021.

GIORGI, R. S. N., QUIRINO, V. A.; MEIRELLES, C. R. M. Contexto para a utilização da madeira como sistema estrutural em edifícios habitacionais. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n. 3, p. 9760-9775, 2020.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

HASELEIN, C. R. *et al.* Características estruturais da madeira de *Pinus elliottii* Engelm aos 30 anos de idade. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 2, p. 135-144, 2000.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte I**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2003. 81 p.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul**. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

HULLER, L. A. S. *et al.* Variação da densidade básica de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em função da altura comercial. In: Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da madeira. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2013.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2015**. Brasília: IBÁ, 2015. 80 p.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2019**. Brasília: IBÁ, 2019. 80 p.

IWAKIRI, S. *et al.* Mistura de espécies na produção de chapas de partículas estruturais “waferboard”. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1-2, p. 107-114, 1995.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fupef, v. 247, 2005.

JELEC, M.; RAJCIC, V.; VAREVAC, D. Cross-laminated timber (CLT) – A state of the art report. **Gradevinar**, v. 70, n. 2, p. 75-95, 2018.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005.

KUILEN, J. W. G. V. *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber. In: East Asia-Pacific Conference on Structural ENGINEERING AND Construction, v. 12. **Proceedings...** Hong Kong: Elsevier. p. 1621-1628, 2011.

LIMA, N. N. *et al.* Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 407-413, 2013.

LOPES, C. S. D. *et al.* Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Plantarum, Nova Odessa, 2003. 368 p.

MALLO, M. F. L.; ESPINOZA, O. Awareness, perceptions and willingness to adopt cross laminated timber by the architecture community in the United States. **Cleaner Production**, v. 94, p. 198-210, 2015.

MARCHIORI, J. N. D. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1996. 158 p.

- MELCHIORETTO, D.; ELEOTÉRIO, J. R. Caracterização, classificação e comparação da madeira de *Pinus patula*, *P. elliottii* e *P. taeda* através de suas propriedades físicas e mecânicas. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica, Blumenau. **Anais...** Blumenau: FURB, 2003. 5 p.
- MOHAMMAD, M.; GAGNON, S. Introduction to Cross Laminated Timber. **Wood Design Focus**, v. 22, n. 2, p. 1-12, 2010.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil**. Eucalypt cultivation in Brazil. São Paulo, 2000.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. 4. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 192 p.
- MOTTA, J. P. *et al.* Avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 615-621, 2014.
- NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.
- NETO, C. C. **Madeira laminada colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- OLIVEIRA, F. L. de. *et al.* Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, p. 59-70, 2006.
- PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W.; (2011) Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 559-566, 2011.
- PASSARELLI, R. **Cross Laminated Timber: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo**. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- PEREIRA, M. C. de. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada**. 107. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- SANTOS, A. F. do.; AUER, C. G.; JR, A. G. **Doenças do eucalipto no sul do Brasil: identificação e controle**. Circular Técnica. Colombo: Embrapa Florestas, 2001.
- SCHULTZ, A. C. P. **Avaliação da colagem e da variação de umidade na produção de painéis de madeira compensada com mistura de espécies**. 70 p. Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- SEGUNDINHO, P. G. de. A. *et al.* Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015.

SERPA, P. N. *et al.* Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.

SILVA, C. A.; CHIRINÉIA, M. L. B.; BARROS, M. M. S. **Cross Laminated Timber (CLT): uma tecnologia viável no Brasil**. ENTAC XVI – Encontro Nacional de Tecnologia, São Paulo, 2016.

SOARES, T. S.; CARVALHO, R. M. M. A.; VALE, A. B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 689-694, 2003.

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

SOUZA, C. R. *et al.* Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 95-101, 2004.

TEREZO, R. F. *et al.* Comparação do custo de produção de painel CLT produzido artesanalmente com outros materiais de construção convencionais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 68584-68590, 2020.

TRIANOSKI, R. *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Wood Handbook: wood as engineering material**. Washington: U. S. Government Printing Office, 1987. 466 p.

VITAL, R. B. Métodos de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico**, Viçosa, MG, n. 1, 1984. 21 p.

VIVIAN, M. A. *et al.* Efeito do tratamento preservante e da exposição a campo na resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 20, n. 3, p. 241-249, 2021.

WANG, B.; PIRVU, C.; LUM, C. **Cross-laminated timber manufacturing**. In: FPInnovations. CLT Handbook: cross-laminated timber. Revisão de Romulo C. Casilla, Y. H. Chui e Bob Knudson. Québec: Canadian, 2011. cap. 2.