

**NAYARA FRANZINI LOPES**

**EFICIÊNCIA DE REFORÇOS EM MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Marcos Oliveira de Paula

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L864e  
2023

Lopes, Nayara Franzini, 1993-  
Eficiência de reforços em madeira lamelada colada cruzada  
/ Nayara Franzini Lopes. – Viçosa, MG, 2023.  
1 tese eletrônica (115 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Marcos Oliveira de Paula.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.183>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira lamelada colada - Propriedades mecânicas.  
2. Fibras vegetais. 3. Construção de madeira lamelada. I. Paula,  
Marcos Oliveira de, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9812719

**NAYARA FRANZINI LOPES**

**EFICIÊNCIA DE REFORÇOS EM MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 18 de dezembro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 **NAYARA FRANZINI LOPES**  
Data: 10/07/2024 11:55:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Nayara Franzini Lopes**  
Autor

Documento assinado digitalmente  
 **MARCOS OLIVEIRA DE PAULA**  
Data: 11/07/2024 14:20:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Marcos Oliveira de Paula**  
Orientador

*Á Deus, aos meus pais, Rita e Carlos  
Eduardo e meu irmão Nickolas por serem a  
base e o motivo de tudo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por chegar até aqui.

Aos meus pais Rita de Cassia e Carlos Eduardo e ao meu irmão Nickolas por todo apoio incondicional na realização dos meus sonhos e mesmo distantes se fizerem presente na minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal pela acolhida e estrutura concedida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela possibilidade de cursar meu doutorado e por todas as amizades que construí.

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

Ao meu orientador, professor Marcos Oliveira de Paula, por todo apoio e confiança não só na realização desse trabalho, mas durante esses anos que estive na pós-graduação.

Ao professor Vinicius Resende de Castro e as professoras Angélica de Cássia Carneiro, Ana Márcia Ladeira e Iara Demuner por todo auxílio e acolhimento nos laboratórios LAPEM e LPM.

Aos membros da banca, por aceitarem e se disponibilizarem a contribuir com esse trabalho.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo por possibilitar a realização de análises, principalmente ao José Geraldo que me auxiliou na realização dos ensaios mecânicos.

Aos funcionários Leila Lopes, Welliton, Braulio, Edna, Lawrence, Fernanda, Éder, Alexandre e Dilson por toda ajuda nos momentos que precisei, vocês são indispensáveis.

Aos amigos de pós-graduação, especialmente Caio Nemer, Frances Andrade, Nidia Niela e Thamyris Lopes por trilharem esse caminho comigo e compartilharem não somente um laboratório, mas alegrias e tristezas.

Aos estagiários William Colatino, William Moreira e Rafael Cardoso por toda ajuda e risadas.

Aos meus amigos Lhorayne e Rodrigo, meus companheiros de todas as horas, sempre presentes na minha vida. Obrigada por partilharem Viçosa comigo.

Ao Vitor, que esteve comigo neste último ano, me apoiando e incentivando.

As amizades que fiz em Viçosa que tornaram tudo mais leve por aqui.  
Especialmente a Gizele e aos demais amigos da CeM academia.

À todas a outras pessoas não citadas aqui, mas que direta e indiretamente auxiliaram na realização desse trabalho. A todos vocês, meu muito obrigada.

## RESUMO

LOPES, Nayara Franzini, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Eficiência de reforços em madeira lamelada colada cruzada**. Orientador: Marcos Oliveira de Paula.

A madeira é o mais antigo material construtivo, porém por muitos anos teve sua aplicação limitada. Com o avanço da tecnologia e a busca por materiais mais sustentáveis, a madeira voltou a ganhar espaço no mercado da construção civil por meio de produtos de madeira engenheirada. Entre os principais produtos podemos destacar a madeira lamelada colada (MLC) ou *glued laminated timber* (GLULAM) e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) ou *cross laminated timber* (CLT). Por se tratar de produtos à base de madeira, que apresentam alta variabilidade e estão sujeitos a defeitos intrínsecos, as propriedades finais do material podem ser afetadas e até mesmo reduzidas. Sendo importante aumentar a resistência para utilização na construção civil por meio do emprego de reforços de fibra na estrutura. Assim, este estudo foi estruturado em quatro capítulos, sendo o primeiro de revisão bibliográfica sobre os principais aspectos da MLCC, a madeira de pinus e os componentes de reforço para estruturas. No segundo capítulo, realizou-se uma análise dos materiais utilizados na fabricação de elementos reforçados por colagem. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinus, bem como as características do adesivo poliuretano de mamona e dos materiais de reforço, como fibra de juta, Vectran e bambu. No terceiro capítulo foi avaliada a resistência de madeira lamelada colada reforçada com bambu submetida à ensaio de flexão. No quarto capítulo, foram fabricados painéis de madeira lamelada colada cruzada com dimensões de 6,4 cm × 33 cm × 55 cm (espessura × largura × comprimento). Esses painéis foram reforçados com três tipos diferentes de fibras: duas naturais (juta e bambu) e uma sintética (Vectran). Foram então realizadas avaliações das propriedades mecânicas, incluindo resistência à flexão, a resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e a densidade aparente, bem como análise do modo de ruptura. De maneira geral, a introdução de reforço resultou em um aumento da resistência à flexão da madeira colada. Especificamente, as fibras de juta e Vectran demonstraram proporcionar um aumento significativo na resistência à flexão e ao cisalhamento perpendicular à linha de cola. Assim como esperado, a aplicação de reforço não teve impacto na resistência à compressão. O

cisalhamento *rolling shear*, delaminação e tração são os principais modos de ruptura da MLCC. Além disso, a aplicação de reforços altera o modo de falha dos elementos colados. Assim, a utilização de reforços de fibra, tanto natural quanto sintética, em MLCC proporciona ganhos de resistência à flexão e alterações na ruptura, sendo uma alternativa para melhorar materiais de baixa resistência.

Palavras-chave: Colagem de madeira; Propriedades mecânicas; Fibras; Adesivo.

## ABSTRACT

LOPES, Nayara Franzini, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2023. **Efficiency of reinforcements in Cross Laminated Timber.** Adviser: Marcos Oliveira de Paula.

Wood is the oldest construction material, but for many years its application was limited. With the advancement of technology and the search for more sustainable materials, wood has once again gained space in the construction market through engineered wood products. Among the main products we can highlight glued laminated timber (GLULAM) and cross laminated timber (CLT). As these are wood-based products, which present high variability and are subject to intrinsic defects, the final properties of the material can be affected and even reduced. It is important to increase resistance for use in civil construction through the use of fiber reinforcements in the structure. Thus, this study was structured into four chapters, the first being a bibliographic review on the main aspects of CLT, pine wood and reinforcement components for structures. In the second chapter, an analysis of the materials used in the manufacture of elements reinforced by gluing was carried out. The physical and mechanical properties of pine wood were evaluated, as well as the characteristics of castor bean polyurethane adhesive and reinforcement materials, such as jute fiber, Vectran and bamboo. In the third chapter, the resistance of glued laminated timber reinforced with bamboo subjected to flexural testing was evaluated. In the fourth chapter, cross laminated timber panels with dimensions of 6,4 cm × 33 cm × 55 cm (thickness × width × length) were manufactured. These panels were reinforced with three different types of fibers: two natural (jute and bamboo) and one synthetic (Vectran). Assessments of mechanical properties were then carried out, including flexural strength, compressive strength, shear strength and apparent density, as well as analysis of the rupture mode. In general, the introduction of reinforcement resulted in an increase in the flexural strength of glued wood. Specifically, jute and Vectran fibers have been shown to provide a significant increase in flexural and shear strength perpendicular to the glue line. As expected, the application of reinforcement had no impact on compressive strength. Rolling shear, delamination and tension are the main failure modes of CLT. Furthermore, the application of reinforcements changes the failure mode of the glued elements. Thus, the use of fiber reinforcements, both natural and synthetic, in CLT provides gains in

flexural strength and changes in rupture, being an alternative to improving low-resistance materials.

Keywords: Wood collage; Mechanical properties; Fibers; Adhesive.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Configuração das camadas do painel CLT. ....	24
Figura 2 - Processo de fabricação da CLT.....	26
Figura 3 - Filamentos e tecido de LCP Vectran.....	43
Figura 4 - Adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, constituído de componente A (um pré-polímero) e componente B (um polioli).....	62
Figura 5 - Filamentos e tecido obtido de Vectran.....	63
Figura 6 - Etapas de processamento do bambu. A – touceira de bambu para coleta dos colmos; B – ripas do bambu cortadas manualmente; C – ripas dispostas no interior da autoclave vertical.....	64
Figura 7 - Processo de desfibramento do bambu cozido. A – corte longitudinal das ripas de bambu; B – desfibramento com auxílio de estilete; C – feixes de fibras de bambu.....	64
Figura 8 - Tecido de fibra de juta cortado nas dimensões para aplicação como reforço.....	65
Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova de tecido.....	68
Figura 10 - Prensagem de elementos de madeira lamelada colada.....	85
Figura 11 - Ensaio de flexão estática em elemento de madeira lamelada colada.....	86
Figura 12 - Modos de rupturas dos elementos de madeira lamelada colada reforçadas com bambu. a), b), c), d) elementos sem aplicação de reforço; e), f), g), h) elementos reforçados com bambu.....	89
Figura 13 - Etapas do processo de produção das MLCC. (a) Classificação das lamelas; (b) Limpeza e lixamento; (c) Pesagem dos componentes do adesivo; (d) Mistura do adesivo; (e) Colagem lateral das lamelas e preparação para recebimento do adesivo; (f) Aplicação do reforço; (g) Prensagem.....	99
Figura 14 - Esquema de montagem das camadas para produção de madeira lamelada colada cruzada.....	100
Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de flexão da MLCC.....	101
Figura 16 - Configuração e dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de	

compressão: (a) compressão paralelas às fibras e (b) compressão normal às fibras.....	101
Figura 17 - Configuração e dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento na linha de cola: (a) cisalhamento paralelo às fibras e (b) cisalhamento perpendicular às fibras.....	102
Figura 18 - Dimensões do corpo de prova para determinação da densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> ).....	103
Figura 19 - Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola no sentido paralelo às fibras. a) Sem reforço; b) Vectran; c) Bambu; d) Juta.....	108
Figura 20 - Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola no sentido perpendicular às fibras. a) Sem reforço; b) Vectran; c) Bambu; d) Juta.....	108
Figura 21 - Tipos de rupturas dos corpos de prova ensaiados à flexão: a) sem reforço; b) com reforço de juta; c) com reforço de juta mostrando a delaminação; d) detalhe do rompimento do corpo de prova.....	109
Figura 22 - Modos de ruptura para os corpos de prova reforçados com bambu.....	110
Figura 23 - Modos de ruptura para os corpos de prova reforçados com Vectran....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados médios das propriedades mecânicas e da densidade aparente (12%) da madeira de espécies de <i>Pinus</i> tropicais e <i>Pinus taeda</i> .....	33
Tabela 2 - Valores médios de densidade e resistência das classes para <i>Pinus</i> spp. (ABNT NBR 7190:2022).....	34
Tabela 3 - Caracterização de algumas fibras naturais.....	38
Tabela 4 - Propriedades de fibras sintéticas utilizadas como reforços.....	42
Tabela 5 - Principais materiais utilizados como reforço em CLT.....	44
Tabela 6 - Valores médios de densidade aparente, teor de umidade e variações dimensionais da madeira de <i>Pinus</i> sp.....	69
Tabela 7 - Valores médios de resistência à flexão ( $f_{m0}$ ), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) da madeira de <i>Pinus</i> sp.....	71
Tabela 8 - Valores médios para as propriedades do adesivo.....	72
Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados como reforço.....	74
Tabela 10 - Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) para as vigas de MLC sem e com reforço de fibras de bambu.....	87
Tabela 11 - Valores médios de densidade aparente da MLCC sem reforço e com os três diferentes tipos de reforço.....	104
Tabela 12 - Valores médios das propriedades mecânicas dos corpos de prova de MLCC de pinus.....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTM	American Society of Testing and Material.
CLT	Cross Laminated Timber.
GLULAM	Glued Laminated Timber.
MLC	Madeira Lamelada Colada.
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada.
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
$f_{c0}$	Resistência à compressão paralela às fibras.
$f_{c90}$	Resistência à compressão perpendicular às fibras.
$f_{v0}$	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.
$f_{v90}$	Resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras.
$f_m$	Resistência à flexão

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	20
CAPÍTULO I .....	22
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
1.1 Cross Laminated Timber (CLT) .....	23
1.1.1 Produção dos painéis CLT .....	25
1.1.2 Madeiras utilizadas na confecção de elementos estruturais colados .....	27
1.1.3 Adesivos utilizados na produção de elementos estruturais colados.....	29
1.2 O gênero <i>Pinus</i> .....	31
1.3 Componentes de reforço .....	35
1.3.1 Fibras naturais.....	37
1.3.1.1 Juta.....	39
1.3.1.2 Fibra de bambu .....	40
1.3.2 Fibras sintéticas .....	40
1.3.2.1 Fibra Vectran.....	43
2. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45
CAPÍTULO II .....	58
1. INTRODUÇÃO .....	59
2. OBJETIVOS .....	61
2.1 Objetivo geral .....	61
2.2 Objetivos específicos .....	61
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	61
3.1 Madeira .....	61
3.2 Adesivo.....	61
3.3 Reforços utilizados .....	62
3.3.1 Fibra de Vectran.....	62
3.3.2 Fibra de bambu .....	63
3.3.3 Fibra de juta .....	65
3.4 Caracterização dos materiais .....	65
3.4.1 Propriedades físicas da madeira .....	65
3.4.2 Propriedades mecânicas da madeira .....	67
3.4.3 Caracterização do adesivo .....	67

3.4.4 Caracterização dos materiais de reforço .....	67
3.4.4.1 Fibras de bambu .....	67
3.4.4.2 Fibra Vectran e juta .....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.....	69
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....	71
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO .....	72
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE REFORÇO .....	74
5. CONCLUSÕES .....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
CAPÍTULO III .....	80
1. INTRODUÇÃO .....	81
2. OBJETIVOS .....	82
2.1 Objetivo geral .....	82
2.2 Objetivos específicos .....	82
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	83
3.1 Materiais utilizados.....	83
3.2 Classificação visual das lâminas .....	83
3.3 Confecção dos elementos de MLC .....	83
3.3.1 MLC sem reforço.....	84
3.3.2 MLC com reforço.....	85
3.4 Caracterização dos elementos de madeira lamelada colada .....	86
3.4.1 Ensaio de flexão.....	86
3.4.2 Caracterização dos tipos de ruptura.....	86
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1 Ensaio de flexão.....	87
5. CONCLUSÕES .....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
CAPÍTULO IV .....	94
1. INTRODUÇÃO .....	95
2. OBJETIVOS .....	97
2.1 OBJETIVO GERAL .....	97
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	97
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	98
3.1 Classificação visual das lamelas .....	98

3.2	Confecção dos painéis de MLCC .....	98
3.3	Caracterização dos elementos de madeira lamelada colada cruzada .....	100
3.3.1	Ensaio de flexão .....	100
3.3.2	Ensaio de compressão .....	101
3.3.3	Cisalhamento na linha de cola .....	102
3.3.4	Densidade aparente .....	102
3.4	Delineamento experimental .....	103
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	104
4.1	Densidade aparente da madeira lamelada colada cruzada .....	104
4.2	Propriedades mecânicas da madeira lamelada colada cruzada .....	105
4.3	Modo de ruptura das MLCC ensaiadas à flexão .....	108
5.	CONCLUSÕES .....	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
	CONCLUSÕES GERAIS .....	116

## INTRODUÇÃO GERAL

A madeira é considerada o material de construção mais antigo, principalmente devido à sua acessibilidade, abundância e relação peso-resistência. Apesar das diversas vantagens existentes, o uso da madeira como material de construção ainda enfrenta desafios significativos (Mallo; Espinoza, 2015). Suas propriedades não são uniformes e apresentam variação com relação a espécie, disposição celular, teor de umidade, localização da árvore e dentro da mesma árvore (Ross, 2010). Além disso, devido à natureza anisotrópica da madeira, suas características alteram nas diferentes direções (Hoadley, 2000).

Para lidar com a variabilidade inerente à madeira e otimizar a utilização desse material, foram desenvolvidos produtos engenheirados de madeira (PEMs), como por exemplo, o OSB (“Oriented Strand Board”), o MDF (“Medium Density Fiberboard”) e a madeira lamelada colada (“Glulam”) (Mallo; Espinoza, 2015). Esses produtos são fabricados com intuito de alcançar propriedades de engenharia específicas, como resistência elevada, durabilidade aprimorada e uniformidade. Além disso, os PEMs também ajudam a fazer um uso mais eficiente de árvores de menor valor e diâmetro reduzido (Stark; Cai; Carll, 2010; Woodall *et al.*, 2011; APA, 2013).

Uma das mais recentes inovações nos PEMs é a fabricação de painéis de madeira lamelada cruzada (*Cross laminated timber* - CLT). Esses painéis (também chamados de “X-Lam”, “Massive Timber” ou “Cross-Lam”) consistem tipicamente em um número ímpar de camadas à base de madeira (não menos que três) dispostas lado a lado e laminadas ortogonalmente usando adesivos (Karacabeyli; Douglas, 2013). Essa laminação cruzada visa melhorar a rigidez, estabilidade e propriedades mecânicas (Evans, 2013).

Normalmente são confeccionadas utilizando adesivos à base de poliuretanos (PUR), à base de formaldeído, como melamina-ureia-formaldeído (MUF) e fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), e emulsão polímero isocianato (EPI) (Crespell; Gagnon, 2010; Yeh; Kretschmann; Wang, 2013).

A “Cross Laminated Timber” permite a utilização de madeira de menor valor agregado para aplicações de maior valor, promovendo uma utilização mais eficiente dos recursos florestais (Mallo; Espinoza, 2015). O que viabiliza a produção de peças

estruturais de alta qualidade, utilizando madeiras que não atendam a padrões estruturais excessivamente restritivos (Gsell *et al.*, 2007; Crespell; Gagnon, 2010).

As espécies mais usuais para fabricação de produtos em CLT são provenientes de florestas plantadas, o que reduz a pressão sobre as florestas nativas (Ramos *et al.*, 2022). No entanto, é necessário que o cultivo e a colheita dessas madeiras sejam realizados de forma responsável e sustentável, para minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente.

Recentemente, houve um aumento significativo no estudo de diversas espécies de madeira visando sua aplicação na produção de elementos estruturais como a madeira lamelada colada (Glulam) e o painel de madeira laminada cruzada (CLT). Pesquisas têm explorado a viabilidade de fabricar CLT de três camadas utilizando madeira de eucalipto de pequeno diâmetro e crescimento rápido (Liao *et al.*, 2017; Pangh *et al.*, 2019), bem como a resistência de CLT feitos a partir de *Pinus* sp. para utilização em lajes (Ecker *et al.*, 2017). Além disso, estudos têm sido conduzidos sobre as propriedades de flexão e compressão de painéis CLT feitos com *cicuta canadense* (He *et al.*, 2018). Essas pesquisas têm contribuído para ampliar o conhecimento sobre as potenciais aplicações de diferentes espécies de madeira na construção de estruturas sustentáveis e eficientes.

O uso de matérias-primas sustentáveis associado a utilização de madeiras de baixa qualidade nos painéis CLT apresenta uma potencialidade considerável, uma vez que a laminação e o efeito do sistema na produção de CLT reduzem a influência das irregularidades da madeira (Valdes *et al.*, 2020). Neste contexto, o uso de materiais de reforço pode melhorar as propriedades da madeira fora de com qualidades indesejáveis, superando as deficiências no desempenho estrutural (Cherry *et al.*, 2019).

Muitos materiais de reforço foram bem-sucedidos em melhorar o desempenho da madeira, como fibras de carbono (Neubauerová, 2012; Johnsson *et al.*, 2007), polímero reforçado com fibra de vidro (Basterra *et al.*, 2017), fibras naturais (Dixit *et al.*, 2017; Borri *et al.*, 2013; Mascia *et al.*, 2019), parafusos autorroscantes (Dietsch; Brandner, 2015) e outros.

Essas tecnologias demonstraram parcerias bem-sucedidas com a madeira e abrem oportunidades inovadoras na exploração de novas aplicações de engenharia para agregar valor a este abundante recurso de madeira fora de qualidade (Cherry

*et al.*, 2019). Uma vez que aplicação de reforços tende a melhorar as propriedades da madeira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APA. **Engineered Wood Products for Superior Performance**. The Engineered Wood Association. 2013.

BASTERRA, L. A. *et al.* Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 914-920, 2017.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. Reinforcement of wood with natural fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 53, p. 1-8, 2013.

CHERRY, R. *et al.* Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 858-868, 2019.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber: a Primer**. FP Innovations. Vancouver, Canada. 2010.

DIETSCH, P.; BRANDNER, R. Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements—A state-of-the-art report. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 78-89, 2015.

DIXIT, S. *et al.* Natural fibre reinforced polymer composite materials - a review. **Polymers from renewable resources**, v. 8, n. 2, p. 71-78, 2017.

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

EVANS, L. **Cross-laminated Timber: Taking Wood Buildings to the Next Level**. Architectural Records. 2013.

GSELL, D.; FELTRIN, G.; SCHUBERT, S.; STEIGER, R.; MOTAVALLI, M. Cross laminated timber plates: evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, [S.l.], v. 133, n. 1, p. 132-138, 2007.

HE, M.; SUN, X.; LI, Z. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 175-183, 2018.

HOADLEY, B. **Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology**. Taunton Press. Newtown, CT. 2000.

JOHNSSON, H.; BLANKSVÄRD, T.; CAROLIN, A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 47-56, 2007.

KARACABEYLI, E; DOUGLAS, B. **CLT Handbook: cross laminated timber**. FPIInnovations. Pointe-Claire, QC. 2013.

LIAO, Y. *et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers, **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 508-515, 2017.

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

MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. Glued laminated timber beams reinforced with sisal fibres. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 8, n. 4, p. 390-397, 2019.

NEUBAUEROVÁ, P. Timber beams strengthened by carbon–fiber reinforced lamellas. **Procedia Engineering**, v. 40, p. 292-297, 2012.

PANGH, H. *et al.* Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 535-542, 2019.

RAMOS, F. M. G. *et al.* Considerações sobre o desenvolvimento de um sistema construtivo misto concreto e madeira laminada cruzada. **CIS-Conjecturas Inter Studies**, v. 22, n. 8, p. 745-759, 2022.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-based composite materials. In: ROSS, R. J. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Chapter 11, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, p. 1-28, 2010.

VALDES, M. *et al.* Reinforcement of maritime pine cross-laminated timber panels by means of natural flax fibers. **Construction and Building Materials**, v. 233, 2020.

WOODALL, C. W. *et al.* An overview of the forest products sector downturn in the United States. **Forest Products Journal**, v. 61, n. 8, 2011.

YEH, B.; KRETSCHMANN, D.; WANG, B. Cross-laminated timber manufacturing. In: KARACABEYLI, E; DOUGLAS, B. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Chapter 2, Québec: FPIInnovations, p. 1-23, 2013.

## CAPÍTULO I

### ESTUDO DA MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA REFORÇADA COM FIBRAS: CARACTERIZAÇÃO E POTENCIALIDADES

**Resumo** – As preocupações ambientais têm impulsionado a busca por matérias-primas construtivas mais sustentáveis e de menor impacto ambiental, o que tem renovado o interesse pela madeira como uma importante opção nesse cenário. Por ser renovável, de fácil trabalhabilidade e demandar menos energia em sua produção, a madeira apresenta vantagens significativas em relação a materiais tradicionais como o aço e o concreto. Os avanços tecnológicos têm contribuído para o desenvolvimento de produtos processados e pré-fabricados conhecidos como madeira engenheirada, como o *glued laminated timber* (GLULAM) e o *cross laminated timber* (CLT), projetados para maximizar sua aplicação na construção civil. Esta revisão busca compilar informações sobre a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), incluindo seus aspectos construtivos, as matérias-primas e adesivos empregados, além de identificar lacunas no conhecimento sobre o uso de reforços em estruturas de madeira. Pinus e eucalipto provenientes de florestas plantadas são as principais matérias-primas para a fabricação desses produtos, devido ao rápido crescimento e à sua disponibilidade. O uso crescente desses produtos engenheirados está agregando valor, otimizando propriedades e aumentando a resistência do produto final. Contudo, para atender às exigências de carga na construção, é necessário aumentar a resistência e a rigidez desses produtos, o que muitas vezes é desafiador devido à baixa densidade e propriedades mecânicas da madeira original. O uso de técnicas de reforço, incluindo fibras sintéticas, é uma alternativa promissora para melhorar essas características e mitigar defeitos inerentes à madeira. No entanto, a aplicação de reforços de fibras depende de diversos fatores, incluindo as características da madeira, do adesivo utilizado e da interação entre eles, exigindo mais estudos para uma aplicação eficaz. As pesquisas envolvendo a utilização de reforços em MLCC são escassas, o que confirma a importância deste trabalho.

**Palavras-chave:** Madeira engenheira; Adesivos; Pinus; Propriedades mecânicas.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

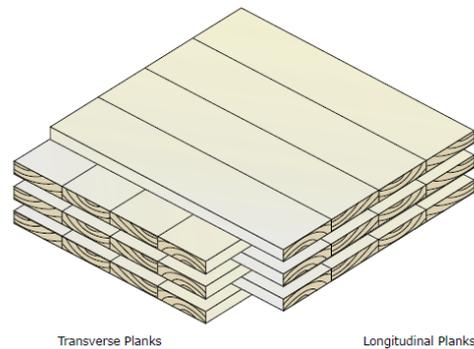
### 1.1 Cross Laminated Timber (CLT)

O sistema de construção conhecido como madeira lamelada colada cruzada (MLCC), também referido como "Cross Laminated Timber" (CLT), foi introduzido nos primeiros anos da década de 90 na Áustria e na Alemanha. Desde então, tem experimentado um aumento de popularidade significativo na Europa (Karacabeyli; Douglas, 2013). No início dos anos 2000 a construção em CLT aumentou significativamente, sendo impulsionada pelo movimento de construção ecológica, melhores eficiências do processo construtivo, aprovações de produtos e melhorias nos canais de marketing e distribuição (Karacabeyli; Douglas, 2013; Crespell; Gagnon, 2010).

Estes painéis (também denominados "X-Lam", "Massive Timber" ou "Cross-Lam") são produtos engenheirados de madeira compostos por um número ímpar de camadas (geralmente três, cinco ou sete camadas), cada uma feita de lamelas de madeira colocadas lado a lado, dispostas transversalmente entre si em um ângulo de 90° (Figura 1), capaz de suportar cargas dentro e fora do plano (Brandner *et al.*, 2016).

Em configurações especiais, as camadas sucessivas podem ser posicionadas na mesma direção, resultando na formação de uma camada dupla. As lamelas individuais de madeira podem variar em espessura de 16 a 51 mm e em largura de 60 a 240 mm. Os tamanhos dos painéis variam de acordo com o fabricante, com larguras mais comuns de 60 cm, 120 cm, 240 cm e 300 cm, enquanto o comprimento pode atingir até 18 m. A produção de painéis com dimensões maiores é realizada por meio da técnica de *finger-joint* (Karacabeyli; Douglas, 2013).

Figura 1 - Configuração das camadas do painel CLT.



Fonte: Karacabeyli; Gagnon, 2019.

O arranjo ortogonal das camadas do CLT confere uma alta capacidade para suportar esforços de forma bidirecional, com uma maior resistência e rigidez dentro e fora do plano, o que permite a sua aplicação como diafragmas de parede, placas de piso, ou mesmo elemento de vigas e pilares (Christovasilis *et al.*, 2016; Brandner *et al.*, 2016). Essa orientação específica das camadas atribui aos painéis CLT grande estabilidade dimensional, devido a minimização das taxas de contração e inchamento pela laminação cruzada (Evans, 2013; Brandner *et al.*, 2016).

Além de excelentes características de resistência e rigidez (Liao *et al.*, 2017; Wang; Gong; Chui, 2015; Sharifnia; Hindman, 2017), o CLT possui alto nível de pré-fabricação quando comparado a alvenaria, o que reduz o tempo de construção (Brandner *et al.*, 2016), desempenho favorável sob ação sísmica (Van de Kuilen *et al.*, 2011), isolamento térmico e acústico, baixa relação resistência/peso e viabiliza a construção de edifícios de múltiplos pavimentos (Karacabeyli; Douglas, 2013; Santoni *et al.*, 2017).

O CLT também possui vantagem quanto ao seu caráter ambiental, sendo reconhecido como um sistema construtivo mais sustentável por reduzir os impactos ao meio ambiente, originar-se de fontes renováveis e demonstrar alta eficiência em termos de consumo energético e emissão de CO<sub>2</sub> ao longo de sua produção (Murta *et al.*, 2010; Lehmann, 2012).

Outra vantagem da madeira lamelada cruzada se refere às propriedades mecânicas mais uniformes, permitindo o uso de madeira de menor qualidade e subutilizadas. A classificação visual e mecânica das lamelas possibilita sua utilização em camadas centrais do painel, onde as solicitações são menores,

mantendo esses produtos florestais competitivos no mercado (Cherry *et al.*, 2019; Pereira; Calil Junior, 2019).

As características mencionadas tornam os painéis CLT uma forte alternativa aos materiais mais tradicionais, como concreto, alvenaria ou aço, especialmente em construção multifamiliar, industrial e comercial (APA, 2016). Porém, ainda existem barreiras a serem ultrapassadas, como a percepção e aceitação do mercado, a disponibilidade e logística, custos iniciais mais elevados do que os materiais tradicionais, mão de obra especializada (Jones *et al.*, 2016; Penfield *et al.*, 2022).

O comportamento das propriedades mecânicas dos painéis CLT pode ser de difícil entendimento, principalmente devido à disposição ortogonal das fibras nas camadas sucessivas e à anisotropia inerente à madeira (Christovasilis *et al.*, 2016). Sendo necessários estudos sobre as variações das propriedades mecânicas dos painéis, assim como a seleção da espécie de madeira apropriada para garantir um projeto estrutural adequado.

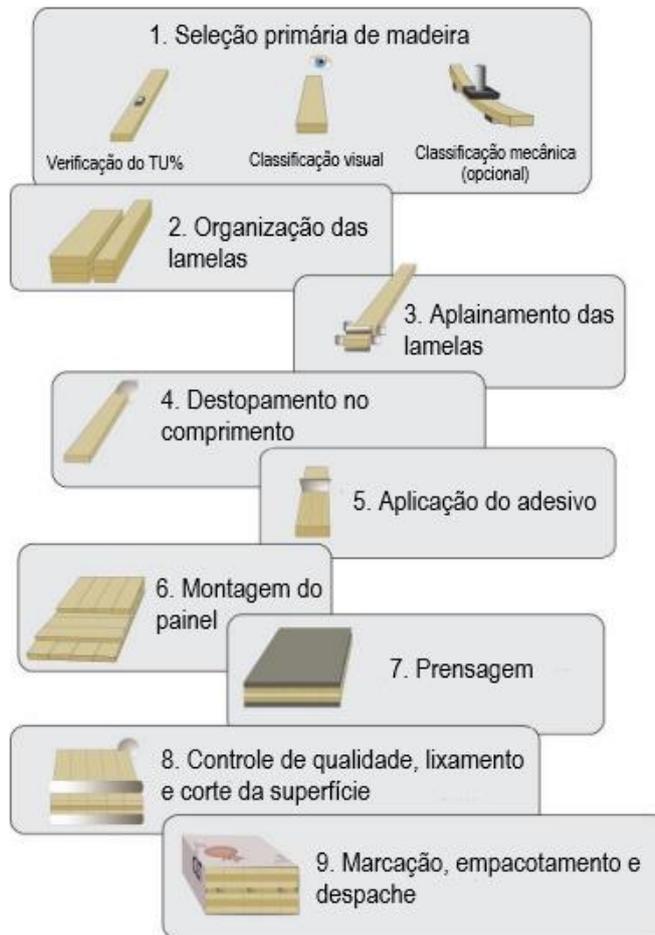
### **1.1.1 Produção dos painéis CLT**

Nos últimos anos os painéis CLT vêm se popularizando como um sistema de construção pré-fabricado. Para garantir confiabilidade e resistência, os componentes escolhidos e os processos de produção, tais como aplicação do adesivo, pressão de prensagem, dentre outros, devem ser levados em consideração (Karacabeyli; Douglas, 2013).

O processo de fabricação dos painéis CLT envolve algumas etapas conforme descritas abaixo e também apresentadas na Figura 2.

- 1) Seleção primária de madeira,
- 2) Organização das lamelas,
- 3) Aplainamento das lamelas.
- 4) Destopamento no comprimento desejado,
- 5) Aplicação do adesivo,
- 6) Montagem do painel CLT,
- 7) Prensagem,
- 8) Acabamento, corte e controle de qualidade,
- 9) Marcação, empacotamento e despacho do produto.

Figura 2 - Processo de fabricação da CLT



Fonte: Adaptado de Karacabeyli; Gagnon, 2019.

A primeira etapa inclui a verificação do teor de umidade do material que deve ser  $12\% \pm 3\%$ , a fim de minimizar alterações nas dimensões e prevenir o aparecimento de fendas superficiais, garantindo um maior desempenho do adesivo. Além da inspeção da madeira por meio de um controle de qualidade, que geralmente envolve uma classificação visual com adição ou não de classificação mecânica (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Kurzinsk; Crovella; Kremer, 2022).

As lamelas são então agrupadas conforme as direções de maior e menor resistência do CLT. De forma geral, toda a madeira na direção de maior resistência deverá ter as mesmas propriedades de engenharia, assim como todas as madeiras na direção de menor resistência (camadas cruzadas) farão parte do mesmo conjunto de propriedades (Karacabeyli; Gagnon, 2019). As lamelas externas podem ser classificadas por critérios visuais para garantir qualidade estética (Kurzinsk; Crovella; Kremer, 2022).

A terceira etapa consiste no aplainamento das lamelas que pode ser feito em quatro ou dois lados para garantir a uniformidade dimensional e adesão adequada (Karacabeyli; Gagnon, 2019). Superfícies aplainadas adequadamente ajudam a garantir que uma camada de adesivo de espessura uniforme possa ser espalhada uniformemente sobre o aderente (Frihart; Hunt, 2010).

No passo seguinte, as lamelas são aparadas e unidas longitudinalmente por emendas do tipo *finger-joints* de acordo com a especificação e o comprimento desejado para as camadas do CLT (Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018). Após a preparação das lamelas é aplicado adesivo estrutural nas camadas de madeira, que são montadas em direções alternadas. Além disso pode haver colagem lateral das lamelas (Kurzinsk; Crovella; Kremer, 2022).

A colagem das camadas é realizada aplicando pressão desejada, permitindo que as faces da laminação se encaixem adequadamente e penetração adequada do adesivo (Karacabeyli; Gagnon, 2019). Segundo Jeleč, Varevac e Rajčić (2018) os valores variam de 0,10 a 1,0 MPa se forem utilizadas prensas hidráulicas, enquanto os valores correspondentes variam de 0,05 a 0,10 MPa para prensas de vácuo, e os valores variam de 0,01 a 0,20 MPa para pressão exercida por parafusos, braçadeiras e pregos.

Na etapa seguinte é realizado o lixamento da superfície dos painéis CLT por meio de uma lixadeira industrial e são então transportados para estação de usinagem, onde são cortadas as aberturas para portas e janelas. Pequenos reparos podem ser realizados manualmente nessa parte do processo (Karacabeyli; Gagnon, 2019).

Finalizadas essas etapas, é feita a marcação dos produtos, garantindo a especificação, entrega e instalação correta dos painéis. O produto final é então empacotado, para proteção das condições climáticas externas e enviado para transporte (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Jeleč; Varevac; Rajčić, 2018).

### **1.1.2 Madeiras utilizadas na confecção de elementos estruturais colados**

O potencial brasileiro para uso de madeiras como elementos construtivos é enorme, visto que existem grandes áreas de reflorestamento com espécies de rápido crescimento florestal, como o pinus e o eucalipto, que apresentam valor agregado elevado e, que possuem desempenho comparável às madeiras utilizadas

em países europeus ou norte-americanos, nos quais o uso do CLT já é estabelecido (Lucena, 2017).

Apesar do uso do CLT no país ainda estar em estágio inicial, suas vantagens em comparação à madeira serrada são significativas, principalmente pela capacidade de produzir peças a partir de madeira de reflorestamento sem limitação de dimensões e com aumento da resistência e rigidez (Ramos; Carrasco; Rodrigues, 2018).

Na confecção de painéis CLT são utilizadas predominantemente espécies de coníferas, porém o uso de madeiras de folhosas também é viável e pode apresentar vantagens (Brandner *et al.*, 2016). No Brasil, a madeira de *Pinus taeda* e em situações particulares, o *Eucalyptus grandis* já estão sendo utilizados para fabricação de painéis CLT (CROSSLAM, 2021).

A ANSI/PRG320 aconselha o uso de madeiras com densidade mínima de 0,35 g/cm<sup>3</sup> para fabricação de CLT, enquanto espécies com densidade entre 0,42 g/cm<sup>3</sup> e 0,6 g/cm<sup>3</sup> são geralmente usadas na Europa (Hematabadi *et al.*, 2020). No Brasil, a NBR 7190 (2022) recomenda a utilização de lamelas com densidade aparente entre 0,40 g/cm<sup>3</sup> e 0,75 g/cm<sup>3</sup>.

A tecnologia CLT permite o uso de madeira de menor valor agregado em aplicações de alto valor, promovendo uma utilização mais eficiente dos recursos florestais (Mallo; Espinoza, 2015). É possível fabricar peças estruturais de alta qualidade utilizando tipos de madeira que normalmente não são comumente empregadas para esse fim (Gsell *et al.*, 2007; Crespell; Gagnon, 2010). Uma variedade de matéria-prima pode ser usada na confecção de painéis CLT, as diferentes espécies de madeira utilizadas irão depender do recurso local disponível e do objetivo do painel (Navaratnam *et al.*, 2020).

Conforme Pangh *et al.* (2019), as espécies de madeira de rápido crescimento, como eucalipto, podem oferecer uma solução para o fornecimento de madeira para a construção CLT. Algumas pesquisas já vêm sendo realizados para estudar a possibilidade de aplicação de madeiras de menor resistência.

Liao *et al.*, (2017) analisaram a viabilidade de fabricação de madeira lamelada cruzada de três camadas usando madeira de eucalipto de pequeno diâmetro e crescimento rápido (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) e concluíram que os painéis CLT fabricados com madeira serrada de eucalipto são promissores para aplicações estruturais, pois possuem capacidade de oferecer uma solução estrutural

viável, com base em uma matéria-prima disponível em abundância e com desempenho satisfatório para diversas aplicações na construção civil.

Alencar (2015) avaliou a possibilidade de uso de painéis CLT, fabricados com peças de pinus e medula de eucalipto, provenientes de florestas plantadas e obteve valores superiores aos da norma ANSI/APA 320 (2012), mostrando-se viável para a confecção desses painéis para uso estrutural.

Lessa (2017) também estudou a viabilidade da utilização de espécies de reflorestamento como *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* na confecção de painéis CLT e concluiu ser possível a utilização dessas espécies, uma vez que os defeitos das peças são distribuídos nas diferentes camadas.

Pereira e Calil Junior (2019) avaliaram a rigidez de painéis CLT produzidos de *Pinus taeda* com adesivo MUF (melamina ureia formaldeído) e de *Eucalyptus urograndis* com adesivo de PU (poliuretano) e concluíram que esses foram adequados para uso estrutural, se tornando uma nova opção de material construtivo a ser utilizado no país.

### **1.1.3 Adesivos utilizados na produção de elementos estruturais colados**

Durante o processo de produção do CLT, o tipo de adesivo, a gramatura de aplicação, as características visuais da matéria-prima, o teor de umidade, a temperatura, o tempo de montagem, a pressão aplicada e o tempo de prensagem estão entre as principais variáveis que afetam a qualidade da ligação adesiva (Wang *et al.*, 2018). Alterações na formação da ligação entre o adesivo e a madeira podem reduzir a resistência dos elementos, sendo necessária avaliação da qualidade e durabilidade das linhas de cola (Karacabeyli; Douglas, 2013).

Entre as principais resinas utilizadas para fabricação dos painéis CLT's estão o resorcinol-formaldeído (RF), fenol-resorcinol-formaldeído (FRF), melamina-uréia-formaldeído (MUF) e poliuretano monocomponente (PUR), assim como os adesivos de emulsão-polímero-isocianato (EPI) (Karacabeyli; Douglas, 2013; Brandner *et al.*, 2016).

Os adesivos sintéticos RF e FRF são amplamente utilizados na fabricação de juntas coladas para uso estrutural, tanto em ambientes internos quanto externos, devido à sua alta resistência mecânica e excelente resistência à água em diferentes condições climáticas (Iwakiri, 2005). Por sua vez, a MUF se destaca por seu menor

tempo de cura e pela linha de cola transparente após a catalisação, sendo preferencialmente empregada na fabricação de painéis para uso externo e semi-externo (Miotto; Dias, 2009). Os adesivos à base de PUR são fabricados sem a adição de solventes ou formaldeído, caracterizando-se pela linha de cola incolor, fácil aplicação e endurecimento rápido (Wang; Pirvu; Lum, 2011). Embora o adesivo EPI também ofereça alta resistência à umidade, linha de cola incolor, menor tempo de cura e pressão de colagem, seu alto custo pode ser um fator limitante em sua aplicação (Frihart, 2005).

Segundo Brandner *et al.* (2016) esses adesivos podem apresentar propriedades diferentes, variando de produto para produto e devem ser previamente aprovados para a produção de CLT. Além disso, as recomendações de uso do fabricante devem ser seguidas (Karacabeyli; Douglas, 2013).

Os adesivos à base de poliuretanos ganharam espaço no mercado nacional devido ao menor custo quando comparado ao resorcinol, que é importado dos EUA (Icimoto, 2018). No Brasil, o fabricante de CLT emprega como adesivo estrutural o poliuretano monocomponente, que possui 100% de teor de sólidos, livre de formaldeído, com certificação para uso estrutural e com resistência a água (CROSSLAM, 2021).

Ecker, Miotto e Turmina (2017) avaliaram a influência da variação da gramatura de adesivo na colagem das lamelas dos painéis CLT, para isso utilizaram poliuretano monocomponente. Neste estudo, os autores concluíram que a maior gramatura, de 200 g/m<sup>2</sup>, deve ser utilizada para garantir a qualidade da ligação.

No estudo realizado por Yusof *et al.* (2019), constatou-se que entre os corpos de prova confeccionados em fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e poliuretano (PUR) da espécie *Acacia mangium*, amostra confeccionada em PRF apresentou maiores valores de resistência à flexão, cisalhamento e compressão. Embora o CLT de PUR tenha apresentado propriedades inferiores, ele ainda pode ser usado para aplicações de menor resistência onde a cor transparente das linhas de cola é necessária.

Sikora, McPolin e Harte (2016) realizaram testes de delaminação e cisalhamento para avaliar a eficácia da colagem do abeto Sitka (*Picea sitchensis*) em painéis CLT unidos com adesivos de poliuretano (PUR) e resorcinol-formaldeído (PRF). Eles observaram que as amostras coladas com PUR apresentaram maior resistência ao cisalhamento, enquanto as amostras coladas com PRF tiveram

melhor desempenho no teste de delaminação. Além disso, os autores destacaram que o método de teste de cisalhamento empregado nesse estudo foi preciso na avaliação da resistência ao cisalhamento das linhas de cola em painéis CLT.

Por outro lado, Das *et al.* (2023) investigaram a adequação da madeira de choupo (*Populus nigra* L.) e bordo (*Acer platanooides* L.) para a produção de painéis CLT de espécies mistas, utilizando adesivos de melamina e poliuretano. Eles obtiveram resultados satisfatórios de resistência à delaminação para os painéis CLT de choupo colados com ambos os adesivos. No entanto, para os painéis de espécies mistas, o adesivo de poliuretano (PUR) apresentou melhor desempenho. Além disso, a qualidade da adesão do choupo com o adesivo de poliuretano confirma sua adequação para espécies mistas de painéis CLT.

Maithani, Chauhan e Sethy (2023) caracterizaram física e mecanicamente as propriedades da madeira lamelada colada cruzada preparada a partir de madeira de *Pinus radiata* e adesivo poliuretano. Os autores encontraram propriedades de delaminação para todas as amostras de CLT dentro das normas, indicando que a propriedade de ligação do painel foi adequada e a taxa de adesão e a pressão utilizadas para fabricar o painel CLT também foram satisfatórias.

## 1.2 O gênero *Pinus*

O gênero *Pinus*, da família *Pinaceae*, possui centenas de espécies com origem predominante no hemisfério Norte. No Brasil, a introdução e cultivo tiveram início há mais de um século, com pesquisas do Serviço Florestal do Estado de São Paulo (Santos, 2019), tendo sido introduzidas as espécies americanas *P. palustris*, *P. echinata*, *P. elliotii* e *P. taeda*, com destaque para as duas últimas por terem se aclimatado melhor (Shimizu, 2008).

O *Pinus taeda* e *Pinus elliotii* são os mais plantados e utilizados na região sul brasileira (Aguiar *et al.*, 2014). Mas outras espécies como os *Pinus* tropicais têm sido pesquisadas por possibilitarem o incremento da produtividade, a oferta de madeira e a diversificação da matéria-prima, a exemplo do *Pinus caribaea* e *Pinus oocarpa* (Santos, 2016).

No ano de 2022, a área total de florestas plantadas correspondeu a 9,94 milhões de hectares (IBÁ, 2023). Os plantios de *Pinus* representam 19% da área total e são oriundos principalmente da região Sul do país, onde estão localizados

89% dos cultivos. Tendo o Paraná 713 mil hectares e Santa Catarina 701 mil hectares de área plantada (IBÁ, 2023).

Ainda segundo o relatório da Indústria Brasileira de Árvores (2022), a madeira serrada de pinus apresentou um crescimento de 6% do volume exportado no primeiro semestre de 2021 em relação ao mesmo período de 2020. Além de se destacar como a principal fonte de madeira serrada, o pinus é a matéria-prima predominante na fabricação de lâminas, compensados, molduras, portas e outros produtos. Isso se deve não apenas à capacidade da espécie de se adaptar às condições edafoclimáticas das diferentes regiões, mas também à sua ampla aceitação pela indústria madeireira no processamento de produtos (ABIMCI, 2019).

A madeira pertencente a esse gênero, cultivada no Brasil, devido ao crescimento acelerado, apresenta uma baixa densidade e muitos nós, o que resulta em baixa resistência em certos pontos. Além disso são de fácil trabalhabilidade e possuem alta permeabilidade (Cunha, 2007). Podendo ser destinadas para a produção de celulose, MDF, OSB, compensados, vigas, embalagens, móveis e partículas. Além da extração da resina, utilizada na produção de adesivos, vernizes, fungicidas e outros (Santos, 2016).

Na construção civil, o gênero vem se destacando em razão da maior parte das tecnologias utilizadas para industrialização de produtos estruturais serem provenientes de países europeus e norte-americanos, onde o maior emprego é principalmente de coníferas como matéria-prima (Stamato *et al.*, 2006). Por exemplo na confecção de madeira lamelada colada, dormentes e madeira lamelada cruzada (Santos, 2019).

Na confecção de produtos de madeira engenheirada o gênero *Pinus* tem demonstrado desempenho estrutural satisfatório (Icimoto *et al.*, 2016; Mirski *et al.*, 2020a). A fim de ampliar e diversificar o uso de madeiras do gênero, estudos vêm sendo realizados.

Mustefaga *et al.* (2019) examinaram as propriedades físico-mecânicas de madeiras jovens de *Pinus taeda* e *P. patula*, constatando que, apesar da baixa densidade, ambas as espécies exibiram resistência e rigidez suficientes para serem classificadas como madeira estrutural. Isso revelou que os valores normativos não se adequaram à madeira proveniente das árvores jovens analisadas no estudo.

Mirski *et al.* (2020b) avaliaram a qualidade da madeira de *Pinus sylvestris* por meio do MOE e concluíram que a origem das toras no tronco tem influência nas

propriedades da madeira, sendo as toras da ponta as que produzem elementos de alta qualidade.

As madeiras provenientes do gênero *Pinus* apresentam variabilidade das propriedades físicas e mecânicas entre as espécies, sendo necessário conhecer as características de cada uma delas para sua correta utilização para as diversas finalidades (Trianoski *et al.*, 2014).

As diferentes propriedades mecânicas e física de sete espécies de *Pinus* tropicais comparadas com as propriedades do *Pinus taeda*, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados médios das propriedades mecânicas e da densidade aparente (12%) da madeira de espécies de *Pinus* tropicais e *Pinus taeda*

<b>Espécie</b>	<b>MOR (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>f<sub>c0</sub> (MPa)</b>	<b>E<sub>c0</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>v0</sub> (MPa)</b>	<b>ρ<sub>12</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	65	7187	30	9189	10,64	0,491
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	58	6060	28	9447	9,10	0,435
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	62	7106	34	10956	10,49	0,502
<i>Pinus chiapensis</i>	59	7293	33	10060	8,72	0,435
<i>Pinus maximinoi</i>	70	8943	37	12990	11,37	0,533
<i>Pinus oocarpa</i>	70	7993	39	12212	11,95	0,552
<i>Pinus tecunumanii</i>	71	8943	39	14049	11,42	0,557
<i>Pinus taeda</i>	64	8234	37	12432	10,52	0,527

MOR: módulo de ruptura à flexão; MOE: módulo de elasticidade à flexão; f<sub>c0</sub>: resistência à compressão paralela às fibras; E<sub>c0</sub>: módulo de elasticidade à compressão; f<sub>v0</sub>: resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; ρ<sub>12</sub>: densidade aparente à 12% de umidade. Fonte: adaptado de Trianoski *et al.* (2014).

A fim de se atender parâmetros mínimos para aplicação estrutural, a determinação das propriedades mecânicas e físicas é fundamental para a classificação das peças de madeira (Santos, 2019). O conhecimento do comportamento do material sob um determinado carregamento é necessário para o correto dimensionamento dos elementos de uma estrutura.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de algumas propriedades para cada classe de resistência para *Pinus spp*, estudadas a partir de corpos de prova e descritos pela norma ABNT NBR 7190:2022.

Tabela 2 - Valores médios de densidade e resistência das classes para *Pinus spp* (ABNT NBR 7190:2022)

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade $\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	500	400	350
Módulo de elasticidade médio $E_{med}$ (MPa)	11000	8000	5000
Resistência característica à flexão $f_{m,k}$ (MPa)	35	27	14
Resistência característica à compressão paralela $f_{c0,k}$ (MPa)	22	18	14
Resistência característica ao cisalhamento $f_{v,k}$ (MPa)	6	3,5	2,5

Fonte: ABNT NBR 7190:2022.

Um dos parâmetros que afetam as propriedades físicas e mecânicas da madeira é o teor de umidade, uma vez que ele se relaciona diretamente as outras variáveis, influenciando consideravelmente as condições do material (Silveira *et al.*, 2012). De modo geral, é observada uma relação inversamente proporcional das propriedades de resistência e rigidez com teor de umidade.

Outra variável importante para determinação da qualidade da madeira é a densidade, pois além de ser uma propriedade de fácil obtenção ainda permite a predição da resistência e rigidez do material (Aquino *et al.*, 2018; Christoforo *et al.*, 2017). As madeiras provenientes das espécies de pinus de forma geral apresentam baixa densidade devido ao seu crescimento acelerado, sendo necessária a classificação para utilização como componente estrutural (Carreira; Dias, 2005).

Devido à sua natureza higroscópica e anisotrópica, a madeira está sujeita a alterações dimensionais de madeira desigual em relação aos diferentes planos de orientação, dependendo da umidade do ambiente em que se encontra, especialmente quando está abaixo do PSF (ponto de saturação das fibras) (Cezaro; Trevisan; Balbinot, 2016). Essa retratibilidade da madeira pode ser um dos maiores problemas práticos, que pode afetar sua utilização e processamento, necessitando de análises dos parâmetros dimensionais para garantir a correta aplicação na indústria de produtos sólidos (Trianoski *et al.*, 2013).

As variações dimensionais e o coeficiente anisotrópico da madeira, dado pela razão entre a contração tangencial e radial, do gênero *Pinus* já foram estudados por diversos autores. A anisotropia está ligada à qualidade da madeira, determinando sua estabilidade dimensional. Madeiras com menor coeficiente anisotrópico são

consideradas mais estáveis e menos propensas a fissuras durante a secagem. Aquelas com um coeficiente maior que 2 não são recomendadas para aplicações que demandem maior estabilidade dimensional (Oliveira *et al.*, 2010; Miranda *et al.*, 2012; Freitas *et al.*, 2016).

De acordo com Trianoski *et al.* (2013) a contração tangencial pode variar entre 5,74% a 6,55%, a contração radial entre 1,88% a 3,38%, já a contração volumétrica pode variar de 8,67-10,65%, enquanto a anisotropia varia de 2,20 a 3,36 para as espécies de pinus tropicais. Ladeira *et al.* (2018) obtiveram valores médios de 9,57% para contração volumétrica, 4,47% para contração tangencial, 3,72% para contração radial e 1,26 para fator anisotrópico.

Balloni (2009) obteve um inchamento volumétrico de 10,89% para *Pinus elliottii*. Acosta *et al.* (2020) encontraram valores de inchamento radial, tangencial e anisotropia de 5%, 6,72% e 1,46, respectivamente para *Pinus elliottii*.

### 1.3 Componentes de reforço

O emprego de compósitos fibrosos no setor da construção é cada vez mais frequente, sendo utilizados para reforçar estruturas de madeira, concreto e alvenaria. Polímero Reforçado com Fibra (FRP – “Fiber Reinforcing Polymers”) é um material compósito feito de uma matriz polimérica reforçada com fibras com inúmeras vantagens, sendo aplicado tanto para fortalecer estruturas existentes quanto para reforçar novos elementos (Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021). As fibras que atuam como reforço podem estar presentes de forma contínua (fibras longas/alinhadas) ou descontínua (fibras curtas, alinhadas ou orientadas aleatoriamente) (Dato, 2012).

Os FRP's são materiais extremamente versáteis, de alta resistência e rigidez, sendo possíveis reforços para melhorar o comportamento de suporte de carga, deformação e confiabilidade da madeira (Bergner *et al.*, 2018), além de reduzir a variabilidade do material. As fibras de carbono e vidro são, em geral, os FRP's mais aplicados para reforçar vigas de madeira, segundo Schober *et al.* (2015) e Fiorelli e Dias (2011).

A associação das propriedades mecânicas dos materiais de reforço com madeira lamelada por exemplo, resulta em um compósito de alto desempenho, pois o material de reforço é aplicado para aprimorar as propriedades individuais da

madeira, restaurar a resistência inicial do elemento projetado ou até aumentá-la (Bertoline *et al.*, 2016).

A utilização da técnica de colagem de tecidos naturais ou sintéticos, impregnados com resinas poliméricas para reforços de estruturas de madeira vem sendo pesquisada (Kasal; Yan, 2021). Essa abordagem se deve a sua ágil e fácil aplicação, sem aumento significativo no peso da estrutura e por ser economicamente vantajosa em relação à outras técnicas (Donadon *et al.*, 2017).

A utilização de fibras naturais, que possuem resistência à tração e leveza, têm sido muito estudadas devido a conscientização ambiental e a busca por produtos mais sustentáveis (Valdes *et al.*, 2020). Além disso, sua fabricação envolve pequeno consumo de energia, baixa emissão de CO<sub>2</sub>, métodos de processamento simples e ecológicos (Sanjay *et al.*, 2019).

O emprego de fibras vegetais é atrativo devido à sua característica de ser um material renovável e biodegradável. Exemplos incluem a fibra de sisal (Mascia; Mayer; Moraes, 2014), fibras de curauá (Donadon *et al.*, 2017), fibras de coco (Tomczak, 2010) e outras variedades.

No entanto, estudos envolvendo fibras sintéticas também tem impulsionado, pois essas exibem grande resistência mecânica e à oxidação, baixa densidade e possuem capacidade em manter suas propriedades mesmo quando submetidas a amplas faixas de temperatura (Miotto; Dias, 2006; Bertoline *et al.*, 2016).

As fibras sintéticas têm alto módulo de elasticidade, resistência e tenacidade. Quando associadas a um material da matriz resultam em compósito fibroso, onde as fibras determinam resistência e rigidez, e o material da matriz garante as principais direções mecânicas, a distribuição de tensões e a integridade estrutural do sistema de compósitos (Mascia *et al.*, 2018).

O reforço adequado da seção tracionada de vigas de madeira tem o potencial de alterar o comportamento da fratura de frágil para dúctil (Wdowiak-Postulak; Brol, 2020). A incorporação de fibras sintéticas como material de reforço estrutural na área mais exigida de vigas de madeira maciça ou vigas de madeira lamelada colada pode levar a um projeto estrutural mais eficaz (Bertoline *et al.*, 2016).

Diversos fatores podem influenciar o grau de aumento dos parâmetros de resistência das vigas reforçadas, como o tipo de elemento reforçado e material de FRP, a localização do reforço, a qualidade da cooperação entre o FRP e a madeira (integridade da junta), o grau de reforço, entre outras (Śliwa-Wieczorek *et al.*, 2021).

Sendo assim diferentes resultados podem ser obtidos dependendo dos fatores a serem considerados.

### 1.3.1 Fibras naturais

A fibra natural frequentemente utilizada é aquela proveniente de plantas (como vegetais, folhas e madeira), organismos e processos geológicos (Chandramoha; Marimuthu, 2011). Entre essas fibras naturais, o linho, o cânhamo, a juta, o sisal, o kenaf, a fibra de coco, a sumaúma, a banana, o henequen e muitos outros são muito reconhecidos atualmente (Manna *et al.*, 2017).

As fibras naturais, reconhecidas por sua resistência à tração e leveza, têm sido objeto de extensos estudos devido à crescente conscientização ambiental e à busca por produtos mais sustentáveis (Valdes *et al.*, 2020). Além de apresentarem benefícios em termos de custos de produção, são biodegradáveis, não-tóxicas e ecológicas (Dixit *et al.*, 2017), uma vez que sua fabricação envolve pequeno consumo de energia, baixa emissão de CO<sub>2</sub>, métodos de processamento simples e ecológicos (Sanjay *et al.*, 2019).

Além disso, o aumento nos custos para produção de materiais compósitos tem ampliado as pesquisas envolvendo materiais naturais, consideravelmente mais econômicos (Borri; Corradi; Speranzini, 2013). Fibras naturais (por exemplo, cânhamo, linho, bambu) foram recentemente introduzidas no mercado como alternativas às fibras sintéticas, como carbono ou vidro, para obter Polímeros Reforçados com Fibras Naturais (NFRP's) (Hoseinpour *et al.*, 2018).

As fibras naturais têm despertado interesse considerável entre cientistas e pesquisadores como uma alternativa às fibras sintéticas no reforço de compósitos poliméricos, devido às suas vantagens em relação às fibras convencionais, como vidro, carbono e outras (Borri; Corradi; Speranzini, 2013; Khalid *et al.*, 2021). Sendo considerada um material ecologicamente correto e com boas propriedades quando comparada aos materiais convencionais utilizados (Mahir *et al.*, 2019).

Os materiais compósitos reforçados com fibras à base de fibras naturais apresentam vantagens, uma vez que se prestam a aplicações simples de construir e extremamente versáteis, tanto na recuperação de estruturas existentes como na concepção de novas estruturas (Borri; Corradi; Speranzini, 2013). Além de

oferecerem uma combinação de resistência e módulo que são semelhantes ou melhores do que muitos materiais metálicos convencionais (Mahir *et al.*, 2019).

Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades de algumas fibras naturais utilizadas como reforço.

Tabela 3 - Caracterização de algumas fibras naturais

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Referência</b>
Basalto	2,65	4840	89	Shi (2012)
Cânhamo	1,4-1,6	690	30-70	Väisänen; Das; Tomppo (2017)
Linho	1,4	88-1500	60-80	Mahir <i>et al.</i> (2019)
Bambu	1,5-4	575	11,32	Ahmed <i>et al.</i> (2022)
Sisal	1,27-1,5	126-800	3,8-62	Neto; Pardini (2016)
Rami	1,51	393-900	7,3-25	Neto; Pardini (2016)
Juta	1,5	320-500	12-100	Neto; Pardini (2016)

Como a CLT é uma tecnologia relativamente nova no Brasil, estudos com reforços, principalmente naturais são escassos. Valdes *et al.* (2020) investigaram painéis CLT de pinho marítimo reforçados com fibras de tecido de linho que possuía uma resistência à tração de 512 MPa e um módulo de elasticidade de 21,4 GPa. Enquanto Munis *et al.* (2018) avaliaram a resistência à compressão paralela e perpendicular de painéis CLT com e sem reforço de bambu.

O estudo realizado por Victor (2018) analisou vigas de madeira lamelada colada reforçadas com fibra e indicou que a inclusão de fibras de sisal como reforço estrutural reduz a variabilidade do material, aumentando a segurança da estrutura. Portanto, essa abordagem é recomendada para aprimorar a resistência de elementos de MLC.

Donadon *et al.* (2017) realizaram uma avaliação das propriedades mecânicas de vigas de madeira laminada colada (MLC) reforçadas com fibras naturais. As fibras de Curauá demonstraram uma elevação na rigidez da viga de 8% a 20% e um aumento na força de ruptura entre 4% e 22%. Já as fibras de Sisal mostraram um

incremento na rigidez da viga de 9% a 16% e um aumento na força de ruptura de 11% a 22%, quando comparadas ao valor médio das vigas de referência.

Mascia, Donadon e Vilela (2019) desenvolveram um estudo experimental de vigas de madeira laminada reforçada por fibras de Sisal e notaram uma diminuição de 20 a 30% para as tensões normais, de 5 a 10% para as tensões de cisalhamento e 8 a 12% para os deslocamentos em relação às vigas não reforçadas. Concluindo que a adição de fibras de sisal como reforço é viável.

### 1.3.1.1 Juta

A juta (*Corchorus capsularis*, Linn) é uma planta arbustiva que pode chegar de 3 a 4 metros de altura, pertencente à família *Tilioidae* e que foi trazida para o Brasil no início do século XX (Sarker, 2022). Cultivada principalmente no Norte brasileiro, em Estados como Pará e Amazonas. A fibra também é popular em países asiáticos, sendo amplamente plantada e comercializada principalmente no sul da Ásia (Marques *et al.*, 2020).

A composição principal das fibras de juta consiste principalmente em celulose e lignina, possui fibra longa, 100% natural, apresenta uma aparência macia e brilhante, renovável, biodegradável, compostável, de baixo custo, além de ser uma das fibras naturais mais resistentes (Jahan; Hossain; Khan, 2022). Quando misturada a polímeros, pode originar produtos de menor densidade com uma grande variedade de aplicações (Neto; Carvalho; Araújo, 2007).

Algumas propriedades são atrativas ao seu uso em materiais compósitos na construção civil, como alta resistência à tração, resistência moderada ao fogo, biodegradabilidade, entre outras vantagens pertencentes às fibras vegetais (Islam e Ahmed, 2018). Os compósitos reforçados pela juta podem ser utilizados em telhados, painéis e outras partes do carro, placas para a indústria eletrônica, mesas e divisórias para escritório, portas e janelas (Abilash; Sivapragash, 2013).

A juta é uma das fibras naturais mais antigas utilizada na produção de compósitos e tem sido mais recentemente, empregada na forma de fios e tecidos tramados em estilo plano para o reforço em matrizes termofixas. Porém para reforço de estruturas de madeira ainda não existem estudos.

### 1.3.1.2 Fibra de bambu

O termo bambu se refere a uma variedade de espécies de gramíneas (Família *Gramineae* ou *Poaceae*) da subfamília *Bambusoideae*. Essas plantas têm um crescimento acelerado e podem atingir seu tamanho máximo em até seis meses de cultivo (Hidalgo-López, 2003). Estima-se que existam 119 gêneros, abrangendo 1.482 espécies de bambu em todo o mundo (Clark *et al.*, 2015).

Possui uma ampla gama de aplicações, sendo frequentemente empregado em contextos não estruturais, como revestimentos de piso, fabricação de móveis, artesanato e decoração. No entanto, também possui um grande potencial como elemento estrutural na construção civil, onde é predominantemente utilizado em sua forma natural (Akinlabi; Anane-Fenin; Akwada, 2017).

As fibras de bambu, que são fibras naturais, têm muito potencial como alternativa ecologicamente correta para reforço compósitos poliméricos. Estas fibras têm atraído grande interesse devido à sua propriedade específica de tração, ser um material carbono neutro, renovável e biodegradável, de grande abundância de recursos e alta relação resistência-peso, o que as torna substitutos potenciais ideais para fibras artificiais usadas na produção de compósitos reforçados com fibras (Khalil *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2014).

O bambu apresenta propriedades mecânicas superiores ao longo da direção da fibra, tornando-o um material renovável adequado para compósitos em aplicações de alto desempenho devido às suas propriedades microestruturais únicas (Javadian *et al.*, 2019). Sua abundância como recurso natural de rápido crescimento, especialmente em regiões tropicais, oferece um grande potencial para a geração de novos produtos na construção civil. Além disso, o bambu demonstra um bom comportamento físico-mecânico, que pode impactar positivamente o desempenho dos materiais compósitos fabricados (Hebel *et al.*, 2014; Javadian *et al.*, 2016; Javadian *et al.*, 2019).

### 1.3.2 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas podem ser compostas por materiais poliméricos ou minerais. Exemplos comuns de fibras minerais incluem fibra de vidro e fibra de

carbono. Por outro lado, tecidos poliméricos sintéticos, como poliéster e poliamida, são exemplos de fibras com base em polímeros (Ahmad; Zhou, 2022). Geralmente, as fibras sintéticas são mais resistentes do que as fibras naturais.

A qualidade das fibras e tecidos sintéticos pode ser facilmente convertida de acordo com a necessidade, modificando as propriedades químicas e as circunstâncias sob as quais são fabricadas (Cesa; Turra; Baruque-Ramos, 2017). Quando comparadas às fibras naturais, as fibras sintéticas são normalmente mais resistentes à água, manchas, calor e danos químicos (Ahmad; Zhou, 2022).

Por outro lado, as fibras sintéticas apresentam desvantagens como alto custo, alta densidade (em comparação com polímeros) e baixa reciclagem e propriedades não biodegradáveis (Mahir *et al.*, 2019).

A fibra sintética tem sido usada para fabricar produtos compósitos de matriz polimérica de alto desempenho, como tanques FRP, componentes aeroespaciais, peças automotivas e painéis de construção. Entre as fibras sintéticas populares comumente usadas nas indústrias de compósitos estão vidro, carbono e aramida (Thakur; Thakur; Pappu, 2017).

Os materiais poliméricos reforçados com fibra são comumente utilizados na indústria devido à sua capacidade de combinar fibras de alta resistência com uma matriz de resina. Essa combinação proporciona uma alta relação resistência-peso, tornando esses materiais ideais para uma variedade de aplicações industriais. Além disso, a facilidade de manuseio desses materiais os torna atrativos para a fabricação de componentes estruturais. No contexto das estruturas de madeira, esses materiais podem ser aplicados como reforço para melhorar a resistência e a durabilidade da madeira, tornando-a mais adequada para uma variedade de aplicações estruturais (Schober *et al.*, 2015).

Recentemente, um número crescente de investigações tem sido conduzido sobre o reforço de componentes estruturais de madeira com polímero reforçado com fibra (FRP), devido às suas propriedades superiores de resistência à corrosão, alta relação resistência-peso e à diversidade de produtos FRP (Sun; He; Li, 2020).

O polímero reforçado com fibra (“Fiber Reinforced Polymer” - FRP) é um material composto avançado que consiste em fibras incorporadas em uma matriz polimérica. Enquanto as fibras fornecem força e rigidez de FRP, a matriz é essencial para transferir forças entre as fibras individuais e para protegê-las da abrasão e degradação ambiental (Glišović; Stevanović; Todorović, 2016).

Os FRP estão disponíveis em uma ampla variedade de formas e têm propriedades que variam consideravelmente dependendo do material da fibra, fração de volume e orientação (Schober *et al.*, 2015). As fibras sintéticas comumente empregadas em estruturas de madeira incluem polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP), polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), polímero reforçado com fibra de basalto (BFRP) e polímero reforçado com fibra de aramida (AFRP) (Prashanth *et al.*, 2017).

Para reforço estrutural, duas formas principais de FRP são geralmente usadas. Para reforço interno, hastes pultrudadas e placas são coladas em fendas ou ranhuras formadas no elemento de madeira. Para reforço externo, placas de FRP ou materiais de tecido são usados (Schober *et al.*, 2015).

A aplicação de reforços em elementos de madeira com fibras de alto desempenho, como os polímeros reforçados com carbono (CFRP), ainda é uma perspectiva desafiadora que possibilitaria a produção de novos componentes estruturais de madeira colada (tanto de madeira lamelada colada e madeira lamelada cruzada, CLT) com reduzida profundidade/espessura e/ou mais longa extensão (Brunetti *et al.*, 2019).

É fundamental observar que as características das fibras sintéticas são altamente variáveis, principalmente em termos de módulo de elasticidade, que é uma propriedade significativa quando as fibras são empregadas na produção de compósitos (Ahmad; Zhou, 2022). As propriedades de algumas fibras sintéticas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades de fibras sintéticas utilizadas como reforços

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Aramida	1,44	3620	62
Aço	7,8	280-2800	203
Carbono	1,9	1800-2600	230-380
Vidro	2,5	1050-3850	70
Vectran NT	1,4	1100	52
Vectran HT	1,4	3200	75
Vectran UM	1,4	3000	103

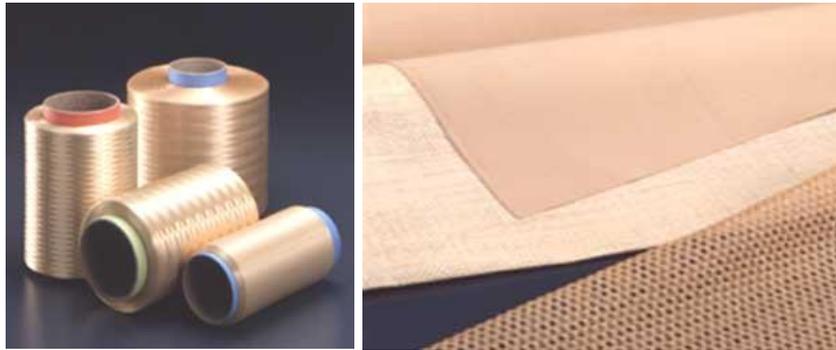
Fonte: (Ahmad; Zhou, 2022; KURARAY AMERICAN, 2010).

### 1.3.2.1 Fibra Vectran

As fibras Vectran são termoplásticas constituídas de multifilamentos e são obtidas a partir de LCP (“Liquid Crystal Polymers”), conforme Figura 3. As fibras são formadas pela extrusão do LCP fundido por meio de capilares, e durante seu processo de extrusão os domínios moleculares são orientados paralelamente à direção axial da fibra (KURARAY AMERICAN, 2010).

A fibra VECTRAN™ apresenta excepcional resistência a tração (Tabela 4) e rigidez, tem boa estabilidade dimensional, baixa deformação plástica e encolhimento, resistente a químicos e solventes (KURARAY, 2015).

Figura 3 - Filamentos e tecido de LCP Vectran



Fonte: KURARAY, 2015.

Devido às suas elevadas propriedades mecânicas, que se equiparam a outros materiais convencionais utilizados para reforço, e à sua favorável relação entre resistência e peso, esses elementos demonstram ser uma promissora opção de uso como reforço (Donadon *et al.*, 2020).

Bertoline *et al.* (2016) analisando a viabilidade do uso de fibras como reforço estrutural de vigas de madeira laminada colada concluíram que a implementação da fibra Vectran® no setor da construção civil é possível, considerando tanto aspectos econômicos quanto técnicos de sua aplicação. As elevadas propriedades mecânicas desta fibra, bem como a sua densidade, tornam-na uma alternativa muito interessante considerando o cenário atual, possibilitando a aplicação de altas resistência e sistemas compósitos de baixo peso específico como reforço estrutural.

Donadon *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação do reforço Vectran-FRP em vigas de madeira laminada colada resultou em um acréscimo de 19 a 35% na

rigidez no regime elástico e de 7% a 40% na capacidade de suporte de carga final. Os resultados mostram que as fibras Vectran são mecanicamente eficientes como reforço, com perspectivas de aplicação na construção civil.

Na Tabela 5, é fornecido um resumo dos principais materiais de reforço encontrados na literatura.

Tabela 5 - Principais materiais utilizados como reforço em CLT

<b>Material de reforço</b>	<b>Resultados</b>	<b>Autor</b>
Tecido de linho	Painéis de três camadas tiveram significativo incremento da capacidade de carga e rigidez, enquanto para os painéis de cinco camadas a eficácia do reforço foi insignificante	Valdes <i>et al.</i> (2020)
Bambu	Houve um aumento significativo na resistência na compressão paralela a grã quando o painel apresentava o reforço de bambu na direção longitudinal	Munis <i>et al.</i> (2018)
Fibras de vidro	Sob uma carga monotônica, as paredes CLT reforçadas não mostraram uma resistência ao cisalhamento horizontal muito melhorada em comparação com as paredes CLT não reforçadas	Jung; Song; Hong (2020)
Polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP)	O MOEglobal e MOR aumentaram em 27% e 48%, respectivamente, do que os do CLT não reforçado. O reforço de CLT por placa de CFRP suprimiu positivamente as falhas causadas por defeitos como nós	Song <i>et al.</i> (2019)
Polímero reforçado com fibra de carbono em vigas mistas CLT-concreto	As vigas com sistemas de vergalhão CFRP apresentaram a maior carga final. Os sistemas de reforço de CFRP exibiram a maior rigidez	Hadigheh <i>et al.</i> (2021)

Polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP)	A aplicação de GFRP resultou em um aumento significativo na resistência de pico, ductilidade e rigidez, bem como na resistência pós-pico.	Lopez-Molina; Doudak (2019)
--	---	-----------------------------

## 2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O CLT oferece uma solução de construção sustentável e eficiente que está se tornando cada vez mais popular em todo o mundo. Suas vantagens estruturais, estéticas e ambientais fazem dele uma escolha atraente para uma variedade de projetos de construção.

No Brasil, sua fabricação é feita principalmente em madeira de pinus, devido ao seu rápido crescimento, e adesivo poliuretano. Embora o pinus tenha uma densidade mais baixa em comparação com outras espécies de madeira, suas propriedades mecânicas e estruturais podem ser melhoradas por meio da aplicação de fibras como reforço.

Ao incorporar fibras de materiais como carbono, vidro ou aramida na matriz de madeira, é possível aumentar sua resistência e rigidez, tornando-a adequada para aplicações estruturais mais exigentes.

O CLT, a madeira de pinus e o reforço de fibras são elementos importantes no campo da construção sustentável e oferecem vantagens significativas em termos de eficiência estrutural, sustentabilidade e versatilidade de design. Integrar essas tecnologias pode resultar em soluções de construção inovadoras e ambientalmente responsáveis.

Sendo assim, são necessárias pesquisas envolvendo a aplicação desses materiais e a interação entre eles. Principalmente estudos com fibras naturais que ainda são escassos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILASH, N.; SIVAPRAGASH, M. Environmental benefits of eco-friendly natural fiber reinforced polymeric composite materials. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management**, v. 2, n. 1, p. 53-59, 2013.

ACOSTA, A. P.; SCHULZ, H. R.; BARBOSA, K. T.; ZANOL, G. S.; GALLIO, E.; DELUCIS, R. D. A.; GATTO, D. A. Dimensional stability and colour responses of *Pinus elliottii* wood subjected to furfurylation treatments. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 3, p. 303-310, 2020.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Espécies de pinus mais plantadas no Brasil. In: AGUIAR, A. V. (Ed). **Cultivo de pinus**. 2. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 333, p. 127353, 2022.

AHMED, A. F. *et al.* Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. **Heliyon**, v. 8, n. 1, 2022.

AKINLABI, E. T.; ANANE-FENIN, K.; AKWADA, D. R.; Applications of bamboo. In: AKINLABI, E. T.; ANANE-FENIN, K.; AKWADA, D. R. (Ed). **Bamboo: the multipurpose plant**. Springer, p. 179-219, 2014.

ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou cross laminated timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado**. 2015. 103f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2015.

ALMEIDA, A. C.; SILVA, R. D.; MOURA, J. D. M. Potencial de implantação do sistema construtivo *Cross Laminated Timber* – CLT no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 57607-57619, 2021.

AMERICAN NACIONAL STANDARD. **ANSI/APA PRG 320**: Standard for performance-rated Cross-Laminated Timber. Tacoma: ANSI/APA 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1582**: Standard test method for nonvolatile content of liquid phenol, resorcinol, and melamine adhesives. West Conshohocken: ASTM, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1084-97**: Standard test methods for viscosity of adhesives. West Conshohocken: ASTM, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2256**: Standard test method for tensile properties of yarns by the single-strand method. Pensilvânia: ASTM, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia: ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Pensilvânia: ASTM, 2009.

APA. **Engineered Wood Products for Superior Performance**. The Engineered Wood Association. 2013.

APA. **North American CLT vs. Imported Product**: stringent standard assures consistente value and performance. The Engineered Wood Association. 2016

AQUINO, F. R.; PEÑA, M. M. G.; HERNÁNDEZ, J. I. V.; MANZANARES, A. R.; SALINAS, M. F. Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, p. 69-77, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BALLONI, C. J. V. **Caracterização física e química da madeira de *Pinus elliottii***. 2009. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, SP, 2009.

BASTERRA, L. A. *et al.* Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 914-920, 2017.

BERG, S. *et al.* Finite element analysis of bending stiffness for cross-laminated timber with varying board width. **Wood Material Science & Engineering**, v. 14, n. 6, p. 392-403, 2019.

BERGNER, K. *et al.* Process development for the manufacture of fiber reinforced wood composites (FRWC). **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 275-284, 2018.

BERTOLINE, C. A. A., *et al.* Analysis of fiber reinforced laminated timber beams. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 100-109, 2016.

BETTI, M. *et al.* Comparison of newly proposed test methods to evaluate the bonding quality of Cross-Laminated Timber (CLT) panels by means of experimental data and finite element (FE) analysis. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 952-963, 2016.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. Reinforcement of wood with natural fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 53, p. 1-8, 2013.

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

BRUNETTI, M. *et al.* Production feasibility and performance of carbon fibre reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. **Composites Part B: Engineering**, v. 156, p. 212-219, 2019.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento-preservativo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus sp* plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, n. 67, p. 78-87, 2005.

CESA, F. S.; TURRA, A.; BARUQUE-RAMOS, J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: a review from textile perspective with a focus on domestic washings. **Science of the Total Environment**, v. 598, p. 1116-1129, 2017.

CEZARO, J.A.; TREVISAN, R.; BALBINOT, R. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Chrysophyllum marginatum*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 86, p. 135-143, 2016.

CHANDRAMOHAN, D.; MARIMUTHU, K. A. Review on Natural Fibers. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 194-206, 2011.

CHERRY, R. *et al.* Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 858-868, 2019.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrine* wood specie. **Engenharia Agrícola**, v. 37, p. 376-384, 2017.

CLARK, L. G.; LONDOÑO, X.; RUIZ-SANCHEZ, E. Bamboo taxonomy and habitat. In: LIESE, W.; KÖHL, M. (eds.), **Tropical Forestry, Bamboo: the plant and its uses**, Springer International Publishing, Switzerland, 2015. p. 1–30.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber: a Primer**. FP Innovations. Vancouver, Canada. 2010.

CROSSLAM. **Conhecendo sobre o Cross Laminated Timber (CLT)**. Disponível em: <  
<https://www.crosslam.com.br/site/PDFs/Conhecendo%20sobre%20o%20%20CLT.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2021.

CUNHA, A. B. **Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

DAS, S.; GAŠPARÍK, M.; SETHY, A. K.; KYTKA, T.; KAMBOJ, G.; REZAEI, F. Bonding performance of mixed species cross laminated timber from poplar (*Populus nigra* L.) and maple (*Acer platanooides* L.) glued with melamine and PUR adhesive. **Journal of Building Engineering**, 68, 2023.

DATOO, M. H. **Mechanics of fibrous composites**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

DIETSCH, P.; BRANDNER, R. Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements—A state-of-the-art report. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 78-89, 2015.

DIXIT, S. *et al.* Natural fibre reinforced polymer composite materials - a review. **Polymers from renewable resources**, v. 8, n. 2, p. 71-78, 2017.

DONADON, B. F. *et al.* Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, p. 109818, 2020.

DONADON, B. F.; MASCIA, N. T.; VITOR, R. S.; TRAUTWEIN, L. M. Avaliação de fibras naturais de curauá e sisal para reforço de vigas de madeira laminada colada. In: III CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2017, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017.

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

EVANS, L. **Cross-laminated Timber: Taking Wood Buildings to the Next Level**. Architectural Records. 2013.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, p. 1431-1440, 2011.

FREITAS, D. L.; CARVALHO, D. E.; BELTRAME, R.; SANTOS, G. A.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Estabilidade dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus spp.* **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 435-439, 2016.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: ROSS, R. J. (Ed.), **Wood Handbook - Wood as an Engineering Material**, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, 2010. Chapter 10. p. 1-24.

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; TODOROVIĆ, M. Reforço flexural de vigas de glulam com placas de CFRP. **Materials and Structures**, v. 49, p. 2841-2855, 2016.

GONG, M.; CHUI, Y. H. Evaluation of planar shear properties of cross layer in massive timber panel. **Report**, University of New Brunswick, Fredericton, Canadá, 2015.

GSELL, D. *et al.* Cross laminated timber plates: evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, v. 133, n. 1, p. 132-138, 2007.

HADIGHEH, S. A. *et al.* Evaluation of composite action in cross laminated timber-concrete composite beams with CFRP reinforcing bar and plate connectors using Digital Image Correlation (DIC). **Engineering Structures**, v. 232, 111791, 2021.

HE, M.; SUN, X.; LI, Z. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 175-183, 2018.

HEBEL, D. E. *et al.* Process-controlled optimization of the tensile strength of bamboo fiber composites for structural applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 125-131, 2014.

HEMATABADI, H. *et al.* Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*). **Construction and Building Materials**, v. 265, 120326, 2020.

HIDALGO LÓPEZ, O. **Bamboo the gifts of the gods**. Colômbia, Bogota: D'vinni Ltda, 2003.

HOADLEY, B. **Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology**. Taunton Press. Newtown, CT. 2000.

HOSEINPOUR, H.; VALLUZZI, M. R.; GARBIN, E.; PANIZZA, M. Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 1242-1251, 2018.

ICIMOTO, F. H.; CALIL NETO, C.; FERRO, F. S.; MACEDO, L. B.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CALIL JÚNIOR, C. Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa*. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, pág. 51-55, 2016.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes de madeira laminada colada (MLC) reforçados com tecido de fibra de vidro**. 2018. 105f. Tese (Doutorado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2018.

**Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ** – Relatório anual de 2022. São Paulo, SP, 96 p. 2022.

**Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ** – Relatório anual de 2023. São Paulo, SP, 91 p. 2023.

ISLAM, M. S.; AHMED, S. J. U. Influence of jute fiber on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 768-776, 2018.

JAHAN, M.S.; HOSSAIN, S.; KHAN, M. A. Economic Importance of Jute. In: Zhang, L., Khan, H., Kole, C. (eds) **The Jute Genome**. Compendium of Plant Genomes. Springer, Cham, 2022, p. 1-16.

JAVADIAN, A. *et al.* Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 110-117, 2016.

JAVADIAN, A. *et al.* Mechanical properties of bamboo through measurement of culm physical properties for composite fabrication of structural concrete reinforcement. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 15, 2019.

JELEČ, M.; VAREVAC, D.; RAJČIĆ, V. Cross-laminated timber (CLT)—a state of the art report. **Gradevinar**, v. 70, n. 2, p. 2, 2018.

JOHNSON, H.; BLANKSVÄRD, T.; CAROLIN, A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 47-56, 2007.

JONES, K. *et al.* Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 690-702, 2016.

JUNG, H.; SONG, Y.; HONG, S. Effect of glass fiber-reinforced connection on the horizontal shear strength of CLT walls. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 685-695, 2020.

KARACABEYLI, E.; DOUGLAS, B. **CLT Handbook: cross laminated timber**. Point-Claire, QC: FPIinnovations, 2013.

KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. (ed.). **Canadian CLT Handbook**. Point-Claire, QC: FPIinnovations, 2019. 812 p.

KASAL, B., YAN, L. Fiber-reinforced polymers as reinforcement for timber structural elements. In: BRANCO, J., DIETSCH, P., TANNERT, T. (eds) **Reinforcement of timber elements in existing structures: RILEM State-of-the-Art Reports**. Cham: Springer International Publishing, v. 33, p. 51-78, 2021.

KHALID, M. Y. *et al.* Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. **Results in Engineering**, v. 11, 100263, 2021.

KHALIL, H. P. S. A. *et al.* The use of bamboo fibres as reinforcements in composites. In: FARUK, O.; SAIN, M. **Biofiber reinforcements in composite materials**. Woodhead Publishing, 2015. p. 488-524.

KURARAY AMERICAN, INC. **Vectran®**: Grasp the world of tomorrow - liquid crystal technology. Vectran® informational flyer. Fort Mill. 2010.

KURARAY. Vectran®: Liquid crystal polymer fiber technology: Catálogo. Fort Mill, 2015. Disponível em < <http://www.vectranfiber.com>>.

LADEIRA, L. A.; PEREIRA, C. C. A.; COUTO, L. C.; REIS, A. B. Determinação das propriedades físicas da madeira de *Pinus sp.* **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 7, p. 2244-2251, 2018.

- LESSA, R. **Viabilidade técnica do uso de madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* na fabricação de painéis CLT – Cross Laminated Timber**. 2017. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, 2017.
- LI, H. *et al.* Characterizing engineering performance of bamboo-wood composite cross-laminated timber made from bamboo mat-curtain panel and hem-fir lumber. **Composite Structures**, v. 266, 2021.
- LI, M. *et al.* Bending strength predictions of cross-laminated timber plates subjected to concentrated loading using 3D finite-element-based limit analysis approaches. **Composite Structures**, v. 220, p. 912-925, 2019.
- LI, X. *et al.* Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous lamella layups in cross laminated timber using Australian Radiata Pine. **Construction and building materials**, v. 247, 2020.
- LIAO, Y. *et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers, **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 508-515, 2017.
- LOPEZ-MOLINA, A.; DOUDAK, G. Retrofit techniques for Cross-Laminated Timber (CLT) elements subjected to blast loads. **Engineering Structures**, v. 197, p. 109450, 2019.
- LUCENA, R. C. **Análise teórica de rigidez e resistência à flexão de painéis de madeira lamelada colada cruzada**. 2017. 77f. Trabalho Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.
- MAHIR, F. I. *et al.* A brief review on natural fiber used as a replacement of synthetic fiber in polymer composites. **Materials Engineering Research**, v. 1, n. 2, p. 86-97, 2019.
- MAITHANI, P.; CHAUHAN, S. S.; SETHY, A. K. Polyurethane bonded cross-laminated timber prepared from *Pinus radiata*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 20, p. 117-122, 2023.
- MALLO, M. F. L.; ESPINOZA, O. Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 198-210, 2015.
- MANNA, S.; SAHA, P.; CHOWDHURY, S.; THOMAS, S.; SHARMA, V. Alkali treatment to improve physical, mechanical and chemical properties of lignocellulosic natural fibers for use in various applications. **Lignocellulosic Biomass Production and Industrial Applications**, p. 47-63, 2017.
- MARQUES, M. B. L.; LINHARES, A. C. C.; VASCONCELOS, R. G.; ALVES, S. R. M. Análise da produção nacional de juta (*Corchorus capsularis*) e a sua variação com o mercado internacional. **XVII Semana Da Agronomia/ Encontro Regional Dos Estudantes de Agronomia**, 2020, 1–4.

MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A.; BASÁGLIA, C. D.; DONADON, B. F. Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018.

MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. Glued laminated timber beams reinforced with sisal fibres. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 8, n. 4, p. 390-397, 2019.

MASCIA, N. T.; MAYER, R. M.; MORAES, R. W. Analysis of wood laminated beams reinforced with sisal fibres. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 97-104, 2014.

MASCIA, N. T. *et al.* Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reinforcement and recovery of timber structures. **Semina Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 27, n. 2, p. 163-174, 2006.

MIRANDA, M. C.; CASTELO, P. A. R.; MIRANDA, D. L. C.; RONDON, E.V. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Parkia gigantocarpa* Ducke. **Revista Ciência da Madeira**, v. 3, n. 2, p. 55-65, 2012.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; KAWALERCZYK, J.; KULIŃSKI, M.; ŁABĘDA, K. The usefulness of Pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part II: strength properties of glued laminated timber. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 4029, 2020a.

MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; CHUDA-KOWALSKA, M.; WIERUSZEWSKI, M.; KAWALERCZYK, J.; TROCIŃSKI, A. The usefulness of Pine timber (*Pinus sylvestris* L.) for the production of structural elements. Part I: evaluation of the quality of the Pine timber in the bending test. **Materials**, v. 13, n. 18, p. 3957, 2020b.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. 2008. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

MUNIS, R. A. *et al.* Parallel compression to grain and stiffness of cross laminated timber panels with bamboo reinforcement. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3809-3816, 2018.

MUSTEFAGA, E. C. *et al.* Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de *Pinus*. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

NAVARATNAM, S.; CHRISTOPHER, P. B.; NGO, T.; LE, T.V. Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117-215, 2020.

NEGRELI, M. **Avaliação numérico-experimental do comportamento de elementos de MLC na flexão**. 2016. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Engenharia Industrial Madeireira). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, SP, 2016.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.

NETO, J. R. A.; CARVALHO, L. H.; ARAÚJO, E. M. Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta. **Polímeros**, v. 17, p. 10-15, 2007.

NEUBAUEROVÁ, P. Timber beams strengthened by carbon–fiber reinforced lamellas. **Procedia Engineering**, v. 40, p. 292-297, 2012.

OLIVEIRA, G. L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico**. 2018. 192f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2018.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 34, n. 5, p. 929- 936, 2010.

PANGH, H. *et al.* Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 535-542, 2019.

PENFIELD, P. *et al.* Assessing the adoption of Cross Laminated Timber by architects and structural engineers within the United States. **Journal of Green Building**, v. 17, n. 1, p. 127-147, 2022.

PEREIRA, M. C. 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.

PIZZOL, V. D. **Comportamento elástico da madeira laminada colada cruzada de dormentes reaproveitados**. 2018. 107f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2018.

PRASHANTH, S. *et al.* Fiber reinforced composites - A review. **Journal of Material Sciences & Engineering**, v. 6, n. 03, p. 1-6, 2017.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. 1, p. 333–359, 2017.

RAMOS, F. M. G.; CARRASCO, E. V. M.; RODRIGUES, F. C. Cross Laminated Timber in the international context and in Brazil: Most relevant aspects. **Key Engineering Materials**, v. 777, p. 543–547, 2018.

RIBEIRO, A. B.; MASCIA, N. T. Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. **Composite Structures**, v. 224, 111066, 2019.

ROSS, R. J. **Wood handbook: wood as an engineering material**. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 2010. 509 p.

SANJAY, M. R. *et al.* A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization. **Carbohydrate Polymers**, v. 207, p. 108-121, 2019.

SANTOS, C. V. F. **Método de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de *Pinus spp.*** 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2016.

SANTOS, L. L. **Estabelecimento de classes de resistência para a madeira serrada de *Pinus spp.*** 2019. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2019.

SARKER, R. H. Botany of Jute (*Corchorus spp.*). In: Zhang, L., Khan, H., Kole, C. (eds) **The Jute Genome**. Compendium of Plant Genomes. Springer, Cham, 2022, p. 17-36.

SCHÖBER, K.-U. *et al.* FRP reinforcement of timber structures. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 106-118, 2015.

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

SHI, F. J. A study on structure and properties of basalt fiber. **Applied Mechanics and Materials**, v. 238, p. 17-21, 2012.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008, 223 p.

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M. Shear strength and durability testing of adhesive bonds in cross-laminated timber. **The Journal of Adhesion**, v. 92, n. 7-9, p. 758-777, 2016.

ŚLIWA-WIECZOREK, K.; OSTROWSKI, K. A.; JASKOWSKA-LEMAŃSKA, J.; KAROLAK, A. The influence of CFRP sheets on the load-bearing capacity of the Glued Laminated Timber beams under bending test. **Materials**, v. 14, n. 14, 2021.

SONG, Y.-J. *et al.* Evaluation of delamination and bending performance of composite CLT reinforced with CFRP. **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 4, p. 354-363, 2019.

STAMATO, G. C. *et al.* Cuidados com a Utilização de Coníferas nas Estruturas de Madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE

MADEIRA, EBRAMEM, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Carlos: IBRAMEN – Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006.

SUN, X.; HE, M.; LI, Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118751, 2020.

TANKUT, N.; TANKUT, A. N.; ZOR, M. Finite element analysis of wood materials **Drvna Industrija**, v. 65, n. 2, p. 159-171, 2014.

THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K.; PAPPU, A. (Ed.). **Hybrid polymer composite materials: Applications**. Woodhead Publishing, 2017.

TOMCZAK, F. **Estudo sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010, 135f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M. D.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 398-406, 2013.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Forestalis**. v.42, n. 101, p. 21-28, 2014.

TURNER, A. **Structural performance of Cross Laminated Timber panels as walls**. 2010. Faculty of Engineering and Surveying - Department of Agricultural, Civil and Environmental Engineering. University of Southern Queensland, EUA, 2010.

VÄISÄNEN, T.; DAS, O.; TOMPPO, L. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 582-596, 2017.

VALDES, M. *et al.* Reinforcement of maritime pine cross-laminated timber panels by means of natural flax fibers. **Construction and Building Materials**, v. 233, 2020.

VAN DE KUILEN, J. W. G. *et al.* Very tall wooden buildings with cross laminated timber. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 1621-1628, 2011.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VICTOR, R. S. **Análise de vigas de madeira lamelada colada reforçadas com fibras naturais e sintéticas através de ensaios de flexão**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2018.

- VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à flexão**. 2020. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2020.
- WANG, Z.; GONG, M.; CHUI, Y.-H. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 622-627, 2015.
- WANG, Z. *et al.* Influence of technical characteristics on the rolling shear properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 469-478, 2018.
- WDOWIAK-POSTULAK, A.; BROL, J. Ductility of the tensile zone in bent wooden beams strengthened with CFRP materials. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5451, 2020.
- WOODALL, C. W. *et al.* An overview of the forest products sector downturn in the United States. **Forest Products Journal**, v. 61, n. 8, 2011.
- YEH, B.; KRETSCHMANN, D.; WANG, B. Cross-laminated timber manufacturing. In: KARACABEYLI, E; DOUGLAS, B. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Québec: FPIInnovations, 2013. Chapter 2.
- YU, Y. *et al.* Bamboo fibers for composite applications: a mechanical and morphological investigation. **Journal of Materials Science**, v. 49, p. 2559-2566, 2014.
- YUSOF, N. M.; TAHIR, P. M.; LEE, S. H.; KHAN, M. A.; JAMES, R. M. S. Mechanical and physical properties of cross-laminated timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 20, 2019.

## CAPÍTULO II

### CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DE MADEIRA COLADA REFORÇADA

**Resumo** – Nos últimos anos, a madeira tem ganhado destaque na construção civil, impulsionando o desenvolvimento de novos produtos derivados desse material. Os produtos engenheirados de madeira, feitos principalmente de pinus provenientes de florestas plantadas, são amplamente utilizados devido à sua versatilidade. Esses produtos, como a madeira lamelada colada (MLC) e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), são considerados compósitos que envolvem a colagem de elementos de madeira. Para muitas aplicações desses materiais, é necessária uma maior resistência mecânica, que pode ser aprimorada por meio da aplicação de reforços de fibras. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi determinar as propriedades dos materiais envolvidos na produção do compósito madeira colada reforçada com fibras. Para isso, amostras de madeira de *Pinus sp.* foram caracterizadas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. O adesivo poliuretano de mamona bicomponente foi caracterizado quanto ao teor de sólidos, pH, viscosidade e tempo de trabalho. E para as fibras de juta, Vectran e fibras extraídas de bambu utilizadas, foi feita a determinação de propriedades físicas e mecânicas. A madeira de pinus apresentou uma densidade de 0,485 g/cm<sup>3</sup> e um teor de umidade de 15,7%, valores que estão dentro dos parâmetros para confecção de madeiras coladas. A retração e inchamento volumétrico foram 8,40% e 9,20%, respectivamente. E o fator anisotrópico dessa madeira foi 1,08. Quanto as propriedades mecânicas, o pinus apresentou uma resistência média a flexão de 52,01 MPa, módulo de elasticidade de 2188,25 MPa e resistência à compressão de 28,35 MPa. O adesivo poliuretano de mamona bicomponente apresentou uma viscosidade de 473,33 cP, teor de sólidos de 9,95%, pH igual a 7 e um tempo de trabalho de 20 minutos. As fibras de bambu possuíam em média 30 cm de comprimento e teor de umidade de 6,48%. Já as fibras Vectran e juta apresentaram um teor de umidade de 4,88% e 0,33%, respectivamente.

**Palavras-chave:** Pinus; Adesivo; Materiais de reforço.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da conscientização ambiental impulsionou o crescimento na procura e utilização de materiais provenientes de fontes renováveis. Vários setores, como por exemplo a construção civil, têm buscado matérias-primas alternativas mais sustentáveis a fim de mitigar a geração de resíduos e emissão de gases poluentes.

Nesse cenário, a utilização da madeira, um recurso natural, renovável e em abundância, têm ganhado mais espaço. A madeira possui inúmeros benefícios em comparação aos materiais convencionais utilizados, como baixo custo e gasto de energia para sua transformação em produto final, oferece isolamento térmico e acústico, é um material versátil, fácil de trabalhar e exibe alta relação resistência e peso. Adicionalmente atua como armazém de carbono (Harte, 2017).

A crescente utilização desse material na construção e a necessidade de otimização e minimização da geração de resíduos impulsionou o desenvolvimento de produtos derivados de madeira. Produtos engenheirados de madeira tais como painéis de partículas (MDP), painéis de fibras de média densidade (MDF), compensados, painéis duros e pisos de madeira (Lee *et al.* 2011) e membros estruturais usando madeira lamelada colada (MLC) e madeira lamelada colada cruzada (CLT) e outros (Ramage *et al.* 2017).

A evolução desses produtos tornou a madeira de coníferas e folhosas provenientes de florestas plantadas um recurso cada vez mais importante para ser convertida em produtos estruturais para construção sustentável (Harte, 2017). A utilização de árvores provenientes de reflorestamento, como alternativa à madeira nativa, não apenas contribui para a preservação das florestas naturais, mas também ajuda a reduzir a pressão sobre esses ecossistemas sensíveis.

Em 2022, no Brasil, a área total de árvores plantadas foi de 9,94 milhões de hectares, 0,3% maior que o ano anterior. Desse total, aproximadamente 1,9 milhão de hectares é composto pelo cultivo do pinus (IBÁ, 2023). Conforme observado por Shimizu (2008), a ampla disponibilidade da madeira de Pinus impulsionou sua utilização em várias aplicações, incluindo fabricação de compensados, móveis, celulose e peças de madeira serrada amplamente empregadas na indústria da construção civil.

Todos esses produtos são considerados compósitos à base de madeira que dependem da colagem de vários elementos de madeira em diversas

configurações. A seleção de um adesivo adequado é, portanto, uma etapa indispensável para que os produtos de madeira tenham alta qualidade final com o mínimo de custos envolvidos na produção (Hänsel *et al.*, 2022). A qualidade geral da colagem é influenciada pela madeira, abrangendo a interface entre a superfície da madeira e a linha de cola, pelo tipo de adesivo empregado e pelas condições e parâmetros do processo de colagem em si (Dunky, 2017).

A madeira por se tratar de um material heterogêneo apresenta variabilidade intrínseca tanto nas suas propriedades físicas como mecânicas, que irão influenciar na sua empregabilidade. Assim, estudos envolvendo a utilização de madeira em associação com outros materiais têm sido realizados para melhorar e homogeneizar as suas propriedades, resultando em um compósito com novas propriedades mecânicas (Donadon *et al.*, 2020).

A indústria da construção civil destaca-se como um dos setores mais relevantes e promissores para a utilização de compósitos reforçados com fibras, principalmente as fibras naturais. Esses compósitos, ao serem reforçados com esses materiais, apresentam potencial para se tornarem produtos mais leves e economicamente vantajosos quando comparados com aqueles reforçados com fibras sintéticas (Yan; Chouw; Jayaraman; 2014).

Algumas aplicações envolvendo compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais em estruturas de construções já vem sendo registradas, como por exemplo pontes para pedestres e pontes rodoviárias, edifícios comerciais e residenciais, torres de transmissão de energia e estacas compostas usadas para fundações (Fang *et al.*, 2019).

Para isso, é importante uma boa resistência mecânica dos materiais compósitos, que é definida pela estrutura dos constituintes, como fração dos componentes, como comprimento, forma, tamanho, composição, orientação e distribuição das fibras e partículas, bem como fração volumétrica e nível de adesão entre os componentes (Kieling; Pereira; Santos, 2019).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Determinar as propriedades dos materiais utilizados na produção do compósito madeira-adesivo-fibra.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obter as características físicas tanto da madeira quanto dos materiais de reforço;
- Determinar a resistência a flexão da madeira;
- Realizar ensaios de tração nos materiais utilizados como reforço;
- Caracterizar as propriedades do adesivo utilizado.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Madeira**

A espécie utilizada pertence ao gênero *Pinus*, proveniente de madeireira da região de Viçosa/MG.

A madeira foi obtida na forma de tábuas nas dimensões de 2,3 x 30 x 300 cm (espessura x largura x comprimento) e armazenada em local protegido das condições climáticas até atingir a umidade de equilíbrio com o ambiente. Em seguida, realizou-se uma classificação visual e corte das tábuas conforme as dimensões desejadas.

### **3.2 Adesivo**

O adesivo utilizado na confecção dos elementos colados foi o poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona AGT 1315, doado pela empresa Imperveg (Figura 4).

Para aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,5, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,5 partes do componente B (um polioli).

Figura 4 - Adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, constituído de componente A (um pré-polímero) e componente B (um polioli)



Fonte: A autora.

### 3.3 Reforços utilizados

Foram testados três tipos de materiais, sendo um sintético e dois naturais.

#### 3.3.1 Fibra de Vectran

O tecido utilizado como reforço foi produzido a partir de fibras Vectran® obtidas a partir da fiação por fusão de um polímero de cristal líquido (LCP) (KURARAY, 2022).

O filamento de Vectran foi doado pela empresa Kuraray South America Ltda e o tecido obtido foi produzido pela Texiglass Indústria e Comércio Têxtil, Figura 5.

Figura 5 - Filamentos e tecido obtido de Vectran



Fonte: A autora.

### 3.3.2 Fibra de bambu

Neste estudo foi utilizado o bambu da espécie *Dendrocalamus asper*, coletado nas proximidades do Laboratório de Silvicultura, na Universidade Federal de Viçosa. Os colmos foram cortados a aproximadamente 30 cm da base e com um cabo de aço e trator foram retirados das touceiras.

Por meio de motosserra os colmos do bambu foram seccionados nos entrenós e transportados até o pátio do Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM).

Posteriormente esses colmos foram cortados de forma longitudinal em quatro partes, resultando em ripas que foram em seguida serradas para alcançar dimensões aproximadas de 60 x 11,5 x 300 mm (largura x espessura x comprimento). Estas ripas, com 300 mm de comprimento, foram dispostas em uma autoclave vertical para amolecimento do material, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Etapas de processamento do bambu. A – touceira de bambu para coleta dos colmos; B – ripas do bambu cortadas manualmente; C – ripas dispostas no interior da autoclave vertical



Fonte: A autora.

Essas ripas permaneceram durante uma semana na autoclave, onde foram sujeitas a uma pressão de 1 kgf/cm<sup>2</sup> por cerca de seis horas/dia. Após uma semana foi observado amolecimento adequado para realização do processo de desfibramento, que consistiu na transformação em conjuntos menores de fibras.

Foi realizada a extração manual dos feixes de fibras com um facão e estilete (Figura 7). As sessões médias dos feixes extraídos foram de 2 x 1 mm e comprimento médio de 300 mm.

Figura 7 - Processo de desfibramento do bambu cozido. A – corte longitudinal das ripas de bambu; B – desfibramento com auxílio de estilete; C – feixes de fibras de bambu



Fonte: A autora.

Posteriormente a etapa de desfibramento, os feixes de fibras permanecerem alguns dias secando ao ar livre para remoção do excesso de água e posteriormente foram secas em estufa a 60 °C a fim de evitar o aparecimento de fungos.

É fundamental esclarecer que, no presente trabalho, o termo "desfibramento" refere-se à transformação dos conjuntos de fibras em feixes de dimensões menores, em comparação com as dimensões das paredes dos colmos de bambu. Portanto, não se trata de reduzir o material final às dimensões das fibras que compõem o tecido lenhoso presente nas paredes dos colmos.

### 3.3.3 Fibra de juta

As fibras de juta foram adquiridas no comércio local na forma de tela, com trama mais aberta e gramatura de 190 g/m<sup>2</sup>.

Figura 8 - Tecido de fibra de juta cortado nas dimensões para aplicação como reforço



Fonte: A autora.

## 3.4 Caracterização dos materiais

### 3.4.1 Propriedades físicas da madeira

Na caracterização das propriedades físicas da madeira foram determinados o teor de umidade (Equação 1), a densidade aparente (Equação 2) e a estabilidade dimensional (Equações 3 e 4) de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (ABNT, 2022).

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

U%: umidade da amostra (%);

$m_i$ : massa inicial da madeira, em gramas;

$m_s$ : massa da madeira seca, em gramas.

$$\rho_{ap}(\%) = \frac{m(\%)}{V(\%)} \quad (2)$$

Em que:

$\rho_{ap}$ : densidade aparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

$m(\%)$ : massa da madeira a um dado teor de umidade, em gramas;

$V(\%)$ : volume da madeira a um dado teor de umidade.

$$\varepsilon_{r,12} = \left( \frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{123, sec}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,12} = \left( \frac{L_{12,sat} - L_{12, sec}}{L_{12, sat}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$\varepsilon_r$ : deformações específicas de retração;

$\varepsilon_i$ : deformações específicas de inchamento;

$L_{sat}$ : dimensões da madeira saturada;

$L_{sec}$ : dimensões da madeira seca;

$L_{12}$ : direções radial e tangencial.

Foram utilizados os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios, com dimensões de 3 x 2 x 5 cm (espessura x largura x comprimento), representando, respectivamente, as direções radial, tangencial e longitudinal.

A medição e pesagem dos corpos de prova foram feitas utilizando balança analítica e paquímetro digital no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM).

### **3.4.2 Propriedades mecânicas da madeira**

A caracterização mecânica envolveu a determinação das propriedades de flexão e compressão paralela às fibras, seguindo a norma NBR 7190:2022 com algumas adaptações. No ensaio de flexão estática para avaliar o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), foram empregados corpos de prova com dimensões de 2 cm x 2cm x 27 cm (largura x espessura x comprimento) devido às limitações do equipamento utilizado. Essas propriedades foram avaliadas utilizando a máquina universal de ensaios do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM).

### **3.4.3 Caracterização do adesivo**

Após a mistura dos componentes do adesivo, foram realizadas análises para caracterizá-lo quanto ao teor de sólidos e pH, seguindo as especificações da norma americana ASTM D1582 (ASTM, 1998). A viscosidade foi medida de acordo com o método B da norma ASTM D1084-97 (1998), utilizando um viscosímetro de Brookfield-LV. O tempo de trabalho foi determinado por meio de um cronômetro, que foi acionado imediatamente após a adição do agente endurecedor.

Testes de cisalhamento na linha de cola com orientação paralela e perpendicular das fibras foram realizados para avaliar a ligação adesiva na madeira. Os ensaios seguiram as prescrições da norma ABNT NBR 7190:2022.

### **3.4.4 Caracterização dos materiais de reforço**

#### **3.4.4.1 Fibras de bambu**

A determinação do comprimento médio das fibras foi feita utilizando uma régua graduada de metal.

Para determinação da largura média das fibras utilizou-se um paquímetro. A largura foi medida em três posições distintas em razão da variação das dimensões ao longo do comprimento das fibras.

A massa de cada fibra foi obtida através de uma balança de precisão digital de 4 casas decimais. Obtidas as massas, as fibras foram colocadas em estufa para determinação do teor de umidade.

#### 3.4.4.2 Fibra Vectran e juta

Para verificação das propriedades dos tecidos de Vectran e juta foi utilizada a norma ASTM 5035 como referência para os ensaios de tração. De cada tipo de tecido, foram cortadas 10 amostras medindo 40 × 120 mm e pesadas em uma balança de precisão, com a leitura em gramas até quatro casas decimais. Para eliminar a umidade, os tecidos passaram por um processo de secagem em estufa a 80°C durante 24 horas e, em seguida, foram novamente pesados. Com base na massa seca, foi calculada a área de seção transversal usando a Equação 5.

$$A_m = m/\rho_r L \quad (5)$$

Em que:

$A_m$  = área da seção transversal;

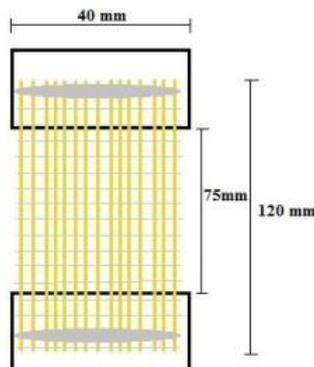
$m$  = massa seca da fibra;

$\rho_r$  = massa específica dos sólidos e

$L$  = comprimento da fibra.

Na Figura 9, observa-se os tecidos cortados com as dimensões da norma.

Figura 9 – Dimensões dos corpos de prova de tecido



Fonte: Caldas (2014).

Um recorte de papel foi fixado em cada extremidade do tecido com a ajuda de um adesivo de secagem rápida para evitar o escorregamento. A velocidade do ensaio em máquina Istron foi de 5 mm/min.

Determinou-se também o teor de umidade das amostras de Vectran e juta.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

Os valores médios de teor de umidade, densidade básica, contração e inchamento (volumétrico, tangencial e radial) e fator anisotrópico da madeira de *Pinus sp.* são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios de densidade aparente, teor de umidade e variações dimensionais da madeira de *Pinus sp.*

Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )			Teor de umidade (%)		
0,485 (0,08)			15,70 (0,28)		
Estabilidade dimensional					
Retração			Inchamento		
Volumétrica	Tangencial	Radial	Volumétrico	Tangencial	Radial
8,40 (1,81)	4,03 (0,72)	3,74 (1,95)	9,20 (2,18)	4,21 (0,78)	3,90 (2,15)
Fator anisotrópico (T/R)					
1,08 (0,37)					

\*T = Tangencial; R = Radial; valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: A autora.

A densidade aparente média da madeira de pinus estudada foi de 0,485 g.cm<sup>-3</sup>, o que inclui essa madeira na Classe 1 da NBR 7190/2022 para fins de aplicações estruturais.

Este resultado de densidade aparente é comparável aos obtidos por Melchiorretto e Eleotério (2003), para *Pinus elliotii* (0,46 g.cm<sup>-3</sup>), *P. patula* (0,45 g.cm<sup>-3</sup>).

<sup>3</sup>) e *P. taeda* ( $0,45 \text{ g.cm}^{-3}$ ). E também aos obtidos por Trianoski *et al.* (2013), para algumas espécies de pinus tropicais.

A madeira utilizada neste estudo é uma matéria-prima aceitável para CLT de acordo com a norma americana ANSI/APA PRG 320:2019. Sugere o emprego de espécies de madeira com densidade acima de  $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$  como forma de garantir qualidade nos produtos estruturais produzidos.

O teor de umidade médio encontrado foi de 15,70%, o teor de umidade de toda a madeira durante a fabricação deve ser  $12 \pm 3\%$  e o teor de umidade deve ser maior ou igual a 8% no momento do teste (ANSI/APA 2019).

Segundo Segundinho *et al.* (2015), a compreensão da densidade e do teor de umidade são parâmetros essenciais na fabricação de elementos colados, uma vez que irão influenciar na prensagem, na pressão aplicada e no processo de penetração e cura do adesivo.

Os valores referentes a estabilidade dimensional da madeira seguem os padrões encontrados em literatura, de forma decrescente para os planos tangencial e radial.

Nas madeiras pertencentes ao gênero *Pinus*, é possível identificar uma variação na contração volumétrica, com valores oscilando de 8 a 10% (Trianoski *et al.*, 2013). Quanto ao inchamento, este pode variar entre 9 e 14%, como mostrado em estudos anteriores (Modes *et al.*, 2013; Guller, 2012; Tiryaki *et al.*, 2016).

Devido a sua natureza higroscópica e anisotrópica, a madeira tem a capacidade de absorver ou perder água para o meio em que se encontra (Grottesi; Coelho; Kraniotis, 2023). Esse processo de contração ou inchamento ocorrem de forma desigual nos diferentes planos anatômicos e pode influenciar significativamente no seu uso (Silva; Oliveira, 2003; Cezaro; Trevisan; Balbinot, 2016).

A Tabela 6 exibe o valor médio do fator anisotrópico, ou coeficiente de anisotropia, da madeira de pinus, que é de 1,08. Esse coeficiente é um indicativo das variações da madeira durante o processo de secagem, indicando sua maior ou menor tendência a fendilhar ou empenar.

A maior proximidade do valor unitário pelo fator anisotrópico reflete em maior estabilidade dimensional da madeira. Como resultado, ela estará sujeita a menos empenamentos e rachaduras, conforme observado por Freitas *et al.* (2016). As razões anisotrópicas podem influenciar a escala dos processos de umedecimento e

secagem e levar a alterações dimensionais e tensões internas que são fatores críticos, especialmente no projeto e manutenção de conexões CLT (Shirmohammadl, 2023).

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A Tabela 7 apresenta os valores médios de resistência a flexão, módulo de elasticidade e resistência à compressão da madeira de pinus.

Tabela 7 – Valores médios de resistência à flexão ( $f_{m0}$ ), módulo de elasticidade (MOE) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) da madeira de *Pinus sp.*

	$f_{m0}$ (MPa)	MOE (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)
Média	52,01	2188,25	28,35
Desvio padrão	4,63	29,17	1,53

Fonte: A autora.

Os valores médios de resistência à flexão e resistência à compressão paralela as fibras são similares aos encontrados por Mustefaga *et al.* (2019), para madeira de *Pinus taeda* proveniente de plantio com idade de 12 anos, em que os valores de  $f_{m0}$  e  $f_{c0}$  foram 56,3 e 28,5 MPa, respectivamente.

Esses valores estão um pouco abaixo dos obtidos por Trianoski *et al.* (2014), na caracterização mecânicas de espécies de pinus tropicais. No caso do *Pinus taeda*, a resistência à flexão e à compressão paralela atingiram 64 e 37 MPa, respectivamente, valores que se encontram próximos aos obtidos para o *Pinus caribaea var. hondurensis*, onde os valores de  $f_{m0}$  e  $f_{c0}$  foram de 62 e 34 MPa, respectivamente.

De maneira geral, é esperado que madeiras com elevada densidade apresentem uma maior resistência e um módulo de elasticidade superior em comparação com madeiras de menor densidade. No entanto, no que diz respeito às propriedades mecânicas, diversos fatores podem exercer influência, incluindo o ângulo das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça, o grau de polimerização da celulose conforme observado por Moreschi (2012), a idade da madeira e suas propriedades físicas (Garbachevski *et al.*, 2022).

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO

As propriedades do adesivo poliuretano de mamona bicomponente, como viscosidade, teor de sólidos, pH e tempo de trabalho são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores médios para as propriedades do adesivo

Propriedade do adesivo	PUR mamona bicomponente
Viscosidade (cP)	473,33 (70,24)
Teor de sólidos (%)	99,95 (0,13)
pH	7 (1,02)
Tempo de trabalho (minutos)	20 (0,22)

Fonte: A autora. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

A viscosidade do adesivo deste estudo foi inferior a encontrada por Bianche *et al.* (2017), que obteve o valor de 3150 cP para o adesivo poliuretano a base de óleo de mamona da Kehl Indústria. Já Buratta (2019) obteve viscosidade de 586,57 cP para o mesmo adesivo deste estudo. Enquanto Faria *et al.*, (2019) encontraram 430,63 cP de viscosidade, valor próximo ao encontrado nesta pesquisa.

Adesivos de baixa viscosidade são mais fluídos e facilitam o espalhamento sobre a superfície da madeira, o que contribui para maior penetração do adesivo e sua absorção pelo material. No entanto, em casos extremos, isso pode levar a uma linha de cola “faminta”, ou seja, com insuficiente quantidade de adesivo na linha de cola para fornecer a adesão entre os materiais (Bianche *et al.*, 2017).

O teor de sólidos neste estudo foi superior aos resultados obtidos por diversos pesquisadores. Em particular, em comparação com Bianche *et al.* (2017), que encontraram um teor de sólidos de 90% para um poliuretano à base de óleo de mamona, este estudo revelou um teor mais elevado. Além disso, o valor obtido foi superior ao encontrado por Faria *et al.* (2019), que relataram um teor de sólidos de 79,43%. Também superou a porcentagem de sólidos observada por Oliveira (2016), que obteve 75% para um poliuretano de origem vegetal. No entanto, o resultado se aproximou do valor encontrado por Soares *et al.* (2017), que alcançaram 98,8% de teor de sólidos em um poliuretano à base de óleo de mamona.

A determinação do teor de sólidos desempenha um papel fundamental na colagem, representando a quantidade de matéria sólida do adesivo que compõe a

linha de cola. Um teor de sólidos mais elevado pode contribuir significativamente para aumentar a resistência da linha de cola (Bianche *et al.*, 2017).

Com relação ao pH, nota-se que a mistura do pré-polímero e do polioliol resultou em um pH básico. O mesmo valor de pH foi obtido por Faria *et al.* (2019) para poliuretano vegetal à base de óleo de mamona. Já Oliveira (2016) constatou valor de pH 6,00 na análise de poliuretano, não muito diferente ao encontrado neste estudo.

Conforme Dias (2005), o pH ideal para o adesivo utilizado em madeira deve ser mantido dentro de uma faixa que varia de 1,5 a 11. Isso ocorre porque um pH muito elevado pode resultar na degradação das fibras da madeira, causando danos ao produto colado. Por outro lado, um pH muito baixo pode prejudicar a aplicação da resina, uma vez que pode levar a uma formação excessiva de espuma, interferindo no processo de colagem. Portanto, manter o pH do adesivo dentro desse intervalo é crucial para garantir uma adesão eficaz e preservar a qualidade da madeira.

É possível perceber que o valor do pH está dentro da faixa estabelecida pela literatura, o que reduz possíveis reações entre extrativos e o adesivo, evitando o comprometimento do processo de adesão. Porém, assim como Cavalheiro (2021), foi notada a formação de espuma, que se trata da formação de microbolhas de ar mesmo com o valor de pH não estando aos extremos da faixa descrita em literatura.

O adesivo deste estudo exibiu um tempo de trabalho médio igual a 20 minutos, sendo considerado um tempo de trabalho reduzido, onde a reação de polimerização entre o polioliol e endurecedor ocorreu de forma rápida, o que pode atrapalhar o espalhamento e fluidez do adesivo na madeira durante o processo de colagem. O tempo de trabalho indica a maleabilidade do adesivo, representando o intervalo que vai do preparo até o momento em que atinge a máxima viscosidade na fase de gel. Tempo de trabalho curto pode causar dificuldades na aplicação e resultar na rápida polimerização do adesivo, levando a uma redução na resistência da linha de cola (Carneiro, 2006).

A resistência média ao cisalhamento na linha de cola do adesivo poliuretano de mamona bicomponente foi de 6,84 MPa com desvio padrão de 1,66. Esse valor é semelhante ao encontrado por Beraldo e Dias (2010) para *Pinus elliotti* colado com adesivo poliuretano de mamona de 6,45 MPa. Porém é inferior ao obtido por Lopes *et al.* (2013) para *Pinus taeda* de 9,61 MPa.

O baixo valor de resistência na linha de cola pode estar relacionado a rápida reação de polimerização desse adesivo, podendo haver uma pré-cura, que resulta em um menor tempo de trabalho e dificulta o espalhamento da cola na madeira (Bianche *et al.*, 2016).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE REFORÇO

Na Tabela 9 são apresentadas algumas propriedades dos materiais de reforço.

Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados como reforço

<b>Material</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>TU (%)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Bambu	255,00	23128	6,48	1,47*
Vectran	2600,00	58346	0,33	1,40*
Juta	391,80	11800	4,88	1,50*

Fonte: A autora. Obtido em literatura para cálculo da resistência.

O tecido de Vectran apresentou a maior resistência a tração, assim como o maior módulo de elasticidade em comparação aos outros materiais. O que já era esperado, pois se trata de uma fibra de alta resistência. Além disso, apresenta uma grande vantagem em termos de relação resistência peso (KURARAY, 2010).

O bambu, por outro lado, apresentou a menor resistência, embora possua um módulo de elasticidade superior ao tecido de juta. Os valores de resistência e rigidez das fibras de bambu foram menores do que os observados na literatura por Mahir *et al.* (2019), onde relataram uma resistência à tração de 503 MPa e um módulo de elasticidade (MOE) de 35.910 MPa. No entanto, esses valores estavam dentro da faixa observada por Fuqua, Huo e Ulven (2012), onde a resistência à tração variou de 140 a 441 MPa e o MOE de 11.000 a 36.000 MPa.

Para a juta, foram encontradas na literatura resistências à tração variando de 393 a 773 MPa e módulos de elasticidade (MOE) variando de 2500 a 26500 MPa (Fuqua; Huo; Ulven, 2012). Além disso, relatos indicam resistência à tração de 400-800 MPa e MOE variando de 10.000 a 30.000 MPa (Mahir *et al.*, 2019).

Os três tipos de reforços apresentam baixa densidade, com mínima diferença entre os valores.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho, pode-se concluir:

- A madeira de pinus apresentou propriedades físicas, como densidade e teor de umidade dentro dos parâmetros exigidos da ANSI/APA PRG 320:2019 para fabricação de madeira colada;
- As propriedades mecânicas da madeira apresentaram valores inferiores aos obtidos em literatura;
- O adesivo bicomponente poliuretano de mamona apresenta baixa viscosidade e um rápido tempo de trabalho;
- A fibra de juta apresentou resistência próxima aos valores encontrados em literatura;
- O tecido sintético de Vectran apresentou os maiores valores de resistência e rigidez comparado as fibras naturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/APA – The Engineered Wood Association. **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber PRG 320-2019**. Tacoma, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1582**: Standard test method for nonvolatile content of liquid phenol, resorcinol, and melamine adhesives. West Conshohocken: ASTM, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1084-97**: Standard test methods for viscosity of adhesives. West Conshohocken: ASTM, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2256**: Standard test method for tensile properties of yarns by the single-strand method. Pensilvânia: ASTM, 2002.

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

BERALDO, D. D.; DIAS, A. A. Resistência ao cisalhamento do adesivo poliuretano (óleo de mamona) para a espécie *Pinus elliotti*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM

MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. EBRAMEM, 2010, Lavras, MG. **Anais...** Lavras: UFLA, 2010.

BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. D. C. O.; LADEIRA, J. P. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; PEREIRA, F. A.; OLIVEIRA, B. S. Shear strength in the glue line of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. wood. **Revista Árvore**, v. 40, p. 1109-1117, 2016.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00077114, 2017.

BURATTA, C. C. **Adesão de peças de madeira de reflorestamento coladas com adesivo estrutural**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

CARNEIRO, A. C. O. **Efeito da hidrólise ácida e sulfitação de taninos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Anadenanthera peregrina* Speg., nas propriedades dos adesivos**. 2006. 182 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

CAVALHEIRO, F. N. **Caracterização de madeira de *Eucalyptus urograndis* e adesivo a base de óleos vegetais visando o emprego em peças de madeira laminada colada**. 2021. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2021.

CEZARO, J. A.; TREVISAN, R.; BALBINOT, R. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Chrysophyllum marginatum*. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 36, n. 86, p. 135- 143, 2016.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

DUNKY, M. Adhesives in the wood industry. In: **Handbook of Adhesive Technology**. CRC Press, 2017. p. 511-574.

FANG, H. *et al.* Connections and structural applications of fibre reinforced polymer composites for civil infrastructure in aggressive environments. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 129-143, 2019.

FARIA, D. L.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, K. M.; JÚNIOR, J. B. G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. **Revista Ciência da Madeira**, v. 10, n. 3, p. 247-254, 2019.

FREITAS, D. L.; CARVALHO, D. E.; BELTRAME, R.; DOS SANTOS, G. A.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Estabilidade dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 435-439, 2016.

FUQUA, M. A.; HUO, S.; ULVEN, C. A. Natural fiber reinforced composites. **Polymer Reviews**, v. 52, n. 3, p. 259-320, 2012.

GARBACHEVSKI, É. M.; HILLIG, E.; ABREU NETO, R. D.; RETSLAFF, F. A. D. S.; KOEHLER, H. S. Physico-mechanical properties and growth characteristics of pine juvenile wood as a function of age and planting spacing. **Revista Árvore**, v. 46, :e4627, 2022.

GROTTESE, G.; COELHO, G. B. A.; KRANIOTIS, D. Heat and moisture induced stress and strain in wooden artefacts and elements in heritage buildings: A review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 12, 7251, 2023.

GULLER, B. Effects of heat treatment on density, dimensional stability and color of *Pinus nigra* wood. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 9, p. 2204-2209, 2012.

HÄNSEL, A. et al. Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: A review. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 3, p. 230-241, 2022.

HARTE, A. M. Mass timber - the emergence of a modern construction material. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, v. 2, n. 3, p. 121-132, 2017.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. **Relatório anual de 2022**. São Paulo, SP, 96 p. 2022.

KIELING, A.; PEREIRA, S.; SANTOS, M. C. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. **Scientia Amazonia**, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2019.

KURARAY. **Vectran®: Liquid crystal polymer fiber technology**. Catálogo. Fort Mill, 2015. Disponível em: <<http://www.vectranfiber.com>> . Acesso: 27 ago. 2022.

LEE, B. H. et al. Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3044-3050, 2011.

LOPES, M. C. et al. Resistência da linha de cola de painéis de *Pinus taeda* colados lateralmente com diferentes adesivos. **Cerne**, v. 19, p. 613-619, 2013.

MAHIR, F. I. et al. A brief review on natural fiber used as a replacement of synthetic fiber in polymer composites. **Materials Engineering Research**, v. 1, n. 2, p. 86-97, 2019.

MELCHIORETTO, D.; ELEOTÉRIO, J. R. Caracterização, classificação e comparação da madeira de *Pinus patula*, *P. elliottii* e *P. taeda* através de suas propriedades físicas e mecânicas. In: **Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica**, 2003.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A. Higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* submetida a tratamento térmico. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 19-25, 2013.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 4 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

MUSTEFAGA, E. C.; HILLIG, É.; TAVARES, E. L.; SOZIM, P. C. L.; RUSCH, F. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de Pinus. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 472-481, 2019.

OLIVEIRA, S. L. **Interação da espécie de madeira e do tipo de adesivo na qualidade da madeira laminada colada**. 2016. 123 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2016.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

SEGUNDINHO, P. G. A.; NETO, C. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J.; JUNIOR, C. C. Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 36, n. 1, p. 107-116, 2015.

SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008.

SHIRMOHAMMADI, M. Study of the hygroscopic properties of three Australian wood species used as solid wood and composite products. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2023.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SOARES, J. D.; REIS, M. F. C.; LOPES, C. B. S.; COSTA, L. J.; FREITAS, T. P.; SANTOS, L. C.; DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O. Desempenho de diferentes adesivos poliuretanos na linha de cola da madeira de *Eucalyptus* sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, CBCTEM. 2017. Florianópolis, SC. **Anais...** 2017.

TIRYAKI, S.; BARDAK, S.; AYDIN, A.; NEMLI, G. Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat-treated woods: Experimental and artificial neural network modeling approach. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 18, n. 3, p. 477-492, 2016.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M. D.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 398-406, 2013.

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M. D.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de pinus tropicais. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.

YAN, L.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K. Flax fibre and its composites - A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 56, p. 296–317, 2014.

## CAPÍTULO III

### PROPRIEDADES DE ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADA COM FIBRAS DE BAMBU

**Resumo** – O *glued laminated timber*, conhecido como madeira lamelada colada, é um dos produtos de madeira engenheirados mais antigos usados na construção civil. Estes elementos estruturais são compostos por lamelas de madeira unidas com adesivo e pressão, permitindo a utilização de madeiras de baixa resistência de florestas de crescimento rápido. No entanto, devido à sua natureza heterogênea, a madeira pode apresentar variabilidade nas propriedades e defeitos naturais, limitando sua aplicação. Para aumentar sua resistência e rigidez, estudos têm explorado a aplicação de reforços por fibras, buscando alternativas mais sustentáveis. As fibras naturais, como as de bambu, têm se destacado devido à fácil obtenção, baixo custo e sustentabilidade, tornando-se uma opção interessante de reforço na construção civil. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi determinar as propriedades de madeira lamelada colada, reforçada com fibras de bambu. Para isso foi utilizada madeira de pinus, reforço de fibra de bambu e adesivo poliuretano de mamona bicomponente. Os elementos produzidos foram ensaiados à flexão estática. A aplicação de reforço aumentou em 24,28% o módulo de elasticidade dos elementos de madeira lamelada colada. Já o módulo de ruptura teve um aumento de 32,40%, ao se adicionar o reforço de bambu. Além disso, a camada de reforço restringiu a ruptura da madeira a lamela inferior, retardando a falha. O bambu, por ser uma fibra de baixo custo e alta disponibilidade pode ser uma estratégia para elevar a qualidade material e viabilizar o uso da madeira de baixa resistência, principalmente das madeiras de pinus, em estruturas da construção civil.

**Palavras-chave:** Fibra natural; Adesivo; MLC.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira tem sido empregada como material construtivo desde a antiguidade, com sua utilização remontando ao início da civilização. Em comparação com o aço e o concreto, mais usuais na construção civil, a madeira apresenta elevada relação resistência/peso, consumo de energia reduzido, flexibilidade de design, além de ser um matéria-prima renovável e sustentável (Zhao *et al.*, 2023). Porém por muito tempo regulamentações governamentais, competitividade com materiais convencionais, percepção pública e outros fatores limitaram a utilização da madeira a pequenas aplicações (Ramage *et al.*, 2017).

Nas últimas décadas as questões ambientais levaram a um aumento na procura por materiais mais sustentáveis, crescendo assim o interesse na aplicação de madeira em projetos de construção como também no desenvolvimento de novos produtos. Com o avanço da tecnologia surgiram produtos estruturais de madeira, como a Madeira Lamela Colada (MLC) ou “Glue Laminated Timber” (Glulam) (Ayanleye *et al.*, 2022).

A madeira lamelada colada é um dos mais antigos produtos de madeira engenheirada e é considerada um material de construção de alto desempenho (Yadav; Kumar, 2021). A MLC consiste em lamelas de madeira coladas umas sobre as outras de forma paralela, utilizando adesivo de alta resistência e pressão, podendo ser utilizada na forma de viga ou pilar (Nadir *et al.*, 2016).

Nos produtos de madeira lamelada colada os defeitos naturais distribuem-se de forma mais homogênea ao longo das seções, resultando em um elemento de maior resistência (Thorhallsson; Hinriksson; Snæbjörnsson, 2017). Entretanto esses defeitos se tornam pontos frágeis durante sua aplicação e podem afetar o desempenho final do elemento estrutural. A aplicação de reforços pode minimizar esta fragilidade e aumentar sua capacidade resistente (Khelifa *et al.*, 2015).

A utilização de reforço em elementos de madeira lamelada colada possui muitas vantagens, como o aumento na ductilidade, na durabilidade, na estabilidade dimensional e a diminuição da fadiga do produto (Nadir *et al.*, 2016). Em vigas reforçadas de madeira laminada colada, as fibras geralmente são coladas na face tracionada (região inferior), aumentando assim a rigidez, evitando a ruptura frágil e proporcionando melhor desempenho mecânico para essas vigas (Donadon *et al.*, 2020).

Nos últimos anos vários estudos foram realizados na tentativa de fortalecer ainda mais a madeira utilizando principalmente, fibras de carbono, vidro e basalto (FRP's) ligadas as vigas de madeira ou madeira lamelada (Fiorelli; Dias, 2006; Thorhallsson; Hinriksson; Snæbjörnsson, 2017; Halicka; Ślósarz, 2021; Nadir *et al.*, 2016). De acordo com a literatura, várias são as vantagens dessas fibras, como resistência e força, baixa densidade, durabilidade. Porém quando utilizadas como componentes FRP's, são difíceis de reciclar.

Como alternativa, foram desenvolvidas pesquisas com fibras naturais (sisal, curauá, algodão e bambu) e os resultados se mostraram promissores no uso de algumas delas como alternativa em diversas aplicações (Mascia; Mayer; Moraes, 2014; Silva; Aquino, 2008; Borri; Corradi; Speranzini, 2013). As fibras naturais são leves, renováveis e possuem altas propriedades mecânicas. Estas características tornam-nos adequados para serem utilizados no reforço de elementos estruturais em madeira (Echavarría; Jiménez; Ochoa, 2012).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar de forma experimental o comportamento de elementos de madeira lamelada colada reforçados com fibra de bambu.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar resistência e módulo de elasticidade dos elementos de MCL com e sem reforço por meio do ensaio de flexão;
- Determinar os modos de ruptura dos elementos ensaiados;
- Promover o uso de madeira de reflorestamento e de baixa resistência para fins estruturais na construção civil.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais utilizados**

Para realização deste estudo foi utilizada madeira de *Pinus sp.* adquirida de madeireira da região de Viçosa/MG, na forma de tábuas com medidas de 25 x 2,3 x 300 cm (largura x espessura x comprimento).

O adesivo empregado foi o poliuretano de mamona bicomponente AGT 1315, fornecido pela empresa Imperveg® Polímeros Indústria e Comércio Ltda.

Como reforço foram utilizadas fibras de bambu *Dendrocalamus asper*, preparadas para esse fim, como mencionado no capítulo 2.

#### **3.2 Classificação visual das lâminas**

Uma seleção prévia das tábuas para compor as lamelas dos elementos de madeira lamelada colada foi realizada por meio uma classificação visual das peças. Etapa importante principalmente quando se trata de madeira de coníferas, para descartar aquelas com defeitos acima dos permitidos como nós, bolsas de resinas, fendas, rachaduras, encañoamentos e encurvamentos. Depois, as madeiras foram classificadas pelas suas massas.

#### **3.3 Confecção dos elementos de MLC**

Os elementos de MLC foram confeccionados tentando manter a relação  $L/h > 20$  visando minimizar o efeito do cisalhamento na flecha no meio do vão.

As lamelas foram processadas em uma plaina desengrossadeira para ajuste da espessura e uniformização da superfície. Para montagem das vigas de MLC foram produzidas lamelas nas dimensões de 2 cm x 5 cm x 120 cm (espessura x largura x comprimento). A escolha da espessura da MLC foi de acordo com a dimensão das tábuas e as demais medidas foram estabelecidas em função da prensa utilizada e do material disponível.

### 3.3.1 MLC sem reforço

Foram produzidos quatro elementos de madeira lamelada colada utilizando madeira de pinus constituído de três camadas, nas dimensões de 6 cm x 5 cm x 120 cm, respectivamente para espessura, largura e comprimento.

Anteriormente à aplicação do adesivo, as superfícies das lamelas de madeira foram lixadas e limpas para eliminar resíduos que pudessem atrapalhar a colagem.

Para a aplicação do adesivo poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,5, sendo 1 parte do componente A (pré-polímero) e 1,5 partes do componente B (poliol). O adesivo foi preparado aos poucos, de forma a evitar que se ultrapasse o tempo de montagem.

A determinação da quantidade total necessária de adesivo para cada elemento foi feita de acordo a medição da área da lamela em m<sup>2</sup> e com a gramatura de adesivo. Com essas informações foi possível calcular a quantidade de gramas de adesivo necessário para cada lamela.

As lamelas foram coladas com gramatura de 300 g.m<sup>-2</sup> em linha de cola simples; para seu espalhamento foi utilizado uma espátula de silicone; após, foram unidas e prensadas durante 48 horas à pressão de 1 MPa, de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 2022). A pressão foi exercida mediante dois sargentos de madeira, com 6 pares de parafusos e porcas (alinhados no sentido longitudinal), com aplicação de pressão por um torquímetro de ½ polegada (Figura 10).

Após a prensagem, os elementos de MLC foram acondicionadas em câmara climática a uma temperatura de 20 °C e umidade relativa do ar de 65%, até a realização dos testes.

Figura 10 – Prensagem de elementos de madeira lamelada colada



Fonte: A autora.

### 3.3.2 MLC com reforço

Foram produzidos também quatro elementos de MLC de pinus com reforço de fibras de bambu. Sendo ambos com 3 camadas nas dimensões de 6 cm x 5 cm x 120 cm (espessura x largura x comprimento).

As fibras de bambu foram separadas em feixes e dispostas de forma a atingir as dimensões das vigas produzidas. A união da fibra com o adesivo para a formação do compósito fibroso foi feita diretamente sobre os elementos de MLC, sobre a última camada.

A aplicação do reforço sobre a MLC teve início com a aplicação de uma camada de adesivo na lamela. Após a aplicação da camada de adesivo foi aplicada uma camada de reforço de fibra, que cobriu toda a área da viga. A face da lamela superior em contato com o reforço recebeu aplicação do adesivo, de forma que ocorresse uma total impregnação de resina nas fibras.

A MLC foi prensada durante 48 horas a uma pressão de 1 MPa, de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 2022).

Para a determinação da quantidade necessária de adesivo, foi medida a área da lamela em m<sup>2</sup>, considerando também a camada de reforço, e então calculada a quantidade de gramas necessária para cada lamela. Foi utilizada a mesma gramatura de 300 g.m<sup>-2</sup> para colagem desses elementos.

Após a prensagem os elementos de MLC foram acondicionadas em câmara climática temperatura de 20 °C e umidade relativa do ar de 65%, até a realização dos testes.

### 3.4 Caracterização dos elementos de madeira lamelada colada

#### 3.4.1 Ensaio de flexão

Para realização dos ensaios de flexão dos elementos de MLC foi utilizada uma máquina de ensaios universal de 10 toneladas do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (Figura 11), seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 7190:1997. A aplicação da carga ocorreu de forma concentrada no meio do vão, que foi fixado em 75 cm e uma velocidade padrão de 2,5 mm/s.

O esforço foi aplicado até o rompimento do elemento para geração dos dados de módulo de elasticidade e módulo de ruptura.

Figura 11 – Ensaio de flexão estática em elemento de madeira lamelada colada



Fonte: A autora.

#### 3.4.2 Caracterização dos tipos de ruptura

Após a realização do ensaio de flexão, os elementos de MLC foram fotografados e por meio das imagens foram identificados os modos de falha.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio de flexão

Os valores médios do módulo de elasticidade e módulo de ruptura determinados a partir do ensaio de flexão para os elementos de MLC com e sem reforço são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores médios do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) para as vigas de MLC sem e com reforço de fibras de bambu

Tratamento	MOE (MPa)	MOR (MPa)
SEM REFORÇO	1504,98 (215,51) b	37,83 (8,00) b
COM REFORÇO	1870,41 (318,53) a	50,09 (10,09) a

Fonte: A autora. Valores entre parênteses indicam o desvio padrão ( $p < 0,05$ ).

A aplicação de reforço aumentou significativamente em 24,28% o módulo de elasticidade dos elementos de madeira lamelada colada. Já o módulo de ruptura teve um aumento de 32,40%, ao se adicionar o reforço de bambu. A aplicação de reforços em espécies que apresentam baixos valores de resistência e rigidez como é o caso do pinus se torna de fundamental tendo em vista a melhora das propriedades mecânicas da madeira (Bertoline *et al.*, 2016).

Em elementos reforçados de madeira laminada colada que são utilizados como vigas, as fibras geralmente são coladas na face tracionada (região inferior), aumentando assim a rigidez, evitando a ruptura frágil e proporcionando melhor desempenho mecânico para essas vigas (Donadon *et al.*, 2020).

Esse aumento de resistência e rigidez com a aplicação de reforço pode ser atribuído às características do bambu, que possui alta resistência à tração devido à sua estrutura composta por fibras longas e alinhadas (Ghavami; Marinho, 2005). Esse fenômeno foi corroborado por Okimoto *et al.* (2023), que investigaram as propriedades mecânicas de vigas de MLC com reforço de bambu. Ao substituírem a lâmina de pinus na penúltima camada por lâminas de bambu, constataram um aumento na rigidez do material entre 41% e 56% com a utilização do bambu.

Os valores apresentados estão de acordo com obtidos em literatura para elemento de MLC reforçados com outros materiais, como por exemplo, os

encontrados por Mascia, Donadon e Vilela (2019) que estudaram vigas de madeira lamelada colada de *Pinus elliottii* reforçadas obtiveram incrementos de rigidez e capacidade de carga com a aplicação de fibras de sisal coladas sob a última camada.

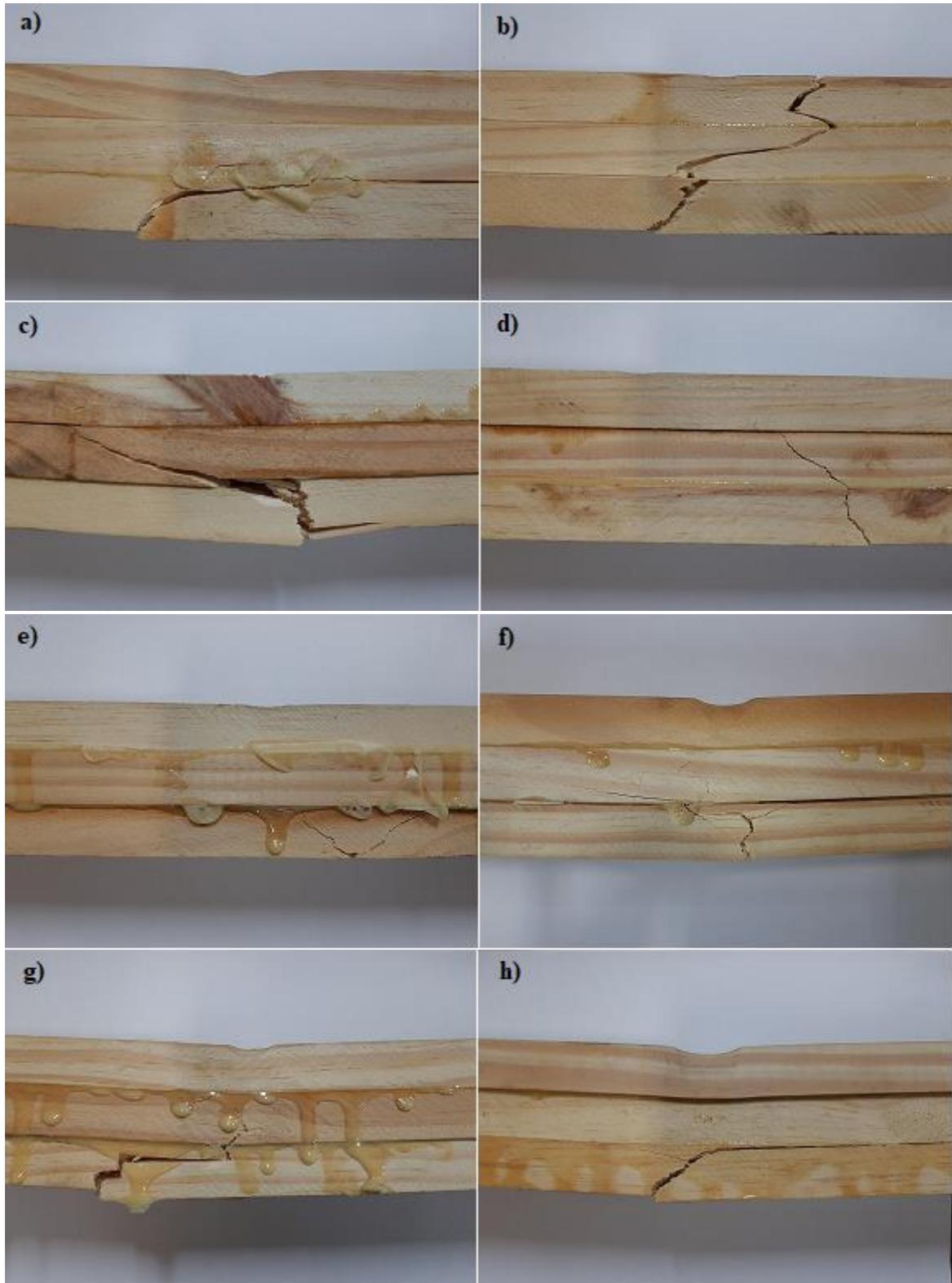
Lenzi, Matias, Risson (2018) estudaram a aplicação de reforço de fibra de vidro em madeira lamelada colada, observando um aumento de até 21,87% na rigidez das vigas reforçadas, além de um aumento máximo de 26,25% de carga de ruptura em relação à viga de referência. Isso resultou em menores deslocamentos para uma mesma força aplicada, em comparação com vigas que não receberam reforço.

Bertoline *et al.* (2016) investigaram a viabilidade de aplicação de fibras de vidro, carbono, Vectran e sisal como alternativa de reforço estrutural em vigas de madeira lamelada feitas com *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* provenientes de reflorestamento. Eles observaram que a fibra Vectran é a melhor opção para reforço de madeiras de maior seção transversal e que a fibra de sisal se mostrou uma opção interessante devido à sua acessibilidade e baixo custo no Brasil.

As fibras naturais têm chamado a atenção por apresentarem características mecânicas adequadas para tal aplicação. A aplicação de fibras naturais, como fibras de bambu, sisal e juta por exemplo, associadas a vigas de madeira lamelada, em particular aquelas fabricadas com espécies de madeira provenientes de reflorestamento, está em acordo com o interesse econômico atual e apelo sustentável.

A Figura 12 ilustra as rupturas ocorridas em cada um dos corpos de prova de MLC de pinus ensaiados à flexão.

Figura 12 - Modos de rupturas dos elementos de madeira lamelada colada reforçadas com bambu. a), b), c), d) elementos sem aplicação de reforço; e), f), g), h) elementos reforçados com bambu



Fonte: A autora.

Os resultados experimentais mostram que a utilização de reforço com fibras de bambu nas vigas de MLC tiveram efeito mínimo na resistência final, porém a adição do reforço afetou o tipo de falha das vigas submetidas à flexão.

Após o ensaio de flexão pode-se observar em quase todas as vigas na região de compressão o esmagamento concentrado na região do cutelo, o que gerou um enfraquecimento na zona de aplicação da carga e contribuiu para a ruptura do elemento na direção perpendicular às fibras (Calil Junior; Lahr; Dias, 2003).

Visualmente os elementos de MLC confeccionados com pinus apresentaram inicialmente ruptura por tração na lamela inferior, que em alguns casos levou a ruptura das vigas como um todo. Além da ruptura por cisalhamento na linha neutra em alguns casos.

Franke; Franke; Harte (2015) indicam que vigas submetidas à flexão se caracterizam por apresentarem rupturas de natureza frágil, por ocorrência de tração excessiva na parte inferior do elemento. Dessa forma, a ruptura por flexão é classificada como crítica, pois está sujeita ao colapso total “não avisado” da construção. Os autores também indicam que rupturas por compressão excessiva são preferíveis do ponto de vista de segurança, uma vez que apresenta características dúcteis com deformação plástica.

De acordo com Raftery e Harte (2011) para aumentar a ductilidade da secção reforçada, é aconselhável eliminar a presença de defeitos naturais na laminação mais extremamente solicitada. Quando uma laminação sacrificial for incluída na viga reforçada, devem ser realizados procedimentos para limitar a influência de defeitos tanto na laminação sacrificial quanto na laminação tensionada diretamente acima da placa de reforço.

As vigas não reforçadas apresentaram rompimento por tração iniciado na lamela inferior que seguiu ao longo da altura, provocando cisalhamento em alguns pontos, o que caracteriza uma ruptura frágil do material. Na Figura 12b é possível notar o rompimento completo da MLC, enquanto nas Figuras 12c e 12d é possível observar que as trincas se propagaram pelas lamelas ao longo da altura da MLC.

Esse comportamento assemelha-se ao observado por Lenzi, Matias e Risson (2018) analisando vigas de madeira lamelada colada reforçadas com fibra de vidro, onde o modo de ruptura de todas as vigas deu-se por tração. De acordo com Valdes *et al.* (2020) esse tipo de ruptura ocorre por trincas de flexão no lado tracionado,

sendo geralmente caracterizada por trincas que se propagam pela seção transversal e ocorrem quando o nível de tensão atinge a resistência à flexão

Ao contrário dos elementos não reforçados onde o dano se propagou por toda a seção, a aplicação do reforço na última camada foi capaz de restringir a ruptura a pequenas regiões retardando a falha da amostra, evitando assim a ocorrência do cisalhamento naquela região como pode ser verificado nas Figuras 12e-h.

Comportamento semelhante foi encontrado por Lacroix e Doudak (2020) que observaram que o uso de tecidos bidirecionais de GFRP localizou o dano na seção de madeira em uma pequena área, proporcionando confinamento que ajudou a retardar a falha da amostra reforçada.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A aplicação de reforço proporcionou aumento na resistência mecânica e na rigidez do elemento de MLC;
- A presença do reforço com fibra de bambu nos elementos de MLC alterou o modo de ruptura das mesmas quando comparadas às MLC sem reforço, o que pode indicar um aumento na segurança da estrutura;
- O bambu, por ser uma fibra de baixo custo e alta disponibilidade pode ser uma estratégia para elevar a qualidade do elemento colado e viabilizar o uso da madeira de menor resistência, principalmente das madeiras de pinus, em estruturas da construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AYANLEYE, S. *et al.* Durability and protection of mass timber structures: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, 103731, 2022.

BERTOLINE, C. A. A. *et al.* Analysis of fiber reinforced laminated timber beams. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 100-109, 2016.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. Bending tests on natural fiber reinforced fir wooden elements. **Advanced Materials Research**, v. 778, p. 537-544, 2013.1

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

DONADON, B. F. *et al.* Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, 109818, 2020.

ECHAVARRIA, C.; JIMENEZ, L.; OCHOA, J. C. Bamboo-reinforced glulam beams: an alternative to fiberglass-reinforced glulam beams. **Dyna**, v. 79, n. 174, p. 24-30, 2012.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model. **Materials Research**, v. 9, p. 263-269, 2006.

FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - State of the art. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 2-13, 2015.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 107-114, 2005.

HALICKA, A.; ŚLÓSZARZ, S. Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips. **Structures**, p. 2912-2921, 2021.

KHELIFA, M.; AUCHET, S.; MÉAUSOONE, P.J.; CELZARD, A. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with carbono fibre-reinforced polymers. **Engineering Structures**, v. 101, p. 364-375, 2015.

LACROIX, D.; DOUDAK, G. Towards enhancing the post-peak performance of glued-laminated timber beams using multi-directional fibre reinforced polymers. **Engineering Structures**, v. 215, 110680, 2020.

LENZI, F.; MATIAS, P. O.; RISSON, A. V. Análise da utilização de fibras de vidro em vigas de madeira laminada colada submetidas à flexão simples. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 1, 2018.

MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. Glued laminated timber beams reinforced with sisal fibres. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 8, p. 390-397, 2019.

MASCIA, N. T.; MAYER, R. M.; MORAES, R. W. Analysis of wood laminated beams reinforced with sisal fibres. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 97-104, 2014.

NADIR, Y. *et al.* Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, 2016.

OKIMOTO, F. S. *et al.* Análise de vigas de madeira lamelada colada enrijecidas com bambu. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 10, p. 1-20, e023008, 2023.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724-735, 2011.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curauá fiber: a new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 27, n. 1, p. 103-12, 2008.

THORHALLSSON, E. R.; HINRIKSSON, G. I.; SNÆBJÖRNSSON, J. T. Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, p. 300-307, 2017.

VALDES, M. *et al.* Reinforcement of maritime pine cross-laminated timber panels by means of natural flax fibers. **Construction and Building Materials**, v. 233, 2020.

YADAV, R.; KUMAR, J. Engineered wood products as a sustainable construction material: A review. **Engineered Wood Products for Construction**, 2021.

ZHAO, X. *et al.* A scalable high-porosity wood for sound absorption and thermal insulation. **Nature Sustainability**, v. 6, n. 3, p. 306-315, 2023.

## CAPÍTULO IV

### PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA REFORÇADA

**Resumo** – O *Cross Laminated Timber* (CLT), ou madeira lamelada colada cruzada (MLCC), é composto por várias camadas de madeira unidas de forma transversal por meio de adesivo e pressão, formando ângulos de 90° entre si. Apresenta vantagens como maior resistência e rigidez, otimização do uso da matéria-prima, possibilidade de utilização de madeira de menor dimensão e qualidade, além de ser aplicável tanto vertical quanto horizontalmente. Geralmente produzido com madeiras de menor densidade, principalmente coníferas do gênero *Pinus*, a MLCC está sujeita a variações inerentes ao material que podem reduzir sua resistência mecânica. Para garantir a adequação estrutural, o reforço da MLCC pode ser considerado como uma alternativa para minimizar as incertezas em relação às suas propriedades. Assim, este trabalho tem como objetivo principal a produção e caracterização de painéis MLCC reforçados nas dimensões 6,4 x 33 x 55 cm (espessura x largura x comprimento). Para isso, foi utilizada a madeira de pinus, adesivo poliuretano de mamona e três diferentes tipos de material de reforço (fibras de bambu, Vectran e juta), os quais foram aplicados entre a camada do meio e a última. A MLCC foi confeccionada com três camadas e prensada à temperatura ambiente. Após a cura completa, foram extraídos corpos de prova para flexão, compressão e cisalhamento na linha de cola. A densidade não foi afetada pela adição de reforço. No ensaio de flexão foram encontrados incrementos de 7,29%, 42,27% e 45,07% em resistência para bambu, Vectran e juta, respectivamente. Para módulo de elasticidade à flexão, compressão paralela e perpendicular às fibras não foram encontradas diferenças significativas com a aplicação de reforço. Cisalhamento *rolling shear*, delaminação e tração foram os principais modos de ruptura dos painéis. A aplicação de reforço aumentou algumas propriedades mecânicas sem alterar a densidade. Os tecidos de juta e Vectran apresentaram os melhores resultados para resistência à flexão e cisalhamento na linha de cola, o que torna um reforço sintético comparável ao natural.

**Palavras-chave:** Cross Laminated Timber. Material de reforço. Propriedades mecânicas.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira foi um dos primeiros materiais construtivos da história e tornou-se cada vez mais importante, principalmente nas duas últimas décadas, o que se deve as suas propriedades intrínsecas únicas e à sua natureza sustentável (Hänsel *et al.*, 2022). Essa demanda da madeira como principal material de construção está relacionada tanto com questões econômicas, sociais, ambientais, técnicas e políticas (Goubran; Masson; Walker, 2020).

O estímulo crescente por materiais construtivos mais sustentáveis permitiu a evolução do ramo de madeira engenheirada e a introdução de novos produtos. Os produtos de madeira engenheirada são definidos como um produto de madeira fabricado pela colagem de partículas, fibras, folheados ou placas de madeira. Para assegurar um desempenho estrutural durável, esses produtos são fabricados e testados de acordo com especificações ou padrões nacionais e internacionais aprovados.

Entre os principais produtos está a madeira lamelada colada cruzada (MLCC) ou do inglês *Cross Laminated Timber* (CLT) que ganhou destaque por sua capacidade de minimizar a emissão de gases de efeito estufa (D'Amico; Pomponi; Hart, 2021). A MLCC é composta por no mínimo três camadas de madeira serrada coladas de forma ortogonal, o que proporciona estabilidade dimensional e elevada resistência e rigidez dentro e fora do plano. Por esse motivo, a MLCC é usada tanto como elemento de parede como de piso ou telhado (Brandner *et al.*, 2016; Yusof *et al.*, 2019).

A MLCC é fabricada principalmente de madeiras macias, como abeto e pinus. A potencialidade da utilização de madeiras de menor qualidade e resistência para uso estrutural tem levado a diversas pesquisas envolvendo o uso de outras espécies, como as provenientes de florestas de rápido crescimento (CROSSLAM, 2015; Liao *et al.*, 2017). Nesse cenário, o Brasil possui grande aptidão para produção e utilização, já que conta com mais de 9 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 1,9 milhão de hectares de pinus e 7,6 milhões de hectares de eucalipto (IBÁ, 2023).

A utilização de madeiras de menor densidade incentivou também no desenvolvimento de pesquisas envolvendo a utilização de reforços que garantam melhorias no desempenho estrutural. A combinação da madeira com outros

materiais resulta em um compósito com novas propriedades mecânicas (Donadon *et al.*, 2020). Os compósitos reforçados com fibras (FRP- “Fiber Reinforcing Polymers”) têm sido altamente empregados devido às suas vantagens, proporcionando incrementos de resistência e rigidez, reduzindo a variabilidade do material, como também diminuindo seção transversal e o peso de vigas lameladas coladas.

Em se tratando de madeira proveniente de reflorestamentos, principalmente *Pinus*, que pertencem às classes de madeiras com baixa rigidez e resistência, o aumento dessas propriedades torna-se ainda mais interessante (Raftery; Rodd, 2015). Devido à presença de nós, característica da madeira de pinus, que a torna um ponto de fragilidade durante a sua utilização, a ação desse defeito pode ser consideravelmente reduzida com a adição de reforço na zona mais tensionada.

Estudos envolvendo a adição de reforço em madeira coladas demonstraram aumento da resistência e rigidez, mudança no modo de ruptura de falha frágil para ruptura dúctil e proporcionaram melhor desempenho mecânico das vigas (Donadon *et al.*, 2020; Raftery; Kelly, 2015; Vilela *et al.*, 2023). Entre as principais matérias-primas utilizadas para reforço de estruturas de madeira estão as fibras naturais de linho e sisal (Borri; Corradi; Speranzini, 2013) e as fibras sintéticas, como os polímeros reforçados com fibra de vidro (Song; Lee; Hong, 2023; Zamli *et al.*, 2022) e os polímeros reforçados com fibra de carbono (Dániel, Habashneh, Rad, 2022; He *et al.*, 2022).

Valdes *et al.* (2020) utilizaram tecido de fibras naturais de linho como reforço externo de painéis MLCC de pinho marítimo colados com resina epóxi e observaram uma melhoria na rigidez, com um aumento médio na capacidade de carga de 63% e 73% para reforços de camada simples e dupla, respectivamente, além de variações no mecanismo de ruptura. Já Song *et al.* (2019) verificaram o comportamento da MLCC reforçada externamente com CFRP submetida à flexão e obtiveram maior módulo de elasticidade e resistência, além redução nas falhas causadas por defeitos nos painéis reforçados.

Para MLCC, por ser tratar de uma tecnologia relativamente nova, estudos envolvendo a utilização de reforços de fibras, principalmente na parte interna dos painéis são escassos. Este estudo ajuda a demonstrar e compreender as aplicações potenciais de reforços para melhorar as propriedades mecânicas de MLCC para construção civil em madeira.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar de forma experimental o comportamento mecânico de elementos de madeira lamelada colada cruzada (MLCC) de *Pinus* spp. reforçados com diferentes tipos de fibras.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obter resultados de resistência e rigidez por meio do ensaio de flexão das MLCC com e sem reforço;
- Caracterizar mecanicamente MLCC com e sem reforço quanto a resistência à compressão e cisalhamento;
- Avaliar de forma visual os tipos de ruptura ocorridos nos corpos de prova ensaiados mecanicamente;
- Fazer comparação dos resultados de resistência de outros autores com os obtidos neste estudo para MLCC produzidas com e sem reforço;
- Promover o uso sustentável de madeira de reflorestamento e de baixa resistência para fins estruturais.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Classificação visual das lamelas**

Tendo como objetivo a seleção de lamelas adequadas para confecção dos painéis de madeira lamelada colada cruzada, foi realizada uma classificação visual das peças para descartar aquelas com defeitos acima dos permitidos, uma vez que as espécies pinus podem apresentar muitos nós, bolsas de resinas, fendas, rachaduras, encanoamentos e encurvamentos. Depois, as madeiras foram classificadas por densidade, como recomenda a norma brasileira de estruturas de madeira NBR 7190 (2022).

#### **3.2 Confecção dos painéis de MLCC**

As lamelas tiveram a superfície uniformizada e a espessura ajustada por meio de uma plaina desengrossadeira. Para confecção dos painéis foram produzidas cerca de 220 lamelas nas dimensões de 2 cm x 5 cm x 60 cm e 2 cm x 5 cm x 30 cm (espessura x largura x comprimento). Estas medidas foram estabelecidas em função da prensa hidráulica e do material disponível.

Após as lamelas terem sido aplainadas e destopadas no comprimento para ajuste ao tamanho final, foi realizada classificação visual com objetivo de homogeneizar e organizar as peças de acordo com tamanho e espessura necessárias para compor as camadas do MLCC.

As lamelas classificadas foram acondicionadas em sala climatizada com temperatura de  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $65 \pm 5\%$  até massa constante.

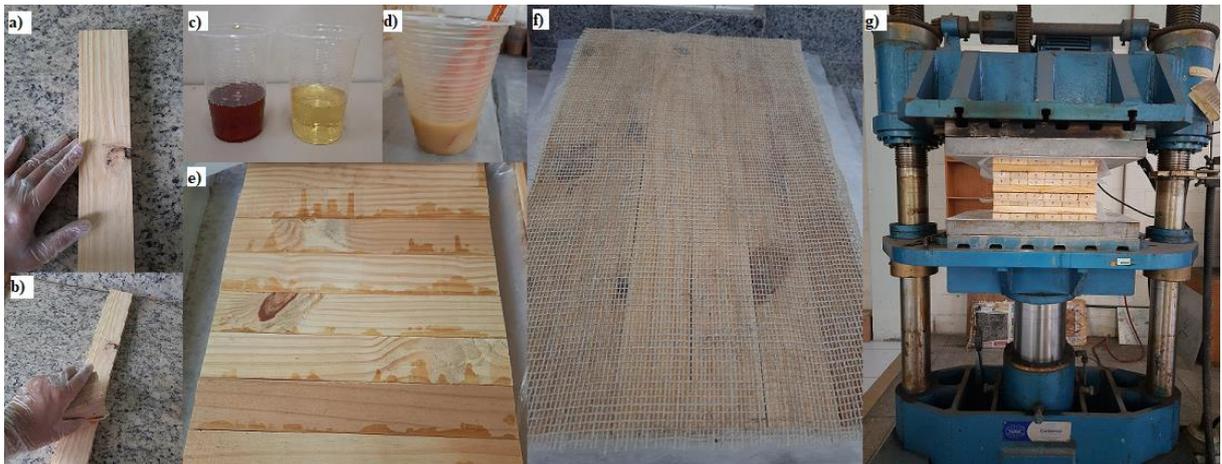
O adesivo foi preparado obedecendo a proporção de 1:1,5, sendo 1 parte do componente A (pré-polímero) e 1,5 partes do componente B (poliol) seguindo as recomendações do fabricante. A misturas do componente foi realizada aos poucos, de forma a evitar que se ultrapasse o tempo de montagem. Além disso, foi realizado o lixamento e a limpeza das lamelas para eliminar sujeiras e resíduos que pudessem prejudicar a colagem.

As lamelas foram coladas primeiramente nas faces laterais, utilizando a gramatura de  $250 \text{ g.m}^{-2}$ . Para as camadas foi utilizada a gramatura de  $300 \text{ g.m}^{-2}$  em linha de cola simples com uso de uma espátula de silicone.

Para os painéis CLT reforçados, primeiro aplicou-se o adesivo na camada inferior, colou-se o material de reforço e foi feita novamente a aplicação de adesivo, para que houvesse total aderência entre a camada de madeira-reforço-madeira.

A prensagem à temperatura ambiente foi realizada em prensa hidráulica modelo CONTENCO durante 48 horas, aplicada uma pressão de 1,2 MPa, seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 7190 (ABNT, 2022). As principais etapas do processo de produção da MLCC estão representadas na Figura 13.

Figura 13 - Etapas do processo de produção das MLCC. (a) Classificação das lamelas; (b) Limpeza e lixamento; (c) Pesagem dos componentes do adesivo; (d) Mistura do adesivo; (e) Colagem lateral das lamelas e preparação para recebimento do adesivo; (f) Aplicação do reforço; (g) Prensagem

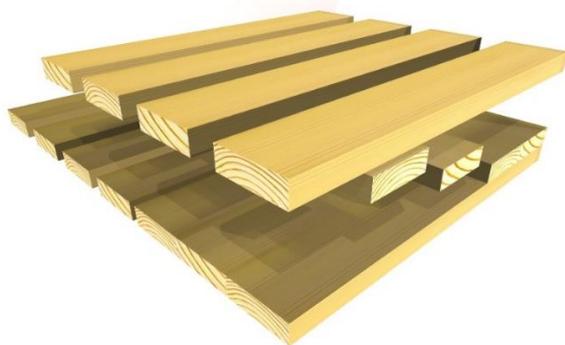


Fonte: A autora.

Após a prensagem, foi realizado o acabamento da MLCC com uma lixadeira para remoção do excesso de adesivo e então, esquadrejamento nas dimensões finais e submetidos a caracterização física e mecânica.

Foram produzidos 3 painéis CLT de madeira de pinus sem reforço, compostos por três camadas, com dimensões de 6,4 cm x 33 cm x 55 cm (espessura x largura x comprimento), e 9 painéis CLT de madeira de pinus com reforço, mantendo as dimensões. A configuração do elemento de MLCC produzido está esquematizada na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de montagem das camadas para produção de madeira lamelada colada cruzada



Fonte: A autora.

### 3.3 Caracterização dos elementos de madeira lamelada colada cruzada

Realizou-se a caracterização da resistência e rigidez por meio do ensaio de flexão, sendo obtidos os módulos de elasticidade (MOE) e módulos de ruptura (MOR); resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras; resistência ao cisalhamento na linha de cola e densidade aparente.

Também foi realizada uma avaliação visual das amostras submetidas ao teste de flexão, analisando-se o tipo de ruptura e o comportamento das falhas, incluindo a presença de *rolling shear*.

#### 3.3.1 Ensaio de flexão

Para determinação das propriedades de resistência e rigidez, foi realizado o ensaio de flexão estática, com aplicação da carga de forma concentrada no centro do vão seguindo a ASTM 198 (2009).

Os corpos de prova foram produzidos com predominância das lamelas no sentido longitudinal e suas dimensões estão representadas na Figura 15.

Para realização do ensaio, os corpos de prova foram colocados em apoios móveis, mantendo um vão padrão de 45 cm para todas as amostras. Sendo aplicado um carregamento monotônico crescente, com velocidade de 6 kN/min seguindo as adaptações do *script* de ensaio de Ecker (2017).

Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de flexão da MLCC



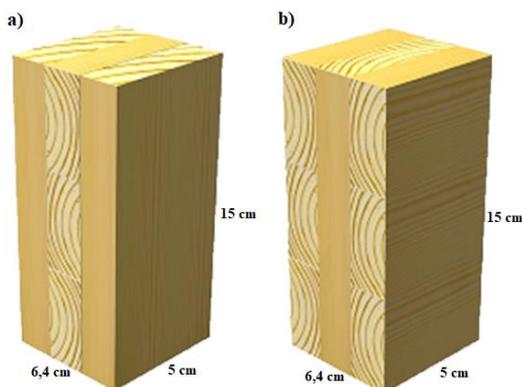
Fonte: A autora.

### 3.3.2 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi realizado com dois tipos de orientação dos corpos de prova: sendo um com duas camadas de lamelas orientadas no sentido longitudinal, ou seja, predominância de compressão paralela às fibras; e outro com duas lamelas orientadas no sentido transversal, tendo predominância de compressão normal às fibras, conforme Figura 16.

Para realização desse ensaio foi aplicado carregamento monotônico crescente com velocidade de 4 kN/min, seguindo as adaptações do *script* de ensaio de Ecker (2017).

Figura 16 - Configuração e dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão: (a) compressão paralelas às fibras e (b) compressão normal às fibras



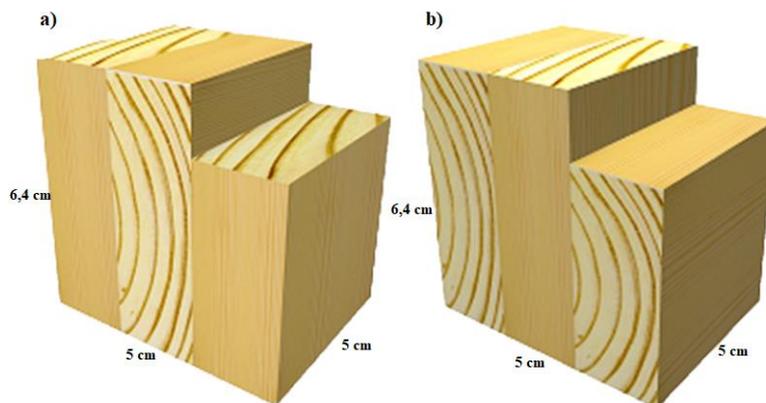
Fonte: A autora.

### 3.3.3 Cisalhamento na linha de cola

De acordo com disposição ortogonal das camadas da MLCC, produziu-se dois tipos de corpos de prova para o ensaio de cisalhamento. Sendo um tipo de corpo de prova com predominância de lamelas no sentido longitudinal e o outro tipo com lamelas predominantemente no sentido transversal, como mostra a Figura 17.

As dimensões dos corpos de prova e o *script* utilizados neste ensaio (carregamento monotônico crescente com velocidade de 4kN/min) seguiram as adaptações de Ecker (2017).

Figura 17 - Configuração e dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento na linha de cola: (a) cisalhamento paralelo às fibras e (b) cisalhamento perpendicular às fibras



Fonte: A autora.

### 3.3.4 Densidade aparente

A densidade aparente ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) foi determinada utilizando corpo de prova cúbico, conforme ilustrado na Figura 18. Os corpos de prova foram primeiramente climatizados a uma temperatura de  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $65 \pm 5\%$ , até atingirem massa constante. Após, foi realizada medição das dimensões os corpos de prova com auxílio de paquímetro e a pesagem em balança digital, determinando-se então a densidade aparente (Equação 6), seguindo as adaptações da metodologia de Vilela e Mascia (2021).

$$\rho_{ap} = \frac{M_{Eq}}{V_{Eq}} * 1000 \quad (6)$$

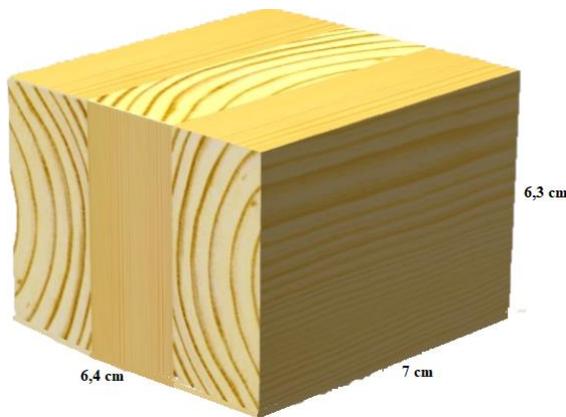
Em que:

$\rho_{ap}$ : densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>);

$M_{Eq}$ : massa da amostra na umidade de equilíbrio higroscópico (g);

$V_{Eq}$ : volume da amostra na umidade de equilíbrio higroscópico (cm<sup>3</sup>).

Figura 18 - Dimensões do corpo de prova para determinação da densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>)



Fonte: A autora.

### 3.4 Delineamento experimental

Neste estudo foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) contendo quatro tratamentos, sendo um tratamento controle no qual não houve aplicação de reforço na MLCC, e três diferentes tipos de reforço (fibras de bambu, Vectran e juta).

Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) com um nível de significância de 95%. Após a comprovação das diferenças significativas, foi realizado o teste de Tukey, também com 95% de probabilidade, para a comparação das médias.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade aparente da madeira lamelada colada cruzada

Na Tabela 11 são apresentados os valores de densidade aparente da MLCC sem aplicação de reforço e com aplicação de reforços de juta, bambu e Vectran.

Tabela 11 - Valores médios de densidade aparente da MLCC sem reforço e com os três diferentes tipos de reforço

<b>Tratamento</b>	<b>Densidade aparente (kg.m<sup>-3</sup>)</b>
Sem reforço	479,70 a (0,03)
Juta	500,47 a (0,025)
Bambu	461,02 a (0,002)
Vectran	486,61 a (0,005)

Fonte: A autora. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. ( $p < 0,05$ )

Os valores médios de densidade aparente não apresentaram diferenças estatísticas entre si para nenhum dos tratamentos, indicando que a aplicação de reforço não afetou a densidade das MLCC. Este resultado é vantajoso, pois a adição de adesivo e reforço à madeira poderia aumentar o peso próprio da MLCC, o que por sua vez aumentaria o peso total da estrutura.

Segundo Wdowiak-Postulak e Brol (2020), a aplicação de reforço em elementos de madeira maciça ou madeira colada pode resultar em benefícios, como o aumento das propriedades mecânicas e a redução do peso próprio da estrutura devido à diminuição da seção dos elementos de madeira, além do uso de madeiras de classe de resistência inferior.

O valor de densidade encontrado está em conformidade com o relatado por Ecker (2017) para CLT de pinus de 0,5 kg/m<sup>3</sup>. Além disso, observa-se que essa densidade está próxima àquela obtida para a madeira maciça de pinus.

## 4.2 Propriedades mecânicas da madeira lamelada colada cruzada

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos corpos de prova de MLCC.

Tabela 12 - Valores médios das propriedades mecânicas dos corpos de prova de MLCC de pinus

Propriedades	Sem reforço	Com reforço			
		Vectran	Bambu	Juta	
Flexão (MPa)	MOR	23,87 b (9,9)	33,96 a (5,69)	25,61 ab (2,93)	34,63 a (2,38)
	MOE	2155,49 a (415,16)	2271,36 a (198,5)	2060,15 a (246,87)	2052,71 a (162,85)
Compressão (MPa)	Paralela – $f_{c0}$	22,53 a (1,87)	22,63 a (1,56)	21,47 a (1,8)	22,94 a (3,31)
	Perpendicular – $f_{c90}$	12,15 a (0,85)	13,26 a (1,9)	13,21 a (2,03)	14,04 a (1,03)
Cisalhamento (MPa)	Paralelo – $f_{v0}$	6,84 a (1,66)	6,88 a (1,39)	4,12 b (1,03)	5,52 ab (0,62)
	Perpendicular – $f_{v90}$	1,88 c (0,76)	4,41 a (0,60)	2,58 bc (0,48)	3,40 ab (0,5)
Porcentagem de falha na madeira (%)	Paralelo – $f_{v0}$	23,18 a (18,34)	19,7 ab (14,34)	0 c	2,89 bc (3,92)
	Perpendicular – $f_{v90}$	17,5 ab (32,62)	46,07 a (35,76)	2,42 b (3,03)	7,63 ab (14,66)

Fonte: A autora. Letras diferentes na linha indicam diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre as médias. Valores em parênteses representam o desvio padrão. MOE: Módulo de elasticidade. MOR: Módulo de ruptura.

A resistência média obtida pelo ensaio de flexão diferiu estatisticamente entre os tratamentos, sendo o tecido Vectran e o de juta os que apresentaram as maiores médias. A adição do reforço com manta de Vectran aumentou em 42,27% o módulo de ruptura da madeira lamelada colada cruzada em comparação a MLCC não

reforçada. Já a resistência dos painéis reforçados com tecido de juta teve um acréscimo de 45,07%.

Ecker (2017) estudando as características de painéis CLT fabricados com madeira de pinus obteve valor médio de MOR de 17,66 MPa. Navaratnam *et al.* (2020) analisaram o desempenho à flexão do CLT preparado a partir de *Pinus radiata* e relataram uma resistência à flexão de 26,61 MPa. Valores esses inferiores aos obtidos neste estudo. Já Buck *et al.* (2016) estudando o abeto norueguês encontraram valores de MOR entre 29,1 e 38,4 MPa.

Não houve diferença significativa entre os tratamentos para o módulo de elasticidade à flexão, demonstrando equivalência na resistência das fibras naturais com a fibra Vectran. Os valores obtidos neste estudo estão abaixo dos observados em literatura para espécies utilizadas na fabricação de MLCC, como por exemplo o abeto norueguês (*Picea abies*) com MOE entre 7.601 e 8.971 MPa (Buck *et al.*, 2016), *Pinus radiata* com MOE médio de 5140 MPa (Navaratnam *et al.*, 2020).

Os menores valores de módulo de elasticidade das MLCC deste estudo podem estar atribuídos ao MOE baixo da madeira de pinus. Baixos valores de MOE longitudinal são frequentemente associados à madeira juvenil, que se desenvolve nos primeiros 10 a 20 anos de vida de uma árvore durante o crescimento inicial (Plomion; Leprovost; Stokes, 2001). Esse rápido crescimento durante a rotação leva a uma madeira com menor rigidez (Rosa *et al.*, 2023).

Os tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas entre si para os ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras. Maithani, Chauhan e Sethy (2023) avaliaram o desempenho mecânico de CLT de *Pinus radiata* colado com PUR e obtiveram valor médio de resistência à compressão paralela às fibras de 16,35 MPa. Enquanto Buck *et al.* (2016) relataram para painéis CLT de *Picea abies* colado com melamina ureia formaldeído uma resistência à compressão de 26,3 MPa.

O cisalhamento na linha de cola no sentido paralelo assim como o cisalhamento perpendicular apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Para o cisalhamento paralelo nota-se uma tendência de diminuição da resistência com a adição de reforço. A aplicação do bambu como reforço reduziu em 39,77% a resistência ao cisalhamento na linha de cola de forma paralela em relação à MLCC não reforçada, o que pode ter relação com a quantidade de fibras aplicadas e a interação insuficiente entre madeira-adesivo-fibra.

Para o cisalhamento perpendicular, o tecido de Vectran e de juta apresentaram os maiores incrementos em resistência, respectivamente 134,57% e 80,85%, demonstrando comparável resistência entre uma fibra natural e uma sintética.

A resistência média ao cisalhamento na linha de cola obtida neste estudo são superiores aos relatados em literatura. Maithani, Chauhan e Sethy (2023) encontraram uma resistência ao cisalhamento do bloco de 3,1 MPa para *Pinus radiata*. Ecker (2017) encontrou uma resistência ao cisalhamento para pinus de 3,16 MPa. Já Li *et al.* (2021) relataram uma resistência de 1,98 MPa para CLT feita de *Larix kaempferi*.

Com relação ao índice de falha na madeira observada após o teste de cisalhamento pode-se notar que todos os tratamentos ficaram abaixo de 50%. Esse percentual reduzido de falhas sugere que a ruptura pode ter acontecido com tensões abaixo da capacidade de suporte intrínseca da madeira (ASTM, 2000).

Para o cisalhamento paralelo o maior percentual de falha na madeira ocorreu nas amostras sem aplicação de reforço, já para os corpos de prova reforçados com bambu a falha foi exclusivamente na linha de cola como pode ser observado na Figura 19c. Nos corpos de prova reforçados com tecido de Vectran e juta ocorreram rompimentos das fibras coladas (Figura 19b e 19d).

O baixo percentual de falha na madeira pode ser explicado pela baixa adesão do adesivo poliuretano a madeira e a baixa interação entre madeira-adesivo-reforço. Quanto menor a viscosidade do adesivo, como é o caso do poliuretano bicomponente, maior será a sua capacidade de penetração e absorção do adesivo pela madeira (Damásio *et al.*, 2017), o que pode ter acarretado uma quantidade insuficiente de adesivo na linha de cola.

O reforço de Vectran foi o responsável pela maior resistência ao cisalhamento da linha de cola, ocasionando maiores valores de falha na madeira no cisalhamento perpendicular (Figura 20b). À medida em que a porcentagem de falhas na madeira aumenta, eleva-se também a resistência na linha de cola, indicando a eficiência do adesivo em relação à resistência intrínseca da madeira (Iwakiri *et al.*, 2005).

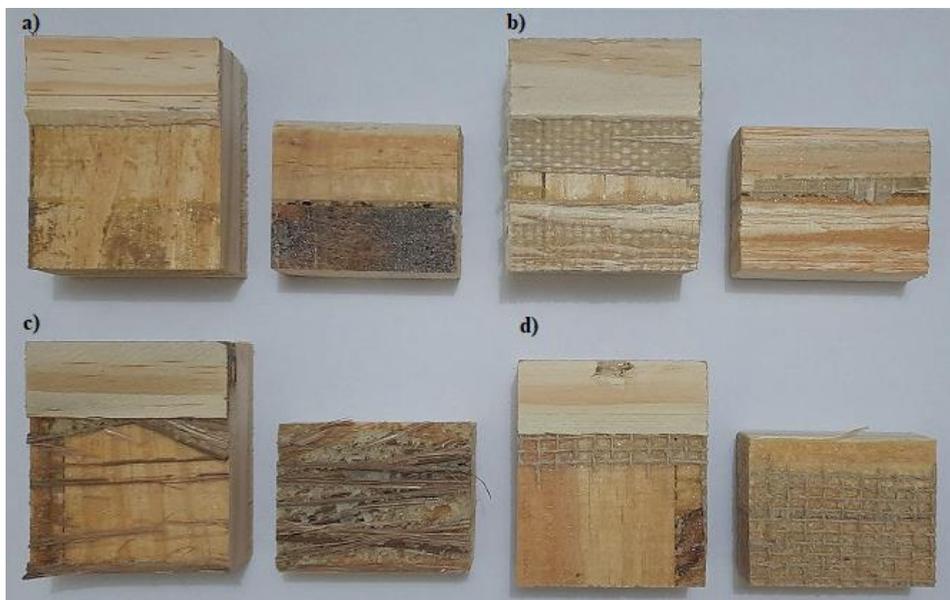
Nas Figuras 19 e 20 são apresentadas as rupturas dos corpos de prova de cisalhamento na linha de cola nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Figura 19 - Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola no sentido paralelo às fibras. a) Sem reforço; b) Vectran; c) Bambu; d) Juta



Fonte: A autora.

Figura 20 - Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola no sentido perpendicular às fibras. a) Sem reforço; b) Vectran; c) Bambu; d) Juta

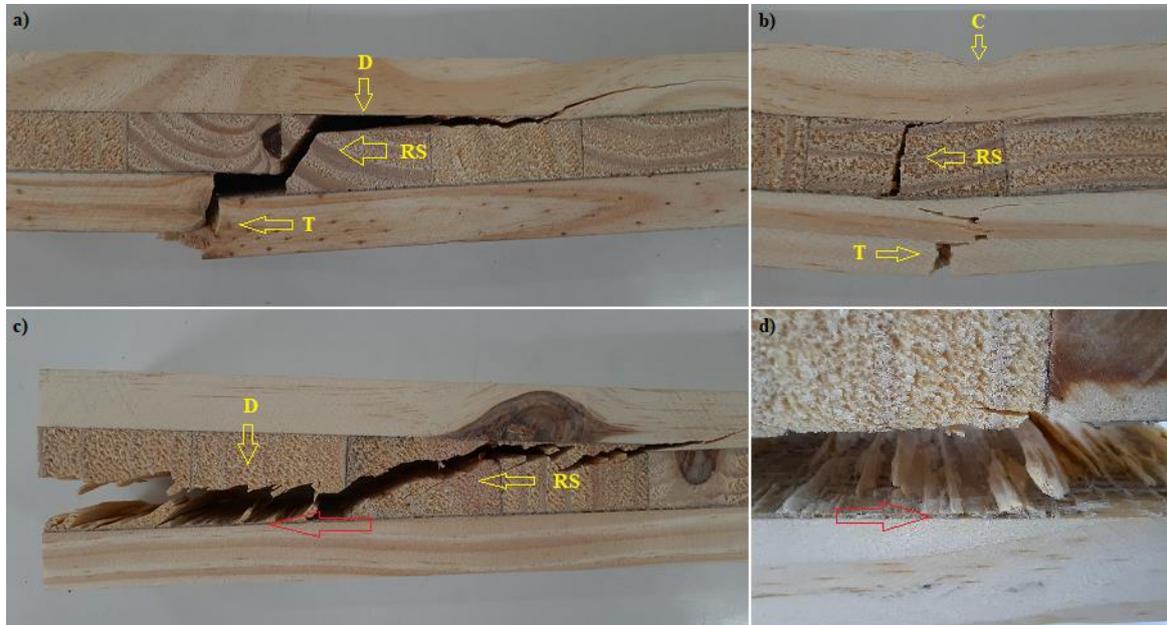


Fonte: A autora.

#### 4.3 Modo de ruptura das MLCC ensaiadas à flexão

Nas Figuras 21 a 23 são apresentados os modos de falha dos corpos de prova submetido ao ensaio de flexão.

Figura 21 - Tipos de rupturas dos corpos de prova ensaiados à flexão: a) sem reforço; b) com reforço de juta; c) com reforço de juta mostrando a delaminação; d) detalhe do rompimento do corpo de prova



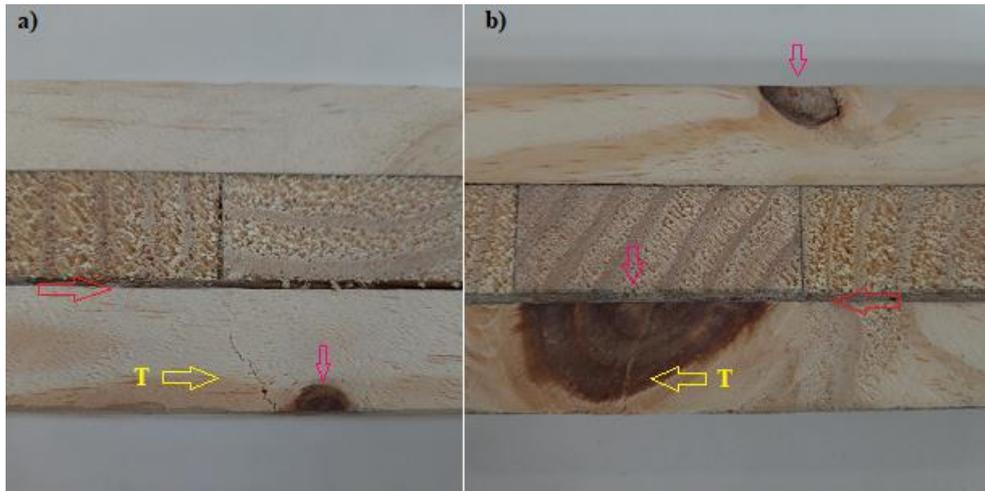
Fonte: A autora. Setas em vermelho indicam a camada de reforço. D: delaminação; RS: *rolling shear*; T: tração; C: compressão.

Os modos de falha mais proeminentes para a MLCC não reforçada e reforçada com juta foram o cisalhamento *rolling shear*, que ocorreu devido a tensão de cisalhamento transversal a grã, falha por delaminação em decorrência da falha na ligação da linha de cola e falha por tração devido à baixa tensão na camada externa.

Estes resultados estão em conformidade com Li *et al.* (2023) que observaram os mesmos tipos de falha para CLT sem aplicação de reforço. Também é apoiado por Yusof *et al.* (2019) que relataram falhas por delaminação, especialmente quando utilizado adesivo poliuretano.

As MLCC reforçadas com juta tiveram comportamento similar aos apresentados no trabalho de Wang *et al.* (2019), que observaram também falha por tração e delaminação em vigas unidirecionais reforçadas. Além disso, relataram que a delaminação ocorreu entre a madeira e reforço, no meio ou na borda da viga.

Figura 22 - Modos de ruptura para os corpos de prova reforçados com bambu

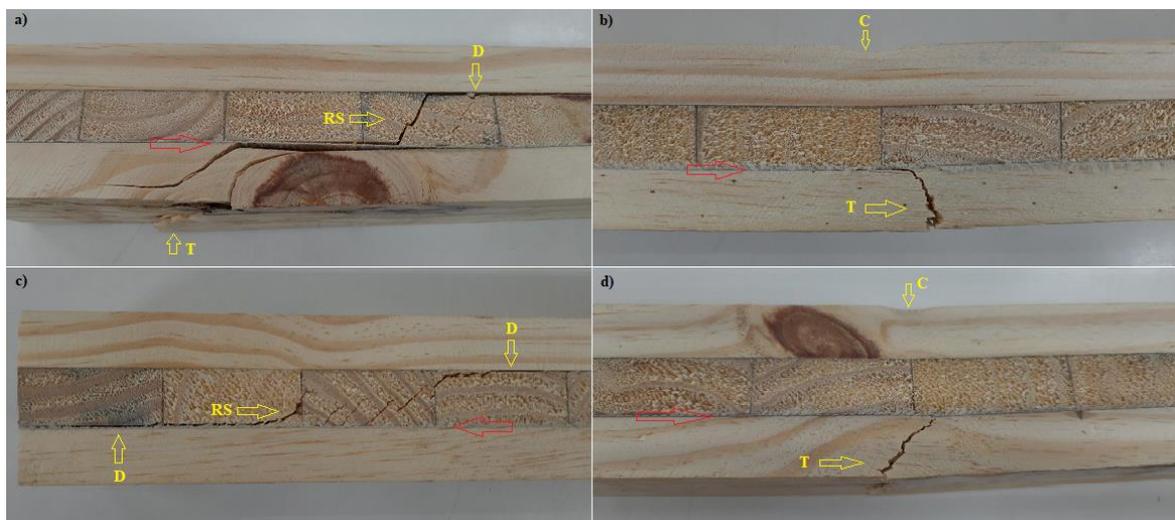


Fonte: A autora. Setas em vermelho indicam a aplicação de reforço. T: tração.

A ruptura por tração foi o principal tipo de falha encontrado na MLCC reforçada com bambu. Que pode ter sido influenciada pela menor resistência a flexão desses elementos e pela concentração da tensão ao redor dos nós existentes na madeira.

Além disso, a parte mais fraca do compósito, nesse caso a madeira, decidiu o modo de falha do compósito, como também pode ser observado por Wang *et al.* (2019).

Figura 23 - Modos de ruptura para os corpos de prova reforçados com Vectran



Fonte: A autora. Setas em vermelho indicam a aplicação de reforço. RS: *rolling shear*. T: tração. D: delaminação. C: compressão.

Para a MLCC reforçada com fibra Vectran, foram observadas falhas principalmente por cisalhamento *rolling shear* e de delaminação. O que pode ser explicado pela maior resistência a tração do tecido feito em Vectran, que transferiu as maiores tensões de carga para a camada transversal (Donadon *et al.*, 2020). Comportamento similar foi observado por Li *et al.* (2023) para CLT com tecidos FRP com falha por cisalhamento *rolling shear* e delaminação entre as camadas superiores.

Normalmente, o cisalhamento *rolling shear* ocorre devido às características anatômicas da madeira (Wang; Gong; Chui, 2015) e é resultado da resistência ao cisalhamento relativamente baixa das camadas transversais que pode levar à ruptura, criando propensão ao afastamento das grãs da madeira (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Nero; Christopher; Ngo, 2022).

A ruptura por cisalhamento *rolling shear* também pode ser atribuída ao curto vão do painel conforme relatado por Li *et al.* (2021), as fissuras principais geraram-se e expandiram-se dentro da camada transversal ao longo da orientação do anel e depois propagaram-se para ambos os lados da linha de cola, causando falhas por delaminação.

Foram identificadas também falhas por tração na camada inferior em regiões próximas a defeitos da madeira. A ruptura se iniciou por rompimento das fibras tracionadas na camada inferior na região no meio do vão e se propagou para a camada transversal por meio de pequenas fissuras, porém não foi identificada nenhuma falha por delaminação nesses corpos de prova.

O aparecimento de trincas na direção das fibras é um tipo de falha muito comum. A mudança na orientação da camada como ocorre na MLCC leva a tensões internas e, se a resistência do material for excedida, as trincas na seção transversal podem reduzir significativamente a capacidade de carga (Franke; Franke; Harte, 2015).

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho, pode-se concluir:

- A aplicação de reforço não afetou a densidade, porém influencia em algumas propriedades mecânicas da madeira lamelada colada cruzada;
- A aplicação do tecido de juta e Vectran aumentou a resistência a flexão da MLCC e ao cisalhamento na linha de cola na direção perpendicular às fibras
- As propriedades de compressão paralela e perpendicular às fibras não foram afetadas pelo reforço;
- A aplicação do reforço de bambu resultou em diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola na direção paralela às fibras;
- Todos os tratamentos apresentaram uma baixa porcentagem de falha na madeira, o que pode indicar uma baixa qualidade na adesão e interação entre adesivo-reforço-madeira;
- As falhas nos corpos de prova submetidos à flexão ocorreram principalmente devido ao cisalhamento *rolling shear*, a delaminação e a tração na camada inferior.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Pensilvânia: ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Pensilvânia: ASTM, 2009.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. Reinforcement of wood with natural fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 53, p. 1-8, 2013.

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

BUCK, D. *et al.* Bending properties of cross laminated timber (CLT) with a 45 alternating layer configuration. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 4633-4644, 2016.

CROSSLAM. **Cross Laminated Timber: Informações Técnicas**; Crosslam: Suzano, Brasil, 2015.

D'AMICO, B.; POMPONI, F.; HART, J. Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123487, 2021.

DAMÁSIO, R. *et al.* Interação de nanocristais de celulose com o adesivo ureia-formaldeído em juntas coladas de *Eucalyptus* sp. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 169-176, 2017.

DÁNIEL, H.; HABASHNEH, M.; RAD, M. M. Reliability-based numerical analysis of glulam beams reinforced by CFRP plate. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 13587, 2022.

DONADON, B. F. *et al.* Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, p. 109818, 2020.

ECKER, T. W. P. **Produção e caracterização mecânica de painéis de Cross Laminated Timber (CLT) para aplicação como placas de piso**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2017.

FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams - State of the art. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 2-13, 2015.

GOUBRAN, S.; MASSON, T.; WALKER, T. Diagnosing the local suitability of high-rise timber construction. **Building Research & Information**, v. 48, n. 1, p. 101-123, 2020.

HÄNSEL, A. *et al.* Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: A review. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 3, p. 230-241, 2022.

HE, M. *et al.* An experimental and analytical study on the bending performance of CFRP-reinforced glulam beams. **Frontiers in Materials**, v. 8, p. 802249, 2022.

**Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ** – Relatório anual de 2023. São Paulo, SP, 91 p. 2023.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. **Canadian CLT Handbook**, FPInnovations. Special Publication, Point-Claire, QC, v. 1, 812 p., 2019.

LI, H. *et al.* Out-of-plane bending behavior of cross-laminated timber members enhanced with fiber-reinforced polymers. **Journal of Building Engineering**, v. 66, 105862, 2023.

LI, M. *et al.* Gluing techniques on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from *Larix kaempferi*. **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 733, 2021.

LI, X. *et al.* Rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine - An experimental study. **Structures**, v. 33, p. 423-432, 2021.

LIAO, Y. *et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 508-515, 2017.

MAITHANI, P.; CHAUHAN, S. S.; SETHY, A. K. Polyurethane bonded cross-laminated timber prepared from *Pinus radiata*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 20, p. 117-122, 2023.

NAVARATNAM, S.; CHRISTOPHER, P. B.; NGO, T.; LE, T.V. Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117-215, 2020.

NERO, R.; CHRISTOPHER, P.; NGO, T. Investigation of rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. **Construction and Building Materials**, v. 316, 125897, 2022.

PLOMION, C.; LEPROVOST, G.; STOKES, A. Wood formation in trees. **Plant physiology**, v. 127, n. 4, p. 1513-1523, 2001.

RAFTERY, G. M.; RODD, P. D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction and building materials**, v. 91, p. 116-125, 2015.

ROSA, T. O. *et al.* Influence of juvenile wood proportion on density and modulus of elasticity in softwood boards for structural use: a preliminary study. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, n. 2, 2023.

SONG, Y.-J. *et al.* Evaluation of delamination and bending performance of composite CLT reinforced with CFRP. **Wood and Fiber Science**, v. 51, n. 4, p. 1-10, 2019.

SONG, Y.-J.; LEE, I.-H.; HONG, S.-I. Creep performance and analysis of glass fiber reinforced glulam beams under the influence of climatic conditions. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-12, 2023.

VALDES, M. *et al.* Reinforcement of maritime pine cross-laminated timber panels by means of natural flax fibers. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 117741, 2020.

VILELA, R.; MASCIA, N.T. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* provenientes de placas de Cross Laminated Timber. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 89-110, 2021.

VILELA, R. *et al.* Mechanical performance analysis in bending of glulam beams reinforced with synthetic Vectran fibres. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 289-302, 2023.

WANG, B. *et al.* Flax, basalt, E-Glass FRP and their hybrid FRP strengthened wood beams: An experimental study. **Polymers**, v. 11, n. 8, p. 1255, 2019.

WANG, Z.; GONG, M.; CHUI, Y.-H. Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 622-627, 2015.

WDOWIAK-POSTULAK, A.; BROL, J. Ductility of the tensile zone in bent wooden beams strengthened with CFRP materials. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5451, 2020.

YUSOF, N. M. *et al.* Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types. **Journal of Wood Science**, v. 65, p. 1-11, 2019.

ZAMLI, A. O. A. *et al.* Flexural performance of strengthened Glued Laminated (GLULAM) timber beam using Glass Fibre-Reinforced Polymer (GFRP). **Green Infrastructure: Materials and Applications**, p. 75-92, 2022.

## CONCLUSÕES GERAIS

Com base nos resultados experimentais obtidos neste estudo, no qual se buscou avaliar a eficácia de reforços em madeira colada, pode-se concluir que:

- Com a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa, atendendo aos padrões normativos, foi possível confeccionar tanto elementos de madeira lamelada colada quanto madeira lamelada colada cruzada.
- A aplicação de reforços de fibras entre a última e a penúltima camada de madeira proporciona um acréscimo expressivo da resistência e rigidez dos elementos colados.
- A utilização de fibras de bambu em madeira lamelada colada mostrou-se uma técnica promissora para a melhoria das propriedades do produto.
- A fibra natural de juta apresentou resistência equiparável à fibra sintética Vectran, mostrando-se uma alternativa eficiente e econômica para uso como reforço de estruturas.
- Para trabalhos futuros, seria interessante demonstrar a influência das diferentes dimensões dos painéis reforçados com fibras, utilizando também diferentes adesivos.
- Além disso, são necessários estudos sobre a durabilidade desses materiais.