



**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA
LAMELADA CRUZADA (CLT) CONFECCIONADOS COM
MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)
UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS**

PETER WIMMER

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

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



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

**PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA
LAMELADA CRUZADA (CLT) CONFECCIONADOS COM
MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)
UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS**

PETER WIMMER

ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

BRASÍLIA-DF: AGOSTO DE 2023

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

**“PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA
(CLT) CONFECCIONADOS COM MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)
UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS”**

PETER WIMMER

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DOUTOR.

APROVADA POR:

Prof. Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, (Universidade de Brasília)
(Orientador)

Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE, Doutor (Universidade de Brasília) (Examinador Interno)

Prof. Dr. ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO, (UFRRJ) (Examinador Externo)

Prof. Dr. RAFAEL RODOLFO DE MELO (UFERSA) (Examinador Externo)

Profa. Dra. CINTHYA BERTOLDO PEDROSO (UNICAMP) (Examinador Suplente Externo)

BRASÍLIA/DF, DIA 25 de AGOSTO de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

W757p	<p>Wimmer, Peter</p> <p>PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT) CONFECCIONADOS COM MADEIRA DE <i>Allantoma decandra</i> (Lecythidaceae) UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS / Peter Wimmer; orientador Cláudio Henrique Soares Del Menezzi. -- Brasília, 2023.</p> <p>111 p.</p> <p>Tese (Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2023.</p> <p>1. Tecnologia da Madeira. 2. Amazônia. 3. Estruturas de Madeira. I. Del Menezzi, Cláudio Henrique Soares, orient. II. Título.</p>
-------	---

REFERÊNCIA

WIMMER, P. (2023). Produção e avaliação de painéis de madeira lamelada cruzada (CLT) confeccionados com madeira de *Allantoma decandra* (Lecythidaceae) utilizando diferentes tecnologias. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD - 08/2023, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Peter Wimmer

TÍTULO: Produção e avaliação de painéis de madeira lamelada cruzada (CLT) confeccionados com madeira de *Allantoma decandra* (Lecythidaceae) utilizando diferentes tecnologias.

GRAU: Doutor ANO: 2023

É concedido à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Peter Wimmer
peterwimmer1983@gmail.com

DEDICATÓRIA

Àqueles que me apresentaram e ensinaram os encantos do trabalho com madeira:

Hellmut Wimmer,

Elemar Lothar Goelzer,

João Evangelista Anacleto,

dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade de Brasília (PPG-CFL/UnB).

Ao Professor Cláudio Henrique Soares Del Menezzi pela orientação.

Aos membros da banca avaliadora, Ailton Teixeira do Vale, Alexandre Monteiro de Carvalho, Rafael Rodolfo de Melo e Cinthya Bertoldo Pedroso, pelas correções e sugestões apresentadas.

Ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro pelo apoio na realização deste estudo.

A empresa Madeflona S.A. pelo apoio na coleta de madeira.

A, Divino Eterno Teixeira, Luciano Roitman, Helder Resende de Carvalho, Cecília Manavella, Alexandre Bahia Gontijo, Alessandro Moreira, Marcelo Fontana, Fátima de Brito e Fernando Gouveia, pelo auxílio no desenvolvimento das diferentes etapas desse trabalho.

Aos demais colegas do LPF.

Aos colegas do PPG-CFL pela amizade e companheirismo.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha família que sempre me apoiou, em especial a minha mãe, Claudete Wimmer e a minha esposa, Cristiane Lopes Costa.

Obrigado!

PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT) CONFECCIONADOS COM MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae) UTILIZANDO DIFERENTES TECNOLOGIAS

RESUMO GERAL

Diversas espécies da família Lecythidaceae são exploradas pela indústria madeireira para fabricação de produtos com baixo valor comercial, como caixotaria e cabos de ferramentas. Os dados de densidade da madeira destas espécies sugerem a possibilidade de seu uso no desenvolvimento de produtos engenheirados de maior valor agregado, entre os quais, destacam-se os painéis de madeira lamelada colada cruzada (CLT). Apesar de possuírem excelentes qualidades, a sua fabricação exige grande investimento e depende do uso de adesivos químicos. Frente a isso, foram desenvolvidos os painéis de madeira lamelada cruzada pregada (NCLT) e cavilhada (DCLT). O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da madeira de *Allantoma decandra* para a produção de painéis de madeira lamelada cruzada utilizando diferentes tecnologias de ligação, incluindo adesivos, pregos e cavilhas. Inicialmente foram realizados ensaios para a determinação das principais características físico-mecânicas da madeira. A seguir, foram realizados ensaios para triagem dos tipos de ligação mais promissores. Adicionalmente foram feitos ensaios de arranquio testando diferentes modelos e dimensões de pregos e, por fim, foram fabricados e ensaiados painéis de CLT, NCLT e DCLT. A madeira de *A. decandra* possui densidade básica de $0,57 \text{ g/cm}^3$, média resistência mecânica e características favoráveis ao seu beneficiamento. Nos ensaios de ligações, o PVAc obteve o melhor resultado entre os adesivos e as cavilhas de 20 mm foram superiores às de 16 mm. Entre os pregos, os anelados 18 x 30 apresentaram maior resistência. Nos ensaios de arranquio, o modelo do prego foi o fator mais relevante, com os pregos anelados apresentando os maiores valores de resistência. Os painéis colados apresentaram excelentes resultados, superando os valores de classes apresentados pela norma específica e de outros trabalhos similares. Os painéis pregados e cavilhados tiveram resultados superiores aos apresentados por outros trabalhos, no entanto, abaixo dos valores normatizados. A madeira de *A. decandra* possui excelentes características para a confecção de produtos engenheirados, em especial painéis de madeira lamelada colada cruzada com adesivo PVAC.

Palavras-chave: produtos engenheirados; adesivos; pregos; cavilhas.

PRODUCTION AND EVALUATION OF CROSS-LAMINATED TIMBER PANELS (CLT) MADE WITH WOOD OF *Allantoma decandra* (Lecythidaceae) UTILIZING DIFFERENT TECHNOLOGIES

GENERAL ABSTRACT

Several species of the Lecythidaceae family are intensively exploited by the timber industry to manufacture low commercial value products, such as crates and tool handles. The data about these species' wood density suggest that it is possible to use them to develop higher value engineered products, such as cross-laminated timber panels (CLT). Despite the qualities of CLT panels, their manufacture requires a large investment and the use of chemical adhesives. As an alternative, nailed cross-laminated timber (NCLT) and doweled cross laminated timber (DCLT) panels were developed. The purpose of this study was to evaluate the potential of *Allantoma decandra* wood to produce cross-laminated wood panels using different connecting technologies, including adhesives, dowels, and nails. Initially, the main physical-mechanical characteristics of the wood were determined. Next, tests were performed to verify the most efficient connectors. Additionally, nail withdrawal tests were carried out, testing different models and dimensions, and finally, CLT, NCLT and DCLT panels were manufactured and tested. *A. decandra* wood has basic density of 0,57 g/cm³, medium mechanical resistance and favorable processing characteristics. Regarding the connection tests, PVAc obtained the best result among the adhesives and the 20 mm dowels were superior to the 16 mm dowels. Among the nails, the 18 x 30 annular nails showed greater resistance. For the withdrawal tests, the nail design was the most relevant factor, with the annular nails presenting the highest resistance values. The glued panels showed excellent results, surpassing the standard values and those of other similar works. The nailed and doweled panels had superior results than those presented by other works, however below the standard values. The wood of *A. decandra* has excellent characteristics for the manufacture of engineered products, especially CLT panels with PVAc adhesive.

Keywords: engineered products; adhesives; nails; dowels.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	vii
GENERAL ABSTRACT.....	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
HIPÓTESE GERAL	3
OBJETIVO GERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
ESTRUTURA DA TESE	4
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
1. ESPÉCIE	5
2. PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA	8
2.1. Painéis de madeiras lamelada colada cruzada (CLT)	9
2.2. Painéis de Madeira lamelada Cruzada Pregada (NCLT).....	14
2.3. Madeira Lamelada Cruzada Cavilhada (DCLT).....	17
3. EXPERIÊNCIAS DE SUCESSO COM CLT E DEMAIS PRODUTOS ENGENHEIRADOS	20
4. USO DE ESPÉCIES FOLHOSAS NATIVAS.....	23
5. NORMAS E ENSAIOS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
CAPÍTULO 1. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE <i>Allantoma decandra</i> (Lecythidaceae)*	34
1. INTRODUÇÃO.....	34
2. METODOLOGIA.....	35
2.1. Matéria Prima	35
2.2. Caracterização Geral e Anatômica	37
2.3. Caracterização Físico-mecânica	37
2.4. Trabalhabilidade	38
2.5. Presença de Sílica	38
3. RESULTADOS	38
4. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

CAPÍTULO 2. RESISTÊNCIA MECÂNICA DE LIGAÇÕES PREGADAS, CAVILHADAS E COLADAS PARA A CONFECCÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT).....	51
1. INTRODUÇÃO.....	51
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
2.1. Confeccão dos corpos de prova	53
2.2. Ensaios	56
2.3. Análise Estatística.....	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
CAPÍTULO 3. EFEITO DE DIFERENTES MODELOS E DIMENSÕES DE PREGOS NA RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO EM MADEIRA DE <i>Allantoma decandra</i> (Lecythidaceae)	66
1. INTRODUÇÃO.....	66
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	68
2.1. Confeccão dos corpos de prova	68
2.2. Análise Estatística.....	69
2.3. Ensaios Teóricos	69
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4. CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
CAPÍTULO 4. PROPRIEDADES DE PAINÉS DE CLT, NCLT E DCLT CONFECCIONADOS COM A MADEIRA DE <i>Allantoma decandra</i> (Lecythidaceae)...	78
1. INTRODUÇÃO.....	78
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	80
2.1. Confeccão dos Painéis	80
2.2. Ensaios	83
2.3. Análise Estatística.....	84
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4. CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
CONCLUSÕES GERAIS DA TESE E RECOMENDAÇÕES.....	99

INTRODUÇÃO GERAL

Lecythidaceae é umas das famílias botânicas de maior representatividade no bioma amazônico. É a terceira em número total de espécies, cerca de 350, e se destaca pelo grande número de indivíduos, especialmente na Amazônia Central. Sua presença é um indicativo de florestas preservadas ou levemente perturbadas (PRANCE e MORI, 1979). No Brasil, diversas espécies de Lecythidaceae dos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari* são exploradas pela indústria madeireira, muitas vezes sendo comercializadas sob a mesma denominação popular de “tauari” (PROCÓPIO e SECCO, 2008). Segundo informações do Sistema de Cadeia de Custódia do Serviço Florestal Brasileiro (2022), entre as dez espécies florestais mais exploradas nos planos de manejo das concessões federais, duas pertencem à família Lecythidaceae, já tendo sido colhidos mais de 100 mil metros cúbicos de madeira nos estados do Pará e Rondônia entre os anos de 2015 e 2020.

Apesar do grande volume explorado, estas madeiras possuem densidades básicas médias, e são comumente utilizadas para fins com baixo valor comercial, como a fabricação de cabos de vassouras, cabos de ferramentas e caixotarias. Conforme os boletins de preços publicados pelas Secretarias de Fazenda, o valor do metro cúbico em tora das espécies dos gêneros mencionados varia entre R\$ 62,00 (SEFAZ-AM, 2023) e R\$ 66,00 (SEFIN - RO, 2023) nos estados do Amazonas e Rondônia, respectivamente. Por outro lado, os valores de densidade básica da madeira indicados pela literatura, entre 0,49 e 0,66 g/cm³, sugerem que seja possível utilizar estas espécies no desenvolvimento de produtos engenheirados para a construção civil.

Produtos engenheirados são desenhados e manufaturados para maximizar a resistência e rigidez naturais características da madeira, orientando as lamelas, lascas e laminações de forma ótima e combinando madeira com adesivos duráveis e outros elementos de conexão. São materiais arquitetônicos extremamente versáteis, uma vez que permitem uma grande variedade de formas. Seus usos mais frequentes são em elementos estruturais de edifícios, pisos, coberturas e pontes. Essas inúmeras utilidades devem-se ao fato de apresentarem alta resistência a solicitações mecânicas em função de seu peso relativamente baixo.

Entre os produtos engenheirados desenvolvidos, destacam-se os painéis de madeira lamelada colada cruzada, mais conhecidos pela sigla em inglês “CLT” (cross-laminated timber). Os painéis de CLT são formados por pelo menos três camadas ortogonais de madeira lamelada serrada, formando um sólido retangular, moldado para aplicações em telhados, pisos ou paredes. Entre os seus benefícios estão a velocidade de construção, facilidade, limpeza, regulação térmica, acústica e eficiência estrutural.

Apesar das qualidades comprovadas dos painéis de CLT, a sua fabricação exige um grande investimento em equipamentos e estrutura, além de existirem questionamentos em relação à toxicidade e sustentabilidade dos adesivos utilizados para a sua confecção. Frente a isso, pesquisadores e a indústria se dedicaram a desenvolver produtos engenheirados de madeira, livres de adesivos, culminando com a concepção dos painéis de madeira lamelada cruzada pregada (*nailed cross-laminated timber* - NCLT) e madeira lamelada cruzada cavilhada (*dowelled cross-laminated timber* - DCLT).

Durante o ano de 2017, o Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) realizou uma coleta de madeira para estudo nas concessões florestais da empresa Madeflona S.A. na Floresta Nacional de Jacundá, estado de Rondônia. Dentre a madeira que foi trazida até as dependências do LPF em Brasília, estavam aproximadamente 3 metros cúbicos de *Allantoma decandra* (Ducke) S.A.Mori, Y.Y.Huang & Prance, provenientes de dez árvores distintas, devidamente registradas e identificadas. Segundo os documentos de origem florestal (DOF) do IBAMA, todo quantitativo de *A. decandra*, colhido pela concessionária Madeflona, está sendo destinado para uma fábrica de cabos de vassouras e ferramentas nos arredores de Porto Velho.

Apesar de já existirem diversos estudos científicos dedicados a aspectos ecológicos e botânicos de *A. decandra*, não se têm registros de uma caracterização físico-mecânica da madeira desta espécie ou sobre indicações de uso na fabricação de produtos engenheirados. A proposta deste estudo foi avaliar o potencial da madeira de *A. decandra* como matéria-prima para a produção de produtos engenheirados de maior valor agregado, em especial painéis de madeira lamelada cruzada, assim como comparar o desempenho dos painéis em função da utilização de diferentes tecnologias de fabricação.

HIPÓTESE GERAL

A madeira de *Allantoma decandra* tem propriedades físico-mecânicas que a habilitam para ser utilizada na confecção de produtos engenheirados de maior valor agregado, como os painéis de madeira lamelada cruzada.

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto foi avaliar o potencial da madeira de *Allantoma decandra* para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada, utilizando pregos, adesivos e cavilhas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Caracterizar as principais propriedades tecnológicas da madeira de *Allantoma decandra*.
- ii. Avaliar a resistência mecânica de ligações pregadas, cavilhadas e coladas para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada.
- iii. Avaliar o efeito de diferentes modelos e dimensões de pregos na resistência ao arranquio em madeira de *Allantoma decandra*.
- iv. Avaliar e comparar o desempenho de painéis de madeira lamelada cruzada, confeccionados com madeira de *Allantoma decandra* e conectados por pregos cavilhas e adesivos.

ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em fundamentação teórica, quatro capítulos e conclusão geral. A fundamentação teórica apresenta as principais informações relevantes para a contextualização e pleno entendimento dos capítulos, assim como faz referência aos trabalhos científicos de destaque a respeito do tema de estudo.

O Capítulo 1 apresenta os dados obtidos a partir da caracterização tecnológica da madeira de *Allantoma decandra*, o que inclui: caracteres gerais, descrição macroscópica, trabalhabilidade, propriedades físicas, resistências mecânicas, além de uma verificação da presença de silício por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura.

O Capítulo 2 apresenta os resultados da avaliação da resistência mecânica de diferentes elementos de ligação (modelos e dimensões de pregos, cavilhas e adesivos), utilizando corpos de prova em corte duplo, visando à confecção de painéis de madeira lamelada cruzada.

A partir dos resultados obtidos para os ensaios com diferentes modelos e dimensões de pregos no segundo capítulo, e considerando a carência de literatura a respeito do desempenho destes em relação a madeiras tropicais, buscou-se o aprofundamento nas questões relacionadas à resistência dos pregos ao arranquio. O Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos por meio do ensaio de arranquio de diferentes modelos e dimensões de pregos.

O Capítulo 4 aborda a avaliação do desempenho de painéis de madeira lamelada cruzada, pregada, cavilhada e colada, confeccionados com a madeira de *Allantoma decandra* utilizando os elementos de ligação previamente testados no Capítulo 2.

Por fim, a última seção do trabalho é dedicada a compilar os principais resultados obtidos, uma conclusão geral e recomendações para estudos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. ESPÉCIE

Allantoma decandra (Ducke) S.A.Mori, Y.Y.Huang & Prance, pertencente à família Lecythidaceae, é conhecida popularmente por jequitibá, jequitibá-rosa, jequitibá-tauari, tauari, tauari-vermelho, cerú e xurú (REFLORA, 2018). Conforme figura 1, a espécie é encontrada na região amazônica em solos franco-arenosos de florestas de terra firme, entre 0 e 500 metros a nível do mar (SMITH et al., 2015). No Brasil, existem registros de ocorrência nos estados do Acre, Amazonas, Pará e Rondônia, mas a espécie também pode ser encontrada na Colômbia e Peru (MORI et al., 2010).

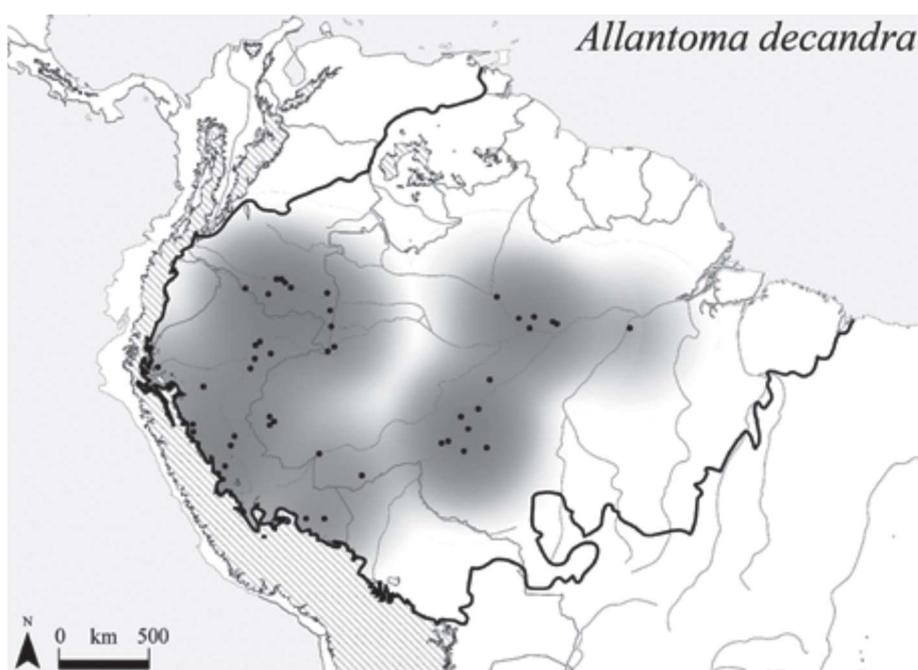


Figura 1. Distribuição de *Allantoma decandra* projetada a partir de pontos de coleta (modificado -PROCÓPIO et al., 2010).

A espécie é caracterizada por árvores de grande porte, de dossel a emergente, podendo chegar a 40 metros de altura, com fuste cilíndrico e diâmetro a altura do peito (DAP) entre 45 e 250 centímetros (PROCÓPIO e SECCO, 2008). A partir da cubagem de 70 árvores na Floresta Nacional do Jamari (Rondônia) foram encontrados os valores médios de 80,5 cm para DAP, 21,7 m de altura comercial e 7,14 m³ de volume comercial (CYSNEIROS et al., 2017). Suas folhas têm o pecíolo alado e seus frutos são pixídios de cor castanho claro (Figura 2).



Figura 2. Ramo e fruto de *Allantoma decandra* (CATENACCI e SIMON, 2017).

Conforme mencionado por Procópio et al. (2008), diversas espécies de Lecythidaceae dos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari* são exploradas e comercializadas pelo nome comum de “tauari”. Isso ocorre em função da similaridade entre as espécies, mas também pelo método usual de inventário florestal que, baseado no conhecimento empírico de “mateiros”, adota nomes vernaculares na determinação das espécies, que a seguir são substituídos por nomes científicos proveniente de literatura especializada ou de listas do IBAMA, sem seguir critérios científicos, morfológicos ou ecológicos.

Para a identificação correta de *A. decandra*, Procópio et al. (2008) e Catenacci e Simon (2017) sugerem os seguintes caracteres diagnósticos: folhas com ápice acuminado e pecíolo alado plano, lâmina decurrente, margem inteira; venação de 2ª ordem arqueada, venação de 3ª ordem fina, pouco visível a olho nu, lâmina brilhante (Figura 3A); forma da base do tronco frequentemente cilíndrica; casca externa acinzentada fissurada e casca interna de cor laranja intenso (Figura 3 B).



Figura 3. *Allantoma decandra*: (A) folhas grandes com margem inteira e venação de 3ª ordem pouco visível (Fonte: Procópio et al., 2008); (B) casca externa e casca interna (modificado - CATENACCI e SIMON, 2017).

Após o corte das árvores e desdobro da madeira, *A. decandra* é facilmente confundida com a madeira de *Allantoma lineata*. Para auxiliar na distinção das duas espécies, Bernal et al. (2011) elencaram os principais caracteres gerais referentes a anatomia da madeira. Entre os aspectos úteis para distinção é possível citar o tamanho dos vasos (mais largos em *A. decandra*), e os tipos de raios (unisseriados em *A. lineata* e bisseriados em *A. decandra*) (Figura 4).

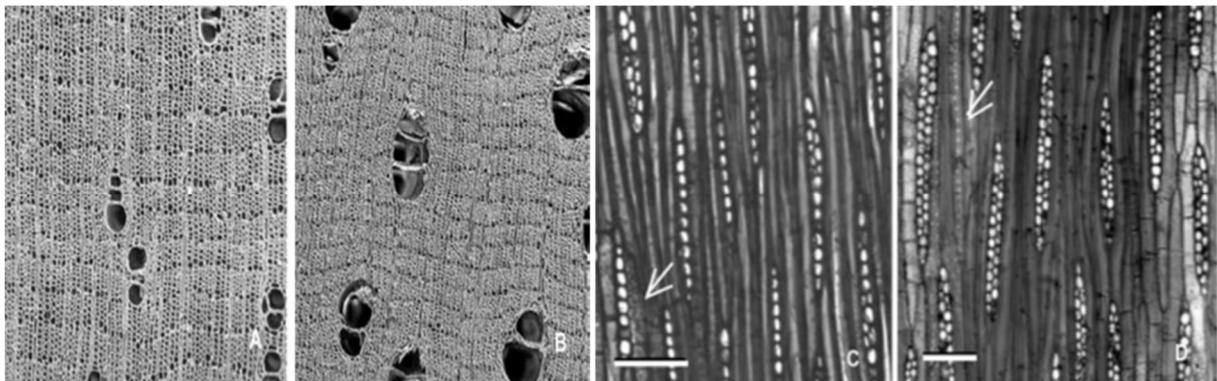


Figura 4. Aspectos gerais das madeiras de *Allantoma*: (A) corte transversal de *A. lineata*: vasos solitários e em múltiplos radiais de 2–3, parênquima axial em faixas reticuladas unisseriadas; (B) corte transversal de *A. decandra*: vasos solitários e em múltiplos radiais de 2–3, parênquima axial em faixas reticuladas unisseriadas; (C) corte tangencial de *A. lineata*: raios parênquima axial em faixas reticuladas unisseriadas; (D) corte tangencial de *A. decandra*: raios bisseriados. Barras de escala = 200 µm. (modificado - BERNAL et al., 2011).

2. PRODUTOS ENGENHEIRADOS DE MADEIRA

Produtos engenheirados envolvem o processamento industrial da madeira e, em geral, o uso de adesivos para formar grandes seções estruturais para uso na construção civil, como vigas, colunas e painéis. Compreendem uma extensa gama de produtos, os quais foram desenvolvidos para suprir a demanda por madeira de alta qualidade e de grandes dimensões frente a escassez deste material nos recursos florestais (PEDROSA, 2003). O processamento da madeira minimiza características que reduzem a resistência dos produtos, como nós e a inclinação da grã, resultando em peças estruturais homogêneas, com rigidez e resistência mais uniformes, maior estabilidade dimensional e durabilidade do que peças de madeira sólida (BRENEMAN, 2016; RAMAGE et al., 2017; GONG, 2019).

Os produtos engenheirados podem ser classificados de acordo com a matéria prima utilizada na sua fabricação. Conforme apresentado por Ramage et al. (2017), as toras de madeira podem ser processadas em madeira serrada (lamelas), lâminas ou cavacos/lascas (Figura 5). A madeira serrada pode ser utilizada para a fabricação de vigas e pilares de madeira lamelada colada (glulam), painéis de lamelas paralelas que podem ser cavilhadas ou pregadas (DLT e NLT) e painéis de madeira lamelada cruzada, mais conhecida pelo termo em inglês "*cross-laminated timber*", que geralmente são confeccionados com adesivos, mas também podem utilizar pregos e cavilhas (CLT, NCLT e DCLT, respectivamente). As lâminas podem ser utilizadas na fabricação de painéis compensados, *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e *Structural Veneer Lumber* (SVL). Já os cavacos ou lascas, são utilizadas para a fabricação de painéis *Oriented Strand Boards* (OSB), painéis de fibras (MDF e HDF), entre outros. Também existem produtos que unem duas tecnologias distintas, como é o exemplo das vigas em "I": os flanges costumam ser fabricados a partir de madeira serrada ou LVL, enquanto a alma pode ser confeccionada a partir de painéis compensados ou OSB.

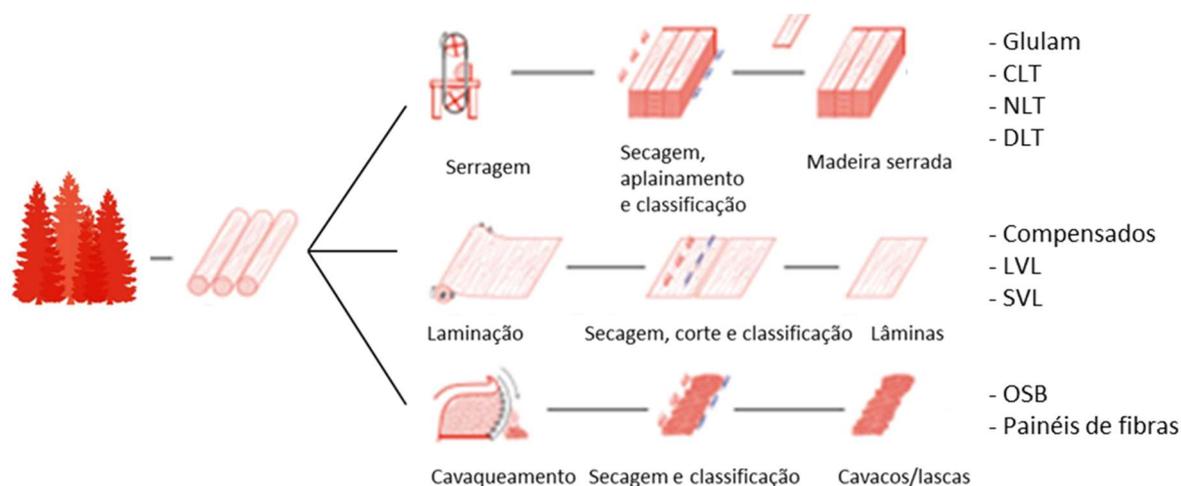


Figura 5. Cadeia de processamento dos principais produtos engenheirados (modificado - RAMAGE et al., 2017).

Os produtos engenheirados produzem menos poluentes comparados aos materiais de construção de origem mineral e geram menos resíduos, pois são confeccionados em fábricas e transportados com suas medidas finais até o pátio de obras, dando agilidade ao processo construtivo (BIRINCI et al., 2020). Em função de suas propriedades mecânicas homogêneas e benefícios ambientais, os produtos engenheirados de madeira estão se tornando uma alternativa à materiais convencionais como concreto e aço (HARTE, 2017; RAMAGE et al., 2017), sendo consumidos em grandes volumes por todo o mundo (SOTAYO et al., 2020).

2.1. Painéis de madeiras lamelada colada cruzada (CLT)

Os painéis de CLT são formados por pelo menos três camadas ortogonais de madeira lamelada serrada (Figura 6), formando um sólido retangular que suporta cargas no sentido paralelo e perpendicular ao plano do painel, permitindo a sua aplicação como elemento de paredes, pisos e telhados (BRANDNER et al., 2016; ANSI, 2018).

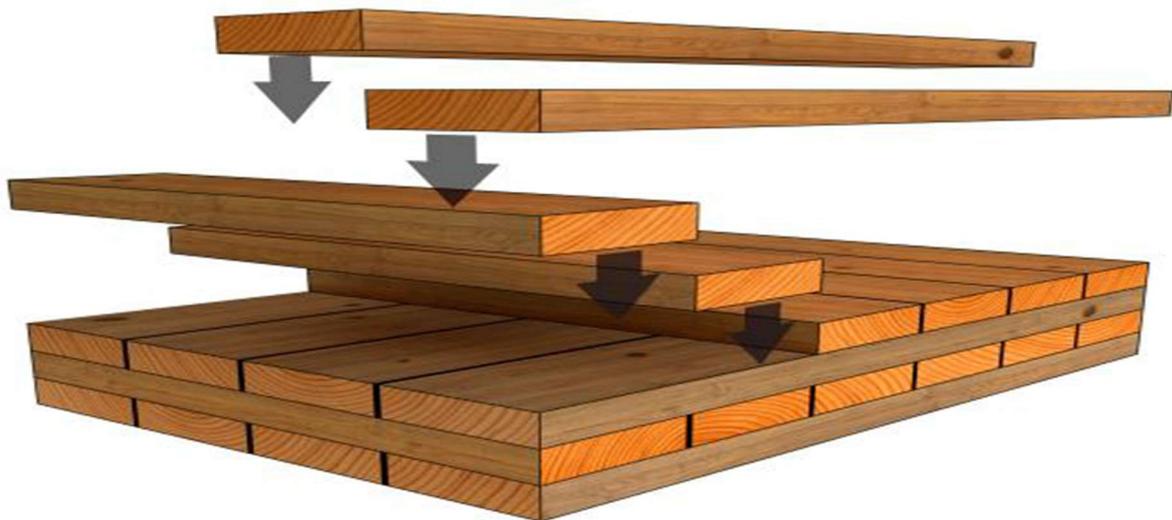


Figura 6. Esquema da montagem de um painel de madeira lamelada Colada Cruzada (CLT) (BUCK et al., 2016).

A espessura das lamelas utilizadas para fabricar os painéis costuma variar entre 10 e 50 mm (LI, 2017), sendo 20, 30 e 40 mm as medidas padrão. A largura das lamelas deve ser de pelo menos quatro vezes a espessura, sendo comuns larguras entre 40 e 300 mm (JELEC et al., 2018). Após o corte, elas são secas em estufas e avaliadas visualmente ou através de equipamentos de “*stressrating*”, para eliminação de defeitos como nós e rachaduras (BRANDNER et al., 2016). Por serem painéis compostos por múltiplas camadas, é possível utilizar as lamelas de classes inferiores nas camadas centrais, onde os efeitos de compressão e tração são menores (PEREIRA e CALIL JUNIOR, 2019).

A aplicação do adesivo é feita de forma automatizada sobre as faces largas das lamelas e então são prensadas utilizando prensas pneumáticas ou a vácuo (Figura 7A). Em geral, a aplicação de adesivo nas laterais das lamelas não é uma prática comum, sendo o seu benefício questionável (BRANDNER, 2013). Devido a alterações de temperatura e umidade, são previstos contrações e inchamentos da madeira e, portanto, diversas normas permitem a existência de frestas de até 6 mm entre as lamelas, evitando o surgimento de rachaduras (JELEC et al., 2018). A espessura dos painéis pode variar entre 50 mm e 500 mm de espessura e, devido a sua excelente estabilidade dimensional, a largura e comprimento podem ser ajustáveis, sendo possível confeccionar painéis de até 20 metros de comprimento e 4 metros de largura (GAGNON e PIRVU, 2011). De acordo com o projeto, os painéis podem ser usinados com o auxílio de um equipamento com comando numérico computadorizado (CNC), para dar origem a encaixes, aberturas (janelas e portas) e condução de componentes elétricos e hidráulicos (Figura 7B).



Figura 7. Confeção e beneficiamento dos painéis de CLT: **A)** Prensa à vácuo; **B)** equipamento de CNC utilizado para usinagem (CROSSLAM, 2022).

Atualmente, a produção industrial de painéis de CLT está baseada no uso de adesivos sintéticos. Os adesivos constituem um dos processos mais modernos de ligação, permitindo a união de madeiras de pequenas seções para a confecção de componentes de uso estrutural. Uma das vantagens do uso de adesivos em relação a métodos mecânicos, como pregos, rebites e parafusos, é que o adesivo dispensa a necessidade de se fazer furos no material a ser unido, evitando assim a concentração de tensões, que pode causar uma diminuição de suas propriedades físicas e mecânicas (POCIUS, 2002). Por outro lado, o custo dos adesivos sintéticos é elevado e tem influência direta no preço final do produto, podendo chegar até metade desse valor (CARNEIRO et al., 2004).

A eficiência da ligação depende da porosidade e permeabilidade natural da madeira, que está relacionada à estrutura da madeira e sua densidade, influenciando no fluxo de líquidos através de sua estrutura lenhosa (IWAKIRI, 2005). A densidade apresenta uma relação inversa com a porosidade e a ação de penetração de adesivos na estrutura lenhosa. Madeiras de média e alta densidade dificultam o processo de colagem na medida em que restringem a penetração do adesivo e conseqüentemente a formação de uma linha de cola eficiente (LOBÃO e GOMES, 2006). Por outro lado, em madeiras de baixa densidade ocorre maior penetração do adesivo, que poderá resultar em linha de cola faminta. As espécies com maior potencial de colagem são as coníferas com densidade básica entre 0,40 e 0,75 g/cm³ (SZÜCS, 1992). As folhosas apresentam maior dificuldade de colagem devido à sua constituição química e sua maior complexidade estrutural (VITAL et al., 2006), no entanto, as madeiras menos densas (< 0,7 g/cm³) também podem ser coladas satisfatoriamente (TEREZO e SZÜCS, 2010; SANTOS e DEL MENEZZI, 2010).

Para uma colagem eficiente, é necessário realizar uma preparação da superfície da peça a ser colada para remover a camada superficial da madeira, impregnada por extrativos, aumentando a permeabilidade ao adesivo (VELLA, 2020; LEGGATE et al., 2021). Extrativos são elementos impregnantes presentes no lúmen ou parede celular, os quais são constituídos de materiais orgânicos como: graxas, óleos, gorduras, taninos, carboidratos, ácidos, gomas e resinas. Estes materiais são produzidos durante a formação do cerne e seus efeitos predominantes estão relacionados à redução da higroscopicidade e da permeabilidade da madeira (IWAKIRI, 2005). De acordo com a espécie e condições de secagem da madeira, pode ocorrer a migração e concentração excessiva de extrativos na superfície, com a formação da superfície inativa ou contaminada, bloqueando o contato adesivo/madeira. A concentração de extrativos nas camadas superficiais da madeira pode bloquear a passagem da água e retardar a sua taxa de evaporação, aumentando o tempo necessário de prensagem.

A forma mais tradicional de preparação de superfícies para colagem é por meio do aplainamento da superfície a ser colada (KNORZ et al., 2015). Após esta atividade, a colagem deve ser realizada em até 24 horas (VICK, 1999), pois em curto espaço de tempo, ocorre a emersão de extrativos de baixo peso molecular a superfície, diminuindo a higroscopicidade da madeira (AYDIN, 2004).

Em escala mundial, os adesivos mais utilizados na confecção de produtos engenheirados são à base de melamina-ureia formaldeído (MUF) e poliuretano (PUR) (JELEC et al., 2018). Ambos os adesivos formam uma linha de cola quase incolor e são resistentes à exposição solar, umidade e hidrólise. As vantagens do adesivo à base de MUF são a resistência a altas temperaturas (fogo) e suas propriedades de penetração e preenchimento. Suas desvantagens são a emissão de formaldeído e sua capacidade limitada de armazenamento. Em contraponto, adesivos a base de PUR são livres de formaldeído e podem ser facilmente adaptados a necessidades individuais de produção, no que tange reatividade e tempo de cura. Ligações feitas com eles apresentam boa resistência à fluência, à umidade, aos tratamentos com exposição ao calor e, além disso, a cura pode ser feita em condições ambientais (RENZO, 2008). Em contrapartida, apresenta como desvantagem o alto custo e a extrema toxicidade (HASELEIN e PAULESKI, 2004). No Brasil, a produção de MUF foi suspensa pela Akzo Nobel, principal fabricante nacional, e o PUR é atualmente o adesivo mais utilizado pelas indústrias de produtos engenheirados de madeira.

Os adesivos a base de polivinil acetato (PVA) são polímeros sintéticos à base de água, preparados pela polimerização do acetato de vinila. Foram inicialmente desenvolvidos para uso interno, no entanto, em anos recentes, a indústria têm desenvolvido novas fórmulas acrescidas

de catalisadores que ativam reações químicas de polimerização (crosslinking), aumentando a resistência à água e a esforços. Estas fórmulas têm obtido excelentes resultados em escala experimental (PIMENTEL et al., 2021), no entanto, ainda carecem de resultados de desempenho sob condições extremas e em longo prazo. Entre as vantagens dos adesivos à base de PVA podemos destacar: praticidade de uso, formação de união flexível, pouco abrasivo, transparente, fáceis de limpar e permitem elevado tempo de armazenagem (HEINRICH, 2001), baixo custo, segurança no manuseio, inodoro, não inflamável, alta estabilidade (IWAKIRI, 2005), flexibilidade de cura, pois curam a frio ou a quente, onde se incluem as prensas de alta frequência (CONNER, 2001; IWAKIRI, 2005).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações coladas de madeira tendem a se romper por cisalhamento, que pode ocorrer na linha de cola ou pela ruptura da madeira. A ruptura na linha de cola indica alguma deficiência na preparação da madeira, execução da colagem e prensagem ou uma incompatibilidade entre tipo de adesivo e espécie. Por outro lado, a ruptura na madeira indica eficiência do processo de colagem, onde a linha de cola adquire resistência superior à da madeira.

Apesar das qualidades comprovadas dos painéis de CLT, existem questionamentos em relação à toxicidade e sustentabilidade dos adesivos utilizados para a sua confecção. Segundo Thoma (2012), o uso de adesivos químicos retira todo o potencial ecológico do uso da madeira. Apesar de já existirem iniciativas de desenvolver adesivos ecológicos bio-baseados (NAKAMURA et al., 2017), ainda restam entraves para a disseminação de seu uso em função do menor custo e melhor desempenho dos adesivos sintéticos a base de petróleo (HEMMILA et al., 2017). Entre os principais questionamentos, podemos destacar:

- A grande maioria dos adesivos é suscetível à exposição ambiental, o que compromete a sua vida útil (CHEN et al., 2019);
- Grandes quantidades de adesivos são utilizadas, gerando poluição ambiental (ATAEI et al., 2019; ZHANG et al., 2020);
- Dificuldade em reutilizar, reciclar e destinar os painéis após uso, visto que estão impregnados por adesivos potencialmente tóxicos (CHANG e NERCHOU, 2015).

Como forma de contornar estas questões, diversas pesquisas foram realizadas buscando alternativas. Entre os elementos de ligações testados para substituir os adesivos, podem ser citados: anéis metálicos, parafusos metálicos, parafusos de madeira, pregos e cavilhas de

madeira de alta densidade, com destaque para os dois últimos (BRANDNER, 2016). Para diferenciar todos os produtos que não utilizam adesivos em sua concepção foi definida a sigla AFEWD (Adhesive Free Engineered Wood Products): Produtos Engenheirados de Madeira, Livres de Adesivo (PEREIRA et al., 2019). A partir deste conceito, diversos produtos vêm sendo desenvolvidos, entre os quais:

- Painéis de madeira lamelada cruzada pregada (*Nail cross-laminated Timber - NCLT*),
- Painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada (*Dowel Cross-laminated Timber - DCLT*).

Existem outros produtos já consagrados como o *Nail Laminated Timber* e o *Dowel Laminated Timber*, que partilham do mesmo princípio das vigas de madeira laminada colada (*Glulam*), e outros em fase experimental que incluem: painéis lamelados cruzados com camadas alternadas em 45° (BUCK et al., 2016); vigas paralelas que utilizam cavilhas com diferentes ângulos de inserção (DOURADO et al., 2019; ZHANG et al., 2020) e painéis que intercalam lamelas cruzadas e paralelas (HOSSEINZADEH et al., 2020). Apesar dos artigos científicos apresentarem resultados promissores, estas tecnologias ainda não foram adotadas pela indústria.

2.2. Painéis de Madeira lamelada Cruzada Pregada (NCLT)

A tecnologia de NCLT utiliza o mesmo processo de preparo das lamelas, mas ao contrário dos CLTs colados, dispensa o uso de prensas hidráulicas ou a vácuo (BRANDNER, 2013). Os painéis (Figura 8) podem ser fabricados no pátio de obras, apenas com um pregador pneumático, reduzindo o tempo de montagem quando comparado a outros tipos de materiais (PANG et al., 2017).

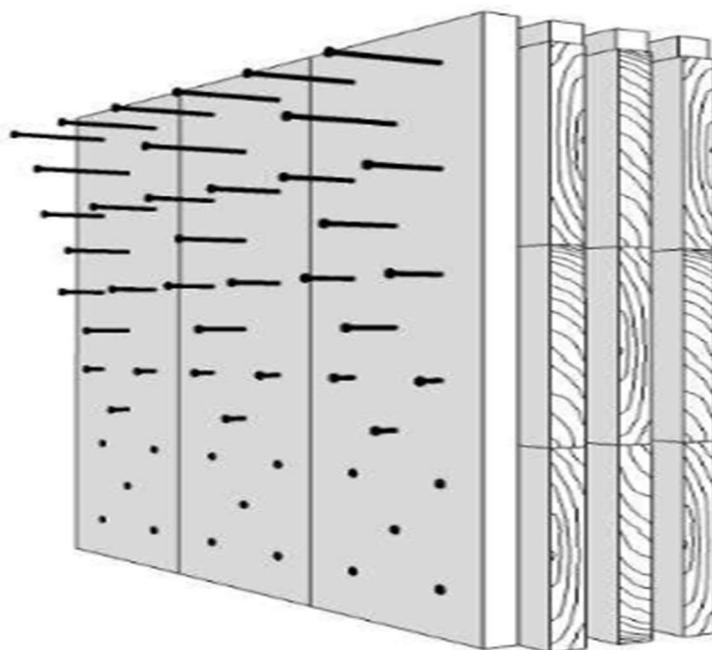


Figura 8. Painel de Madeira lamelada Cruzada Pregada (NCLT) (STRUCTURE CRAFT, 2017).

Os pregos são os elementos de ligação mais comuns e provavelmente os mais tradicionais. Ao contrário dos adesivos, apresentam um baixo custo e não demandam infraestrutura específica para serem utilizados. Entre os fatores que influenciam a resistência de ligações pregadas pode-se mencionar: a forma e dimensão dos pregos, sua carga admissível, a deformação do prego por flexão, o enfraquecimento da seção provocada pelo furo, fendas e rachaduras ocasionadas pela penetração, disposição dos pregos e alteração da umidade da madeira (retração provoca afrouxamento dos furos). O uso de pregos é uma solução simples e viável para fazer ligações entre madeiras de baixa capacidade de adesão, em especial as folhosas com madeira de densidades elevadas ou elevada presença de extrativos (HOSSEINZADEH et al., 2020). Por outro lado, a presença dos pregos dificulta o processamento dos painéis em função do desgaste das ferramentas de corte.

O prego mais comumente utilizado é o de haste cilíndrica com cabeça, no entanto, diversas melhorias foram agregadas aos pregos, em relação a tamanho e forma, com o objetivo de aumentar sua resistência ao arranquio (THEILEN et al., 1998). Entre os diferentes tipos de pregos no mercado, cada qual com sua função específica, existem dois modelos que foram desenvolvidos para aumentar a resistência ao arranquio: os pregos anelados e espiralados (LUSZCKI et al., 2013).

Ao contrário dos pregos lisos, que se fixam na madeira apenas pelas forças de fricção entre as fibras da madeira e a haste do prego, os pregos anelados possuem também resistência mecânica, pois as fibras da madeira se encaixam entre os anéis do prego, dispostos a 90°, durante a sua inserção. Para arrancar um prego anelado é necessário superar a fricção e quebrar as fibras da madeira encaixadas entre os anéis, o que requer uma força adicional (RAMMER et al., 2001; DOPPKE, 2004). Ao comparar a resistência ao arranquio de pregos anelados e pregos lisos de mesmo diâmetro, Skulteti et al. (1997) concluiu que os anelados possuem o dobro de resistência. Por outro lado, a presença dos anéis na haste do prego exige 15% mais energia para inserção na madeira (OGUNRINDE et al., 2019). Pregos espiralados são recomendados para madeiras de maior densidade, pois o seu formato, com saliências dispostas entre 30 e 70°, facilita a sua inserção. Apesar de possuírem uma superfície de fricção maior do que os pregos de haste lisa, não foi verificada uma grande superioridade na sua resistência ao arranquio (BLASS e FELLMOSE, 2004).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações pregadas podem se romper por plastificação dos pregos ou por ruptura da madeira, que pode ocorrer por embutimento, cisalhamento ou fendilhamento. É comum que o rompimento da ligação aconteça com diversos tipos de rupturas ocorrendo concomitantemente. A plastificação dos pregos indica subdimensionamento ou número de pregos inadequado, enquanto a ruptura na madeira indica eficiência da ligação pregada. Diversos estudos têm demonstrado que painéis com conexões metálicas possuem bom desempenho e longa durabilidade em serviço na construção civil:

Derikvand et al. (2019) utilizaram madeira das espécies *Eucalyptus nitens* e *Eucalyptus globulus*, que são predominantemente utilizadas para produção de cavacos para fins energéticos, na fabricação de painéis de NLT. Os painéis foram submetidos a ensaios vibracionais e de flexão e os autores concluíram que as duas espécies demonstraram desempenho suficientes para fabricação de produtos estruturais, destinados para uso como pisos, com alto valor agregado.

Hosseinzadeh et al. (2020), compararam o desempenho de painéis de CLT e NCLT confeccionadas com madeira de *Abies sp.*, utilizando adesivos à base de poliuretano e pregos de haste lisa, respectivamente. Os painéis foram submetidos aos ensaios de flexão de quatro pontos, para cálculo dos módulos de elasticidade e de ruptura, e flexão de três pontos, para cálculo do cisalhamento. Os autores não encontraram diferenças significativas entre o desempenho dos dois tipos de painéis, confirmando a viabilidade da técnica de confecção de painéis utilizando pregos.

Zhang et al. (2020) testaram painéis de NCLT com diferentes tipos de conectores metálicos (pregos de haste lisa, pregos anelados e parafusos), ângulo de incidência dos conectores, número de conectores e número de camadas. Os resultados demonstraram que o modo de falha dos painéis está diretamente ligado aos diferentes tratamentos, mas de uma forma geral, os painéis de NCLT apresentaram excelentes desempenhos em flexão, indicando o seu potencial como material sustentável e resiliente para a construção de estruturas leves.

Do ponto de vista ambiental, o uso de pregos de aço ou alumínio evita a emissão de gases tóxicos e de riscos à saúde. Por outro lado, por se tratar de recursos minerais não renováveis, a extração destes minerais gera impactos ambientais diretos nas jazidas, além de uma grande emissão de carbono durante o seu beneficiamento.

2.3. Madeira Lamelada Cruzada Cavilhada (DCLT)

Apesar do uso de cavilhas na construção civil ser antiga, os painéis de madeira laminada cruzada cavilhada, conhecidas em inglês por *dowelled cross-laminated timber* (DCLT) são uma invenção recente, tendo sido patenteados em 1998 pela empresa Thoma Holz100. Assim como na tecnologia de CLT, os painéis são formados por camadas ortogonais de lamelas de madeiras, em geral, de coníferas, unidas por cavilhas de madeiras de folhosas com alta densidade (Figura 9). De acordo com a sua aplicação na construção civil, as espessuras de cada camada de lamelas podem variar, mas sempre mantendo a simetria. Por não possuírem conexões metálicas, os painéis de DCLT são facilmente beneficiados utilizando equipamentos com CNC.



Figura 9. Painel de madeira lamelada cavilhada (DCLT) (THOMA HOLZ100, 2012).

As cavilhas são pinos cilíndricos, lisos ou estriados, confeccionadas com madeira “clear” (grã reta, sem nós, rachaduras ou outros defeitos), de alta densidade, para unir duas ou mais peças de madeira. Apesar de ser uma das técnicas de carpintaria mais tradicionais, durante muito tempo o uso de cavilhas foi deixado de lado. Em anos recentes, a pesquisa a respeito da sua aplicação para conexão de elementos estruturais em madeira teve um aumento substancial devido ao seu baixo custo, impacto ambiental positivo, alta resistência, conexões justas e melhor reciclabilidade (GUAN et al., 2010).

Para uso estrutural, são consideradas apenas cavilhas com diâmetro de 16 mm, 18 mm e 20 mm (ABNT, 2022). Para inseri-las nos painéis, é necessário a execução de pré-furos com a mesma dimensão (STRUCTURECRAFT, 2017). No momento da inserção, as cavilhas devem estar com teor de umidade de aproximadamente 5-8% e os painéis em 10-15%, dessa forma, ao equilibrarem sua umidade com o painel e ambiente, as cavilhas incham formando uma junção sob fricção, dando origem a um painel que dispensa o uso de adesivos ou pregos (BUCK et al., 2018; CWC, 2017; RAMAGE et al., 2017).

Zhu et al. (2017) variaram o teor de umidade das cavilhas de madeira (2% e 12%) e do substrato onde foram inseridas (2%, 7% e 12%), concluindo que a resistência ao arranquio é determinada pela umidade da cavilha, sendo o teor de umidade do substrato desprezível. Kanazawa et al. (2005) obtiveram resultados similares onde as cavilhas com menor teor de umidade (2%) obtiveram resistência ao arranquio 57,66% maior do que cavilhas não condicionadas, com maior teor de umidade. O autor concluiu que o inchamento da cavilha ao absorver umidade do ambiente após a sua aplicação é o responsável pela maior resistência. Esta conclusão também foi obtida por Pizzi et al. (2006).

Alguns fabricantes utilizam equipamentos hidráulicos para a inserção de cavilhas de dimensões ligeiramente maiores do que os furos. A compressão que as cavilhas sofrem nesse processo garante a rigidez dos encaixes (THOMA, 2012). A forma mais sofisticada de fixar as cavilhas é pelo processo de “solda”, onde as cavilhas são inseridas em movimento de rotação, e as temperaturas elevadas decorrentes de fricção causam o derretimento da lignina, gerando uma conexão extremamente rígida (O’LOINSIGH et al., 2012).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações cavilhadas podem se romper por flexão e esmagamento das cavilhas ou por ruptura da madeira, que pode ocorrer por embutimento, cisalhamento ou fendilhamento. A flexão ou esmagamento das cavilhas indica subdimensionamento ou número de cavilhas inadequado, enquanto a ruptura na madeira indica eficiência da ligação.

Pelo fato de ser praticamente 100% madeira, com exceção dos painéis que utilizam uma mínima quantidade de adesivos nos *finger joints* para união de topo das lamelas, a tecnologia DCLT tem despertado muito interesse tanto na Europa como na América do Norte (GONG, 2019). No entanto, apenas a empresa Thoma Holz100 possui produção comercial deste tipo de painel, na Áustria e no Canadá.

O número de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e caracterização de produtos engenheirados conectados por cavilhas ainda é limitado, no entanto os resultados parecem promissores: O’Loinsigh et al. (2012) testaram a resistência à flexão de vigas com lamelas paralelas conectadas por cavilhas soldadas. Os autores concluíram que cavilhas oferecem potencial como sistemas para suporte de cargas em aplicações estruturais, além de possuir características ambientalmente amigáveis.

Plowas et al. (2015) avaliaram o potencial de painéis de lamelas paralelas, unidos por cavilhas, confeccionados com madeira de espécies do gênero *Larix* para uso como pisos. Além de obter resultados positivos a respeito das propriedades mecânicas, os painéis também apresentaram excelentes desempenhos em avaliações pós-ocupação.

Dourado et al. (2019) manufacturaram e testaram vigas conectadas por cavilhas de madeiras utilizando diferentes ângulos de inserção. Os resultados demonstraram que o ângulo de inserção não teve uma influência substancial na rigidez das vigas. A rigidez na flexão e carga de ruptura dos painéis cavilhados corresponderam a 54% e 81%, respectivamente, de uma viga similar confeccionada com adesivo.

Sotayo et al. (2020) manufacturaram e testaram vigas de lamelas paralelas e painéis de lamelas cruzadas, conectadas por cavilhas de madeiras, utilizando diferentes arranjos entre as lamelas e cavilhas. Apesar da resistência mecânica das vigas e dos painéis DCLT fabricados ter ficado consideravelmente abaixo de valores encontrados para vigas e painéis de dimensões semelhantes unidas por adesivos, a pesquisa trouxe importantes conclusões: cavilhas com maior diâmetro e em maior número geraram um incremento no módulo de elasticidade; o ângulo de inserção das cavilhas não afetou a resistência mecânica de forma significativa; e as propriedades estruturais das vigas e lamelas foram mais influenciadas pela variação de espécies e resistência das lamelas do que das cavilhas. Os autores vincularam o baixo desempenho mecânico a defeitos na madeira, sugerindo que uma classificação visual mais rigorosa poderia melhorar as propriedades das vigas e painéis cavilhados.

Do ponto de vista ambiental, o uso de cavilhas para a ligação das lamelas em painéis se apresenta como a melhor alternativa, pois a sua produção não utiliza produtos tóxicos, recursos não renováveis ou de difícil disposição final. Por outro lado, a indústria dedicada a painéis

cavilhados depende de duas fontes de suprimento distintas, madeiras de baixa densidade para lamelas e de alta densidade para as cavilhas, e precisa de maquinário específico para a confecção e inserção das cavilhas, o que aumenta consideravelmente o investimento inicial em infraestrutura.

3. EXPERIÊNCIAS DE SUCESSO COM CLT E DEMAIS PRODUTOS ENGENHEIRADOS

A tecnologia dos painéis de CLT foi patenteada na Áustria nos meados da década de 1990 (BUCK e HAGMAN, 2018). Segundo Lehmann (2012), não se trata apenas de um produto, mas sim de um sistema construtivo. Em função do seu baixo peso e facilidade de montagem atribuída ao alto grau de pré-fabricação, a execução dos projetos se torna mais rápida, sendo resumida a alocação e conexões entre painéis (JELEC et al., 2018). Além disso, os painéis possuem bom isolamento térmico, acústico e resistência a incêndios (SHARIFNIA e HINDMAN, 2017), tornando o CLT uma opção viável em diferentes tipos de construções como escritórios, edifícios comerciais, repartições públicas e complexos residenciais de múltiplos andares (HASHEMI e QUENNEVILLE, 2020). Pelo fato de a madeira possuir um comportamento mais fluido do que o concreto, as propriedades destes painéis têm sido reconhecidas em países expostos a frequentes abalos sísmicos como o Japão, China, Nova Zelândia e Turquia (BRANDNER, 2013; BIRINCI et al., 2020). O volume de produção anual global tem tido aumentos exponenciais, de 50 mil m³ em 2000 para 625 mil m³ em 2014 e um esperado de três milhões de m³ em 2025 (DUGMORE et al., 2019).

Enquanto os países Europeus e da América do Norte já assimilaram o uso dos painéis e produtos engenheirados na construção civil e inclusive “disputam” pelo título de “maior prédio de madeira do mundo”, a América Latina, em especial o Brasil, ainda está na fase inicial da adoção das tecnologias de construção com madeira massiva. Abaixo seguem alguns exemplos emblemáticos de edifícios construídos em madeira:

Edifício Treet, Bergen, Noruega (2015) – Prédio residencial de 62 apartamentos com 14 andares e aproximadamente 50 metros de altura. Na época, foi considerado o prédio em madeira mais alto do mundo. O seu subsolo foi construído em concreto e todos os demais andares em madeira. Sua estrutura é formada por treliças, vigas e colunas de madeira laminada e CLT para paredes e pisos.

Edifício T3, Minneapolis, EUA (2016) - Prédio de escritórios e comércio, com sete andares, sendo o primeiro andar em concreto e os demais em madeira laminada colada e pregada. Foi o primeiro prédio moderno de madeira a ser construído nos Estados Unidos em mais de 100 anos, e na ocasião de sua inauguração, era o maior da América do Norte.

Edifício Dalston Works, Londres, Inglaterra (2017) - O prédio de 121 apartamentos foi, na ocasião de sua inauguração, o maior feito inteiramente de CLT no mundo, tendo utilizado 4.649 metros cúbicos de CLT (Figura 10A). Em função de seu baixo peso, estimado em 20% de um prédio de concreto, foi possível aumentar a altura do prédio acima dos padrões estimados para o tipo de terreno onde se encontra.

Edifício Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Canadá (2017) – Primeiro prédio híbrido com mais de 14 andares (Figura 10B). Tem aproximadamente 53 metros de altura com 18 andares, onde moram aproximadamente 400 alunos. Com exceção do primeiro andar construído em concreto, os demais andares são compostos de painéis de CLT e vigas laminadas e 70% da fachada é composta de madeira. Foi estimada uma redução de 2432 toneladas de emissões de dióxido de carbono quando comparado a um projeto convencional de concreto e aço. O projeto também evidenciou outra vantagem do CLT: a maior rapidez na construção. Erguido a um ritmo de dois andares por semana, o prédio foi concluído quatro meses antes do período convencional para edifícios de seu porte.

Edifício Mjøstårnet, Brumunddal, Noruega (2022) – Com 18 andares e 85 metros de altura, é atualmente o prédio em madeira mais alto do mundo (Figura 10C). O prédio possui restaurantes, escritórios, quartos de hotel e apartamentos. Sua estrutura é formada por treliças, vigas e colunas de madeira laminada e CLT para paredes e pisos, inclusive no vão dos elevadores e escadas.



Figura 10. Edifícios confeccionados utilizando produtos engenheirados de madeira: **(A)** Dalston Works, Londres, Inglaterra (WAUGHTHISTLETON, 2023); **(B)** Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Canadá (STRUCTURELAM, 2022); **(C)** Mjøstårnet, Brumunddal, Noruega (CTBUH, 2023).

Na América Latina, o uso de CLT foi registrado apenas no Uruguai e Brasil. As primeiras experiências com o uso de CLT no Uruguai, foram trabalhos experimentais para construção de pontes (BAÑO et al., 2016) e casas populares (BAÑO et al., 2017). Em 2018 foi construído um complexo de seis edifícios de três andares e 1800 m² para uma cadeia de hotéis, no balneário José Ignacio. Foi um dos primeiros edifícios da América Latina, construído em poucos meses com a utilização de 504 metros cúbicos de madeira laminada importada da Itália. Além dessas experiências, em 2022, foi fundada no departamento de Tacuarembó a companhia *Arboreal*. A empresa comprou uma serraria de grande porte que está sendo adaptada para a produção de painéis de CLT a partir da madeira de árvores do gênero *Pinus*, oriundos da silvicultura.

No Brasil, a fabricação de CLT se iniciou em 2012 com a *Crosslam*. Situada no interior do estado de São Paulo, a empresa fabrica painéis a partir da madeira de *Pinus*, que têm sido utilizados para construções pontuais, em pequena escala. Segundo Oliveira (2018), no ano de 2018 havia 31 construções no Brasil que utilizaram painéis de CLT de forma integral ou parcial. No entanto, nenhuma das obras relacionadas em seu estudo possuía mais de dois pisos e que 58% destas construções eram residências unifamiliares, evidenciando que o uso da tecnologia pelo setor da construção civil ainda estava aquém de seu potencial.

Em dezembro de 2020 foi inaugurado o primeiro prédio em CLT, na Avenida Brigadeiro Faria Lima, São Paulo. O projeto de quatro pavimentos possui 1.500 m² e foi desenvolvido para ser um ponto comercial de uma marca brasileira de chocolates. Os painéis de CLT utilizados na obra foram importados da Áustria enquanto as vigas de madeira laminada colada, utilizadas como pilares e vigas, foram de produção nacional.

No ano de 2022, foi inaugurada a fábrica da empresa *Urbem*. Localizada próxima a Curitiba, Paraná, a empresa pretende produzir painéis de CLT, vigas e pilares de MLC (madeira lamelada colada) e S4S Timber Class (madeira serrada classificada), com capacidade produtiva de 100 mil m³/ano, equivalente a 500 mil m² em área construída.

4. USO DE ESPÉCIES FOLHOSAS NATIVAS

A produção de CLT ainda está focada na Europa central (onde foi desenvolvido) e na América do Norte, utilizando quase que exclusivamente madeiras de coníferas, com destaque para as espécies *Picea abies*, *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Larix decidua*, *Pseudotsuga menziesii* e *Larix occidentalis* (BRANDNER et al., 2013). No entanto, acredita-se que a maior parte do crescimento na próxima década ocorrerá fora dessa região. Com a descentralização da produção, têm surgido o interesse em utilizar recursos madeireiros locais para a confecção de painéis de CLT, em especial, as espécies folhosas (SRIVARO et al., 2020).

Entre os motivos deste interesse, podem ser mencionados: a falta de espécies de coníferas em alguns países, a mudança de composição das florestas nativas (particularmente na Europa) e o desejo de se utilizar madeiras subutilizadas ou de baixo valor de mercado (ESPINOZA e BUEHLMANN, 2018). Segundo Crovella et al. (2019), em função da sua natureza engenheirada, painéis de CLT podem ser um excelente mercado para madeira de baixo valor (espécies menos conhecidas, árvores doentes, árvores infestadas e madeira de classes inferiores). No entanto, quando as análises da literatura são comparadas, pode-se observar que cada espécie local, usada para a confecção de CLT, obteve desempenho mecânico distinto (BIRINCI et al., 2020), reforçando a necessidade de aprofundar os estudos. Entre as pesquisas que buscaram avaliar o potencial de folhosas para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada podemos destacar:

Mohamadzadeh e Hindman (2015) avaliaram as propriedades mecânicas de painéis de CLT confeccionados com madeira de *Liriodendron tulipifera*, uma das espécies mais abundantes dos Estados Unidos (cerca de 10% do estoque), obtendo resultados de rigidez e resistência em flexão 20% superiores aos encontrados para coníferas.

Näher et al. (2015) investigaram o uso potencial da madeira de *Fagus sylvatica*, espécie folhosa dominante nas florestas suíças (18% do total inventariado) mas utilizada apenas como lenha, para a fabricação de vigas lameladas e CLT. Os estudos demonstraram grande potencial devido ao fato das vigas e painéis necessitarem de um menor volume de madeira para atingir determinada resistência mecânica, quando comparados às vigas e painéis confeccionados com madeiras de coníferas.

Derikvand et al. (2019) utilizaram madeira das espécies *Eucalyptus nitens* e *Eucalyptus globulus* de plantios na Austrália, para a fabricação de painéis pregados com lamelas paralelas, obtendo resultados superiores a produtos engenheirados já disponíveis no mercado.

Crovella et al. (2019) testaram a madeira de *Fraxinus americana* e *Acer rubrum* para a confecção de CLT, comparando os resultados com painéis de *Pinus strobus*. As duas espécies folhosas obtiveram resultados superiores e se enquadraram na classe V2 da norma ANSI/APA PRG 320 (2028). A espécie *Pinus strobus* não atingiu os requisitos exigidos.

Além dos trabalhos científicos, o Serviço Florestal Americano tem financiado diversos projetos para explorar a viabilidade de fabricar CLT com madeira de baixo valor ou de classes de resistência inferiores, a exemplo dos gêneros: *Fraxinus*, *Carya*, *Quercus* e *Acer* (BRINDLEY, 2017).

No Brasil, diversos pesquisadores também se dedicaram a testar espécies nativas na fabricação de produtos engenheirados, como vigas de madeira laminada colada e vigas com perfil “I”. Apesar das pesquisas indicarem bons resultados, estes ainda não foram assimilados pelas empresas brasileiras. Entre os diversos estudos, podemos destacar:

Terezo e Szücs (2010), analisaram o desempenho de vigas de madeira laminada colada (MLC) com *Schizolobium amazonicum* empregando os adesivos a base de resorcinol formaldeído e de emulsão polimerizada com isocianato. Verificaram que os adesivos tiveram desempenhos equivalentes e que é possível recomendar o uso desta espécie para a fabricação de vigas em MLC, com critérios de cálculo da classe C-20 de resistência da NBR 7190 (ABNT, 2022), tendo desempenho compatível com vigas de madeira serrada.

Teles et al. (2010) também confeccionaram vigas de MLC, usando madeira de *Sextonia rubra* e adesivo resorcinol formaldeído. A qualidade da adesão foi considerada satisfatória, com baixa ocorrência de cisalhamento na linha de cola e a madeira foi considerada apta para a produção das vigas.

Zangiácomo et al. (2017) testaram a madeira de *Erismia uncinatum*, *Bertholletia excelsa*, *Xylopia sp.* e *Erismia sp.* para a confecção de vigas de MLC utilizando adesivos Cascophen e a base de óleo de mamona, com pressões distintas. Os autores concluíram que os adesivos e as

pressões não geraram diferenças significativas no desempenho das vigas, no entanto, *Erisma sp.* obteve os melhores resultados nos ensaios mecânicos, quando comparado às demais espécies.

Campos et al. (2012) testaram as madeiras de *Simarouba amara* e *Cariniana micrantha* como flanges para a fabricação de vigas com perfil em “I”. O desempenho de ambas as espécies foi considerado satisfatório, demonstrando potencial, no entanto, as vigas confeccionadas com *Cariniana micrantha* (de maior densidade), obtiveram valores de resistência mecânica mais elevados. De forma similar, Shiba et al. (2018) avaliaram a resistência de vigas com perfil “I” com flanges confeccionadas com madeira de *Micropholis velunosa*, *Pinus sp.* e com ambas as espécies. Apesar de não ter havido uma boa interação entre a espécie amazônica e o adesivo utilizado, suas vigas apresentaram resultados superiores aos obtidos para as vigas de *Pinus sp.* As vigas mistas obtiveram resultados intermediários.

Jelec et al. (2018) mencionam que um número limitado de ensaios pontuais com a madeira de folhosas demonstraram um grande potencial para sua aplicação prática. Devido a propriedades mecânicas superiores de sua madeira, o CLT de folhosas poderá propiciar novas soluções para desafios da arquitetura e engenharia civil como vãos e cargas maiores utilizando seções reduzidas (ESPINOZA e BUEHLMANN, 2018). O CLT de folhosas também poderá ter um impacto positivo nas atividades de manejo florestal e serrarias, ao abrir um novo mercado consumidor de madeira. Brandner (2013) reforça esta ideia afirmando que espécies nativas podem ser utilizadas de forma sustentável gerando a valorização regional que pode levar ao estabelecimento global dos produtos engenheirados, com a consequente criação de linhas de produção de pequena e média escala, assim como grandes empresas.

5. NORMAS E ENSAIOS

A construção civil com CLT teve um grande avanço no ano de 2012, após a *American National Standards Institute* (ANSI) e *The Engineered Wood Association* (APA) publicarem a primeira versão da norma conjunta PRG 320. A norma definiu especificações técnicas e métodos de ensaio para painéis de CLT manufaturados a partir de madeira sólida ou produtos engenheirados de madeira (*Structural Composite Lumber*), de espécies coníferas norte-americanas, para uso em aplicações da construção civil.

Os métodos de ensaios fazem referência a normas da *American Society for Testing and Materials*-ASTM, em especial a D198 (ASTM, 2003). Dentre os ensaios apresentados, dois são considerados obrigatórios para a caracterização e avaliação de painéis de CLT, sendo eles: (i)

ensaio de flexão estática de quatro pontos na posição horizontal (*flatwise*), nas direções de maior e menor resistência, para determinação da rigidez e resistência do painel; (ii) ensaio de flexão estática de três pontos na posição horizontal (*flatwise*), nas direções de maior e menor resistência, para determinação da tensão de cisalhamento. Com base na composição de espécies utilizadas na fabricação dos painéis de CLT e classificação dada às lamelas: “*stress rated*” (E) ou visual (V), a norma estabelece categorias com os seus respectivos valores característicos de desempenho, conforme tabela 1.

Tabela 1. Valores de desempenho para as diferentes categorias de painéis de CLT apresentados na norma PRG 320 (ANSI/APA, 2019).

Categoria	Sentido de Maior Resistência (MPa)			Sentido de Menor Resistência (MPa)		
	f_b	$E^{(d)}$	f_v	f_b	$E^{(d)}$	f_v
E1	28,2	11.700	1,5	7,0	9.000	1,5
E2	23,9	10.300	1,9	4,6	10.000	1,9
E3	17,4	8.300	1,3	4,5	6.500	1,3
E5	23,9	10.300	1,6	7,0	10.000	1,6
V1	10,0	11.000	1,9	4,6	10.000	1,9
V2	11,8	9.500	1,5	7,0	9.000	1,5
V5	11,0	11.000	1,6	7,0	10.000	1,6

Sendo, f_b : resistência à flexão; E : módulo de elasticidade; f_v : tensão de cisalhamento.

Pelo fato de não existirem normas específicas, a norma publicada pela ANSI/APA tem sido utilizada como um parâmetro para testar e avaliar o desempenho estrutural de painéis de CLT confeccionados com madeiras de folhosas (MOHAMADZADEH e HINDMAN, 2015), assim como painéis de NCLT e DCLT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. **PRG 320:** Standard for Performance-rated Cross Laminated Timber. Tacoma, WA: APA - The Engineered Wood Association. Tacoma, 65 p. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D-198:** Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. West Conshohocken, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107 p. 2022.

ATAEI, A.; CHINIFORUSH, A.; BRADFORD, M.; VALIPOUR, H. Cyclic behavior of bolt and screw shear connectors in steel-timber composite (STC) beams. **J. Constr. Steel Res.** 161, p. 328–340, 2019.

AYDIN, I. Activation of wood surfaces for glue bonds by mechanical pre-treatment and its effects on some properties of veneer surfaces and plywood panels. **Applied Surface Science.** 233 (1–4), p. 268-274, 2004.

BAÑO, V. MAZZEY, C., VEGA, A. GODOY, D.; MOYA., L. Fabricación de un prototipo de puente vehicular a partir del desarrollo de productos de ingeniería de madera de pino uruguayo. II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera (CLEM)- II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD). **Anais.** 2017

BAÑO, V.; GODOY, D.; VEGA, A. Experimental and numerical evaluation of cross-laminated timber (CLT) panels produced with pine timber from thinnings in Uruguay. WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering. **Anais.** 2016

BERNAL, R.A., CORADIN, V.T.R., CAMARGOS, J.A.A., COSTA, C. Wood anatomy of Lecythidaceae species called “Tauari”. **IAWA J.** 32, p. 97 – 112., 2011.

BIRINCI, A.U., ÖZTÜRK, H., DEMIRKIR, C.; ÇOLAKOĞLU G. Structural Performance Analysis of Cross Laminated Timber (CLT) Produced from Pine and Spruce Grown in Turkey. **J. Anatolian Env. and Anim. Sciences**, 5(5), p. 819-824, 2020.

BLASS, H. J., FELLMOSE, D. P. “Design of solid wood panels with cross layers”, In: **Proceedings WCTE 2004 - World Conference on Timber Engineering**, p. 543-548, 2004.

BRANDNER, R. Production and technology of cross laminated timber (CLT): State-of-the-art-report, Focus solid timber solutions - **European conference on cross laminated timber (CLT)**, Bath, p. 3-36, 2013.

BRANDNER, R., FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G.; THIEL A. et al, “Cross laminated timber (CLT): overview and development”, **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, pp. 331-351, Jan. 2016.

BRENEMAN S. Cross-Laminated Timber Structural Floor and Roof Design. **STRUCTURE Magazine**, Estados Unidos, p. 12-15, Jun. 2016.

BRINDLEY C. First U.S. hardwood CLT project in development in Pallet Enterprise. **Industrial Reporting Inc.** 2017.

BUCK, D.; WANG, A.; HAGMAN, O.; GUSTAFSON, A. Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration. **BioResources** (2), 4633, 2016.

BUCK, D.; HAGMAN, O. “Production and In-Plane Compression Mechanics of Alternatively Angled Layered Cross-Laminated Timber.” **Bioresources** 13: 4029-4045, 2018.

CAMPOS, M.; DEL MENEZZI, C.; DE SOUZA, M. Flexural properties of wood I-beams flanged with tropical hardwoods. **Journal of Tropical Forest Science** 24(3): 358–367, 2012.

CANADIAN WOOD COUNCIL (CWC). **Wood Design Manual**. Ottawa, ON, Canada: Canadian Wood Council; 1486 p. 2017.

CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., PIMENTA, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivo de ureia-formaldeído e de taninos de casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden ou de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **RevistaÁrvore**, v.28, n.5, p.715-724, 2004.

CATENACCI, F. S.; SIMON, M. F. A checklist of Lecythidaceae in the upper Madeira River, Rondônia, Brazil with comments on diversity and conservation. **Brittonia** 69(4): 447–456, 2017.

CHANG, W. S., NEARCHOU, N. Hot-pressed dowels in bonded-in rod timber connections, **Wood Fiber Sci.** 47 (2) 199–208, 2015.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability**, 11, 1278, 2019.

CONNER, A.H. Wood: adhesives. In: Buschow KHJ, editor. **Encyclopedia of materials: science and technology**. USA: Elsevier Science; 2001.

CROSSLAM. Disponível em: <https://crosslam.com>. Acesso em 19/03/2022.

CROVELLA, P.; SMITH, W.; BARTCZAK, J. Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels, **Construction and Building Materials**, Volume 229, 2019.

COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT - CTBUH. **Buildings**. Disponível em: <https://www.skyscrapercenter.com/building/mjostarnet/26866>. Acesso em 19/07/2023.

CYSNEIROS, V. C.; PELISSARI, A. L.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SOUZA, L. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v.45, n.114, p.295-304, 2017.

DERIKVAND, M.; JIAO, H.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; CHAN, A.; NOLAN, G. Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. **Holz als Roh- und Werkstoff**. 77, 2019.

DOPPKE, T. Engineering a stronger nail. **American Fastener Journal**, Vol. 21:48-50, 2004.

DOURADO, N.; PEREIRA, F.; LOUSADA, J.; De MOURA, M. Experimental and numerical analyses of wood boards joining using wood-pin connectors, **Constr. Build. Mater.** 222, 556–565, 2019.

DUGMORE, M.; NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, C. B. Bonding Quality of Cross-Laminated Timber: Evaluation of Test Methods on Eucalyptus Grandis Panels, **Construction and Building Materials**, 211, 217-227, 2019.

ESPINOZA, O.; BUEHLMANN, U. Cross-Laminated Timber in the USA: Opportunity for Hardwoods? **Current Forestry Reports**, 4(1), 2018.

GAGNON, S. e PIRVU, C. Cross laminated timber (CLT) handbook. FPInnovations, Vancouver, Canada, 2011.

GONG, M. Lumber-Based Mass Timber Products in Construction. **Timber Buildings and Sustainability**. 10.5772, 2019.

GUAN, Z., KOMATSU, K., JUNG, K., KITAMORI, A. Structural characteristics of beam - column connections using compressed wood dowels and plates. In: **Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)**. Trentino (Italy). 2010.

HARTE, A. M. Mass timber—the emergence of a modern construction material, **J. Struct. Integr. Maint.** 2 (3), 121–132, 2017.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II: Parte I**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2004. 73p.

HASHEMI, A.; QUENNEVILLE, P. Seismic performance of timber structures using rocking walls with low damage hold-down connectors. **Structures** 27: 274-284, 2020.

HEINRICH H. **Wood adhesion and glued product**. Bruxelas: COST Action E13 WG; 2001.

HEMMILA, V., ADAMOPOULOS, S., KARLSSON, O., KUMAR, A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels—A Review, **RSC Adv.** 7 (61) (2017) 38604–38630.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, B.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber, **Wood Material Science and Engineering**, 2020.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fupef; 259p. 2005.

JELEČ, M., VAREVAC, D., RAJČIĆ, V. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report. **Gradevinar** 2/2018.

KNORZ, M., NEUHAEUSER, E., TORNIO, S., VAN DE KUILEN, J. W. Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood–adhesive bonds. In **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 57: 40–48. 2015.

KANAZAWA, F.; PIZZI A.; PROPERZI, M.; DELMOTTE, L.; PICHELIN, F. Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. **J Adhes Sci Technology** Vol 19. 1025–1038, 2005.

LEGGATE, W.; MCGAVIN, R. L.; OUTHWAITE, A.; KUMAR, C.; FAIRCLOTH, A.; KNACKSTEDT, M. Influence of Mechanical Surface Preparation Methods on the Bonding of

Southern Pine and Spotted Gum: Tensile Shear Strength of Lap Joints. **BioResources**. Vol. 16 Issue 1, p46-61. 16p. 2021.

LEHMANN, S., Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems, **Sustainability Journal**, v. 4, n. 10, pp. 2707-2742, 2012.

LI, X.; ASHRAF, M.; SUBHANI, M.; GHABRAIE, K.; LI, H.; KREMER, P. Withdrawal resistance of self-tapping screws inserted on the narrow face of cross laminated timber made from Radiata Pine. *Structures* 31, 1130–1140, 2021.

LOBÃO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 194-200, 2006.

LUSZCKI, G. E.; CLAPP, J. D.; DAVIDS, W. G.; LOPEZ-ANIDO, R. Withdrawal capacity of plain, annular shank, and helical shank nail fasteners in Spruce-Pine-Fir lumber, **For. Prod. J.** 63 (5-6), 213–220, 2013.

MOHAMADZADEH, M.; HINDMAN, D. Mechanical Performance of Yellow-Poplar Cross Laminated Timber, **Rep. No. CE/VPI-ST-15-13.** 44, 2015.

MORI, S. A.; SMITH, N. P.; CORNEJO, X.; PRANCE, G. T. **The Lecythydaceae Pages.** The New York Botanical Garden, Bronx, New York. 2010.

NÄHER T., NEUBAUERLETSCH B.; MÜLLER A. Grundlagen zum Marktpotential für verklebte Laubholzprodukte mit Fokus Buchen-Brettschichtholz, in Institut für Holzbau, **Tragwerke und Architektur.** Bern University of Applied Sciences: Bern, Switzerland p 67, 2015.

NAKAMURA, A. P. D.; DEL MENEZZI, C. H. S.; WIMMER, P.; TEIXEIRA, D. E. Citric acid as biobased adhesive for particleboards produced with coconut fibers (*Cocos nucifera* L.). In: **III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**, 2017.

OGUNRINDE, O.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; LI, L. Flexural Properties of Downscaled Dowel-Type-Fastener Laminated Timber. **International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies** 5.11: 98-104, 2019.

OLIVEIRA, G.L. Cross Laminated Timber no Brasil: processo construtivo e desempenho. **Dissertação de Mestrado.** Universidade de São Paulo. São Paulo, 192 p. 2018.

O'LOINSIGH, C.; OUDJENE, M.; AIT-AIDER, H.; FANNING, P.; PIZZI, A.; SHOTTON, E.; MEGHLAT, E. M. Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels. **Constr. Build. Mater.** 36, 245–250, 2012.

PANG, S. J.; KIM, K. M.; PARK, S. H.; LEE, S. J. Bending Behavior of Nailed-Jointed Cross-Laminated Timber Loaded Perpendicular to Plane. **Journal of the Korean Wood Science and Technology.** 45(6): 728-736, 2017.

PEDROSA, A. L. **Desempenho estrutural de vigas “I” constituídas por PLP e compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden e OSB de *Pinus* spp.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003, 104p.

PEREIRA, M. C. de M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons. **Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

PEREIRA, M.C.M.; MINARI, V.H.; SOHIER, L.; DESCAMPS, T.; CALIL JUNIOR, C. Comparativo da rigidez e ruptura de dois painéis estruturais de madeira maciça lamelar unida por cavilhas. In: 4º. **Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas**. Montivideo, Uruguay. 2019

PIZZI, A.; DESPRES A.; MANSOURI, H. R.; LEBAN, J. M.; RIGOLET, S. Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, 13C-NMR and water resistance. **J Adhes Sci Technology**, Vol. 20: 427–436, 2006.

PIMENTEL, T. S., WIMMER, P., CARVALHO, H. R., ROITMAN, L., e DEL MENEZZI, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, 49(132), e3753. (2021). <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19>

PLOWAS, W.; BELL, T.; HAIRSTANS, R.; WILLIAMSON, J. **Understanding the Compatibility of UK Resource for Dowel Laminated Timber Construction**, Edinburgh Napier University, Scotland, 2015.

POCIUS, A. V. **Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction**. 2. ed. Munich (Alemanha): Hanser. ISBN 3446217312. 319 p. 2002.

PROCÓPIO, L. C. e SECCO, R. S. A importância da identificação botânica nos inventários florestais: o exemplo do “tauari” (Couratari spp. E Cariniana spp. – Lecythidaceae) em duas áreas manejadas no Estado do Pará. **Acta Amazonica** 38(1): 31-44, 2008.

PROCÓPIO, L. C., GAYOT, M., SIST, P., e FERRAZ, I. D. K. As espécies de tauari (Lecythidaceae) em florestas de terra firme da Amazônia: padrões de distribuição geográfica, abundâncias e implicações para a conservação. **Acta Botanica Brasilica**, 24(4), 883–897, 2010.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D. The wood from the trees: the use of timber in construction, **Renew. Sustain. Energy Rev.** 68, 333–359, 2017.

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G.; BENDER, D. A. Withdrawal strength of threaded nails, **J. Struct. Eng.** 127 (4) 442-449, 2001.

REFLORA, 2018. Lecythidaceae in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB36625>>. Acesso em: 21 de setembro de 2018.

RENZO, R. **Painel estrutural de lâmina paralelas (PLP) de Eucalyptus grandis utilizando adesivo resorcinólico, taninos e poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2008. 115f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2008.

SANTOS, M. C.; DEL MENEZZI, C. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta** 40, 2010.

SECRETARIA DE ESTADO DE FINANÇAS – SEFIN, Governo do Estado de Rondônia. Instrução Normativa nº 44/2023/GAB/CRE. Disponível em: <https://legislacao.sefin.ro.gov.br/textoLegislacao.jsp?texto=2043>. Acesso em 29/08/2023.

SECRETARIA DE FAZENDA DO ESTADO DO AMAZONAS. Resolução nº 006/2021-GSEFAZ. Disponível em: https://online.sefaz.am.gov.br/silt/Normas/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Estadual/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20GSEFAZ/Ano%202021/RG%20006_21.htm. Acesso em 29/08/2023.

SISTEMA DE CADEIA DE CUSTÓDIA/SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SCC/SFB. Acesso em: 21 agosto 2021.

SHARIFNIA, H.; HINDMAN, D. P. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers. **Construction and Building Materials**, 156, pp.314-320, 2017.

SHIBA, G. K.; DEL MENEZZI, C. H. S.; DE MELO, R. R.; SOUZA, M. R. Bending properties of wood i-joint made with pinus (*Pinus* sp.) and curupixá (*Micropholis venulosa*) flanges. **Journal of Tropical Forest Science** 30(3): 312–319, 2018.

SKULTETI, M. J.; BENDER, D. A.; WINSTORFER, S. G.; POLLOCK, D. G. Withdrawal strength of ring-shank nails embedded in southern pine lumber, *Trans. ASAE*, 40 (2) 451-456, 1997.

SMITH, N. P.; MORI, S. A.; PRNCE, G. T. Lecythidaceae. In: **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015.

SOTAYO, A; BRADLEY, D.; BATHER, M.; OUDJENE, M.; EL HOUJEYRI, I.; GUAN, Z. Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels. **Construction and Building Materials**. 259, 2020.

SRIVARO, S.; TOMAD, J.; SHI, J.; CAI, J. Characterization of Coconut (*Cocos Nucifera*) Trunk's Properties and Evaluation of its Suitability to be Used as Raw Material for Cross Laminated Timber Production. **Construction and Building Materials**, 254, 2020.

STRUCTURECRAFT. **Dowel Laminated Timber—Mass Timber Design Guide**, Ver. 3. Abbotsford, BC, Canada: StructureCraft; 24 p. 2017.

STRUCTURELAM. **Projects**. Disponível em: <https://mercermasstimber.com/projects>. Acesso em 20/06/2020.

SZÜCS, C.A. **Aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado-colado**. Florianópolis: UFSC, Departamento de Engenharia Civil, 1992.

TELES, R. F.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R.; SOUZA, F. Effect of nondestructive testing of laminations on the bending properties of glulam beam made from louro vermelho (*Sextonia rubra*). **Cerne**, 16, 77-85, 2010.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas de madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, 87, 471- 480, 2010.

THEILEN, R. D.; BENDER, D.A.; POLLOCK, D.; WINISTORFER, S. G. Lateral resistance of ring-shank nail connections in southern pine lumber. **Faculty publications** - Department of Mechanical and Civil Engineering. Paper 32, 1998.

THOMA, 2012. **Parts catalogue system thoma Holz100**. Available at: https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2017/07/parts_catalog.pdf, 8th February 2019.

VELLA, R. **Improving the Adhesion of High-density Softwoods with Isocyanate Based Adhesives**. Master's Thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia. (2020).

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. In: **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Forest Products Laboratory, pp. 9-1 – 9-24, 1999.

VITAL, B. R.; Maciel, A. S.; Della Lucia, R.M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

WAUGHTHISTLETON. **News**. Disponível em: <https://waughthistleton.com/news/21/05/22/financial-times-use-clt-dalston-works/>. Acesso em 19/07/2023.

ZANGIÁCOMO, A. L.; BALANÇO, G. G.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Glued laminated timber produced with tropical Brazilian wood species. **British Journal of Applied Science e Technology**, Haryana, India, v. 23, n. 1, p. 1-12, 2017.

ZHANG, Y.; NEHDI, M.L.; GAO, X.; ZHANG, L. V. Flexural Performance of Novel Nail-Cross-Laminated Timber Composite Panels. **Applied Sciences**: 10(17):5983, 2020.

ZHU, X.; YI, S.; YING, G.; ZHAO, Y.; QIU, Y. Mechanical evaluation, and XRD/TG investigation on the properties of wooden dowel welding. **Journal of BioResources** Vol. 12(2): 3396-3412, 2017.

CAPÍTULO 1. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)*

* Parte dos dados apresentados neste capítulo foi publicada na revista *Scientia Forestalis* – DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19> - ISSN 2318-1222. Qualis CAPES B1 – dezembro de 2021.

1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia existem 390 bilhões de indivíduos arbóreos, com diâmetro a altura do peito superior a dez centímetros, pertencentes à aproximadamente 16 mil espécies (TER STEEGE et al., 2013). Dentro deste universo, a família Lecythidaceae se destaca pelo elevado número de espécies, cerca de 350 (TER STEEGE et al., 2006), e pelo grande número de indivíduos, especialmente na Amazônia Central (MORI et al., 2017). Segundo Prance e Mori (1979), a presença de Lecythidaceae é um indicativo de florestas preservadas ou levemente perturbadas.

No Brasil, diversas espécies de Lecythidaceae dos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari* são intensamente exploradas pela indústria madeireira, muitas vezes sob o mesmo nome comum (PROCÓPIO et al., 2010). Segundo informações do Sistema de Cadeia de Custódia do Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2022), entre as dez espécies florestais mais exploradas nos planos de manejo das concessões federais, duas pertencem à família, já tendo sido colhidos mais de 100 mil metros cúbicos de madeira nos estados do Pará e Rondônia entre os anos de 2015 e 2020.

Apesar da abundância nas florestas e do grande volume explorado, estas madeiras são comumente utilizadas para fabricação de produtos com baixo valor comercial, como cabos de vassouras, ferramentas e caixotaria. Entre os fatores responsáveis pela baixa valorização destas madeiras está a falta de conhecimento da potencialidade das características físicas e mecânicas da madeira que influenciam na qualidade e destinação do produto final, tais como cor, figura, trabalhabilidade, densidades, contrações e resistências mecânicas. A destinação de madeiras sem o devido conhecimento técnico leva a perda de eficiência ao longo do processo de beneficiamento e a resultados imprevisíveis no seu desempenho em serviço.

Além disso, existe a percepção de que a madeira das espécies de Lecythidaceae possui efeito abrasivo sobre as ferramentas de corte, atribuído à presença de sílica em sua estrutura. A sílica é um composto químico presente no solo que é absorvido pelas árvores e se deposita nas células procumbentes dos raios, na forma de corpos arredondados e amorfos, os quais aumentam de tamanho no sentido do alburno para o cerne (PANSWIN e DE ZEEUW, 1980). A

presença de depósitos minerais de silício é comumente encontrada em várias famílias de madeiras tropicais (RODRIGUES e SANTANA, 2005). Sua presença aumenta a resistência mecânica estrutural e diminui o ataque de insetos (GOMES et al., 2018), no entanto, exerce efeito abrasivo sobre as ferramentas de corte utilizadas para o beneficiamento da madeira, reduzindo a sua vida útil (SANTANA et al., 2013). Mesmo que em pequena quantidade, é prejudicial às propriedades de usinagem (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980), podendo inclusive inviabilizar a utilização da madeira (VASCONCELOS et al., 1993). O conhecimento prévio do teor de sílica existente em tais espécies é imprescindível ao desenvolvimento de melhores estratégias de processamento industrial da madeira, diminuindo os custos agregados ao produto (RODRIGUES e SANTANA, 2005).

Durante o ano de 2017, o Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) realizou uma coleta de madeira na Floresta Nacional de Jacundá, Rondônia. Dentre a madeira coletada, estavam aproximadamente três metros cúbicos de *Allantoma decandra*. Apesar de já existirem diversos estudos científicos dedicados a aspectos botânicos, ecológicos e fitogeográficos de *A. decandra* (PROCÓPIO et al., 2010; CATENACCI e SIMON, 2017; MORI et al., 2017) não se têm registros de uma caracterização físico-mecânica da madeira desta espécie ou sobre indicações de uso.

O objetivo deste capítulo foi realizar a caracterização tecnológica das principais propriedades da madeira de *A. decandra*, visando à geração de subsídios para indicações de beneficiamento e uso final de forma mais eficiente e rentável.

2. METODOLOGIA

2.1. Matéria Prima

Para este estudo foram utilizadas amostras de madeira de *Allantoma decandra* (Ducke) S.A.Mori, Y.Y.Huang & Prance, provenientes de dez árvores distintas. A espécie é conhecida popularmente por jequitibá, jequitibá-tauari, tauari, tauari-vermelho, cerú e xurú (REFLORA, 2022). No Brasil, é encontrada nos estados do Acre, Amazonas, Pará e Rondônia (SMITH, 2015), mas também pode ser encontrada na região amazônica da Colômbia e Peru (MORI et al., 2010). A espécie é caracterizada por árvores de grande porte, de dossel a emergente, podendo chegar a 40 metros de altura, com fuste cilíndrico e diâmetro a altura do peito entre 45 e 250 centímetros (PROCÓPIO e SECCO, 2008).

A madeira utilizada neste estudo é proveniente de árvores coletadas na Unidade de Manejo Florestal I (UMF I), da Floresta Nacional (FLONA) de Jacundá. Situada ao norte do estado de Rondônia (Figura 1), a FLONA localiza-se entre os municípios de Porto Velho e Candeias do Jamari. Foi criada em 2004 e possui aproximadamente 220 mil hectares, dos quais 112 mil foram destinados à realização de manejo florestal. A UMF I, onde as árvores foram coletadas, foi concedida a empresa Madeflona S.A. com sede no município de Itapuã do Oeste, Rondônia.

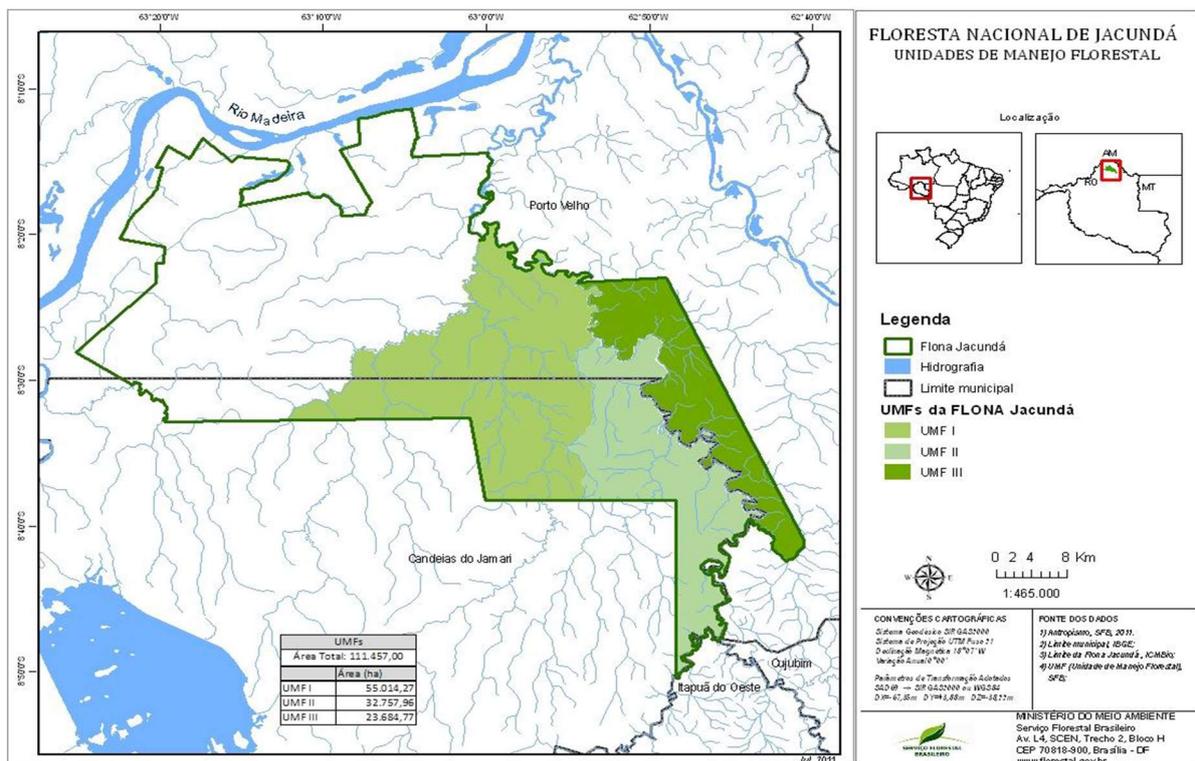


Figura 11. Localização das Unidades de Manejo Florestal da Floresta Nacional de Jacundá, Rondônia (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2012).

A escolha das árvores em campo foi feita buscando-se uma maior distribuição espacial, com objetivo de evitar indivíduos com genética e condições de sítio muito similares e, dessa forma, garantir uma maior representatividade da coleta. Na ocasião da derrubada, foram coletadas exsicatas, que foram enviadas para o Jardim Botânico do Rio de Janeiro, para confirmação da identificação da espécie. Ainda em campo, as árvores foram sectionadas em toras que a seguir, foram transportadas até a serraria da Madeflona S.A. para serem desdobradas em pranchas. Em seguida, a madeira foi transportada até as dependências do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) em Brasília, onde foi submetida

à análise de caracteres gerais, caracterização anatômica macroscópica, caracterização física e mecânica, ensaios de trabalhabilidade e avaliações para verificação da presença de sílica, conforme metodologias descritas a seguir.

2.2. Caracterização Geral e Anatômica

A descrição dos caracteres gerais e da anatomia da madeira de *A. decandra* foi realizada conforme metodologia da International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1964) e Coradin e Camargos (2002).

2.3. Caracterização Físico-mecânica

Para a caracterização física da madeira foram determinados: densidade básica (ρ), densidade aparente (ρ_{ap}), contrações: radial (E_1), tangencial (E_2) e volumétrica (ΔV) e o coeficiente anisotrópico (C.A.). Para a realização das medições foram confeccionados 10 corpos de prova (CPs) por árvore, com dimensões de 2 cm x 3 cm x 5 cm (tangencial, radial e longitudinal), totalizando 100 amostras para a espécie. Os ensaios foram realizados com base na metodologia da norma D-143 (ASTM, 2014).

Para a caracterização mecânica da madeira foram realizados confeccionados 20 CPs, sendo duas amostras de cada árvore, para os seguintes ensaios: flexão estática (50 mm x 50 mm x 760 mm) para determinação da resistência (f_b) e módulo de elasticidade (E_0), compressão paralela (50 mm x 50 mm x 200 mm) ($f_{c,0}$) e perpendicular às fibras (50 mm x 50 mm x 150 mm) ($f_{c,90}$), cisalhamento paralelo às fibras (50 mm x 50 mm x 650 mm) (f_v), fendilhamento (50 mm x 50 mm x 950 mm) (f_{s0}) e dureza Janka (50 mm x 50 mm x 150 mm) (f_H). Após a confecção, os CPs foram depositados numa sala de aclimatação com temperatura e umidade controladas (20 +/- 3°C e 65 +/- 1%), até a estabilização de sua umidade (aproximadamente 12%). Os ensaios mecânicos foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade de 600 kN, de marca Martins Campelo. Os acessórios, velocidades de ensaio, cálculos e descrição dos resultados foram realizados conforme procedimentos previstos na norma D-143 (ASTM, 2014). Os resultados dos ensaios foram avaliados por meio de estatística descritiva, determinando-se as médias, desvios padrão, coeficientes de variância além dos valores característicos conforme NBR 7190 (ABNT, 2022).

2.4. Trabalhabilidade

Para caracterizar a trabalhabilidade da madeira de *A. decandra* foram realizados os ensaios de: plaina, lixa, broca e torno, de acordo com a norma americana D-1666 (ASTM, 2022). Para os três primeiros ensaios foram confeccionados 50 CPs com dimensões 2 cm x 10 cm x 50 cm, sendo cinco amostras por árvore. Para o aplainamento das amostras foi utilizada uma plaina de desengrosso de quatro facas. As amostras foram passadas pelo equipamento até que toda a sua superfície tivesse sido aplainada. O ensaio de lixa foi feito utilizando uma lixadeira de cinta equipada inicialmente com uma lixa de grão 80 e, num segundo momento, com uma lixa grão 120. As amostras foram lixadas até que toda a sua superfície tivesse beneficiada de forma uniforme. Para o ensaio de broca foi utilizada uma furadeira vertical equipada com broca de 1 polegada.

Para a realização do ensaio de torneamento foram utilizados 10 CPs com dimensões de 2 cm x 2 cm x 15 cm. As amostras foram trabalhadas em um torno mecânico, com velocidade de aproximadamente 2500 RPM, utilizando uma faca com os desenhos e formas previstas pela norma. Os corpos de prova foram avaliados de forma visual e tátil por três especialistas, levando em conta a qualidade do acabamento e presença de defeitos (aspereza, grã felpuda, grã arrancada). A avaliação final se deu a partir da média das notas atribuídas pelos especialistas.

2.5. Presença de Sílica

Para a avaliação da presença de sílica na madeira, foi realizado o imageamento de dez amostras, sendo uma por árvore, com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Tabletop Microscope TM4000Plus da marca Hitachi com um aumento de 200 vezes.

Adicionalmente, foi utilizado o acessório Detector de Energia Dispersiva (EDS), que permite a identificação e a distribuição dos elementos químicos presentes em uma amostra, fornecendo informações qualitativas sobre a sua composição. O método usa um feixe de elétrons incidente sobre a amostra, gerando uma interação que produz raios-X característicos para cada elemento presente (GOLDSTEIN et al., 2017). Essa radiação é detectada e analisada pelo espectrômetro de energia dispersiva que determina quais elementos estão associados a cada padrão espectral (EGERTON, 2011).

3. RESULTADOS

As amostras de madeira avaliadas possuem coloração rosa-acinzentada, com cerne e albúrnio indistintos pela cor. A madeira não possui brilho nas superfícies longitudinais e os limites dos anéis de crescimento são pouco distintos, caracterizados por zonas fibrosas tangenciais mais escuras ou pela diminuição da frequência de faixas de parênquima. Sua figura tangencial é pouco destacada, em faixas longitudinais e em forma de “V”, devido ao parênquima axial das camadas de crescimento. Sua figura radial é pouco destacada, em faixas longitudinais, causadas pelas linhas vasculares nas camadas de crescimento (Figura 2).

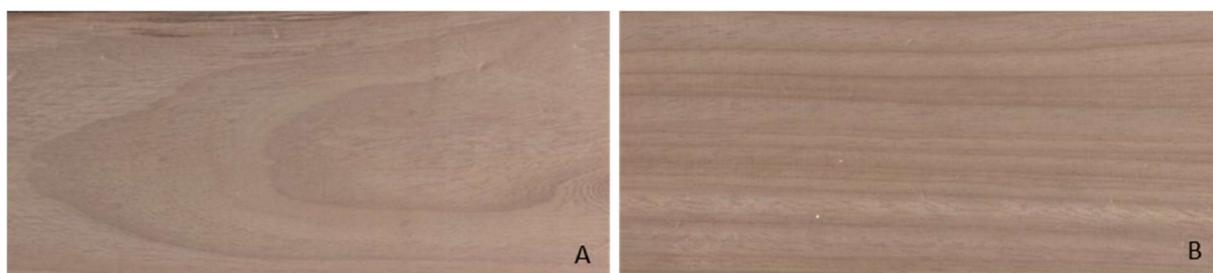


Figura 12. Vistas dos cortes da madeira de *Allantoma decandra*: (A) tangencial e (B) radial.

A madeira de *A. decandra* não possui gosto ou cheiro perceptíveis, sua grã é direita e a textura das fibras média, o que favorece o seu corte, beneficiamento e qualidade de acabamento. Conforme figura 3, possui vasos de diâmetro médio a grande; porosidade difusa; moderadamente numerosos; em proporções variáveis de vasos solitários e múltiplos; em grupos radiais curtos (de 2 a 4 vasos); dispostos em padrão não definido; de contorno circular a oval; parte dos vasos obstruídos por substância de cor esbranquiçada. Possui parênquima axial visível, em faixas reticuladas. Possui raios finos, baixos e pouco frequentes, visíveis nas superfícies transversal e tangencial, contrastados na superfície radial. Não possui estruturas estratificadas, estruturas secretoras ou variantes cambiais. Teste de cromazurol negativo.



Figura 13. Seções da madeira de *Allantoma decandra* com aumento de 10 vezes: (A) transversal, (B) tangencial e (C) radial.

A madeira apresentou densidade básica de 0,57 g/cm³ (Tabela 1), sendo classificada por Melo et al. (1990) e Coradin et al. (2010) como de média densidade. A densidade é reconhecidamente uma das propriedades que mais fornece informações a respeito das características da madeira, por estar relacionada com sua resistência e rigidez (Melo et al., 2010). O valor encontrado para densidade básica sugere que a madeira seja de fácil desdobro e possua resistências mecânicas medianas.

Tabela 1. Médias, Desvios Padrão e Coeficiente de Variação (C.V.) das propriedades físicas da madeira de *Allantoma decandra*.

Propriedade	Unidade	Média	Desvio Padrão	CV%
ρ_{bas}	(g/cm ³)	0,57	0,04	6,5
$\rho_{ap\ 12\%}$	(g/cm ³)	0,70	0,05	7,8
E_1	(%)	5,40	0,60	11,2
E_2	(%)	7,50	0,90	12,5
ΔV	(%)	12,80	1,40	11,3
C.A.	-	1,39	0,12	8,4

Onde, ρ : densidade Básica; ρ_{ap} : densidade aparente a 12%; E_1 : contração radial; E_2 : contração tangencial; ΔV : contração volumétrica; C.A.: coeficiente anisotrópico.

As densidades encontradas também indicam que a madeira possui porosidade e permeabilidade adequadas para serem coladas. Segundo Vital et al. (2006), as espécies folhosas apresentam maior dificuldade de colagem devido à sua constituição química e sua maior complexidade estrutural. No entanto, as madeiras menos densas (densidade básica < 0,7 g/cm³) também podem ser coladas satisfatoriamente (TEREZO e SZÜCS, 2010; SANTOS e DEL MENEZZI, 2010).

Conforme os valores apresentados na Tabela 1, a madeira de *A. decandra* apresentou contrações radial, tangencial e volumétrica de 5,4%; 7,5% e 12,8%, respectivamente. Segundo Melo e Camargos (2016), o valor de 12,8% classifica a madeira como de média contração, o que favorece o seu uso para confecção de produtos que não toleram grande variação dimensional. O coeficiente anisotrópico (relação entre a contração tangencial e radial) calculado para a madeira de *A. decandra* foi de 1,39. De acordo com Durlo e Marchiori (1992) é classificada como de excelente estabilidade dimensional, similar à madeira de espécies como cedro, sucupira e mogno, que segundo Oliveira et al. (2010), é considerada uma das madeiras de maior estabilidade dimensional existentes. É importante ressaltar que quanto menor o valor

da contração volumétrica e do coeficiente anisotrópico, menos fendilhamentos, rachaduras e empenamentos surgirão na madeira. A estabilidade dimensional é fundamental para a confecção de peças de precisão com encaixes (aberturas, portas, janelas etc.), em especial, em regiões com alta variação de umidade no ar.

Os valores encontrados para as propriedades mecânicas de *A. decandra* (Tabela 2) são condizentes com a densidade da madeira e similares a outras espécies da mesma família. Os coeficientes de variação encontrados estão dentro do esperado para testes de resistência mecânica. Visto que a norma ASTM D-143 não apresenta nenhuma forma de classificação das propriedades mecânicas da madeira, calculou-se os valores característicos para cada propriedade com objetivo de comparação com as classes de resistência apresentada pela norma NBR 7190 (ABNT, 2022).

Tabela 2. Médias, desvio padrão, coeficientes de variação (C.V.) e valores característicos (f_k) das propriedades mecânicas da madeira de *Allantoma decandra*.

	Unidade	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)	*f_k
f_M	(MPa)	115,59	8,6	7,44	110,72
E_{M0}	(MPa)	13817,04	1720,9	12,46	-
$f_{v,0}$	(MPa)	10,97	1,5	13,65	9,76
$f_{c,0}$	(MPa)	54,16	5,2	9,62	49,03
$f_{c,90}$	(MPa)	9,75	1,3	13,32	8,64
f_{s0}	(N/cm)	846,19	91,9	10,87	760,16
f_H	(N)	4680,04	657,7	14,05	3997,37
$f_{H,90}$	(N)	5738,66	791,6	13,79	4934,22

Onde, f_M : resistência à flexão; E_{M0} : módulo de elasticidade; $f_{v,0}$: cisalhamento; $f_{c,0}$: compressão paralela; $f_{c,90}$: compressão perpendicular às fibras; f_{s0} : fendilhamento; f_H : dureza Janka paralela e $f_{H,90}$: dureza Janka transversal às fibras. * f_k : valores característicos calculados com base na norma NBR 7190 (ABNT, 2022).

Levando em conta as classes da norma NBR 7190, os valores característicos de resistência ao cisalhamento ($f_{v0,k}$) e compressão paralela às fibras (f_{c0k}) encontrados para *A. decandra* permitiriam enquadrá-la nas classes D60 e D40, respectivamente. No entanto, a densidade aparente de 0,70 g/cm³ restringe o seu enquadramento na classe D30. A referida norma possui uma tabela intitulada “*Valores de Classes de Resistência para Madeiras Nativas do Brasil*”, que apresenta a classificação de diversas espécies nativas brasileiras. Assim como

verificado para *A. decandra*, os dois registros de espécies da família Lecythidaceae: *Bertholletia excelsa* e *Couratari sp.*, também são classificados como D30.

Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas por *A. decandra* foram semelhantes aos encontrados no *Banco de Dados de Madeiras Tropicais* (LPF, 2023) para *Allantoma lineata* e *Couratari guianensis* (Tabela 3), as duas espécies da família Lecythidaceae mais exploradas no Brasil (SFB, 2022). Por analogia, pode-se indicar para a madeira de *A. decandra* os mesmos usos citados por Melo e Camargos (2016) para as espécies mencionadas: usos estruturais leves, móveis, esquadrias, instrumentos musicais, utensílios domésticos, embarcações, embalagens, forros, cabos de ferramentas, tonéis e revestimentos.

Tabela 3. Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas neste estudo para *Allantoma decandra* com dados bibliográficos de *Allantoma lineata* e *Couratari guianensis*.

	Unidade	<i>A. decandra</i>	<i>A. lineata</i>	<i>C. guianensis</i>
f_M	(MPa)	115,59	114,84	104,05
E_{M0}	(MPa)	13817,04	12750,00	11470,00
f_{v,0}	(MPa)	10,97	-	10,20
f_{c,0}	(MPa)	54,16	57,96	53,94
f_{c,90}	(MPa)	9,75	11,28	7,75
f_{s0}	(N/cm)	846,19	500,14	-
f_H	(N)	4680,04	4942,56	5060,24
f_{H,90}	(N)	5738,66	5128,89	6521,44

O primeiro ensaio de trabalhabilidade ao qual os corpos de prova confeccionados com a madeira de *A. decandra* foram submetidos foi de aplainamento, que é considerado um beneficiamento primário. Ao fim do ensaio, foi possível visualizar as marcas das facas da plaina nos corpos de prova, no entanto, a sua superfície estava lisa, sem fibras levantadas ou arrancadas (Figura 4A). Dessa forma, o acabamento para plaina foi classificado como “excelente”.

A seguir, as mesmas superfícies foram submetidas ao lixamento, inicialmente com lixa grão 80 e, após avaliação, lixa grão 120. Após a passada da primeira lixa a madeira já apresentou uma superfície sem defeitos. Após a passada da segunda lixa (mais fina), a madeira apresentou superfície extremamente lisa, sendo classificada como de “excelente” acabamento (Figura 4B). Em relação ao ensaio de broca, a madeira de se demonstrou macia e não apresentou defeitos acentuados como fibra arrancada ou queimada após a realização dos furos (Figura 4C). Todavia, apresentou superfície felpuda e, portanto, o seu desempenho foi classificado como “bom”. De

forma similar, os corpos de prova ensaiados no torno não apresentaram defeitos graves, mas em todos era possível observar superfície felpuda (Figura 4D). Essa característica não inviabiliza a utilização da madeira, no entanto, exige maior tempo e mão de obra para garantir que a sua superfície adquira um acabamento ideal. Dessa forma, o desempenho da espécie foi classificado como “bom”.

Os resultados demonstram a aptidão da espécie à produção de formas e superfícies de boa qualidade, sendo possível indicá-la para a confecção de produtos de maior valor agregado, como movelaria, acabamento interno e confecção de pequenos objetos de mobiliário. Comparando com dados bibliográficos (LPF, 2023), o desempenho da madeira de *A. decandra* foi superior ao de *A. lineata* e de *C. guianensis*, que tendem a ficar com superfície de aparência felpuda.

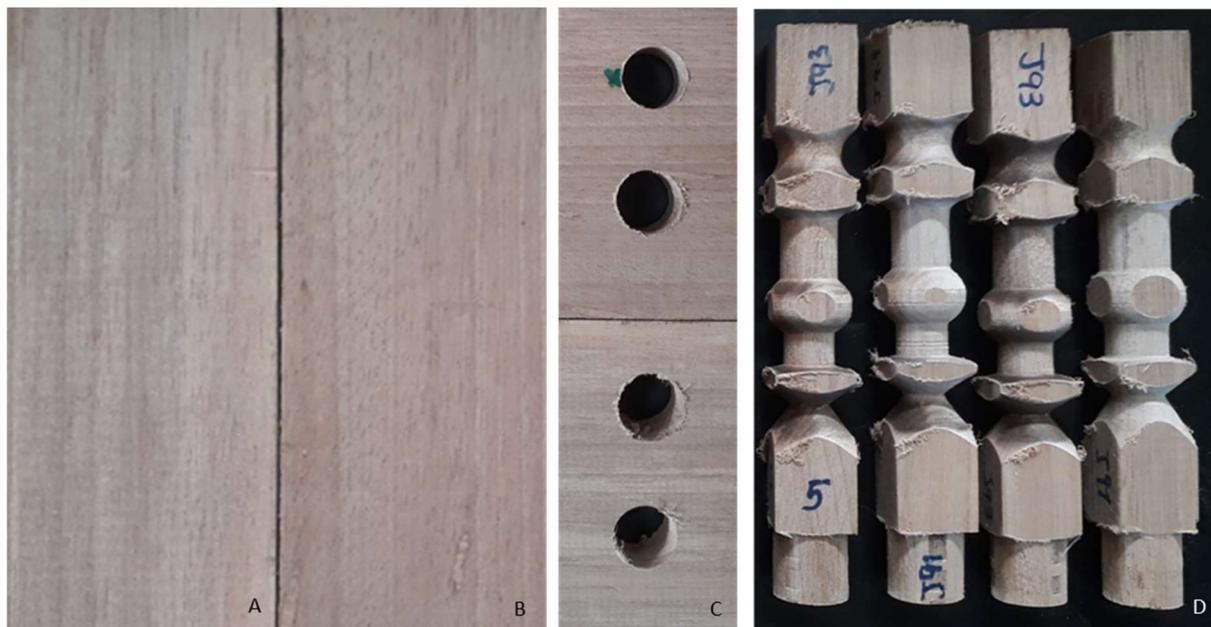


Figura 14. Corpos de prova de *Allantoma decandra* após ensaios de trabalhabilidade: (A) ensaio de plaina; (B) ensaio de lixa grão 80 e 120; (C) ensaio de broca, e (D) ensaio de torno.

Para a verificação da presença de silício (Si), que é uma característica marcante da madeira das espécies de Lecythidaceae (SANTANA et al., 2013), foram feitas micrografias de amostras de madeira, pertencentes a dez árvores (Figura 5). As imagens de todas as dez amostras revelaram a presença de uma pequena quantidade de cristais inseridos nas células de raio (Figura 5A) e altas concentrações de cristais inseridos no parênquima axial (Figura 5B). Após a análise das amostras com o Detector de Energia Dispersiva (EDS), o software gerou

imagens indicando o principal elemento químico presente na amostra analisada (Figuras 5C e 5D), além de gráficos da composição química elementar (Figuras 5E e 5F).

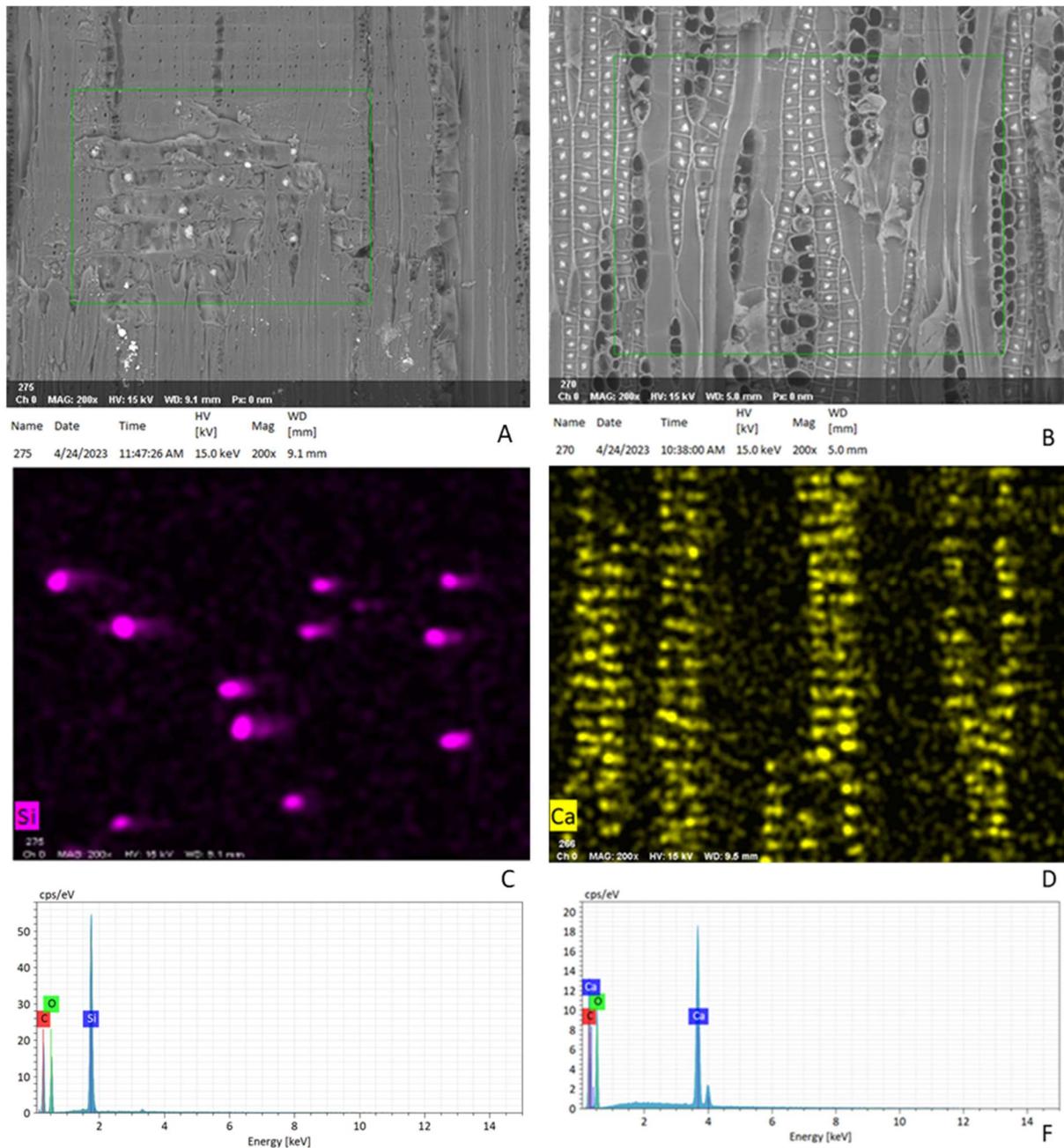


Figura 15. Micrografias de *Allantoma decandra* (aumento de 200 vezes) e arquivos de saída do Detector de Energia Dispersiva (EDS). **(A)** Cristais inseridos nos raios. **(B)** Cristais inseridos nas células de parênquima. **(C)** Imagem do EDS, correspondente a figura A, indicando presença de silício. **(D)** Imagem do EDS, correspondente a figura B, indicando presença de cálcio. **(E)** Gráficos da composição química elementar das amostras confirmando a presença de silício. **(F)** Gráficos da composição química elementar das amostras confirmando a presença de cálcio.

Conforme relatado por dados bibliográficos a respeito desta espécie e de outras da mesma família (DE ZEEUW e MORI, 1987 e DE ZEEUW et al., 1990), as análises do EDS confirmaram a presença de silício. O elemento foi encontrado principalmente nas células radiais, com baixa frequência nas células de parênquima axial ou fibras, sendo esta, uma característica típica das Lecythidaceae (BERNAL et al., 2011; SANTANA et al., 2013). Assim como descrito por Richter (1980), o mineral apresentou formas irregulares e globulares, variando consideravelmente em forma e tamanho.

O equipamento de MEV e EDS não permite uma quantificação precisa do teor de sílica presente na madeira das amostras analisadas e, em função do tamanho reduzido das amostras, sequer permite uma extrapolação dos resultados. Contudo, ao se comparar as imagens de MEV de *A. decandra* com imagens de *Apuleia leiocarpa* publicadas por Santana et al. (2013), é possível observar que a quantidade de silício de *A. decandra* é muito inferior. Essa observação coincide com estudos de Mori e Prance (1990); Lens et al. (2007) e Bernal et al. (2011) que afirmam que no gênero *Allantoma*, o elemento é encontrado de forma pouco frequente.

Por outro lado, as análises do EDS indicaram que o componente principal dos cristais encontrados nas células do parênquima axial é cálcio (Ca), sugerindo que se trata de acúmulos de oxalato de cálcio. Assim como a sílica, os cristais de oxalato de cálcio são formados a partir da absorção de minerais presentes no solo. A sua função fisiológica nas plantas ainda não é plenamente conhecida, mas se especula que tenha relação com: defesa contra herbivoria e organismos xilófagos (NAKATA, 2012), em especial na fase jovem das plantas (NETO et al., 2021), aumento da rigidez dos tecidos contribuindo com o suporte mecânico da estrutura de plantas e árvores (SCHNEIDER, 1901; FRANCESCHI e NAKATA, 2005; VANSTEENKISTE et al., 2007), reserva de cálcio (FRANCESCHI et al., 1989), regulação e excreção do cálcio nos tecidos das plantas (FRANCESCHI, 2001, PAIVA et al., 2019) e inibição e retardativo de fogo (PRIOR e CUTLER, 1992).

Existem poucos estudos que fazem referência às consequências da presença do oxalato de cálcio para o desdobro da madeira. Vegunta et al. (2022) afirmam que a presença do oxalato diminui o rendimento de polpa Kraft durante a produção de papel, atrasando o processo de deslignificação e aumentando a quantidade de resíduos. Bozkurt e Erdin (1989) afirmam que, assim como a sílica, os cristais de oxalato também geram o desgaste das ferramentas de corte durante o desdobro e beneficiamento da madeira.

Se por um lado a quantidade de cristais presentes na madeira interfere na durabilidade do equipamento utilizado para o processamento, demandando serras e lâminas específicas e técnicas elaboradas para desdobro (SUDAM/IPT, 1981), por outro lado, as madeiras com essa característica poderão ser testadas para usos que exijam resistência a insetos, fungos e micro-organismos marinhos (BOZKURT e ERDIN, 1989; RODRIGUES e SANTANA, 2005).

4. CONCLUSÃO

Os dados gerados pela pesquisa indicam que a madeira de *Allantoma decandra* possui aspecto visual agradável, densidade média, excelente estabilidade dimensional e pode ser enquadrada na classe de resistência D30 da norma NBR 7190. Os ensaios de trabalhabilidade avaliados demonstram que a madeira responde bem aos processos de beneficiamento, garantindo uma boa qualidade de acabamento. A baixa quantidade de silício encontrado nos raios da madeira não deve representar entrave para o desdobro e beneficiamento da madeira, no entanto, é necessário avaliar o efeito dos cristais de cálcio encontrados abundantemente nas células de parênquima axial.

Dessa forma, a madeira de *A. decandra* pode ser indicada para artigos de decoração, mobiliário, aberturas (portas e janelas), para a fabricação de produtos engenheirados e até mesmo peças estruturais de uso interno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D-143: Standard Test Methods for small clear specimens of timber**. West Conshohocken, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D-1666: Standard Test Methods for**. West Conshohocken, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p. 2022.

BERNAL, R.A., CORADIN, V.T.R., CAMARGOS, J.A.A., COSTA, C. (2011) Wood anatomy of Lecythydaceae species called “Tauari”. **IAWA J.** 32:97 – 112.

BOZKURT Y, ERDIN N (1989). Commercially Important Exotic Trees, Istanbul University, **Natural and Applied Sciences Publications**, Public No: 3572-4, Istanbul-Turkey, p. 382.

CATENACCI, F. S.; SIMON, M. F. A checklist of Lecythydaceae in the upper Madeira River, Rondônia, Brazil with comments on diversity and conservation. **Brittonia** 69(4): 447–456, 2017.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A. **A Estrutura Anatômica da Madeira e Princípios para a sua Identificação**. IBAMA/Laboratório de Produtos Florestais, 2002.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. **Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos**. 2010.

DE ZEEUW, C., MORI, S.A. (1987) Wood anatomy. In: **The Lecythidaceae of Lowland Neotropical Forest: La Fumée Mountain, French Guiana**. Ed. Mori, S.A. Mem New York Bot. Gard. 44:110 – 112.

De ZEEUW, C. 1990. Secondary xylem of Neotropical Lecythidaceae. In: S. Mori e G.T. Prance: **Fl. Neotr.** 21 (2): 4–59.

DURLO, M.A.; MARCHIORI, J.N.C. Tecnologia da madeira: retratibilidade. **Série técnica, 10**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992

EGERTON, R. F. **Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope**. Springer, 2011.

FRANCESCHI V.R. Calcium oxalate formation is a rapid and reversible process in Lemna minor L. **Protoplasma** 148: 130–137. 1989.

FRANCESCHI V.R. Calcium oxalate in plants **TRENDS in Plant Science** Vol.6 No.7 July 2001

FRANCESCHI VR, NAKATA PA. 2005. Calcium oxalate in plants: formation and function. **Annual Review of Plant Biology** 56: 41–71.

GOLDSTEIN, J. I. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. Springer, 2017.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A Sílica e suas Particularidades. **Rev. Virtual Quim.** 10 (4), 2018.

IAWA COMMITTEE ON NOMECLATURE. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy**. Switserzland: Konkordia, Winterhur, 1964. 186p.

LENS, F., BAAS P., JANSEN S. e SMETS E. A search for phylogenetically informative wood characters within Lecythidaceae s.l. **Amer. J. Bot.** 94: 483–502. 2007.

LPF - **BANCO DE DADOS DE MADEIRAS BRASILEIRAS**. Acesso em 19/09/2022: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/bd-madeiras-brasileiras>

MELO, J. E.; CORADIN, V. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**, 6., 1990, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, 1990. v. 3. p. 695-705.

MELO, R.R. et al. Caracterização física e mecânica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Agrária**, v. 5, n. 1, p. 67-73, 2010. DOI:10.5039/agraria.v5i1a515.

- MELO, J.E.; CAMARGOS, J.A.A. **A madeira e seus usos**. Brasília: SFB/LPF/MMA. 2016. 228p.
- MORI, S.A. e PRANCE, G.T. 1990. Flora Neotropica Lecythidaceae- Part II (*Couroupita*, *Corythophora*, *Bertholletia*, *Couratari*, *Eschweilera* e *Lecythis*), with a study of secondary xylem of Neotropical *Lecythidaceae*. **Flora Neotropica** 21(2): 376.
- MORI, S. A.; SMITH, N. P.; CORNEJO, X.; PRANCE, G. T. **The Lecythidaceae Pages**. The New York Botanical Garden, Bronx, New York. 2010.
- MORI, S. A.; KIERNAN, E. A.; SMITH, N. P.; KELLEY, L. M.; HUANG, Y-Y; PRANCE, G. T.; THIERS, B. Observations on the phylogeography of the *Lecythidaceae* clade (Brazil nut family). **Phytoneuron** 30: 1–85, 2017.
- NAKATA PA. Influence of calcium oxalate crystal accumulation on the calcium content of seeds from *Medicago truncatula*. **Plant Science** 185–186: 246–249. 2012.
- NETO, T; e LATORRACA, J.; SANTOS, G.; RAMOS, L.; SALES, T.; VASCONCELOS, T. Distribution and chemical composition of crystals in wood of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex Adr Jussieu) Muell. Arg. **Revista de Ciências Agrárias**. (2021). 44. 10.19084/rca.20819.
- OLIVEIRA, J.T. da S. TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa. MG, v.34, n.5, p.929-936, 2010.
- PAIVA, E.A.S. (2019), Are calcium oxalate crystals a dynamic calcium store in plants? **New Phytol**, 223: 1707-1711. <https://doi.org/10.1111/nph.15912>
- PANSHIN, A.J. e DE ZEEUW, C. **Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and uses of the Commercial woods of the United States and Canada**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. 772 p.
- PRANCE, G. T. e MORI, S. A. Lecythidaceae - Part I: The actinomorphic flowered New World Lecythidaceae. **Fl. Neotrop**. Monogr. 21: 1-270. 1979.
- PRIOR, J. e D. CUTLER. 1992. Trees to fuel Africa's fires. **New Sci**. 135, pt 1836: 35-39.
- PROCÓPIO, L. C. e SECCO, R. S. A importância da identificação botânica nos inventários florestais: o exemplo do “tauari” (*Couratari* spp. E *Cariniana* spp. – *Lecythidaceae*) em duas áreas manejadas no Estado do Pará. **Acta Amazonica** 38(1): 31-44, 2008.
- PROCÓPIO, L. C., GAYOT, M., SIST, P., e FERAZ, I. D. K. As espécies de tauari (*Lecythidaceae*) em florestas de terra firme da Amazônia: padrões de distribuição geográfica, abundâncias e implicações para a conservação. **Acta Botanica Brasilica**, 24(4), 883–897, 2010.
- RICHTER, H.G. Occurrence, morphology, and taxonomic implications of crystalline and siliceous inclusions in the secondary xylem of the Lauraceae and related families. **Wood Sci. Technol**. 14:35 – 44. (1980).

REFLORA. Disponível em: <http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/>. Acessado em 20/06/2022.

RODRIGUES, L. C.; SANTANA, M. A. E. Metodologia para determinação do teor de sílica em materiais lignocelulósicos via espectrometria no ultravioleta-visível. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.12, n.1, p. 57-62, 2005.

SCHNEIDER, ALBERT. The Probable Function of Calcium Oxalate Crystals in Plants Author(s): Source: **Botanical Gazette**, Aug. 1901, Vol. 32, No. 2 (Aug. 1901), pp. 142-144 Published by: The University of Chicago Press Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/2560402>.

SANTANA, M. A. E.; RODRIGUES, L. C.; CORADIN, V. T. R.; OKINO, E. Y. A.; DE SOUZA, M. R. "Silica content of 36 Brazilian tropical wood species." **Holzforschung** 67.1 (2013).

SANTOS, M. C.; DEL MENEZZI, C. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta** 40, 2010.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Edital nº 01/2012** – Anexo 5. 2012.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SISTEMA DE CADEIA DE CUSTÓDIA. Aplicativo. Acessado em: 06 de setembro de 2022.

SMITH, N. P.; MORI, S. A.; PRNCE, G. T. Lecythidaceae. In: **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015.

SUDAM/IPT. Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia – Instituto de Pesquisa Tecnológicas. **Rendimento em Serraria de Trinta Espécies de Madeiras Amazônicas**. Belém. 185p. 1981.

TER STEEGE, H.; NIGEL, C. A.; PITMAN, P. O. L.; CHAVE, J.; SABATIER, D.; DUQUE, A.; MOLINO, J. -F.; PRÉVOST, M. -F.; SPICHIGER, R.; CASTELLANOS, H.; HILDEBRAND, P.; VÁSQUEZ, R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature** 443: 444-447, 2006.

TER STEEGE, H. et al. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science* 342, 1243092, doi: 10.1126/science.1243092 (2013).

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas de madeira laminada colada de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, 87, 471- 480, 2010.

VANSTEENKISTE, D., VAN ACKER, J., STEVENS, M. et al. Composition, distribution and supposed origin of mineral inclusions in sessile oak wood — consequences for microdensitometrical analysis. **Ann. For. Sci.** 64, 11–19 (2007). <https://doi.org/10.1051/forest:2006083>

VASCONCELOS, F.J.; FREITAS, J.A.; CASTRO E SILVA, A. Observações microscópicas de inclusões minerais no xilema de espécies tropicais da Amazônia. **Acta Amazonica**. Manaus. 25 (1/2): 55-68p. 1993.

VEGUNTA, V., SENTHILKUMAR, E., LINDÉN, P., SEVASTYANOVA, O., VILAPLANA, F., GARCIA, A., BJÖRK, M., JANSSON, U., HENRIKSSON, G. e LINDSTRÖM, M. High calcium content of *Eucalyptus dunnii* wood affects delignification and polysaccharide degradation in kraft pulping. **Nordic Pulp e Paper Research Journal**, 37(2), 338-348. (2022). <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0069>.

VITAL, B. R.; Maciel, A. S.; Della Lucia, R.M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

CAPÍTULO 2. RESISTÊNCIA MECÂNICA DE LIGAÇÕES PREGADAS, CAVILHADAS E COLADAS PARA A CONFECCÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT)

1. INTRODUÇÃO

Painéis de madeira lamelada cruzada (CLT) são projetados e manufaturados para maximizar a resistência e rigidez naturais características da madeira, orientando as lamelas de forma ótima e combinando madeira com adesivos duráveis e outros elementos de ligação (APA, 2019). São extremamente versáteis, uma vez que permitem uma grande variedade de formas e seus usos mais frequentes são em elementos estruturais de edifícios, pisos, coberturas e pontes (BRENEMAN, 2016). Essas inúmeras utilidades devem-se ao fato de apresentarem alta resistência às solicitações mecânicas em função de seu peso relativamente baixo. Os painéis lamelados cruzados foram idealizados para serem confeccionados com adesivos, todavia, outros elementos de ligação como pregos e cavilhas de madeira vêm sendo testados (GONG, 2019; HOSSEINZADEH et al., 2020).

Os pregos são os elementos de ligação mais comuns e provavelmente os mais tradicionais. Ao contrário dos adesivos, apresentam um baixo custo e não demandam infraestrutura específica para serem utilizados. Além disso, o uso de pregos é uma solução simples e viável para fazer ligações entre madeiras de baixa capacidade de adesão, em especial as folhosas com madeiras de altas densidades ou elevada presença de extrativos (HOSSEINZADEH et al., 2020). Entre os fatores que influenciam a resistência de ligações pregadas pode-se mencionar: a forma e dimensão dos pregos, sua carga admissível, a deformação do prego por flexão, o enfraquecimento da seção provocada pelo furo, fendas e rachaduras ocasionadas pela penetração, disposição dos pregos e alteração da umidade da madeira (RAMMER e ZELINKA, 2004; MAHDAVIFAR et al., 2018; KIM, 2021).

O prego mais comumente utilizado é o de haste lisa com cabeça, no entanto, entre os diferentes tipos de pregos no mercado, existem dois modelos que foram desenvolvidos para aumentar a resistência ao arranquio: os pregos espiralados e anelados (WILLS et al., 1996; THEILEN et al., 1998). Estes pregos possuem ranhuras onde as fibras da madeira se encaixam durante a sua inserção (LUSZCKI et al., 2013). Para arrancar um prego espiralado ou anelado é necessário quebrar as fibras da madeira encaixadas entre os anéis, o que requer uma força adicional (RAMMER et al., 2001; DOPPKE, 2004). Por outro lado, a presença dos anéis na haste do prego exige 15% mais energia para inserção na madeira (OGUNRINDE et al., 2019).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações pregadas podem se romper por plastificação dos pregos ou por ruptura da madeira, que pode ocorrer por embutimento, cisalhamento ou fendilhamento. É comum que o rompimento da ligação aconteça com diversos tipos de rupturas ocorrendo concomitantemente. A plastificação dos pregos indica subdimensionamento ou número de pregos inadequado, enquanto a ruptura na madeira indica eficiência da ligação pregada.

As cavilhas são pinos cilíndricos, lisos ou estriados, confeccionadas com madeira “clear” (grã reta, sem nós, rachaduras ou outros defeitos) de alta densidade (STRUCTURECRAFT, 2017). Para uso estrutural no Brasil, são consideradas apenas cavilhas com diâmetros de 16 mm, 18 mm e 20 mm (NBR 7190, 2022). A pré-furação das peças a serem unidas deverá ser realizada com diâmetro idêntico ao da cavilha e, no momento da cravação, as cavilhas devem estar perfeitamente secas, caso contrário há retração após sua colocação provocando folgas (CWC, 2017). O inchamento da cavilha ao absorver umidade do ambiente após a sua aplicação é o responsável pela maior resistência (KANAZAWA et al., 2005; PIZZI et al., 2006).

Apesar de ser uma das técnicas de carpintaria mais tradicionais, a difusão do uso de pregos no início do século 20 fez com que durante muito tempo o uso de cavilhas fosse deixado em segundo plano (O’LOINSIGH et al., 2012). Em anos recentes, a pesquisa a respeito da sua aplicação para conexão de elementos estruturais em madeira teve um aumento substancial devido ao seu baixo custo, alta resistência mecânica, conexões justas, impacto ambiental positivo e melhor reciclabilidade (GUAN et al., 2010). Pelo fato de os produtos cavilhados serem praticamente 100% madeira, com exceção de emendas de topo das lamelas que geralmente são coladas, a tecnologia tem despertado muito interesse tanto na Europa como na América do Norte (GONG, 2019).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações cavilhadas podem se romper por flexão e esmagamento das cavilhas ou por ruptura da madeira, que pode ocorrer por embutimento, cisalhamento ou fendilhamento. A flexão ou esmagamento das cavilhas indica subdimensionamento ou número de cavilhas inadequado, enquanto a ruptura na madeira indica eficiência da ligação.

Por sua vez, os adesivos constituem um dos processos mais modernos de ligação, permitindo a união de madeiras de pequenas seções para a confecção de componentes de uso estrutural. Uma das vantagens do uso de adesivos em relação a métodos mecânicos, como pregos, rebites e parafusos, é que o adesivo dispensa a necessidade de se fazer furos no material a ser unido, evitando assim a concentração de tensões, que pode causar uma diminuição de suas

propriedades físicas e mecânicas (POCIUS, 2002). Como pontos negativos dos adesivos sintéticos: custo elevado e tem influência direta no preço final do produto, podendo chegar até metade desse valor (CARNEIRO et al., 2004; VARANDA et al., 2018); a grande maioria é suscetível à exposição ambiental, o que compromete a sua vida útil (CHEN et al., 2019); são potencialmente tóxicos e podem gerar poluição ambiental (CHANG e NERCHOU, 2015; ATAEI et al., 2019; ZHANG et al., 2020).

A eficiência da ligação com adesivos depende da porosidade e permeabilidade natural da madeira. As espécies com maior potencial de colagem são as coníferas com massa volumétrica entre 0,40 e 0,75 g/cm³ (SZÜCS, 1992). As folhosas apresentam maior dificuldade de colagem devido à sua constituição química e sua maior complexidade estrutural (VITAL et al., 2006), porém, as madeiras menos densas (densidade básica < 0,7 g.cm-3) também podem ser coladas satisfatoriamente (TEREZO e SZÜCS, 2010; SANTOS e DEL MENEZZI, 2010).

Ao serem submetidas a tensões, as ligações coladas de madeira tendem a se romper por cisalhamento na linha de cola ou pela ruptura da madeira. O cisalhamento na linha de cola indica alguma deficiência na preparação da madeira, execução da colagem e prensagem ou uma incompatibilidade entre tipo de adesivo e espécie (OLIVEIRA e SERAPHIM, 2015). Por outro lado, a ruptura na madeira indica eficiência do processo de colagem, onde a linha de cola adquire resistência superior à da madeira (FARIA et al., 2020).

Cada elemento de ligação possui vantagens e desvantagens relacionadas à forma de aplicação, custos, resistência mecânica, possibilidade de reaproveitamento e aspectos ambientais. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica de diferentes tipos, modelos e dimensões de adesivos, pregos e cavilhas, submetidos a ensaios de compressão em corpos de prova em corte duplo, visando o desenvolvimento de novas tecnologias para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Confeção dos corpos de prova

A madeira utilizada neste experimento foi oriunda de dez árvores de *Allantoma decandra* (Ducke) S.A.Mori, Y.Y.Huang e Prance coletadas na Floresta Nacional de Jacundá, estado de Rondônia. A espécie pertence à família das Lecythidaceae e a sua madeira possui densidade básica média de 0,57 g/cm³ (PIMENTEL et al., 2021), sendo este valor considerado apropriado para colagem (TEREZO e SZÜCS, 2010; SANTOS e DEL MENEZZI, 2010). É

uma espécie nativa da floresta amazônica, não possui restrições legais de corte e vêm sendo explorada em áreas de manejo florestal sustentável (SFB, 2023).

Os corpos de prova foram compostos de três lamelas de madeira com dimensões de 2 cm x 16 cm x 16 cm. As lamelas foram dispostas perpendicularmente em relação à orientação das fibras, sendo as duas externas na posição vertical e a lamela central posicionada horizontalmente (Figura 1). As peças tiveram uma área de sobreposição de 14 cm x 16 cm, onde foram aplicados adesivos ou fixados os elementos de ligação, quatro por corpo de prova, com distância de 8 cm entre eles e pelo menos 3 cm das bordas.

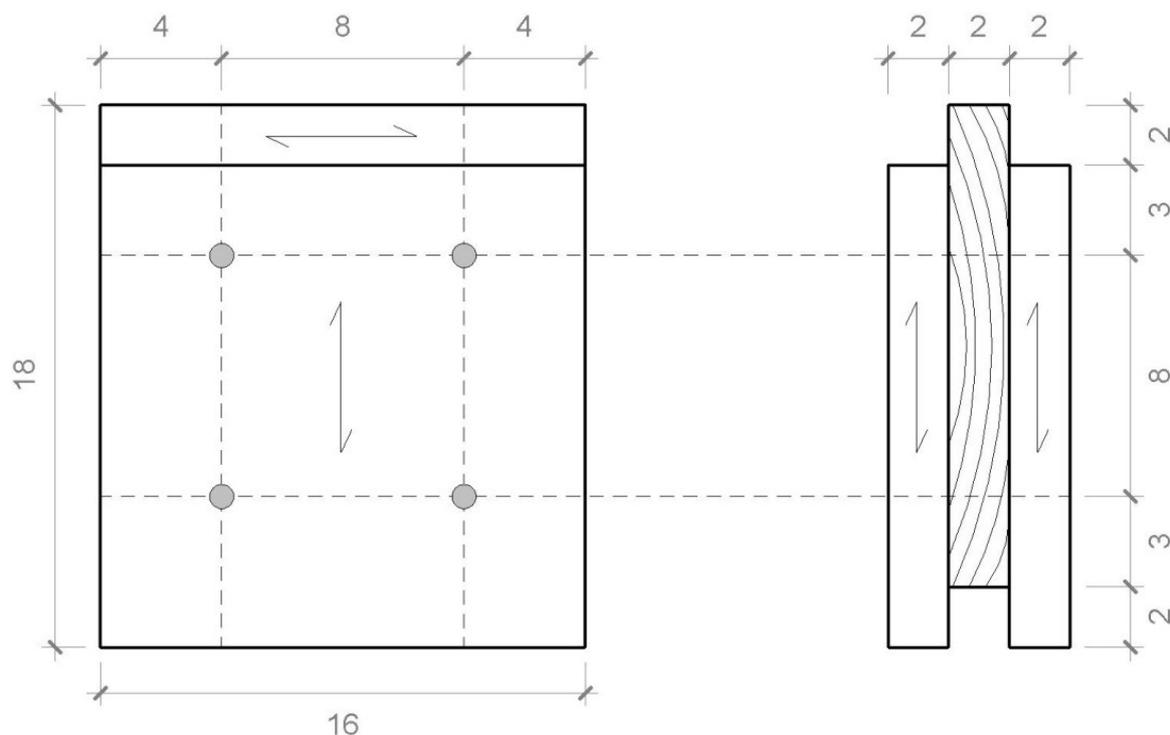


Figura 1. Vista frontal e lateral do corpo de prova para ensaios de compressão em elementos de ligação em corte duplo. Medidas em centímetros.

Como elementos de ligação entre as lamelas foram testadas duas dimensões de pregos (de três modelos distintos), cavilhas com dois diâmetros e dois tipos de adesivos, totalizando 10 tratamentos, conforme descritas a seguir:

- Pregos 16 x 24* (2,7 mm x 55 mm), de marca Gerdau, nos modelos de hastes:
 - Lisas
 - Espiraladas
 - Aneladas

- Pregos 18 x 30* (3,7 mm x 70 mm), de marca Gerdau, nos modelos de hastes:
 - Lisas
 - Espiraladas
 - Aneladas
- Cavilhas de madeira de roxinho com dimensões de:
 - 16 mm x 600 mm.
 - 20 mm x 600 mm.
- Adesivos a base de:
 - Poliuretano (PUR) de marca TekBond.
 - Acetato de polivinila crosslink (PVAc) de marca Titebond Ultimate III.

* Tradicionalmente a medida de pregos é apresentada no formato JP x LPP, ou seja, Jauge de Paris x Linha de Polegadas Portuguesas, correspondentes ao diâmetro e ao comprimento do prego, respectivamente.

Para facilitar a fixação dos pregos (Figura 2A) e mitigar o surgimento de defeitos que pudessem interferir no resultado dos ensaios, foi realizada uma pré-furação utilizando uma broca com diâmetro de aproximadamente 50% do diâmetro do prego. A seguir, os pregos foram fixados com um martelo, sendo dois de cada lado. As pontas dos pregos 18 x 30 que transpassaram as três lamelas foram serradas rente aos corpos de prova para não interferir nos resultados.

As cavilhas (Figura 2B) foram fabricadas por meio do torneamento de peças de madeira de roxinho (*Peltogyne lecointei* Ducke), considerada uma madeira de alta densidade, com densidade básica aproximada de 0,86 g/cm³ (PIMENTEL et al., 2021). Também é nativa da floresta amazônica, não possui restrições legais de corte e vêm sendo explorada em áreas de manejo florestal sustentável (SFB, 2023).

As cavilhas foram confeccionadas com madeira climatizada, com teor de umidade de aproximadamente 12 %. Para facilitar a inserção na madeira, as cavilhas foram previamente secas em estufa com ventilação forçada à temperatura de 103° C até atingirem massa constante (teor de umidade = 0%). Durante a secagem, ocorreu um processo de contração da madeira, o que favoreceu a inserção das cavilhas nas lamelas de madeira com pré-furação de mesmas dimensões. Ao absorverem a umidade do ambiente, as cavilhas voltaram a expandir suas dimensões, garantindo um encaixe bem ajustado em relação às lamelas.

Os adesivos PUR e PVAc (Figura 2C) foram aplicados sobre as lamelas, com o uso de espátulas, na gramatura de 200g/m², recomendada por ambos os fabricantes. Após a aplicação dos adesivos, as lamelas foram prensadas numa prensa hidráulica de marca Wabash com pressão de aproximadamente 1,0 MPa por duas horas.



Figura 2. (A) Pregos lisos, espiralados e anelados nas medidas 16 x 24 e 18 x 30. (B) Cavilhas de roxinho de 16 e 20 mm. (C) Adesivos PUR e PVAc.

2.2. Ensaios

Para a avaliação dos elementos de ligação foi utilizada a metodologia de Pang et al. (2017), com a realização de ensaios de compressão em corpos de prova com elementos de ligação em corte duplo. Para verificar a resistência mecânica dos elementos de ligação, os corpos de prova (dez por tratamento, totalizando 100 amostras) foram submetidos a ensaios de compressão, com a carga sendo aplicada na lamela central. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios, de marca Martins Campelo, com capacidade de 600 kN (Figura 3A). Foram seguidos os procedimentos previstos na norma D5652 (ASTM, 2015), utilizando a velocidade de carga de 1,0 mm/min. Os tratamentos foram avaliados com base na carga máxima suportada pelos corpos de prova e pelos modos de ruptura.

2.3. Análise Estatística

Para avaliar quais as dimensões e modelos mais eficientes entre os diferentes tipos de ligações mecânicas (pregos, cavilhas e adesivos) foram utilizados os valores das cargas máximas suportadas pelos corpos de prova. Os valores das cargas máximas obtidos pelos diferentes modelos e dimensões de pregos foram submetidos a uma ANOVA fatorial “Two-

way”, a um nível de significância de 5% (intervalo de confiança de 95%), seguido por um Teste de Tukey. Os valores obtidos para adesivos e cavilhas foram submetidos a análises de variância (ANOVA). Todas as análises foram realizadas utilizando o software SPSS da IBM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias dos resultados de resistência mecânica obtidos pelos elementos de ligação nos ensaios variaram entre 10.681 N e 72.664 N (Tabela 1). Os melhores resultados foram obtidos pelos corpos de prova confeccionados com adesivos, seguidos pelos cavilhados, e pregados. Os valores determinados para os coeficientes de variação dos dez tratamentos variaram entre 6,9% e 18,3%, valores considerados satisfatórios visto que a confecção dos corpos de prova foi feita de forma manual, estando sujeita a variações decorrentes das ferramentas e do operador.

Tabela 1. Médias das cargas máximas, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) para corpos de prova confeccionados com pregos, cavilhas e adesivos.

Elemento de Ligação	Média (N)	Desvio Padrão	C.V. (%)	
Pregos	16 x 24 Liso	10.681 a	1.957	18,3
	16 x 24 Espiralado	11.867 a, b	1.287	10,8
	16 x 24 Anelado	13.577 b, c	1.386	10,2
	18 x 30 Liso	15.033 c	1.863	12,4
	18 x 30 Espiralado	17.914 d	1.235	6,9
	18 x 30 Anelado	21.106 e	2.023	9,6
Cavilhas*	16 mm	44.855	6.139	13,7
	20 mm	55.517	7.561	13,6
Adesivos*	PUR	57.541	10.336	18,0
	PVAc	72.664	12.087	16,6

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. *Após realização da ANOVA, as médias apresentaram diferenças estatisticamente significativas a um nível de 5% de significância.

Os corpos de prova confeccionados com pregos de dimensão 16 x 24 tiveram valores de carga máxima inferiores aos confeccionados com pregos 18 x 30, indicando que o aumento nas dimensões dos pregos agregou resistência aos corpos de prova sem perda de resistência das

lamelas. Após a realização de uma análise de variância fatorial “two way”, foi observado que tanto a dimensão quanto o modelo tiveram efeito significativos a um intervalo de confiança de 95%. O teste de Tukey indicou diferença estatisticamente significativa para os corpos de prova confeccionados com os três modelos de pregos 18 x 30, enquanto os corpos de prova confeccionados com pregos de dimensões 16 x 24 apresentaram uma maior similaridade entre as suas médias.

Coadunando com dados publicados por Rammer (2021), os pregos anelados obtiveram resultados superiores aos espiralados, que por sua vez foram superiores aos lisos. Entre os corpos de prova confeccionados com pregos 16 x 24, aqueles com pregos espiralados e anelados suportaram, respectivamente, cargas 11% e 27% maiores do que os confeccionados com pregos lisos. Para os corpos de prova confeccionados com pregos 18 x 30, o ganho de resistência mecânica foi ainda maior, cerca de 20% e 40%.

Este aumento na resistência pode ser explicado pelas particularidades das hastes de cada tipo de prego. Enquanto os pregos lisos se fixam na madeira apenas pelas forças de atrito entre as fibras da madeira e a haste do prego, os pregos espiralados e anelados também possuem resistência mecânica gerada pelo encaixe das fibras da madeira entre as ranhuras da haste durante a sua inserção (LUSZCKI, 2013). Para arrancar um prego espiralado ou anelado é necessário quebrar as fibras da madeira encaixadas entre os anéis, o que requer uma força adicional (RAMMER, 2001; DOPPKE, 2004), podendo apresentar um acréscimo de resistência na ordem de 30 a 40% para os pregos espiralados (BLASS e UIBEL, 2004), chegando a 100% dos valores apresentados pelos pregos lisos de mesma dimensão, no caso dos anelados (SKULTETI et al., 1997; RAMMER, 2021).

Apesar do aumento das dimensões dos pregos ter gerado um incremento de resistência dos corpos de prova submetidos à compressão, todos os modelos e dimensões de pregos sofreram plastificação (Figura 3B), indicando um subdimensionamento destes elementos. O aumento das dimensões dos pregos acima de 18 x 30 exigiria equipamentos mais robustos e mão de obra adicional para a sua fixação correndo o risco de gerar rachaduras e enfraquecer a resistência das lamelas.

Os corpos de prova unidos por cavilhas apresentaram valores de carga máxima intermediários entre os pregos e adesivos. Apesar da diferença entre as dimensões das cavilhas ser pequena, o aumento de 4 mm no diâmetro gerou um incremento de aproximadamente 24% no valor médio de resistência dos corpos de prova. Após a aplicação de uma ANOVA, ficou evidenciado que existe diferença significativa, ao nível de 5%, entre as médias obtidas pelas cavilhas de 16 mm (44.855 N) e 20 mm (55.517 N).

Todas as cavilhas de 16 mm se plastificaram e romperam (Figura 3C), indicando subdimensionamento. Para contornar essa situação, seria possível utilizar um número maior de cavilhas por corpo de prova, no entanto, isto poderia gerar um enfraquecimento das lamelas, com ruptura dos corpos de prova por cisalhamento ou fendilhamento das lamelas. Por outro lado, todas as cavilhas de 20 mm resistiram às cargas aplicadas, com os corpos de prova sucumbindo por esmagamento ou ruptura da lamela central (figura 3D). Dessa forma, é possível afirmar que o uso das cavilhas de 20 mm foi adequadamente dimensionado, inclusive no que tange ao espaçamento utilizado.

Os corpos de prova colados obtiveram os mais altos valores de resistência à compressão entre todos os tratamentos. O adesivo PUR apresentou média de carga máxima de 57.541 N, enquanto o adesivo PVAc obteve média de 72.664 N (Tabela 1). Após a aplicação da ANOVA ficou evidenciada a diferença significativa entre as médias, ao nível de 5%.

Entre os motivos que podem explicar os resultados superiores do PVAc em relação ao PUR está a viscosidade dos adesivos que, segundo os fabricantes, é de 4000 cPs e 8000 cPs, respectivamente. Para que ocorra uma colagem eficiente, o adesivo deve alcançar a camada de madeira intacta abaixo da superfície, penetrando e preenchendo os lúmens, pontuação das células e as fendas da parede celular (ALBUQUERQUE e LATORRACA, 2000; BIAZZON et al., 2019; JAKES et al., 2007). Para isso, é desejável que o adesivo possua valores médios de viscosidade que permitam um melhor espalhamento sobre a face da madeira, auxiliando a maior penetração do adesivo e sua absorção pela madeira (BIANCHE et al., 2017). Adesivos com viscosidade alta tem a tendência de se distribuir de forma irregular na madeira, causando uma linha de cola espessa, por causa da dificuldade de penetração do adesivo na madeira (MENDOZA et al., 2017).

A viscosidade do adesivo e a sua penetração na madeira estão diretamente ligadas à porcentagem de falha na madeira após o cisalhamento. Maiores porcentagens de falha na madeira indicam que a colagem foi eficiente e que as ligações adesivas são mais resistentes do que a madeira, indicando um bom Inter travamento mecânico (FARIA et al., 2020). Todos os corpos de prova unidos com adesivo PUR sofreram cisalhamento na linha de cola (Figura 3E), com baixíssima falha na madeira, indicando que não houve uma boa absorção do adesivo, possivelmente decorrente de sua viscosidade elevada. Os corpos de prova colados com adesivo PVAc romperam majoritariamente por esmagamento das lamelas centrais (Figura 3F), sendo necessário interromper o ensaio sem que houvesse o cisalhamento, o que indica uma excelente colagem.



Figura 3. (A) Máquina universal de ensaios executando ensaio de compressão dos corpos de prova em duplo corte. (B) Plastificação dos pregos sem esmagamento ou ruptura da lamela central. (C) Plastificação e ruptura das cavilhas de 16 mm. (D) Esmagamento e ruptura da lamela central dos corpos de prova conectados por cavilhas de 20 mm. (E) Cisalhamento na linha de cola dos corpos de prova confeccionados com PUR com baixo percentual de falha na madeira. (F) Esmagamento da lamela central sem ocorrência de cisalhamento da linha de cola dos corpos de prova confeccionados com PVAc.

Pimentel et al. (2021) estudaram o desempenho dos Adesivos PVAc e PUR em sete espécies tropicais, entre elas *A. decandra*. Os autores obtiveram resultados similares, onde a resistência na linha de cola e a porcentagem de falha na madeira, de todas as espécies testadas foram maiores quando aplicado o adesivo PVAc em relação ao adesivo PUR.

Outra forma de avaliar a eficiência de adesivos é por meio da comparação da resistência ao cisalhamento na linha de cola de corpos de prova colados com resultados obtidos no cisalhamento da madeira sólida de mesma espécie. Segundinho et al. (2017), testaram os adesivos poliacetato de vinila (PVA) e poliuretano (PUR) à base de óleo de mamona com a madeira de *Eucalyptus cloeziana* (densidade básica = 0,626 g/cm³). Os valores de cisalhamento na linha de cola para os adesivos PVA, PUR e cisalhamento da madeira sólida foram de: 12,85 MPa, 8,29 MPa e 10,32 MPa, respectivamente. Dessa forma, constataram a superioridade do PVA (eficiência de 124%) em relação ao PUR (eficiência de 80%). No estudo de Pimentel et al. (2021), apesar de ambos os adesivos terem obtidos excelentes resultados para *A. decandra*, a eficiência obtida para o PVAc (139%) foi superior àquela obtida pelo PUR (129%).

4. CONCLUSÃO

Os adesivos proporcionaram os melhores resultados de resistência mecânica, com destaque para o adesivo PVAc. Os corpos de prova unidos pelo adesivo PUR apresentaram valores consideráveis de carga máxima, mas romperam na linha de cola com baixa porcentagem de falha na madeira, o que indica baixa absorção do adesivo pela madeira.

Entre as cavilhas, as de 20 mm de diâmetro obtiveram os melhores resultados de resistência mecânica. Apesar de terem obtido resistências mecânicas significativas, todas as cavilhas de 16 mm romperam, indicando subdimensionamento.

Os pregos anelados de dimensão 18 x 30 proporcionaram os melhores resultados entre os corpos de prova pregados, no entanto, todos foram muito aquém dos corpos de prova ligados por adesivos e cavilhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, C. E. C., e LATORRACA, J. V. (2000). Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Floresta e Ambiente**, 7(1), 158-166.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 5652**: Standard Test Methods for Single-Bolt Connections in Wood and Wood-Based Products. West Conshohocken, 2015.

ATAEI, A.; CHINIFORUSH, A.; BRADFORD, M.; VALIPOUR, H. Cyclic behaviour of bolt and screw shear connectors in steel-timber composite (STC) beams. **J. Constr. Steel Res.** 161, 328–340, 2019.

BIANCHE, J. J., TEIXEIRA, A. P. M., LADEIRA, J. P. S., CARNEIRO, A. C. O., CASTRO, R. V. O., e DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, 24(0), 1-9. (2017). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.077114>.

BIAZZON, J. C., ARAUJO, V. A., ALVES, P. R. G., MORALES, E. A. M., GONÇALVES, M. T. T., e VALARELLI, I. D. D. Resistência mecânica à adesão em superfícies de madeira de pinus aplainadas e unidas por adesivos PVAc. **Matéria** (Rio de Janeiro), 24(1), e-12323. (2019). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0606>.

BLASS, H.J. e UIBEL, T. Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Karlsruhe, Germany, 2007.

BRENEMAN S. Cross-Laminated Timber Structural Floor and Roof Design. **STRUCTURE Magazine**, Estados Unidos, p. 12-15, Jun. 2016.

CANADIAN WOOD COUNCIL (CWC). **Wood Design Manual**. Ottawa, ON, Canada: Canadian Wood Council; 2017. 1486 p.

CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., PIMENTA, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Propriedades de chapas de flocos fabricadas com adesivo de ureia-formaldeído e de taninos de casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden ou de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Árvore**, v.28, n.5, p.715-724, 2004.

CHANG, W. S., NEARCHOU, N. Hot-pressed dowels in bonded-in rod timber connections, **Wood Fiber Sci.** 47 (2) 199–208, 2015.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability**, 11, 1278, 2019.

DOPPKKE, T. Engineering a stronger nail. **American Fastener Journal**, Vol. 21:48-50, 2004.

FARIA, D.L., MENDES, L.M., GUIMARÃES JÚNIOR, J.B. Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. **Scientia Forestalis**, 48(126), 1-11. (2020). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11>.

GONG, M. Lumber-Based Mass Timber Products in Construction. **Timber Buildings and Sustainability**. 10.5772, 2019.

GUAN, Z., KOMATSU, K., JUNG, K., KITAMORI, A. **Structural characteristics of beam - column connections using compressed wood dowels and plates**. In: World Conference on Timber Engineering (WCTE). Trentino (Italy).2010.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, B.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber, **Wood Material Science and Engineering**, 2020.

JAKES, J. E., STONE, D. S., e FRIHART, C. R. Nanoindentation size effects in wood. In **Proceedings 30th annual meeting of the adhesion society** (pp. 15–17). (2007). Miscellaneous Publication.

KANAZAWA, F.; PIZZI A.; PROPERZI, M.; DELMOTTE, L.; PICHELIN, F. Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation. **J Adhes Sci Technology**. Vol 19. 1025–1038, 2005.

KIM, K. Predicting nail withdrawal resistance and bearing strength of cross-laminated timbers from mixed species. **BioResources**. 16. 4027-4038. (2021).
10.15376/biores.16.2.4027-4038

LUSZCKI, G. E.; CLAPP, J. D.; DAVIDS, W. G.; LOPEZ-ANIDO, R. Withdrawal capacity of plain, annular shank, and helical shank nail fasteners in Spruce-Pine-Fir lumber, **For. Prod. J.** 63 (5-6), 213–220, 2013.

MAHDAVIFAR, VAHID e SINHA, ARIJIT e BARBOSA, ANDRE e MUSZYNSKI, LECH e GUPTA, RAKESH. (2018). Lateral and Withdrawal Capacity of Fasteners on Hybrid Cross-Laminated Timber Panels. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 30. 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002432.

MENDOZA, Z. M. S. H., BORGES, P. H. D. M., RIBEIRO, A. S., e FERNANDES, F. B. Aspectos gerais sobre adesivos para madeira. **Multitemas**, 22(51), 49-68. (2017).

OGUNRINDE, O.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; LI, L. Flexural Properties of Downscaled Dowel-Type-Fastener Laminated Timber. **International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies** 5.11: 98-104, 2019.

OLIVEIRA, M. P., e SERAPHIM, L. F. (2015). Resistência ao cisalhamento das juntas adesivas produzidas com três diferentes espécies de madeiras e adesivos vinílicos para aplicações não estruturais. **Revista Árvore**, 39(2), 375-384. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000200017>.

O'LOINSIGH, C., OUDJENE, M., AIT-AIDER, H., FANNING, P., PIZZI, A., SHOTTON, E., MEGHLAT, E.M. Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded through wood dowels. **Constr. Build. Mater.** 36, 245–250. 2012.

PANG, S. J.; KIM, K. M.; PARK, S. H.; LEE, S. J. Bending Behavior of Nailed-Jointed Cross-Laminated Timber Loaded Perpendicular to Plane. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**. 45(6): 728-736, 2017.

PIMENTEL, T. S., Wimmer, P., Carvalho, H. R., Roitman, L., e Del Menezzi, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, 49(132), (2021). e3753. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19>

PIZZI, A.; DESPRES A.; MANSOURI, H. R.; LEBAN, J. M.; RIGOLET, S. Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, 13C-NMR and water resistance. **J Adhes Sci Technology**, Vol. 20: 427–436, 2006.

POCIUS, A. V. **Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction**. 2. ed. Munich (Alemanha): Hanser. ISBN 3446217312. 2002. 319 p.

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G.; BENDER, D. A. Withdrawal strength of threaded nails, **J. Struct. Eng.** 127 (4) 442-449, 2001.

RAMMER, D.R.; ZELINKA, S.L. 2004. Review of end grain nail withdrawal research. **Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-151**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 28 pages.

RAMMER, D. (2021). CHAPTER 8 Fastenings Contents. In: **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. General technical report FPL-GTR- 190, Ed: R.J.Ross, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2021.

SANTOS, M. C.; DEL MENEZZI, C. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta** 40, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. A., GONÇALVES, F. G., GAVA, G. C., TINTI, V. P., ALVES, S. D., e REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Materia**, 22(2), 1-13. (2017).

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. SISTEMA DE CADEIA DE CUSTÓDIA. Disponível online. Acesso em 20/03/2023.

SKULTETI, M. J.; BENDER, D. A.; WINSTORFER, S. G.; POLLOCK, D. G. Withdrawal strength of ring-shank nails embedded in southern pine lumber, *Trans. ASAE*, 40 (2) 451-456, 1997.

STRUCTURECRAFT. **Dowel Laminated Timber—Mass Timber Design Guide**, Ver. 3. Abbotsford, BC, Canada: StructureCraft; 2017. 24 p.

SZÜCS, C.A. **Aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado-colado**. Florianópolis: UFSC, Departamento de Engenharia Civil, 1992.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas de madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, 87, 471- 480, 2010.

THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION - APA. **Engineered Wood Construction Guide**. 102 pag. 2019.

THEILEN, R. D.; BENDER, D.A.; POLLOCK, D.; WINISTORFER, S. G. Lateral resistance of ring-shank nail connections in southern pine lumber. **Faculty publications** - Department of Mechanical and Civil Engineering. Paper 32, 1998.

VARANDA, L. D., YAMAJI, F. M., SANTOS, L. R. O., SILVA, D. A. L., CHRISTOFORO, A. L., e LAHR, F. A. R. Physical performance of particleboards using castor oil-based adhesive. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(10), 707-712. (2018). <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p707-712>.

VITAL, B. R.; Maciel, A. S.; Della Lucia, R.M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

WILLS, B.L., WINISTORFER, S.G., BENDER D.A., POLLOCK, D.G. Threaded-nail fasteners – Research and standardization needs. **Transactions of the ASAE** 39(2):661-668. 1996.

ZHANG, Y.; NEHDI, M.L.; GAO, X.; ZHANG, L. V. Flexural Performance of Novel Nail-Cross-Laminated Timber Composite Panels. **Applied Sciences**: 10(17):5983, 2020.

CAPÍTULO 3. EFEITO DE DIFERENTES MODELOS E DIMENSÕES DE PREGOS NA RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO EM MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)

1. INTRODUÇÃO

A resistência e estabilidade de qualquer estrutura dependem primariamente das conexões entre as suas partes. Uma grande vantagem da madeira como matéria prima estrutural é a facilidade com que se pode unir diferentes seções utilizando uma gama de elementos (RAMMER, 2021). Entre estes, podemos destacar os pregos, que são os elementos de ligação mais antigos e tradicionais (DE PAULA et al., 1988; RUAN et al., 2021).

Ao contrário de outros conectores como parafusos e adesivos, os pregos apresentam um baixo custo e não demandam infraestrutura específica para serem utilizados, podendo ser fixados na madeira de forma manual ou por meio de pistolas pregadoras pneumáticas. Além disso, são uma solução simples e viável para fazer ligações entre madeiras de baixa capacidade de adesão, em especial as folhosas com madeiras de alta densidade ou elevada presença de extrativos (HOSSEINZADEH et al., 2020).

A resistência ao arranquio de pregos está diretamente relacionada com a espécie de árvore, densidade da madeira, diâmetro dos pregos e profundidade de inserção na madeira (RAMMER e ZELINKA, 2004; MAHDAVIFAR et al., 2018; KIM, 2021). O prego mais comumente utilizado é o de haste lisa com cabeça, que resiste a esforços pela força de fricção entre as fibras da madeira e a haste do prego. As forças de fricção têm seu ponto máximo imediatamente após a inserção do prego, mas com o passar do tempo, ocorre um relaxamento das fibras com conseqüente perda da resistência ao arranquio. Esse efeito pode ser acentuado se a madeira for exposta a processos de secagem e encharcamento constantes (RAMMER e MENDEZ, 2008). Gahagan e Scholten (1938) registraram uma diminuição na resistência ao arranquio de pregos de 57%, 105 dias após a inserção dos pregos na madeira.

Ao longo do tempo, diversas melhorias foram agregadas aos pregos, em relação ao tamanho e forma, com o objetivo de melhorar o seu desempenho e resistência ao arranquio (THEILEN et al., 1998). Uma dessas melhorias é a aplicação, por compressão, de ranhuras espiraladas ou anelares nas hastes dos pregos (WILLS et al., 1996; LUSZCKI et al., 2013). Os pregos espiralados apresentam ranhuras em ângulos entre 30 e 70° em relação à sua haste e foram desenvolvidos originalmente para uso em madeiras de alta densidade. Durante a fixação na madeira, os pregos espiralados tendem a girar em torno de seu eixo (a exemplo dos

parafusos), gerando menores danos às fibras da madeira adjacente (RAMMER et al., 2001). Por sua vez, os pregos anelados apresentam ranhuras dispostas em ângulos de aproximadamente 90° e foram desenvolvidos com o propósito específico de aumentar a sua resistência ao arranquio (SKULTETI et al., 1997).

Ao contrário dos pregos lisos, que se fixam apenas pelas forças de fricção entre as fibras da madeira e a haste, os pregos com ranhuras possuem também resistência mecânica, pois durante a sua inserção, as fibras da madeira se encaixam entre as cristas das ranhuras (LUSZCKI et al., 2013). Para arrancar um prego espiralado ou anelado é necessário quebrar as fibras da madeira, o que exige uma força superior à de pregos de haste lisa de mesmas dimensões (SKULTETI et al., 1997; RAMMER et al., 2001; LUSZCKI et al., 2013).

Pregos com ranhuras são ideais para situações de carga extrema e condições adversas de umidade, pois o relaxamento e contrações das fibras tem pouco efeito na sua resistência (WILLS et al., 1996; RAMMER et al., 2001). Por outro lado, a presença dos anéis na haste do prego exige 15% mais energia para inserção na madeira (OGUNRINDE et al., 2019). Além disso, as deformações aplicadas para a criação das ranhuras resultam em diâmetros ligeiramente inferiores em relação a pregos lisos de mesma medida (WILLS et al., 1996).

Com o objetivo de prever o desempenho ao arranquio de pregos lisos e com ranhuras, diversos autores e instituições desenvolveram equações: Ehlbeck e Siebert (1988) apresentaram uma equação exclusiva para pregos espiralados. Rammer et al. (2001) desenvolveram uma equação para pregos espiralados e outra para anelados, enquanto Blass e Uibel (2007) desenvolveram uma equação única para pregos com ranhuras. O *American Wood Council* (AWC, 2018) e o *Forest Products Laboratory* (RAMMER, 2021) desenvolveram equações específicas para anelados. Pela ausência de estudos específicos, ambas as instituições sugerem o uso das equações destinadas aos pregos lisos para a predição da resistência ao arranquio de pregos espiralados.

Com o crescimento da consciência ambiental e o entendimento de que o uso da madeira é uma excelente forma de sequestrar carbono da atmosfera, mitigando as mudanças climáticas, surgiu um movimento mundial de retomada da utilização da madeira na construção civil (WANG et al., 2021; AHN et al., 2021; ABDOLI et al., 2022). Este movimento, que vem sendo denominado de “*massive timber constructions*”, ou em português: “construções em madeira massiva”, está baseado em diversas tecnologias construtivas e produtos engenheirados, entre os quais podemos mencionar: wood-frame, post-frame, vigas de madeira laminada colada (*glulam*), painéis de madeira lamelada colada cruzada (*CLT*), entre outras (AHN et al., 2021;

KIM, 2021). Apesar de contarem com alto nível de pré-fabricação dos seus componentes, todas estas técnicas utilizam e dependem de elementos de ligação metálicos.

No entanto, os dados disponíveis a respeito da resistência ao arranquio de pregos são escassos. A maior parte das pesquisas tem focado em pregos de haste lisa, de pequenos diâmetros, sendo testados em madeiras de coníferas de zonas temperadas (WILLS et al., 1996). Desta forma, existe uma grande lacuna de conhecimento no que se refere ao uso de pregos de maiores dimensões, espiralados ou anelados, para uso em madeiras de folhosas tropicais. Frente a este panorama, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes modelos e dimensões de pregos na resistência ao arranquio, visando explicitar o seu potencial e suas limitações para o uso na construção civil em madeira, além de testar as equações existentes para predição de suas resistências.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Confeção dos corpos de prova

Os ensaios de arranquio de pregos foram realizados com três modelos de pregos (lisos, espiralados e anelados), em duas dimensões distintas (16 x 24 e 18 x 30), totalizando seis tratamentos (Figura 1). Os pregos 16 x 24 têm diâmetro de haste de 2,8 mm e comprimento de 55 mm. Já o prego 18 x 30 possui diâmetro de haste de 3,5 mm e comprimento de aproximadamente 70 mm. Para evitar variações decorrentes de material, todos os pregos utilizados neste estudo foram do mesmo fabricante.



Figura 1. Pregos utilizados nos ensaios: liso 16 x 24, espiralado 16 x 24, anelado 16 x 24, liso 18 x 30, espiralado 18 x 30 e anelado 18 x 30.

Para a realização dos ensaios foi utilizada a madeira de dez árvores de *Allantoma decandra* (Ducke) S. A. Mori, Y. Y. Huang e Prance. A espécie pertence à família das Lecythidaceae e a sua madeira possui densidade básica aproximada de $0,57 \text{ g/cm}^3$, sendo considerada de média densidade (PIMENTEL et al., 2021). É nativa da floresta amazônica, não possui restrições legais de corte e vêm sendo explorada em áreas de manejo florestal sustentável (SFB, 2023).

Para cada tratamento foram confeccionados 10 corpos de prova (CPs), sendo um de cada árvore, com dimensões de $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}$, livres de defeitos como nós, rachaduras, esmoados etc. Após a confecção, os CPs foram depositados numa sala de aclimatação com temperatura e umidade controladas ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $65 \pm 1\%$), até a estabilização de sua umidade ($\pm 12\%$). Para fins de ensaios teóricos, foi calculado o volume e a massa dos corpos de prova a 12% de umidade e, após os ensaios, a 0% de umidade (secagem em estufa).

Com a utilização de um martelo, os pregos foram inseridos 32 mm na madeira, sem a realização de pré-furos. Foram fixados dois pregos na face radial e dois na face tangencial, tendo o cuidado de manter distância mínima de 19 mm das laterais, 38 mm das pontas e 50 mm entre os pregos, evitando deixá-los alinhados. Todos os 240 pregos (40 repetições por tratamento) foram arrancados dentro do período máximo de uma hora após a fixação nos CPs. Para a realização dos ensaios de arranquio foi utilizada uma máquina universal de ensaios com capacidade de 600 kN, de marca Martins Campelo. Os acessórios, cálculos e descrição dos resultados foram realizados conforme procedimentos previstos na norma ASTM D-143-2014 e a velocidade de ensaio foi de 2,0 mm/minuto.

2.2. Análise Estatística

O delineamento experimental foi fatorial, composto por seis tratamentos (duas dimensões e três modelos de pregos). Para avaliar os modelos e dimensões mais eficientes foram utilizados os valores das cargas máximas suportadas, que foram submetidos a uma análise de variância (Two-way ANOVA), a um nível de significância de 5% (intervalo de confiança de 95%) utilizando o software SPSS da IBM.

2.3. Ensaio Teóricos

Adicionalmente, foram realizados ensaios teóricos aplicando as características dos pregos e da madeira utilizados neste estudo às equações apresentadas por: Ehlbeck e Siebert (1988), Rammer et. al. (2001), Blass e Uibel (2007), National Design Specification (AWC,

2018) e *Wood Handbook* (Rammer, 2021) (Tabela 1). Os valores calculados pelas equações foram comparados aos obtidos de forma experimental, com a determinação de sua variação.

Tabela 1. Equações para predição da resistência ao arranquio de pregos.

Tipo de Pregos	Equação	Unidade	Fonte
Liso	$W = 1380 G^{5/2} D L$	LB	AWC (2018)
	$W = 54,12 G^{5/2} D L$	N	Rammer (2021)
Espiralado	$W = 36 \times 10^{-2} G^2 D L$	N	Ehlbeck e Siebert (1988)
	$W = 29,6 G^{1,28} D L$	N	Rammer et. al. (2001)
	$W = 0,117 D^{0,6} L G^{0,8}$	N	Blass e Uibel (2007)
	$W = 1380 G^{5/2} D L$	N	AWC (2018)
	$W = 54,12 G^{5/2} D L$	N	Rammer (2021)
	$W = 42,8 G^{1,38} D L$	N	Rammer et. al. (2001)
Anelado	$W = 0,117 D^{0,6} L G^{0,8}$	N	Blass e Uibel (2007)
	$W = 1800 G^2 D L$	LB	AWC (2018)
	$W = 77,57 G^2 D L$	N	Rammer (2021)

*W= Carga máxima; G= densidade da madeira; D= diâmetro do prego e L= profundidade de penetração do prego na madeira.

As equações propostas por Rammer (2021), utilizam os valores de densidade da madeira calculados a partir da massa a 0% de umidade e o volume a 12%. Todas as demais utilizam os valores de densidade da madeira calculados com base na massa e volume 0% de umidade. Os valores gerados pelas equações da AWC representam a carga máxima de resistência dividida por cinco para ajuste de condições de teste, segurança e duração da carga.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados das cargas máximas de resistência ao arranquio foram inicialmente analisados fazendo distinção entre os valores determinados nas faces radiais e tangenciais. Para todos os tipos e tamanhos de pregos, as faces tangenciais ofereceram maior resistência ao arranquio do que as faces radiais, o que pode ser explicado pelo maior número de camadas de parênquima, de maior densidade, transpassadas pelos pregos (TAJ et al., 2009; ABDOLI et al., 2022). No entanto, após a aplicação da ANOVA, foi constatado que os resultados obtidos para as faces radiais e tangenciais não apresentaram diferença estatisticamente significativa. Levando em

conta que essa observação já havia feita por outros autores em experimentos similares (AYTEKIN, 2008; TENG et al., 2018), os dados foram agrupados e analisados sem distinção de faces, conforme tabela 2.

Tabela 2. Valores médios da carga máxima de resistência da madeira de *A. decandra* ao arranquio de seis tipos de pregos e coeficientes de variação (C.V.).

Modelo/Dimensão	Carga máxima (N)	C.V. (%)
Liso 16 x 24	1039,70 a	15,7
Liso 18 x 30	1088,32 a	19,7
Espiralado 16 x 24	1330,10 b	26,8
Espiralado 18 x 30	1557,32 b	23,5
Anelado 16 x 24	2050,09 c	24,3
Anelado 18 x 30	2244,55 c	25,4

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si a 5% de significância.

De forma geral, a bibliografia científica a respeito de pregos indica uma correlação positiva entre aumento do diâmetro e resistência ao arranquio (GEHLOFF, 2011; MAHDAVIFAR 2018; CEYLAN e GIRGIN, 2020; LI, 2021). Neste estudo, o aumento no diâmetro dos pregos gerou um incremento na resistência ao arranquio de 5%, 17% e 9,5 % para os pregos lisos, espiralados e anelados, respectivamente. No entanto, a análise de variância dos efeitos dos modelos e dimensões dos pregos sobre os resultados de carga máxima obtidos, demonstrou que apenas os modelos tiveram efeito significativo (P valor < 0,05) a um intervalo de confiança de 95%, não existindo diferença estatisticamente significativa entre as médias de diferentes dimensões de um mesmo modelo.

Conforme esperado, os pregos lisos apresentaram os mais baixos valores de resistência ao arranquio. Os pregos espiralados apresentaram um acréscimo de resistência na ordem de 30 a 40% (de acordo com a dimensão), similar a dados encontrados na literatura (Blass e Uibel, 2004). Os pregos anelados apresentaram os mais altos valores de resistência ao arranquio, sendo aproximadamente o dobro dos valores apresentados pelos pregos lisos de mesma dimensão. Este resultado foi compatível aos dados apresentados por Skulteti et al. (1997) e Rammer (2021).

Os valores determinados para os coeficientes de variação oscilaram entre 15 e 27%. Apesar de elevados, são considerados satisfatórios para ensaios de arranquio de pregos, visto que a aplicação dos pregos de forma manual é sujeita a variações decorrentes do operador. Estes

valores tiveram variação menor do que os apresentados por Rammer et al. (2001) para os mesmos três tipos de pregos: anelares = 17% a 32%, espiralados = 12% a 41% e lisos = 22% a 48%. Além dos valores de carga máxima alcançada, o comportamento dos diferentes tipos de pregos testados também pode ser explicado por meio das curvas formadas pelos gráficos “deslocamento x carga” (Figura 2).

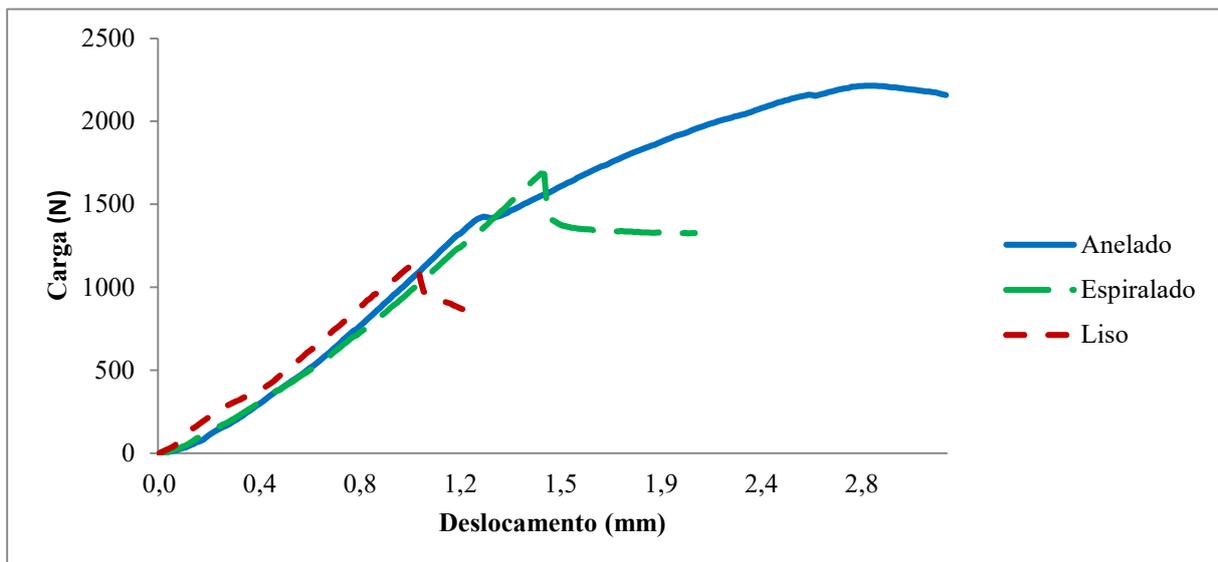


Figura 2. Gráfico com as curvas típicas para pregos anelados, espiralados e lisos durante o ensaio de arranquio de prego.

Ao iniciar o ensaio, os pregos de haste lisa sofrem efeito da fricção estática, apresentando um comportamento inicial entre carga e deslocamento linear. Após a resistência máxima ser atingida, o gráfico apresenta uma queda brusca e a resistência passa a ser exercida pelo coeficiente dinâmico de fricção. A conexão segue perdendo resistência até o arranquio total do prego.

A presença das ranhuras dos pregos espiralados aumenta a superfície de atrito garantindo uma resistência prolongada, que permite atingir cargas máximas superiores aos pregos lisos (LUSZCKI et al., 2013). Após atingirem a carga máxima, apresentam uma queda brusca e tendência à estabilização. Durante este momento, as ranhuras ainda exercem fricção dinâmica contra às fibras da madeira e a conexão ainda é capaz de resistir a grande parte da carga máxima atingida enquanto o prego é destacado da madeira.

Os pregos anelados apresentam inicialmente um comportamento linear elástico, proporcionado pela resistência mecânica das fibras da madeira. Com o início do rompimento das fibras, os gráficos assumem um comportamento não linear (inelástico) até atingirem os

valores de carga máxima. Após o pico, a carga diminui rapidamente, pois ocorre o arranquio das fibras de madeira que estavam embutidas entre os anéis (SKULTETI et al., 1997; RAMMER et al., 2001). A partir deste momento, a resistência se dá apenas por fricção, sendo similar ao comportamento apresentado pelos pregos de haste lisa (LUSZCKI et al., 2013; CEYLAN et al., 2019).

A inserção dos pregos lisos ocorre apenas pelo afastamento das fibras da madeira, portanto, o seu arranquio ocorre sem causar maiores danos. Os pregos espiralados tendem a girar em torno de seu eixo durante a fixação na madeira, o que reduz grandemente o impacto às fibras adjacentes. No entanto, o mesmo não ocorre durante o arranquio, ocasionando o arranquio de pequenas porções de madeira. Por sua vez, durante o arranquio dos pregos anelados, todas as fibras que se encontram alojadas entre os anéis são cortadas, arrancadas e trazidas à superfície na forma de uma coluna de fragmentos aderidos a haste do prego (Figura 3). O mesmo comportamento foi observado nos estudos conduzidos por Ceylan et al. (2019) e Pang et al. (2020).

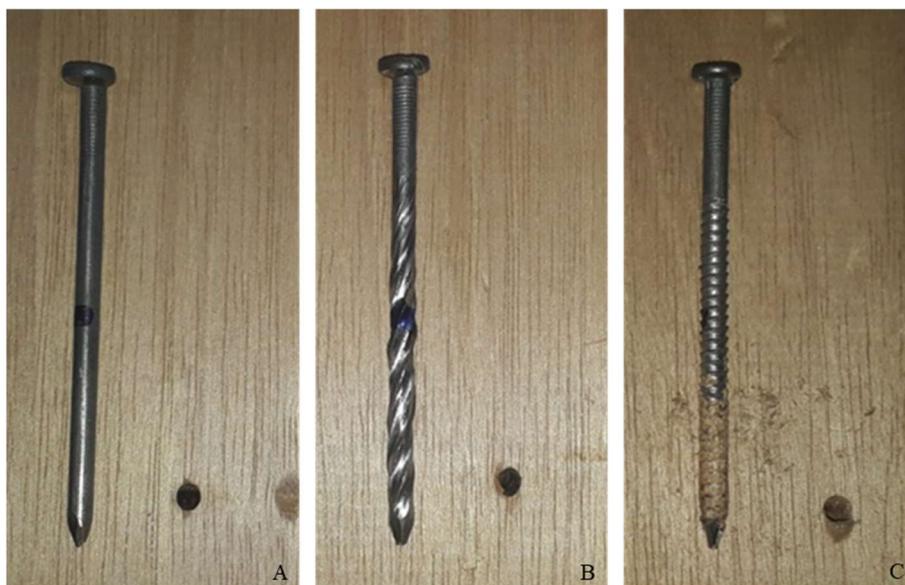


Figura 16. Modos típicos de falha da madeira após arranquio de pregos: **(A)** o prego liso não causa danos à madeira; **(B)** o prego espiralado arranca pequenas quantidades de fibras; **(C)** o prego anelado arranca uma coluna de fragmentos de fibras aderidos a sua haste.

Segundo Li et al. (2021), a retirada dos pregos ocasiona vários níveis de estresse na interface entre as ranhuras das hastes e os componentes da madeira, levando a uma combinação de cisalhamento e tração das fibras. Em função das camadas de parênquima, que apresentam uma densidade mais elevada, esses efeitos são ainda mais pronunciados nas faces tangenciais

(TAJ et al., 2009; ABDOLI et al., 2022). Dessa forma, ocorre uma maior interação entre os tecidos da madeira e os pregos, resultando numa maior resistência ao arranquio e consequentemente maior dano à superfície da madeira (ABDOLI et al., 2022).

Com base na densidade da madeira de *A. decandra*, diâmetros dos pregos testados e profundidade de inserção dos pregos, foram estimadas as cargas máximas de resistência ao arranquio dos seis tipos de prego utilizando as equações encontradas na literatura especializada (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de carga máxima (N) obtidos nos ensaios e estimados pelas equações, para cada tipo de prego testado.

Tipo de Pregos	Ensaio (N)	Ehlbeck e Siebert (1988)	Rammer et. al. (2001)	Blass e Uibel (2007)	AWC (2018)	Rammer (2021)
Liso	1040	-	-	-	1452	1359
16 x 24					(+40%)	(+31%)
Liso	1088	-	-	-	1815	1762
18 x 30					(+67%)	(+62%)
Espiralado	1330	1363	1528	1236	1452	1359
16 x 24		(+2%)	(+15%)	(-6%)	(+9%)	(+2%)
Espiralado	1557	1704	1910	1413	1815	1762
18 x 30		(+9%)	(+23%)	(-9%)	(+17%)	(+13%)
Anelado	2050	-	2116	1236	2344	2936
16 x 24			(+3%)	(-40%)	(+14%)	(+43%)
Anelado	2245	-	2645	1413	2941	3671
18 x 30			(+18%)	(-37%)	(+31%)	(+64%)

Os valores entre parênteses (%) se referem à diferença entre os valores estimados e observados nos ensaios.

As equações da AWC (2018) e de Rammer (2021) superestimaram os valores de carga máxima de arranquio de pregos lisos para as duas dimensões testadas em cerca de 30 e 60% para pregos 16 x 24 e 18 x 30, respectivamente.

Todas as equações testadas para pregos espiralados geraram resultados próximos aos obtidos experimentalmente, com destaque para a equação de Blass e Uibel (2007) que subestimou a carga máxima em 6% para os pregos 16 x 24 e aproximadamente 9% para os pregos 18 x 30.

Para a predição da carga máxima de resistência dos pregos anelados, a equação mais precisa foi a de Rammer et al. (2001), com superestimativa de cerca de 3% e 18% para pregos 16 x 24 e 18 x 30, respectivamente. É importante destacar, que, para fins de cálculo de projetos estruturais, é mais interessante que as equações subestimem os valores de resistência, aumentando a margem de segurança do projeto. Portanto, a equação de Blass e Uibel (2007) pode ser considerada a mais adequada.

4. CONCLUSÃO

O modelo de prego utilizado foi o fator mais relevante deste estudo, tendo influência direta na resistência ao arranquio. Os pregos anelados apresentaram os mais altos valores, seguidos pelos pregos espiralados e lisos. A dimensão dos pregos não teve efeito significativo sobre o resultado de carga máxima.

As equações para estimativa da resistência ao arranquio demonstraram uma boa correlação com os dados obtidos experimentalmente, sendo importantes ferramentas para antecipar o comportamento de estruturas de madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDOLI, F.; RASHIDI, M.; ROSTAMPOUR-HAFTKHANI, A.; LAYEGHI, M.; EBRAHIMI, G. Withdrawal Performance of Nails and Screws in Cross-Laminated Timber (CLT) Made of Poplar (*Populus alba*) and Fir (*Abies alba*). **Polymers** 2022, 14, 3129. <https://doi.org/10.3390/polym14153129>
- AHN K.S., PANG S.J., OH J.K. Prediction of withdrawal resistance of single screw on Korean wood products. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**. 2021; 49(1):93-102
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D-143: Standard Test Methods for small clear specimens of timber**. West Conshohocken, 2000.
- AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). 2018. **National Design Specification for Wood Construction with Commentary 2018 Edition**. Leesburg, VA 20175.
- AYTEKIN, A. Determination of screw and nail withdrawal resistance of some important wood species, **Int. J Mol. Sci.** 9 (4) (2008) 626-637.
- BLASS, H. J., FELLMOSE, D. P. "Design of solid wood panels with cross layers", In: **Proceedings WCTE 2004 - World Conference on Timber Engineering**, pp. 543-548, 2004.
- BLASS, H.J. e UIBEL, T. Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz, **Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau**, Karlsruhe, Germany, 2007.

CEYLAN, AYGÜL e GIRGIN, Z. CANAN. Comparisons on Withdrawal Resistance of Resin and Phosphate Coated Annular Ring Nails in CLT Specimens. **Construction and Building Materials**. 238. 1-10. (2020). 10.1016/j.conbuildmat.2019.117742.

DE PAULA, E.M., Rocha, J.S., Nascimento, C.C. Extração de pregos em madeiras da Amazonia. **Acta Amazonica** 18(3-4): 243-253. 1988.

EHLBECK, J. e SIEBERT, W. Axially loaded nails: Proposals for supplement to the CIB code, Int. **Council Build. Res. Studies Documentation Working Commission W18A-Timber Struct.** CIB-W18A/21-7-5, Universität Karlsruhe, Germany, 1988.

GAHAGAN, J.M. AND SCHOLTEN, J.A. Resistance of Wood to the Withdrawal of Nails, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 1938.

GEHLOFF, M. Pull-Out Resistance of Self-Tapping Wood Screws with Continuous Thread; University of British Columbia: Vancouver, BC, Canada, 2011.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, B.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber, **Wood Material Science and Engineering**, 2020.

KIM, K. Predicting nail withdrawal resistance and bearing strength of cross-laminated timbers from mixed species. **Bio Resources**. 16. 4027-4038. (2021). 10.15376/biores.16.2.4027-4038

LI, X.; ASHRAF, M.; SUBHANI, M.; GHABRAIE, K.; LI, H.; KREMER, P. Withdrawal resistance of self-tapping screws inserted on the narrow face of cross laminated timber made from Radiata Pine. **Structures** 2021, 31, 1130–1140.

LUSZCKI, G. E.; CLAPP, J. D.; DAVIDS, W. G.; LOPEZ-ANIDO, R. Withdrawal capacity of plain, annular shank, and helical shank nail fasteners in Spruce-Pine-Fir lumber, **For. Prod. J.** 63 (5-6), 213–220, 2013.

MAHDAVIFAR, V.; SINHA, A., BARBOSA, A.; MUSZYNSKI, L.; GUPTA, R. Lateral and Withdrawal Capacity of Fasteners on Hybrid Cross-Laminated Timber Panels. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 30. (2018). 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002432.

OGUNRINDE, O.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; LI, L. Flexural Properties of Downscaled Dowel-Type-Fastener Laminated Timber. **International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies** 5.11: 98-104, 2019.

PANG, S.-J.; AHN, K.-S.; KANG, S.G.; OH, J.-K. Prediction of withdrawal resistance for a screw in hybrid cross-laminated timber. **J. Wood Sci.** 66, 79. 2020.

PIMENTEL, T. S., WIMMER, P., CARVALHO, H. R., ROITMAN, L., e DEL MENEZZI, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, 49(132), (2021). e3753. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19>

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G.; BENDER, D. A. Withdrawal strength of threaded nails, **J. Struct. Eng.** 127 (4) 442-449, 2001.

RAMMER, D.R.; ZELINKA, S.L. Review of end grain nail withdrawal research. **Gen. Tech. Rep.** FPL-GTR-151. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2004. 28 pages

RAMMER, D.R.; MENDEZ, A.M. Withdrawal strength of post-frame ring shank nails. **Frame Building News**. April. 2008. p. 59–67.

RAMMER, Douglas. CHAPTER 8 Fastenings Contents. In: **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. General technical report FPL-GTR- 190, Ed: R.J.Ross, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2021.

RUAN, G.; FILZ, I.; GÜNTHER, H. e FINK, G. Shear capacity of timber-to-timber connections. using wooden nails, **Wood Material Science and Engineering**, 2021. DOI: 10.1080/17480272.2021.1964595

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Sistema de Cadeia de Custódia**. Disponível online. Acesso em 20/06/2022.

SKULTETI, M. J.; BENDER, D. A.; WINSTORFER, S. G.; POLLOCK, D. G. Withdrawal strength of ring-shank nails embedded in southern pine lumber, *Trans. ASAE*, 40 (2) 451-456, 1997.

TAJ, M.A.; KAZEMI NAJAFI, S.; EBRAHIMI, G. Withdrawal and lateral resistance of wood screw in beech, hornbeam and poplar. **Eur. J. Wood Wood Prod**. 2009, 67, 135–140.

TENG, Q.; QUE, Z.; LI, Z.; ZHANG, X. Effect of installed angle on the withdrawal capacity of self-tapping screws and nails. In **Proceedings of the World Conference of Timber Engineering**, Seoul, Korea, 20–23 August 2018.

THEILEN, R. D.; BENDER, D.A.; POLLOCK, D.; WINISTORFER, S. G. Lateral resistance of ring-shank nail connections in southern pine lumber. **Faculty publications** - Department of Mechanical and Civil Engineering. Paper 32, 1998.

WANG, Y.; LIAN, W.; BENJEDDOU, O. Experimental and numerical investigation on withdrawal connectors usage for lateral resistance of timber shear wall's structure. **J. Build. Eng.** 2021, 44, 103266.

WILLS, B.L., WINISTORFER, S.G., BENDER D.A., POLLOCK, D.G. Threaded-nail fasteners – Research and standardization needs. **Transactions of the ASAE** 39(2):661-668. 1996.

CAPÍTULO 4. PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE CLT, NCLT E DCLT CONFECCIONADOS COM A MADEIRA DE *Allantoma decandra* (Lecythidaceae)

1. INTRODUÇÃO

Entre os produtos engenheirados de maior destaque na atualidade estão os painéis de madeira lamelada colada cruzada, mais conhecidos pelo termo em inglês "*Cross-laminated Timber (CLT)*". Os painéis são formados por pelo menos três camadas ortogonais de madeira serrada, formando um sólido retangular que suporta cargas no sentido paralelo e perpendicular ao plano do painel, permitindo a sua aplicação como elemento de paredes, pisos e telhados (BRANDNER et al., 2016; ANSI, 2019). Em função do seu baixo peso e facilidade de montagem atribuída ao alto grau de pré-fabricação, a execução dos projetos construtivos se torna mais rápida, sendo resumida a alocação e conexões entre painéis (JELEC et al., 2018). Além disso, os painéis possuem bom isolamento térmico, acústico e resistência a incêndios (SHARIFNIA e HINDMAN, 2017), tornando o CLT uma opção viável em diferentes tipos de construções como escritórios, edifícios comerciais e complexos residenciais de múltiplos andares (HASHEMI e QUENNEVILLE, 2020).

Apesar das qualidades comprovadas dos painéis de CLT, existem diversos pontos questionáveis em relação a sua fabricação: exigem grande investimento em equipamentos e estrutura (BRANDNER, 2013; PANG et al., 2017); a maioria dos adesivos é suscetível à exposição ambiental, comprometendo a sua vida útil (CHEN et al., 2019); as grandes quantidades de adesivos utilizadas geram poluição ambiental (ATAEI et al., 2019; ZHANG et al., 2020); e existe uma dificuldade em reutilizar, reciclar e destinar os painéis após uso, visto que estão impregnados por adesivos potencialmente tóxicos (CHANG e NERCHOU, 2015).

Com objetivo de contornar os altos investimentos e as questões ambientais envolvidas na produção dos painéis colados, diversas pesquisas foram realizadas buscando desenvolver produtos alternativos. Entre os produtos mais promissores, podemos destacar: os painéis de madeira lamelada cruzada pregada (Nail Cross-laminated Timber - NCLT) e os painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada (Dowel Cross-laminated Timber - DCLT).

A tecnologia de NCLT utiliza o mesmo processo de preparo das lamelas, mas ao contrário dos painéis de CLT que demandam a utilização de prensas, os painéis pregados podem ser fabricados no pátio de obras, apenas com um pregador pneumático, reduzindo o tempo de montagem (PANG et al., 2017). A utilização de pregos ao invés de adesivos também permite

expandir a gama de espécies utilizadas, incluindo aquelas com baixa capacidade de adesão (HOSSEINZADEH et al., 2020).

Diversos estudos têm demonstrado que painéis com conexões metálicas possuem bom desempenho e longa durabilidade em serviço na construção civil. Derikvand et al. (2019) confeccionaram painéis de lamelas paralelas pregadas com madeira das espécies *Eucalyptus nitens* e *Eucalyptus globulus*, e concluíram que as duas espécies demonstraram desempenho suficientes para fabricação de produtos estruturais, com alto valor agregado. Hosseinzadeh et al. (2020) testaram o desempenho de painéis de CLT e NCLT confeccionadas com madeira do gênero *Abies*, utilizando adesivos à base de poliuretano e pregos de haste lisa, não encontrando diferenças significativas entre o desempenho dos dois tipos de painéis.

Zhang et al. (2020) testaram painéis de NCLT confeccionados com madeiras norte-americanas e diferentes tipos de conectores metálicos (pregos de haste lisa, pregos anelados e parafusos), ângulo de incidência, número de conectores e número de camadas. Os resultados demonstraram que o modo de falha dos painéis está diretamente ligado aos diferentes tratamentos, mas de uma forma geral, os painéis de NCLT apresentaram excelentes desempenhos em flexão, indicando o seu potencial como material sustentável e resiliente para a construção de estruturas leves.

Por sua vez, os painéis de madeira laminada cruzada cavilhada são formados por camadas ortogonais de lamelas de madeiras, em geral, de coníferas, unidas por cavilhas de madeiras de folhosas com alta densidade. Foram patenteados em 1998 pela empresa Thoma Holz100. Pelo fato de serem praticamente 100% madeira, a tecnologia DCLT possui um alto apelo ambiental e têm despertado interesse na Europa e América do Norte (GONG, 2019). Além disso, por não possuírem conexões metálicas, os painéis de DCLT podem ser facilmente beneficiados sem comprometer as ferramentas utilizadas para corte e acabamento.

O número de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e caracterização de produtos engenheirados conectados por cavilhas ainda é limitado, contudo, existem resultados promissores: Plowas et al. (2015) avaliaram o potencial de painéis, unidos por cavilhas, confeccionados com madeira de espécies do gênero *Larix* para uso como pisos. Além de obterem resultados positivos a respeito das propriedades mecânicas, os painéis também apresentaram excelentes desempenhos em avaliações pós-ocupação. Dourado et al. (2019) compararam o desempenho de lamelas unidas por cavilhas e adesivos. Para as lamelas unidas por cavilhas, os autores encontraram valores de rigidez e resistência correspondentes a 54% e 81%, respectivamente, de uma estrutura similar confeccionada com adesivo.

Sotayo et al. (2020) manufaturaram e testaram painéis de lamelas cruzadas, conectadas por cavilhas de madeiras, utilizando diferentes arranjos entre as lamelas e cavilhas. O seu trabalho concluiu que: cavilhas com maior diâmetro e em maior número geraram um incremento no módulo de elasticidade; e as propriedades estruturais das vigas e lamelas foram mais influenciadas pela variação de espécies e resistência das lamelas do que das cavilhas. Apesar da resistência mecânica dos painéis de DCLT fabricados ter ficado consideravelmente abaixo de valores encontrados para painéis de dimensões semelhantes unidas por adesivos, a pesquisa demonstrou que painéis cavilhados apresentam um comportamento mais dúctil do que os colados, indicando potencial de uso em regiões sujeitas a abalos sísmicos.

A construção civil com CLT teve um grande avanço em 2012, após a *American National Standards Institute* (ANSI) e *The Engineered Wood Association* (APA) publicarem a norma conjunta PRG-320. A norma definiu especificações técnicas, métodos de ensaio e classes de desempenho para painéis de CLT manufaturados a partir de madeira de espécies coníferas norte-americanas. Apesar das classes terem sido elaboradas especificamente para painéis colados com madeira de coníferas, diversos autores (KRAMER et al., 2014; PEREIRA e CALIL JUNIOR, 2019; VETSCH, 2015; MOHAMADZADEH e HINDMAN, 2015) as têm utilizado como parâmetro para avaliar o desempenho estrutural de painéis de CLT confeccionados com madeiras de folhosas, assim como painéis de NCLT e DCLT.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o potencial da madeira de *Allantoma decandra*, espécie folhosa amazônica, como matéria-prima para a produção de painéis de madeira lamelada cruzada, utilizando pregos, adesivos e cavilhas como elementos de ligação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar o potencial da madeira de *A. decandra* como matéria-prima para a produção de madeira lamelada cruzada, foram confeccionados e ensaiados painéis NCLT, DCLT e CLT, seguindo a metodologia apresentada na norma PRG-320 (ANSI-APA, 2019).

2.1. Confeção dos Painéis

A madeira utilizada neste experimento foi oriunda de dez árvores de *Allantoma decandra* (Ducke) S.A.Mori, Y.Y.Huang & Prance, coletadas na Floresta Nacional de Jacundá, estado de Rondônia. A espécie pertence à família das Lecythidaceae e a sua madeira possui densidade básica de 0,57 g/cm³, (PIMENTEL et al., 2021). A espécie é nativa da floresta

amazônica, não possui restrições legais de corte e vêm sendo explorada em áreas de manejo florestal sustentável (SFB, 2022).

Após a secagem ao ar livre, a madeira foi desdobrada em lamelas com seção transversal de 2 cm x 16 cm, que foram avaliadas visualmente para detecção e eliminação de peças com defeitos, como nós e rachaduras. As lamelas selecionadas foram depositadas em sala de aclimação com temperatura e umidade controladas ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $65 \pm 1\%$), até a estabilização de sua umidade (aproximadamente 12%).

Os painéis foram compostos por três camadas e duas lamelas de largura, resultando na seção transversal de 6 cm x 32 cm. Para atender aos requisitos de dimensões mínimas da norma PRG 320-2019, os painéis para os ensaios de flexão foram confeccionados com 200 cm de comprimento e os de cisalhamento com 32 cm, conforme figura 1. Após sua confecção, os painéis foram depositados na sala de aclimação, onde permaneceram até a realização dos ensaios.

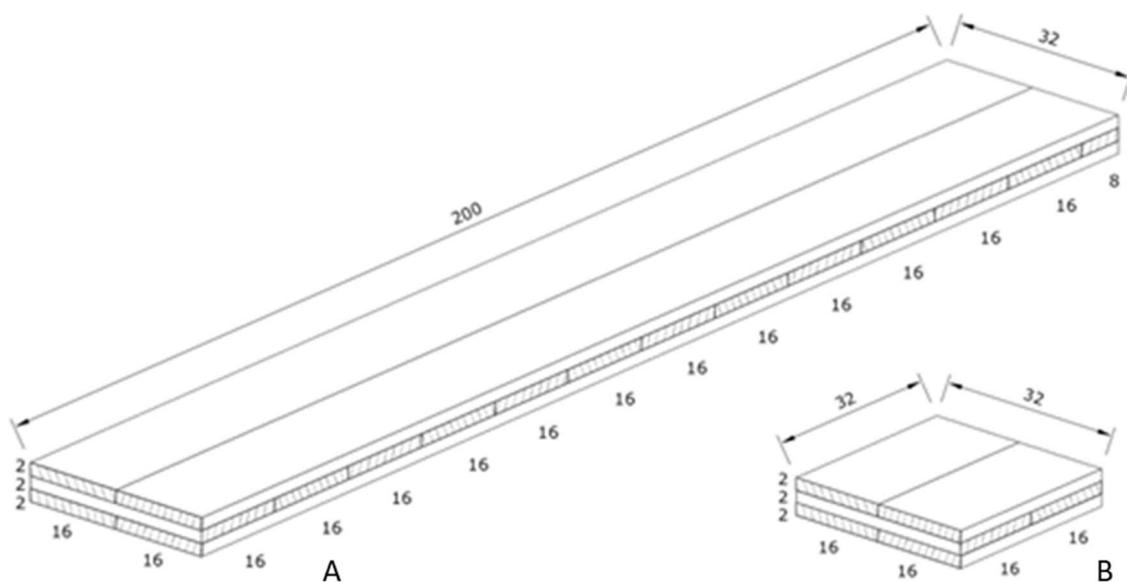


Figura 1. Esquema da confecção dos painéis: (A) para determinação da rigidez e resistência; (B) para determinação do cisalhamento. Medidas em centímetros.

Os painéis de NCLT foram confeccionados utilizando pregos anelados 18 x 30 (3,7 x 70 mm) de marca Gerda, dispostos em linhas, com distanciamento de quatro centímetros das bordas e oito centímetros entre pregos, num total de 100 pregos/painel de flexão e 16 pregos/painel de cisalhamento ($156 \text{ pregos/metro}^2$). Para facilitar a fixação dos pregos e mitigar o surgimento de defeitos que pudessem interferir no resultado dos ensaios, foi realizada uma pré-furação utilizando uma broca com diâmetro de aproximadamente 50% do diâmetro do

prego. A seguir, os pregos foram fixados com um martelo, sendo metade de cada lado. As pontas dos pregos que transpassaram as três lamelas foram serradas rente aos corpos de prova para não interferir nos resultados (Figura 2A).



Figura 2. (A) Eliminação das pontas dos pregos no painel de madeira lamelada cruzada pregada. (B) Painel de madeira lamelada cruzada cavilhada. (C) Montagem das lamelas sobre a prensa para a confecção do painel de madeira lamelada cruzada colada.

Os painéis de DCLT foram confeccionados utilizando cavilhas lisas com 2 cm de diâmetro e 6 cm de comprimento, dispostas em linhas, com distanciamento de quatro centímetros das bordas e oito centímetros entre cavilhas, num total de 100 cavilhas/painel de flexão e 16 cavilhas/painel de cisalhamento (156 cavilhas/metro²). As cavilhas foram obtidas por meio do torneamento de peças de madeira de roxinho (*Peltogyne lecointei* Ducke), que possui densidade básica aproximada de 0,86 g/cm³, sendo considerada uma madeira de alta densidade (PIMENTEL et al., 2021). A espécie também é nativa da floresta amazônica, não possui restrições legais de corte e vêm sendo explorada em áreas de manejo florestal sustentável (SFB, 2022).

As cavilhas foram previamente secas em estufa com ventilação forçada à temperatura de 103° C até atingirem massa constante (teor de umidade = 0%). Neste ponto, as cavilhas sofreram contração, o que favoreceu a sua inserção nas lamelas de madeira com pré-furação de mesmas dimensões. Ao absorverem umidade do ambiente, as cavilhas voltaram a expandir suas dimensões, garantindo um encaixe bem ajustado (Figura 2B).

Para a colagem das lamelas dos painéis de CLT, foi aplicado o adesivo a base de Acetato de polivinila crosslink (PVAc) de marca Titebond Ultimate III, utilizando a gramatura 200g/m² e pressão de aproximadamente 1,0 MPa, conforme recomendações do fabricante. A seguir, as lamelas foram montadas e prensadas utilizando grampos para fixação lateral e uma laje de reação com barras rosqueadas (Figura 2C). A pressão de prensagem foi controlada com o uso de um torquímetro digital.

2.2. Ensaaios

O desempenho dos painéis pregados, cavilhados e colados, foi avaliado por meio dos ensaios de flexão de quatro pontos, para a determinação da rigidez (E_m) e resistência (f_m), e ensaios de três pontos, para a determinação da tensão máxima de cisalhamento (f_v). Ambos os ensaios foram realizados com os painéis na posição horizontal (*flatwise*), com a aplicação da carga sendo realizada perpendicularmente à camada externa do CLT (direção de maior resistência). Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios de marca Martins Campelo, com capacidade de 600 kN, seguindo as diretrizes da norma PRG-320 (ANSI, 2019) e D-198 (ASTM, 2003).

Para a determinação da rigidez e resistência foram ensaiados quatro painéis de cada um dos tratamentos (pregos, cavilhas e adesivo). Os painéis foram posicionados com um vão de 180 cm entre os apoios (L) e a carga foi aplicada com as cabeças posicionadas a uma distância de 60 cm dos apoios e entre elas (L/3), conforme figura 3A. A velocidade de carga utilizada foi de 5,0 mm/min sendo registrada a relação carga/deslocamento.

Para determinar a tensão máxima de cisalhamento, foram ensaiados oito painéis de cada um dos tratamentos (pregos, cavilhas e adesivo). Os painéis foram posicionados com um vão de 32 cm entre os apoios (L), sem excedentes, e a carga foi aplicada no centro da peça, a uma distância de 16 cm até o centro dos apoios (L/2), conforme figura 3B. A velocidade de carga utilizada foi de 2,5 mm/min.

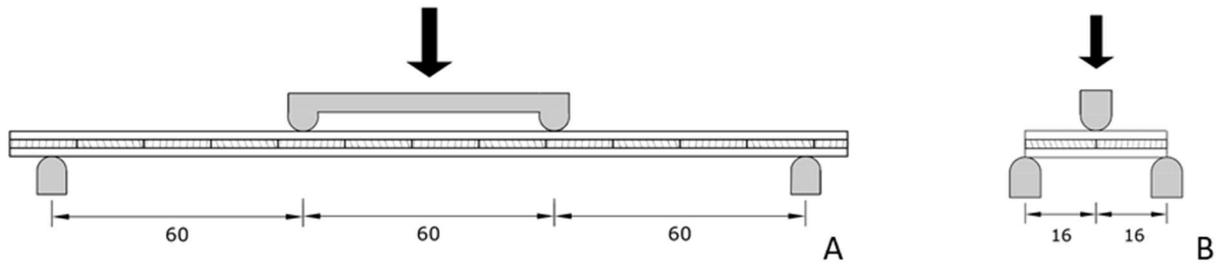


Figura 3. Esquema dos ensaios: **(A)** de flexão; **(B)** cisalhamento.

A rigidez, resistência e a tensão máxima de cisalhamento foram calculadas utilizando as equações (1), (2) e (3) da norma ASTM D198, respectivamente. O desempenho dos painéis foi avaliado com base nos resultados obtidos pelos tratamentos, análise dos gráficos dos ensaios e dos modos de ruptura, além da comparação com dados de literatura e com os valores de referência apresentados pela norma PRG 320.

$$E_m = \frac{P'L^3}{4.7bh^3\Delta} \quad \text{Equação 1.}$$

$$f_m = \frac{PL}{bh^2} \quad \text{Equação 2.}$$

$$f_v = \frac{3}{4} \frac{P}{bh} \quad \text{Equação 3.}$$

Onde:

P' = Carga aplicada no limite proporcional (N)

P = Carga máxima aplicada (N)

L = Vão de ensaio (mm)

b = Largura da seção transversal (mm)

h = Altura da seção transversal (mm)

Δ = Deslocamento ou flecha no limite proporcional (mm).

2.3. Análise Estatística

Para avaliar o desempenho dos painéis de CLT, NCLT e DCLT foram utilizados os valores de rigidez, resistência e a tensão máxima de cisalhamento. Os valores foram submetidos à estatística descritiva, análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, a um nível de significância de 5% (intervalo de confiança de 95%), utilizando o software SPSS da IBM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização do ensaio de flexão, foi observado que os painéis colados obtiveram os mais altos valores médios de rigidez (15.367 MPa) e resistência (76,51 MPa), seguidos pelos painéis cavilhados (5.824 MPa e 31,55 MPa), e por fim, os painéis pregados (3.426 MPa e 48,52 MPa) (Tabela 1). Após a realização da ANOVA e teste de Tukey, foi constatado que as médias dos três tratamentos apresentaram diferença estatisticamente significativa para ambos os quesitos avaliados. Os valores médios de rigidez obtidos pelos painéis pregados e cavilhados foram de aproximadamente 22% e 38 %, respectivamente, do valor médio obtido pelos painéis colados. Os valores médios de resistência obtidos pelos painéis pregados e cavilhados foram de aproximadamente 41% e 63 %, respectivamente, do valor médio obtido pelos painéis colados.

Tabela 1. Médias de rigidez (E_m), resistência (f_m) e coeficientes de variação (C.V. %) obtidos para os painéis pregados, cavilhados e colados após o ensaio de flexão estática de quatro pontos. Letras iguais após as médias indicam que não há diferença significativa.

Painéis	E_m (MPa)	C.V. (%)	f_m (MPa)	C.V. (%)
Pregados	3.426 a	16,1	31,55 a	20,8
Cavilhados	5.824 b	16,7	48,52 b	13,9
Colados	15.367 c	5,1	76,51 c	3,7

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os coeficientes de variação (C.V. %) de rigidez e resistência foram de 5,1% e 3,7% para os painéis colados, 16,7% e 13,9 % para os cavilhados e 16,1% e 20,8 % para os pregados, respectivamente. Os valores de C.V. calculados para os painéis colados são considerados excelentes, demonstrando a uniformidade gerada pelos adesivos. Os valores de C.V. obtidos pelos demais painéis podem ser considerados satisfatórios, visto que a sua confecção foi feita de forma manual, estando sujeita a variações decorrentes das ferramentas e do operador.

O desempenho dos diferentes tipos de painéis testados também pode ser explicado por meio das curvas formadas pelos gráficos “deslocamento x carga” (Figura 4), que se mostraram bastante homogêneos entre os corpos de prova de cada tratamento. Em função de sua baixa rigidez, os painéis pregados apresentaram as maiores deformações, chegando próximos ao limite máximo da estrutura montada para os ensaios. Os painéis cavilhados apresentaram comportamento quase linear entre deslocamento e carga até a resistência máxima ser atingida. E, por sua vez, os painéis colados apresentaram inicialmente um padrão linear, indicando a fase elástica do painel. Após certo ponto, a carga suportada deixou de aumentar significativamente e o gráfico apresentou uma tendência à estabilização, que se manteve até o rompimento do painel.

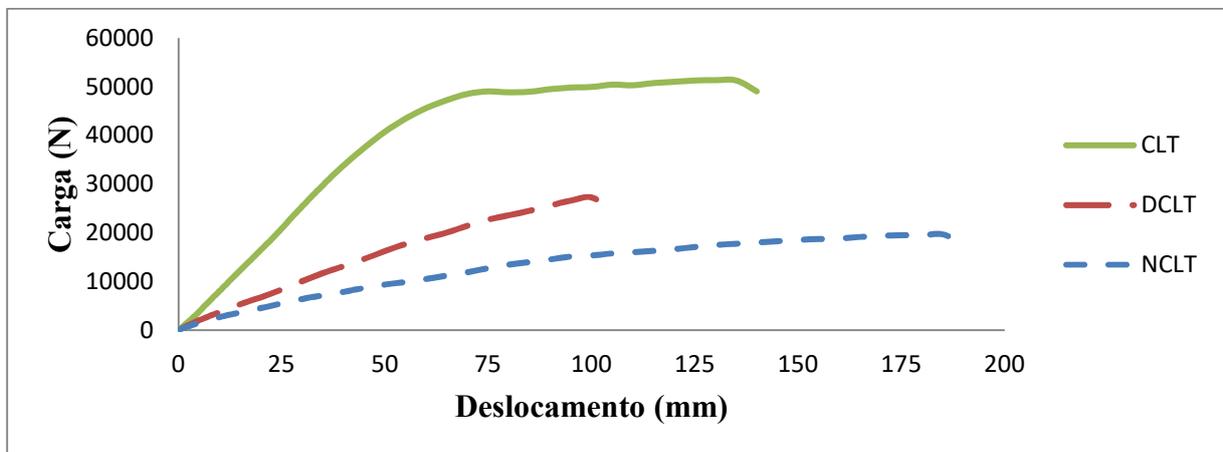


Figura 4. Curvas típicas de deslocamento x carga de painéis de CLT, DCLT e NCLT, submetidos ao ensaio de flexão estática de quatro pontos.

Os painéis de NCLT foram confeccionados utilizando pregos anelados que, além de possuírem resistência por fricção, também apresentam resistência mecânica gerada pelo embutimento das fibras da madeira entre os anéis (SKULTETI et al., 1997; RAMMER et al., 2001). A presença dos anéis nas hastes dos pregos aumenta consideravelmente a resistência ao arranquio, sendo aproximadamente o dobro dos valores apresentados pelos pregos lisos de mesma dimensão (SKULTETI et al., 1997; RAMMER, 2021).

Quanto maior a resistência ao arranquio dos pregos, maior a interação entre lamelas, que repercute positivamente na rigidez e resistência dos painéis (ZHANG, 2020). No entanto, com o aumento da carga, o efeito cisalhamento entre as lamelas cria esforços de tração sobre os pregos e, de forma gradual, ocorre o rompimento das fibras de madeira pelos anéis das hastes. O arranquio, em conjunto com o processo de plastificação dos pregos, desagrega a estrutura

dos painéis (PANG et al., 2017), o que pode ser facilmente verificado nas suas extremidades, onde as lamelas deslizam umas sobre as outras, formando “degraus” (Figura 5A). A partir deste momento, o painel perde a sua coesão e a sua resistência passa a depender das lamelas longitudinais. Assim como verificado por outros pesquisadores (PANG et al., 2017; ZHANG, 2020), o rompimento dos quatro painéis ocorreu após a ruptura das lamelas inferiores, sujeitas à tração (Figura 6A).

Ao contrário de outros estudos com painéis cavilhados (PEREIRA, 2019; SOTAYO et al., 2020), não foi observado deformação ou rompimento das cavilhas, o que pode ser explicado pelo seu elevado diâmetro. No entanto, em função do efeito cisalhamento entre as camadas, as lamelas transversais se deslocaram de sua posição original perdendo o contato de duas arestas com as camadas superior e inferior, o que culminou com a abertura de frestas entre elas (Figura 5B). Também foi possível observar a formação dos “degraus” nas extremidades dos painéis, mas em escala consideravelmente inferior ao observado nos painéis pregados.

O rompimento dos quatro painéis ocorreu após a ruptura por tração da lamela inferior, que por sua vez, ocorreu seguindo o padrão do posicionamento das cavilhas (Figuras 6B). Dessa forma, é possível afirmar que a furação necessária para aplicação das cavilhas se configura como uma vulnerabilidade para os painéis, o que coaduna com as observações de diversos outros autores (PEREIRA, 2019; SOTAYO et al., 2020).

Ao contrário do comportamento dúctil dos demais painéis, que romperam de forma gradual, os painéis colados romperam de forma abrupta, em função do cisalhamento das lamelas intermediárias, rompimento das lamelas inferiores e em dois painéis houve delaminação da linha de cola (Figuras 5C e 6C). Apesar da delaminação ser um indicador de baixa eficiência do adesivo ou baixo potencial de colagem da madeira (devido à alta densidade, presença de extrativos etc.), diversos estudos já comprovaram a aptidão do adesivo PVAc para colagem de madeiras tropicais, inclusive de *A. decandra* (PIMENTEL et al., 2021). Portanto, a ocorrência da delaminação durante os ensaios pode estar vinculada a alguma deficiência no preparo das lamelas ou prensagem, não devendo ser visto como um desestímulo ao uso do adesivo PVAc. Além disso, os valores de carga máxima obtidos pelos painéis que sofreram cisalhamento na linha de cola não foram significativamente distintos das cargas obtidas pelos painéis que sofreram apenas ruptura na madeira.



Figura 5. Comportamento dos painéis ao longo dos ensaios: **(A)** painel de NCLT apresentando as maiores flechas e formação de “degraus” em função do cisalhamento entre as lamelas; **(B)** painel de DCLT apresentando abertura de frestas entre as lamelas e rompimento da lamela inferior seguindo o padrão do posicionamento das cavilhas; **(C)** Painel de CLT apresentando cisalhamento das lamelas intermediárias, rompimento das lamelas inferiores e delaminação da linha de cola.

Comparando os gráficos típicos e modos de ruptura dos diferentes tipos de painéis, fica claro que os painéis colados possuem rupturas frágeis enquanto as ligações por pinos (pregos e cavilhas) são mais dúcteis (PEREIRA, 2019). As deformações nos painéis colados são menores devido a maior área de contato entre as lamelas, ou seja, toda a superfície das peças está unida e transmitindo esforços entre si. Nos painéis pregados ou cavilhados, as tensões se concentram somente na área de atuação dos pregos ou cavilhas, sujeitas à plastificação e embutimento, ocasionando uma deformação maior. Apesar da falta de rigidez ser um limitante para o uso deste tipo de painel como elemento estrutural, o comportamento dúctil dos painéis pregados e cavilhados sugere potencial destes elementos em área sujeitas a abalos sísmicos (SOTAYO et al., 2020).



Figura 6. Modos de ruptura dos painéis após o ensaio de flexão: **(A)** a ruptura de todos os painéis pregados ocorreu após o rompimento das lamelas inferiores; **(B)** a ruptura dos painéis cavilhados ocorreu majoritariamente após o rompimento das lamelas inferiores; **(C)** os painéis colados romperam em função do cisalhamento das lamelas intermediárias, ruptura por tração das lamelas inferiores e delaminação da linha de cola.

Após a realização do ensaio de cisalhamento foi determinada a tensão máxima para os painéis pregados, cavilhados e colados (Tabela 2). Os painéis colados obtiveram o mais alto valor médio (4,06 MPa), seguidos pelos painéis cavilhados (2,63 MPa) e por fim, os painéis pregados (2,44 MPa). Após a realização do teste de Tukey, foi observado que as médias referentes aos painéis pregados e cavilhados não apresentaram diferença estatisticamente significativa, enquanto a média obtida pelos painéis colados diferiu das demais. Os valores médios de tensão máxima de cisalhamento, obtidos pelos painéis pregados e cavilhados foram de aproximadamente 60 e 64%, respectivamente, do valor médio obtido pelos painéis colados. Os coeficientes de variação obtidos ficaram muito próximos entre si, em torno de 14%, sendo considerados valores adequados para ensaios com produtos em madeira.

Tabela 2. Médias de carga máxima, tensão máxima de cisalhamento e coeficientes de variação (C.V. %) obtidos para os painéis pregados, cavilhados e colados após o ensaio de flexão estática de três pontos.

Painéis	Carga Máxima (N)	Cisalhamento (MPa)	C.V. (%)
Pregados	62.506	2,44 a	13,1
Cavilhados	67.243	2,63 a	13,1
Colados	103.930	4,06 b	14,5

Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O rompimento dos painéis após o ensaio de três pontos ocorreu de forma similar aos painéis maiores submetidos aos ensaios de quatro pontos. Os painéis pregados romperam após a plastificação e arranquio parcial dos pregos e a ruptura da lamela inferior por tração (Figura 7A). O rompimento dos painéis cavilhados ocorreu após a ruptura da lamela inferior por tração, seguindo o padrão das furações das cavilhas (Figura 7B). Os painéis colados romperam em função do esmagamento e cisalhamento das lamelas intermediárias, ruptura das lamelas inferiores por tração e delaminação parcial da linha de cola (Figura 7C).

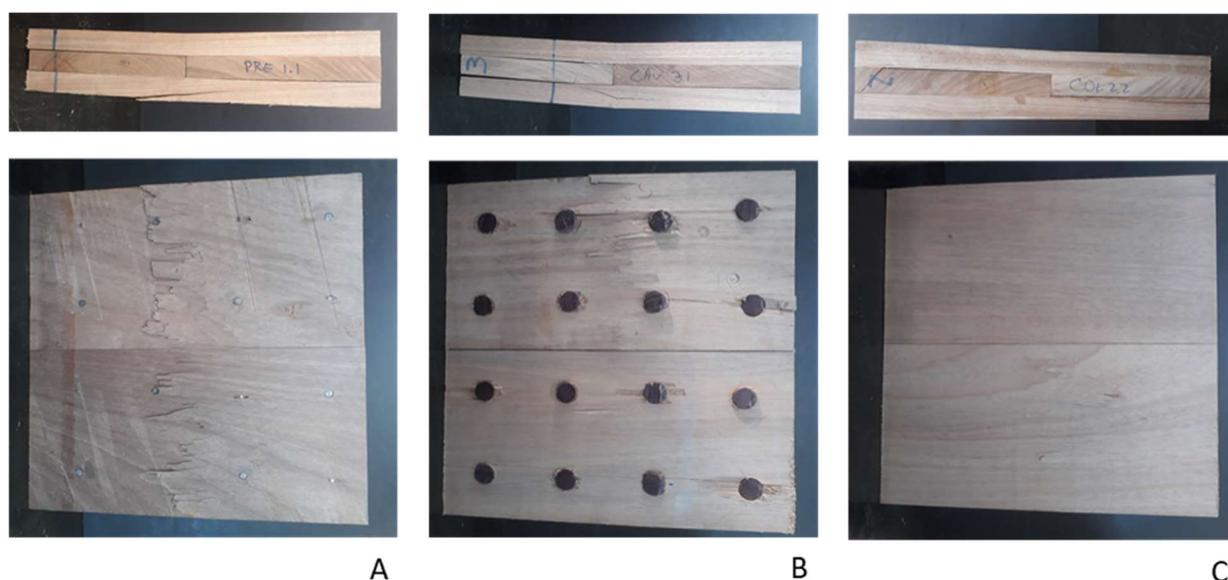


Figura 7. Modos de ruptura dos painéis após o ensaio de três pontos: **(A)** a ruptura dos painéis pregados ocorreu após o rompimento das lamelas inferiores por tração; **(B)** a ruptura dos painéis cavilhados ocorreu após o rompimento das lamelas inferiores por tração, seguindo o padrão das furações; **(C)** os painéis colados romperam em função do esmagamento e cisalhamento das lamelas intermediárias, rompimento das lamelas inferiores e delaminação da linha de cola.

Existe um número considerável de pesquisas a respeito de vigas e painéis de lamelas paralelas utilizando como elementos de ligação pregos (DERIKVAND et al., 2019; CHINIFORUSH et al., 2019; OGUNRINDE et al., 2019) e cavilhas de madeira (GUAN et al., 2010; O'LOINSIGH et al., 2012; CHANG e NEARCHOU, 2015; PLOWAS et al., 2015; DOURADO et al., 2019). No entanto, existe um déficit de estudos a respeito do uso destes elementos de ligação para a confecção de painéis de madeira lamelada cruzada (ZHANG et al., 2020). Além disso, muitos dos trabalhos são limitados pela ausência de informação a respeito dos valores dos módulos de elasticidade e de ruptura, que são as propriedades mecânicas tipicamente utilizadas para análise e design de estruturas (SOTAYO et al., 2020B). A tabela 3 apresenta uma compilação das principais características e resultados de artigos científicos similares ao presente trabalho.

Tabela 3. Compilação das principais características e resultados de artigos científicos similares ao presente trabalho.

Autores	Painel	Espécie	Elemento de ligação	Em (Mpa)	fm (Mpa)	fv (Mpa)
Pang et al. (2017)	NCLT	<i>Pinus koraiensis</i>	Pregos lisos	-	12,8	-
Zhang et al. (2020)	NCLT	Coníferas	Pregos lisos e anelados	-	12,6	-
Este Estudo	NCLT	<i>Allantoma decandra</i>	Pregos anelados	3.426	31,5	2,4
Pereira (2019)	DCLT	<i>Pinus elliottii</i>	Cavilhas de roxinho	4.675	20,3	-
Sotayo et al. (2020)	DCLT	Coníferas	Cavilhas	1.300 - 3.400	22,1 - 38,2	-
Este Estudo	DCLT	<i>Allantoma decandra</i>	Cavilhas de roxinho	5.824	48,5	2,6
Buck et al. (2016)	CLT	<i>Picea sp.</i>	Adesivo MUF	9.353	35,2	-
Buck et al. (2016)	CLT	<i>Picea sp.</i>	MUF com lamelas 45°	10.568	47,5	-
Li (2017)	CLT	<i>Pinus radiata</i>	PUR com lamelas 20 mm	-	-	2,4
Li (2017)	CLT	<i>Pinus radiata</i>	PUR com lamelas 35 mm	-	-	2,0
Sotayo et al. (2020)	CLT	Coníferas	-	9.500 - 13.500	44,1 - 55,2	-
Mohamadzadeh e Hindman (2015)	CLT	<i>Liriodendron tulipifera</i>	Adesivo fenol formaldeído	11.000	13,0	3,9
Kramer et al. (2013)	CLT	<i>Populus sp.</i>	Adesivo fenol resorcinol	7.359	26,0	2,0
Vetsch (2015)	CLT	<i>Populus tremuloides</i>	Adesivo PVAc	8.068	13,3	2,0
Franke (2016)	CLT	<i>Fagus sylvatica</i>	-	12.306	43,8	3,8
Crovella et al. (2019)	CLT	<i>Fraxinus americana</i>	Adesivo a base de Polímero	>10.000	>50,0	>3,0
Crovella et al. (2019)	CLT	<i>Acer rubrum</i>	Adesivo a base de Polímero	>10.000	>50,0	>3,0
Hosseinzadeh et al. (2020)	CLT	<i>Abies sp.</i>	Adesivo PU	10.216	37,1	2,4
Pereira e Calil Junior (2019)	CLT	<i>Eucalyptus urograndis</i>	Adesivo PU	11.740	-	-
Este Estudo	CLT	<i>Allantoma decandra</i>	Adesivo PVAc	15.367	76,5	4,0

Ao comparar os valores de desempenho obtidos por Pang et al. (2017), Zhang et al. (2020), Pereira (2019), Sotayo et al. (2020), Buck et al. (2016) e Li (2017) com os dados de desempenho obtidos pelos painéis correspondentes (pregados, cavilhados e colados) confeccionados com *A. decandra* neste estudo, fica evidente a superioridade destes últimos. Entre as possíveis explicações para os resultados distintos está a densidade básica mais elevada da madeira de *A. decandra* (0,57 g/cm³), em relação às espécies de coníferas utilizadas (em torno de 0,45 g/cm³), que exerce influência direta na resistência mecânicas dos painéis. Resultados similares foram constatados por Mohamadzadeh e Hindman (2015), que obtiveram, para painéis de CLT confeccionados com madeira de *Liriodendron tulipifera*, resultados 20% superiores aos encontrados para coníferas. Da mesma forma, após extensa revisão de literatura sobre produtos cavilhados, Sotayo et al. (2020B) afirmaram que a espécie e propriedades mecânicas das lamelas possuem efeito mais significativo nas cargas de ruptura de painéis do que o tipo e arranjo dos elementos de ligação.

Não foram registrados trabalhos a respeito de painéis de DCLT ou NCLT, confeccionados com madeiras de folhosas, que pudessem ser comparados com os dados obtidos para os painéis de *A. decandra* confeccionados no presente trabalho. No entanto, existe uma quantidade considerável de dados a respeito de painéis colados com espécies folhosas, em especial as de clima temperado do hemisfério norte (Tabela 4). Considerando os estudos que abordaram a confecção de CLT com madeira de folhosas, os melhores resultados foram obtidos nos ensaios realizados por Franke (2016) com madeira de *Fagus sylvatica* e Pereira e Calil Junior (2017) com madeira de *Eucalyptus urograndis*, que por sua vez, costumam apresentar valores de densidade básica mais elevados (entre 0,5 g/cm³ e 0,7 g/cm³) do que as demais espécies mencionadas. Ainda assim, nenhum dos estudos obteve resultados superiores aos encontrados para *A. decandra*, comprovando o potencial desta espécie para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada.

Os painéis colados com a madeira de *A. decandra* obtiveram excelentes resultados nos três quesitos avaliados (rigidez, resistência e tensão de cisalhamento), o que permite o seu enquadramento na classe “E1” (a mais exigente) da tabela de classes de resistência instituídos pela norma PRG 320 (Tabela 12). Os valores obtidos nos ensaios demonstram a aptidão da espécie e a eficiência do adesivo utilizado para a fabricação de painéis de CLT. Os painéis pregados e cavilhados confeccionados com a madeira de *A. decandra* obtiveram excelentes resultados de resistência e tensão de cisalhamento, no entanto, ambos os painéis tiveram valores de rigidez (E^(d)) inferiores aos estabelecidos para a classe de menor resistência mecânica e, portanto, não se enquadraram em nenhuma classe.

Tabela 4. Valores de desempenho obtidos pelos painéis de madeira de *Allantoma decandra* neste estudo e para as diferentes categorias de painéis de CLT apresentados na norma PRG 320 (ANSI/APA, 2019).

Categoria	f_b	E^(d)	f_v
CLT <i>A. decandra</i>	76,5	15.367	4,0
E1	28,2	11.700	1,5
E2	23,9	10.300	1,9
E3	17,4	8.300	1,3
E5	23,9	10.300	1,6
V1	10,0	11.000	1,9
V2	11,8	9.500	1,5
V5	11,0	11.000	1,6
DCLT <i>A. decandra</i>	48,5	5.824	2,6
NCLT <i>A. decandra</i>	31,5	3.426	2,4

Sendo, f_b: resistência à flexão; E: módulo de elasticidade; f_v: tensão de cisalhamento; E: lamelas classificadas por meio de tecnologia “*stress rated*”; V: lamelas classificadas visualmente.

A utilização de pregos como elementos de ligação para a confecção de painéis depende de três variáveis: modelo dos pregos, tamanho dos pregos e quantidade de pregos utilizados. Os pregos utilizados neste trabalho foram de haste anelada, que são o modelo que oferece os maiores valores de resistência ao arranquio. O tamanho dos pregos utilizados (18 x 30) está próximo da dimensão máxima possível de ser utilizada com pregadoras automáticas, portanto, o aumento das dimensões dos pregos exigiria equipamentos mais robustos e mão de obra adicional para a sua fixação, correndo o risco de gerar rachaduras e enfraquecer a resistência das lamelas. Por fim, o aumento no número de pregos utilizados poderia gerar um incremento na rigidez e resistência dos painéis, no entanto, não existe qualquer indicação que este incremento seria suficiente para permitir o uso destes painéis para fins estruturais. Além disso, o aumento do número de pregos implicaria em maior custo, demanda de mão de obra, e tornaria a utilização e beneficiamento dos painéis ainda mais complicados. Com base nos dados obtidos pelos painéis pregados deste trabalho, não foi observada viabilidade desta tecnologia.

O desempenho dos painéis cavilhados ficou abaixo das exigências previstas na norma PRG-320, no entanto, os painéis testados foram confeccionados utilizando ferramentas elétricas manuais, de forma quase artesanal. Ao longo deste processo, foram constatadas diversas

possibilidades de melhorias no processo produtivo, como utilização de prensas robustas para fixação das lamelas no momento da furação, utilização de brocas adequadas e possibilidade de uso de equipamentos mecânicos para a inserção das cavilhas ocorrer da forma mais justa possível, além da possibilidade de “solda” de cavilhas, apresentada anteriormente. Possivelmente, a adoção destes procedimentos na confecção dos painéis poderá levar a um aumento de desempenho dos painéis, permitindo o seu enquadramento nas classes de resistência previstas. Além disso, o grande apelo ecológico que a tecnologia apresenta, prontamente justifica a continuidade e aprofundamento em pesquisas a respeito do tema.

4. CONCLUSÃO

Os painéis de CLT fabricados com madeira de *Allantoma decandra* e adesivo PVAc apresentaram excelentes resultados de desempenho, superiores aos encontrados nos dados bibliográficos e às exigências da norma PRG 320-2019, demonstrando altíssima viabilidade.

Os painéis de NCLT e DCLT tiveram resultados de desempenho superiores aos encontrados nos dados bibliográficos para painéis correspondentes, no entanto, apresentaram rigidez inferior ao estabelecido para a classe de menor resistência da norma PRG 320-2019. O valor reduzido pode ser atribuído à baixa eficiência dos elementos de ligação.

Allantoma decandra possui características que favorecem a sua utilização para a confecção de produtos engenheirados, que por sua vez, pode ser uma forma de agregar valor à madeira desta espécie perante a indústria e o comércio, ao mesmo tempo em que valoriza o manejo florestal amazônico como um sistema de produção viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. **PRG 320:** Standard for Performance-rated Cross Laminated Timber. Tacoma, WA: APA - The Engineered Wood Association. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D-198:** Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. West Conshohocken, 2003.

ATAEI, A.; CHINIFORUSH, A.; BRADFORD, M.; VALIPOUR, H. Cyclic behaviour of bolt and screw shear connectors in steel-timber composite (STC) beams. **J. Constr. Steel Res.** 161, 328–340, 2019.

BRANDNER, R. Production and technology of cross laminated timber (CLT): State-of-the-art-report, Focus solid timber solutions - **European conference on cross laminated timber (CLT)**, Bath, pp. 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, pp. 331-351, Jan. 2016.

BUCK, D.; WANG, A.; HAGMAN, O.; GUSTAFSON, A. Bending Properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° Alternating Layer Configuration. **BioResources** (2), 4633, 2016.

CHANG, W. S., NEARCHOU, N. Hot-pressed dowels in bonded-in rod timber connections, **Wood Fiber Sci.** 47 (2) 199–208, 2015.

CHEN, C. X.; PIEROBON, F.; GANGULY, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) produced in Western Washington: The role of logistics and wood species mix. **Sustainability**, 11, 1278, 2019.

CHINIFORUSH, A.; VALIPOUR, H.; BRADFORD, M.; AKBARNEZHAD, A. Long-term behaviour of steel-timber composite (STC) shear connections. **Eng. Struct.** 196, 109356, 2019.

CROVELLA, P.; SMITH, W.; BARTCZAK, J. Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels, **Construction and Building Materials**, Volume 229, 2019.

DERIKVAND, M.; JIAO, H.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; CHAN, A.; NOLAN, G. Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. **Holz als Roh- und Werkstoff.** 77, 2019.

DOURADO, N.; PEREIRA, F.; LOUSADA, J.; De MOURA, M. Experimental and numerical analyses of wood boards joining using wood-pin connectors, **Constr. Build. Mater.** 222, 556–565, 2019.

FRANKE S., “Mechanical properties of beech CLT,” in **WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering**, 2016.

GONG, M. Lumber-Based Mass Timber Products in Construction. **Timber Buildings and Sustainability.** 10.5772, 2019.

GUAN, Z., KOMATSU, K., JUNG, K., KITAMORI, A. **Structural characteristics of beam - column connections using compressed wood dowels and plates.** In: World Conference on Timber Engineering (WCTE). Trentino (Italy).2010.

HASHEMI, A.; QUENNEVILLE, P. Seismic performance of timber structures using rocking walls with low damage hold-down connectors. **Structures** 27: 274-284, 2020.

HOSSEINZADEH, S.; MOHEBBY, B.; ELYASI, M. Bending performances and rolling shear strength of nail-cross-laminated timber, **Wood Material Science & Engineering**, 2020.

JELEČ, M., VAREVAC, D., RAJČIĆ, V. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report. **Grđevinar** 2/2018.

KRAMER, A., BARBOSA, A.R. e SINHA, A. Viability of Hybrid Poplar in ANSI Approved Cross-Laminated Timber Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 26(7), 06014009, (2014). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000936

LI, M. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. **J Wood Sci** 63, 331–337 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1631-6>

MOHAMADZADEH, M.; HINDMAN, D. Mechanical Performance of Yellow-Poplar Cross Laminated Timber, Virginia Polytechnic Institute And State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Blacksburg. **Rep. No. CE/VPI-ST-15-13. 44**, 2015.

OGUNRINDE, O.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; LI, L. Flexural Properties of Downscaled Dowel-Type-Fastener Laminated Timber. **International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies** 5.11: 98-104, 2019.

O'LOINSIGH, C.; OUDJENE, M.; AIT-AIDER, H.; FANNING, P.; PIZZI, A.; SHOTTON, E.; MEGHLAT, E. M. Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels. **Constr. Build. Mater.** 36, 245–250, 2012.

PANG, S. J.; KIM, K. M.; PARK, S. H.; LEE, S. J. Bending Behavior of Nailed-Jointed Cross-Laminated Timber Loaded Perpendicular to Plane. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**. 45(6): 728-736, 2017.

PEREIRA, M. C. de M.; CALIL JUNIOR, C. **Comparativos entre painéis de Cross Laminated Timber (CLT) produzidos no Brasil**. In: Anais CLEM + CIMAD (2017).

PEREIRA, M. C. de M.; CALIL JUNIOR, C. Strength and stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons. **Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

PEREIRA, M. C. M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. (2019). doi:10.11606/T.18.2019.tde-20082019-141710.

PIMENTEL, T. S., WIMMER, P., CARVALHO, H. R., ROITMAN, L., E DEL MENEZZI, C. H. S. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. **Scientia Forestalis**, 49(132), e3753. (2021). <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19>

PLOWAS, W.; BELL, T.; HAIRSTANS, R.; WILLIAMSON, J. **Understanding the Compatibility of UK Resource for Dowel Laminated Timber Construction**, Edinburgh Napier University, Scotland, 2015.

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G.; BENDER, D. A. Withdrawal strength of threaded nails, **J. Struct. Eng.** 127 (4) 442-449, 2001.

RAMMER, Douglas. (2021). CHAPTER 8 Fastenings Contents. In: **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. General technical report FPL-GTR- 190, Ed: R.J.Ross, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2021.

SANTOS, M. C.; DEL MENEZZI, C. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta** 40, 2010.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). SISTEMA DE CADEIA DE CUSTÓDIA. Disponível on-line. Acesso em: 21 agosto 2022.

SHARIFNIA, H.; HINDMAN, D. P. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers. **Construction and Building Materials**, 156, pp.314-320, 2017.

SKULTETI, M. J.; BENDER, D. A.; WINSTORFER, S. G.; POLLOCK, D. G. Withdrawal strength of ring-shank nails embedded in southern pine lumber, **Trans. ASAE**, 40 (2) 451-456, 1997.

SOTAYO, A; BRADLEY, D.; BATHER, M.; OUDJENE, M.; EL HOUJEYRI, I.; GUAN, Z. Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels. **Construction and Building Materials**. 259, 2020.

SOTAYO, A., BRADLEY, D., BATHER, M., SAREH, P., OUDJENE, M., EL-HOUJEYRI, I., HARTE, A.M., MEHRA, S., O'CEALLAIGH, C., HALLER, P., NAMARI, S., MAKRADI, A., BELOUETTAR, S., BOUHALA, L., DENEUFBOURG, F. AND GUAN, Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications, **Developments in the Built Environment**, 1, pp. 1 - 11 (11). (2020) doi: 10.1016/j.dibe.2019.100004.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas de madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, 87, 471- 480, 2010.

VETSCH, N. A Performance Evaluation of Cross-Laminated Timber Manufactured with Aspen. **Materials Science, Engineering**. (2015). <http://hdl.handle.net/11299/172229>

ZHANG, Y.; NEHDI, M.L.; GAO, X.; ZHANG, L. V. Flexural Performance of Novel Nail-Cross-Laminated Timber Composite Panels. **Applied Sciences**: 10(17):5983, 2020.

CONCLUSÕES GERAIS DA TESE E RECOMENDAÇÕES

A ideia inicial do presente estudo foi concebida durante uma viagem ao município de Itapuã do Oeste, Rondônia, para organizar o desdobro e transporte de uma coleta de madeira do Laboratório de produtos Florestais (LPF), junto a uma das principais concessionárias florestais em atividade. Ao longo da viagem, foi observado que as concessões florestais haviam se especializado na exploração e desdobro de espécies com madeiras de altas densidades, que eram destinadas à exportação. As madeiras “brancas”, como são denominadas as espécies com densidades médias e baixas, sequer passavam pela serraria da empresa, sendo as toras destinadas diretamente a uma fábrica de cabos de vassouras nos arredores de Porto Velho. A partir da constatação de que a madeira de um grande número de espécies estava sendo utilizada para a produção de bens de baixo valor agregado, possivelmente aquém de seu potencial, surgiu o interesse em se buscar alternativas ao cenário instalado.

Com a oportunidade gerada pela coleta científica do Laboratório de Produtos Florestais, que transportou cerca de três metros cúbicos de *Allantoma decandra* (uma das espécies de madeira “branca”) até as suas dependências em Brasília, foi possível iniciar a elaboração de um projeto para valorizar as espécies de densidades médias e baixas. A premissa inicial era de que a madeira de *A. decandra* possui propriedades físico-mecânicas que a habilita para ser utilizada na confecção de produtos de maior valor agregado.

Ao buscar informações sobre as possibilidades de uso para madeiras de média densidade surgiram os produtos engenheirados, entre os quais despontam os painéis de madeira lamelada cruzada colada. Ao aprofundar o estudo a respeito do tema foi observado que, em função de questões ambientais, de custos e de infraestrutura, havia iniciativas de substituir os adesivos por outros elementos de ligação como pregos e cavilhas. Apesar de resultados experimentais promissores, havia poucos dados disponíveis e praticamente nenhum estudo envolvendo espécies tropicais.

A partir deste ponto foi possível formular o objetivo geral deste projeto: “Avaliar o potencial da madeira de *A. decandra* para a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada, utilizando pregos, adesivos e cavilhas, e comparar o efeito dos diferentes tipos de ligação”.

O capítulo 1 foi dedicado a realizar a caracterização tecnológica das principais propriedades da madeira de *A. decandra*, visando à geração de subsídios para indicações de beneficiamento e uso final de forma mais eficiente e rentável. Adicionalmente, buscou-se esclarecer a alegação dos madeireiros de que as espécies da família Lecythidaceae possuem grande presença de sílica na madeira, o que geraria um desgaste dos equipamentos de corte. Foi

observado que esta percepção estava tão arraigada entre os operadores da serraria em Rondônia que, cada vez que uma *Lecythidaceae* era encaminhada para desdobro, o operador parava as operações para trocar a serra por outra de maior resistência.

Os dados gerados pelos ensaios concluíram que a espécie possui excelentes características estéticas e sensoriais, excelente estabilidade dimensional, resistências mecânicas médias e responde bem aos processos de beneficiamento, garantindo uma boa qualidade de acabamento. Por meio de imagens de microscopia eletrônica foi possível constatar que *A. decandra* possui baixa quantidade de silício, o que não deve representar entrave para o desdobro e beneficiamento da madeira. No entanto, como surpresa da pesquisa, também foi constatado a abundância de cristais de cálcio encontrados nas células de parênquima axial. Portanto, recomendam-se pesquisas futuras para avaliar o efeito destes cristais no beneficiamento da madeira de *A. decandra* e de outras espécies de *Lecythidaceae*.

O capítulo 2 foi dedicado a avaliar a resistência mecânica de diferentes tipos, modelos e dimensões de adesivos, pregos e cavilhas utilizados como elementos de ligação em corpos de prova de madeira em corte duplo. A conclusão foi de que os adesivos obtiveram os melhores resultados perante os demais elementos de ligação, com destaque para o adesivo PVAc. As cavilhas de roxinho com 20 mm de espessura também obtiveram resultados positivos, no entanto, os valores de carga máxima obtidos por todos os corpos de prova pregados foram muito aquém dos demais. Apesar disso, ficou explícito a superioridade dos pregos anelados, que são uma alternativa viável para confecção de estruturas com menor demanda de resistência mecânica.

O terceiro capítulo foi destinado a avaliar o efeito de diferentes modelos e dimensões de prego em relação à resistência ao arranquio. Foi constatado que: o modelo de prego foi o fator de maior efeito nos valores de resistência ao arranquio; os pregos anelados apresentaram os mais altos valores de resistência ao arranquio, seguidos pelos pregos espiralados e lisos; e que as equações para estimativa da resistência ao arranquio são eficientes ferramentas para antecipar o comportamento de estruturas de madeira. De forma geral, o capítulo demonstrou o grande potencial dos pregos anelados que, apesar de sua grande eficiência, são dificilmente encontrados no comércio e raramente utilizados.

O capítulo 4 teve por objetivo avaliar o potencial da madeira de *A. decandra* como matéria-prima para a produção de painéis de madeira lamelada cruzada, utilizando pregos, adesivos e cavilhas como elementos de ligação. Foi constatado que todos os painéis desenvolvidos neste estudo obtiveram resultados superiores aos encontrados, para painéis correspondentes, nos dados bibliográficos a respeito do tema. No entanto, os painéis pregados

e cavilhados não alcançaram as exigências da norma específica. Com base nos dados obtidos neste estudo, não se vislumbra viabilidade técnica para uso estrutural dos painéis pregados. Por outro lado, levando-se em conta o apelo ecológico dos painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada e as possibilidades de melhorar o seu processo produtivo, recomenda-se a continuidade e aprofundamento em pesquisas a respeito do tema, em especial, a utilização de equipamentos mais robustos para a furação e inserção das cavilhas, assim como o uso de cavilhas “soldadas”.

Como era esperado, os painéis de madeira lamelada cruzada colada, fabricados com madeira de *A. decandra* e adesivo PVAc apresentaram excelentes resultados de desempenho, sendo uma tecnologia de altíssima viabilidade para a confecção de produtos engenheirados para uso estrutural.

Por fim, pode-se concluir que *A. decandra* demonstrou excelente aptidão como matéria prima na produção de produtos engenheirados, em especial painéis lamelados cruzados colados. Em função da similaridade das madeiras das espécies de Lecythidaceae dos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari*, vislumbra-se a possibilidade de extensão dos resultados deste projeto para um número maior de espécies amazônicas. A utilização das madeiras de médias e baixas densidades na confecção de produtos engenheirados pode ser uma forma de agregar valor às espécies perante a indústria e o comércio, ao mesmo tempo em que valoriza o manejo florestal amazônico como um sistema de produção viável.