

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
Dissertação será disponibilizado
somente a partir
de 24/02/2024

JOÃO VÍTOR FELIPPE SILVA

Estudo numérico-experimental da resistência e rigidez ao *rolling shear* de elementos de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada)

Guaratinguetá - SP
2023

João Vítor Felipe Silva

Estudo numérico-experimental da resistência e rigidez ao *rolling shear* de elementos de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para fim de obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na Área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Guaratinguetá - SP
2023

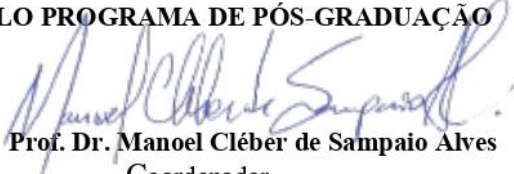
S586e	<p>Silva, João Vítor Felipe</p> <p>Estudo numérico-experimental da resistência e rigidez ao rolling shear de elementos de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada) / João Vítor Felipe Silva – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>230 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 162-175</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Molina</p> <p>1. Painéis de madeira. 2. Estruturas de madeira (Construção civil) 3. Trabalhos em madeira. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 624.011.1(043)</p>
-------	--

JOÃO VÍTOR FELIPPE SILVA

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador - USP

participou por videoconferência



Prof. Dr. NILSON TADEU MASCIA
UNICAMP

participou por videoconferência



Prof. Dr. ANTONIO ALVES DIAS
USP

participou por videoconferência



Prof. Dr. EDUARDO CHAHUD
UFMG

participou por videoconferência



Prof.ª. Dr.ª. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
UNESP

participou por videoconferência

FEVEREIRO de 2023

DADOS CURRICULARES

JOÃO VÍTOR FELIPPE SILVA

NASCIMENTO	01.06.1995 – LINS / SP
FILIAÇÃO	Orival Silva Junior Adriana Silvia Felipe Silva (<i>in memoriam</i>)
2011/2012	Curso Técnico Industrial Madeireiro - Nível Técnico ETEC Dr. Demétrio de Azevedo Júnior do Centro Paula Souza
2013/2017	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira - Nível de Bacharelado Universidade Estadual Paulista – Câmpus Experimental de Itapeva
2018/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Nível de Mestrado Faculdade de Engenharia e Ciências do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista
2019/2020	Curso de Graduação R2 em Matemática - Nível de Licenciatura Faculdades Integradas de Ariquemes - FIAR
2020/2023	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Nível de Doutorado Faculdade de Engenharia e Ciências do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

Dedico este trabalho aos meus avós paternos Orival Silva (*in memoriam*) e Therezinha Nogueira Silva e aos meus avós maternos Nazareno Felipe (*in memoriam*) e Aparecida Grosso Felipe (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de enfrentar o desafio da pós-graduação com saúde;

à minha mãe Adriana Silvia Felipe Silva (*in memoriam*) por sempre ter me incentivado a estudar e melhorar de vida honestamente;

ao meu pai Orival Silva Junior por estar presente me apoiando desde o início e me ensinando a ser cada dia melhor;

à minha irmã Maria Fernanda Felipe Silva pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho e principalmente pela parceria no dia-a-dia;

ao meu orientador Prof. Dr. Julio Cesar Molina pela paciência e muita força de vontade em me ajudar, especialmente pelas dificuldades encontradas durante a pandemia de COVID-19;

aos meus colegas de pós-graduação Karina Aparecida de Oliveira, Carolina Aparecida Barros Oliveira, Amauri da Silva Ribas Junior, Nádia Barros Gomes, Murilo Augusto Veríssimo Leite e Danilo Soares Galdino pelo auxílio nas discussões e nos ensaios referentes à este trabalho;

aos professores Prof.^a Dr.^a Elen Aparecida Martines Morales, Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna e Prof. Dr. Marcos Cesar de Moraes Pereira pela colaboração em vários dos experimentos realizados;

aos técnicos de laboratório que colaboraram para a realização deste trabalho – Juliano Rodrigo de Brito (*in memoriam*), Tiago Matos Andrés, Felipe Cunha Boschi Fagnani, Waldecir de Araujo, Jaime Galindo;

à empresa Vale do Cedro pela doação de madeira para a realização do presente trabalho;

à diretoria do Instituto de Ciência e Engenharia/UNESP-Itapeva e da EESC/USP, por permitir o uso dos laboratórios e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho;

à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), código de financiamento 001, pela concessão de bolsa de doutorado pelo período de 01/03/2020 a 31/05/2020;

à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de bolsa de doutorado, de 01/06/2020 a 28/02/2023, referente ao processo nº 2020/00555-6.

Obs.: As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001;
da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo nº 2020/00555-6.

“Ser feliz ao realizar a jornada pode ser muito melhor do que chegar ao destino com sucesso.”

Jordan Bernt Peterson

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo numérico e experimental da rigidez (G_{vt}) e da resistência (f_{vt}), associadas ao efeito de *rolling shear*, em elementos de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), fabricados com três camadas de madeiras de florestas plantadas do Brasil e colados com adesivo poliuretano bi-componente. Foram utilizadas quatro diferentes espécies de madeira (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* e *Acrocarpus fraxinifolius*) na fabricação dos painéis de MLCC. Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema com base na literatura nacional e internacional disponíveis. Paralelamente foi realizada a caracterização físico-mecânicas das madeiras e a análise da pressão de fabricação na resposta da qualidade de colagem da MLCC, considerando-se cinco níveis de pressão que variaram de 0,1 MPa a 1,3 MPa. Os valores de rigidez e resistência ao *rolling shear* foram determinadas experimentalmente por três métodos de ensaio: flexão de vigas, cisalhamento vertical em corpo de prova e cisalhamento inclinado, também em corpos de prova. Foi realizado também um estudo numérico com base no método dos elementos finitos (MEF) com uso do *software* ANSYS e um estudo analítico complementar para avaliação dos métodos de cálculo disponíveis na literatura: “gama”, “k” e de “Kreuzinger”. Como resultado, observou-se que a pressão de fabricação não teve efeito significativo na porcentagem de delaminação e nem na espessura da linha de cola da MLCC, ao contrário da resistência ao cisalhamento na linha de cola que teve desempenho superior para a pressão de 0,7 MPa. Os valores de G_{vt} obtidos pelos métodos de flexão em vigas e de cisalhamento inclinado em corpo de prova ficaram próximos entre si e ambos e foram maiores que os valores obtidos pelo método de cisalhamento vertical. Os três modelos de ensaio analisados apresentaram resultados semelhantes para f_{vt} . Os modos de falha obtidos experimentalmente foram compatíveis com as distribuições das tensões observadas nos modelos numéricos nas regiões mais solicitadas. As respostas dos métodos analíticos foram significativamente diferentes entre si, sendo o método gama o mais sensível aos valores das propriedades de resistência e de elasticidade da MLCC, como também o que apresentou os resultados mais próximos dos resultados experimentais. Como principais contribuições deste trabalho recomenda-se, para madeiras de reflorestamento brasileiras com $\rho_{12\%}$ entre 380 kg/m³ e 480 kg/m³: o modelo de corpo de prova de cisalhamento inclinado para determinação da rigidez e resistência ao *rolling shear* em elementos de MLCC; a pressão de fabricação de pelo menos 0,7 MPa; o método analítico “gama”, e limite de delaminação total de 10%.

PALAVRAS-CHAVE: *Cross Laminated Timber. Rolling Shear.* Resistência e rigidez. Qualidade de colagem. Simulação numérica. Adesivo poliuretano.

ABSTRACT

The aim of this work was the numerical and experimental study of rolling shear stiffness (G_{vt}) and strength (f_{vt}) of three layers Cross Laminated Timber (CLT) manufactured of wood from forests planted in Brazil and two-component polyurethane adhesive. Four wood species were used (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* and *Acrocarpus fraxinifolius*), for CLT manufacturing. Initially, a bibliographic survey was carried out on the subject based on national and international available literature. Along with that the physical-mechanical characterization of the woods pieces and the evaluation of the manufacturing pressure were carried out for five pressure levels ranging from 0.1 MPa to 1.3 MPa. Rolling shear stiffness and strength were determined by three test methods: beam bending, vertical shear test piece and inclined shears. A numerical study was also carried out based on the finite element method (FEM) using ANSYS software; it was also developed a complementary analytical study using the “gamma”, “k” and “Kreuzinger” design methods available on the literature. The manufacturing pressure had no significant effect on the delamination percentage and thickness glue line of the CLT; however the strength in the glue line had a superior performance at the pressure of 0.7 MPa. The G_{vt} values obtained by the beam bending and inclined shear specimens methods were higher than those obtained by the vertical shear method. The three analyzed test models results of f_{vt} were similar. The experimental failure modes were compatible with the stress distributions in the numerical models. The responses of the analytical methods differed significantly from each other, as the gamma method was the most sensitive to the stiffness and strength properties of CLT, which results were closer to the experimental ones. As main contributions of this work, it is recommended, for Brazilian reforestation woods with $\rho_{12\%}$ between 380 kg/m³ and 480 kg/m³: the inclined shear specimen model for determination of stiffness and strength to rolling shear for CLT elements; the manufacturing pressure of at least 0.7 MPa; the “gamma” analytical method, and a total delamination limit of 10%.

KEYWORDS: Cross Laminated Timber. Rolling Shear. Stiffness and Strength. Bonding Quality. Numerical simulation. Castor oil adhesive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Disposição das peças serradas de madeira no processo de montagem de um painel de MLCC.	25
Figura 2 – Volume de produção mundial de painéis MLCC.	27
Figura 3 – Edificação construída com MLCC de três camadas.	27
Figura 4 – Edifício Mjøstårnet, Noruega.	28
Figura 5 – Edifício Ascent em Milwaukee, EUA.	29
Figura 6 – Primeiro prédio em MLCC do Brasil durante sua construção.	29
Figura 7 - Total de publicações em bases de dados com o termo “ <i>Cross Laminated Timber</i> ”.	30
Figura 8 – Classes de MLCC em fase de desenvolvimento: a) MLCC com cavilhas; b) MLCC unido por encaixes sem adesivo; e c) MLCC curvo.	31
Figura 9 – Áreas com árvores plantadas por estado e por gênero em 2021 no Brasil.	33
Figura 10 - Total de publicações em bases de dados com os termos “ <i>reforestation</i> ” e “ <i>wood</i> ”.	33
Figura 11 – Madeira proveniente das espécies de: a) <i>Pinus elliottii</i> ; b) <i>Eucalyptus grandis</i> ; c) <i>Toona ciliata</i> ; e d) <i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	36
Figura 12 – Micrografia da linha de cola de painel de MLCC.	37
Figura 13 – Reação química da formação do poliuretano.	39
Figura 14 – Prensa à vácuo de membrana flexível.	43
Figura 15 – Prensa hidráulica de pratos rígidos.	44
Figura 16 – Etapas de fabricação de um painel de MLCC em escala industrial.	46
Figura 17 – Dispositivo metálico para o ensaio de cisalhamento da linha de cola.	51
Figura 18 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento das linhas de cola.	51
Figura 19 - Falha por <i>rolling shear</i> em um corpo de prova de MLCC submetido à flexão.	53
Figura 20 - Tipos falha em painéis de MLCC na camada perpendicular ao carregamento.	54
Figura 21 - Total de publicações em bases de dados com o termo “ <i>rolling shear</i> ”	55
Figura 22 - Elemento de MLCC biapoado com carregamento centrado no meio do vão.	57
Figura 23 – Comparação de uma seção “T” com a seção de um elemento de MLCC de três camadas para o dimensionamento.	59
Figura 24 – Sistema de vigas virtuais utilizadas no método de analogia por cisalhamento.	65
Figura 25 - Ensaio de flexão realizado em painel de MLCC.	67
Figura 26 - Modelo para determinação de parâmetros relacionados ao <i>rolling shear</i> em amostras de menores dimensões.	68

Figura 27 - Modelo experimental para determinação de parâmetros relacionados ao <i>rolling shear</i> em painéis OSB e compensados.	68
Figura 28 - Configuração de ensaio por pratos colados para determinação da rigidez e resistência ao <i>rolling shear</i> de madeiras maciças.	69
Figura 29 - Trinca na camada perpendicular ao carregamento pelo método multi escala, em MLCC sem colagem lateral. A unidade da escala é a probabilidade de falha do material.	73
Figura 30 - Distribuição das tensões de cisalhamento (plano xy) em elemento de MLCC de três camadas submetido à flexão de três pontos, tensões em Pa – <i>software</i> ANSYS.	75
Figura 31 - Tensões de cisalhamento e tensões normais no ensaio por pratos colados.	76
Figura 32 – Identificação dos índices das direções da madeira.	81
Figura 33 – Corpo de prova utilizados nos ensaios de: a) compressão paralela às fibras; b) Tração normal às fibras; e c) Módulo de elasticidade dinâmico.	82
Figura 34 – Aplainamento das tábuas: (a) Desempenadeira; (b) Desengrossadeira.	85
Figura 35 – Seccionamento das tábuas com uso de esquadrejadeira.	85
Figura 36 – Lamelas de madeira entabecadas para secagem natural.	86
Figura 37 – Aplicação de adesivo nas lamelas durante a produção do MLCC.	87
Figura 38 – Prensagem de quatro placas de MLCC simultaneamente para os ensaios preliminares.	88
Figura 39 – Pannel de MLCC para os ensaios preliminares: (a) Antes do acabamento; (b) Depois do acabamento.	89
Figura 40 – Corpo de prova para os ensaios de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola.	90
Figura 41 – Autoclave utilizada para realização dos ensaios de delaminação.	91
Figura 42 – Corpo de prova após o ensaio de delaminação.	91
Figura 43 – Arranjo do ensaio de cisalhamento na linha de cola em dispositivo metálico acoplado à máquina universal de ensaios EMIC.	92
Figura 44 – Tipos de falhas observadas no ensaio de cisalhamento na linha de cola.	93
Figura 45 – Superfície da região de colagem escaneada após o ensaio de cisalhamento na linha de cola.	94
Figura 46 – Divisão da Figura 45 em três espectros de cores: (a) Vermelho; (b) Verde; e (c) Azul, respectivamente.	94
Figura 47 – Limiarização pelo algoritmo de Otsu da região de colagem.	95
Figura 48 – Medições da espessura ao longo da linha de cola – Madeira de Cedro Indiano. ...	96
Figura 49 – Análise de microscopia ótica das linhas de cola em corpo de prova de dimensões	

80 mm x 80 mm x 50 mm.	96
Figura 50 – Detalhe do corpo de prova de flexão por vão variável durante o ensaio.	97
Figura 51 – Determinação do módulo de cisalhamento pelo coeficiente angular.	99
Figura 52 – Determinação experimental da rigidez ao <i>rolling shear</i> (G_{vt}) por cisalhamento vertical utilizando: (a) apenas da lamela externa; (b) deslocamento relativo das lamelas externas com transdutores LVDT em ambos os lados do corpo de prova.	101
Figura 53 – Carregamento das amostras de cisalhamento vertical até a ruptura realizadas no LaMEM/EESC/USP.	102
Figura 54 – Ensaio preliminar do corpo de prova de cisalhamento inclinado: (a) modo de ruptura experimental; (b) distribuição de tensões de von Mises em MPa; (c) distribuição de tensões de cisalhamento no plano yz em MPa; (d) distribuição de tensões normais no eixo y em MPa.	104
Figura 55 – Carregamento da amostra de cisalhamento inclinado sem as pernas alongadas durante o ensaio para determinação da rigidez ao <i>rolling shear</i>	105
Figura 56 – Corpos de prova de cisalhamento inclinado após a pintura de uma das faces (superfícies laterais).	107
Figura 57 – Obtenção dos deslocamentos por imagem (a) Posicionamento da câmera em relação ao corpo de prova; (b) Corpo de prova de cisalhamento inclinado com a face pintada; (c) Superfície do corpo de prova identificada pelo <i>software</i> GOM Correlate [®] ; (d) Indicação dos deslocamentos relativos na amostra pelo <i>software</i>	108
Figura 58 – Elemento finito SOLID45.	109
Figura 59 – Malhas dos modelos: (a) modelo de flexão por vão variável; (b) modelo de cisalhamento vertical (método 1); e (c) modelo de cisalhamento inclinado (modelo adicional).	110
Figura 60 – Exemplo da densidade de malha para o modelo de corpo de prova de flexão: (a) 10 mm; (b) 5 mm; e (c) 2,5 mm.	111
Figura 61 – Modelo constitutivo de curva bi-linear.	113
Figura 62 – Vinculações e carregamentos nos modelos numéricos: (A) viga com vão de 450 mm; (B) corpo de prova de cisalhamento vertical (método 1); (C) corpo de prova de cisalhamento inclinado (modelo adicional de corpo de prova).	114
Figura 63 – Verificação dos limites de delaminação total dos corpos de prova.	123
Figura 64 – Relação entre a resistência característica na linha de cola em função do nível de pressão na fabricação da MLCC.	125
Figura 65 – Porcentagem de falha na madeira na região de colagem, pelo <i>software</i> ImageJ.	126

Figura 66 – Curvas de validação dos modelos numéricos das vigas.	135
Figura 67 – Curvas de validação dos modelos numéricos dos corpos de prova de cisalhamento vertical.	135
Figura 68 – Curvas de validação dos modelos numéricos dos corpos de prova de cisalhamento inclinado.	136
Figura 69 – (a) Falha por <i>Rolling Shear</i> obtido no ensaio de flexão da viga (V1 – <i>E. grandis</i>); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.	138
Figura 70 – (a) Falha por compressão normal (na lamela superior)/ e tração paralela (na lamela inferior) obtido no ensaio de flexão da viga (V1 – <i>T. ciliata</i> - cedro australiano); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões normais no eixo z em MPa.	139
Figura 71 – (a) Falha por <i>rolling shear</i> obtido no ensaio do corpo de prova de cisalhamento vertical: (CP13 – <i>P. elliottii</i>); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.	141
Figura 72 – (a) Falha por esmagamento na base da lamela externa obtida no ensaio do corpo de prova de cisalhamento vertical: (CP2 – <i>T. ciliata</i>); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões normais no eixo z em MPa.	142
Figura 73 – Porcentagens dos modos de falha obtidos nos ensaios de <i>rolling shear</i> por cisalhamento vertical.	143
Figura 74 – (a) Falha por <i>rolling shear</i> obtido no ensaio do corpo de prova de cisalhamento inclinado: (CP11 – <i>E. grandis</i>); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.	144
Figura 75 – Curvas de validação comparativas para o estudo numérico complementar.	147
Figura 76 – Distribuição de tensões de von Mises em MPa dos modelos numéricos: (a) Ortotrópico; (b) Com isotropia transversal; (c) Com adoção de G_{vt} experimental.	148
Figura 77 – Distribuição de tensões de cisalhamento yz em MPa dos modelos numéricos: (a) Ortotrópico; (b) Com isotropia transversal; (c) Com adoção de G_{vt} experimental.	149
Figura 78 – Distribuição de tensões principais no eixo y em MPa dos modelos numéricos: (a) Ortotrópico; (b) Com isotropia transversal; (c) Com adoção de G_{vt} experimental.	150
Figura 79 – Configuração da viga para verificação dos modelos analíticos.	151
Figura 80 – Posição das lamelas em cada um dos modelos numéricos.	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Algumas propriedades das madeiras de floresta plantadas.....	36
Tabela 2: Procedimento de classificação de lamelas de <i>Pinus spp</i>	40
Tabela 3: Procedimento de classificação de lamelas de folhosas.....	41
Tabela 4: Quantidade de corpos de prova a extrair em função da largura do painel.....	50
Tabela 5: Dimensões dos corpos de prova dos ensaios realizados.....	83
Tabela 6: Nomenclatura para identificar os níveis de pressão nos ensaios preliminares.	84
Tabela 7: Resultados médios da caracterização física das espécies.	118
Tabela 8: Resultados da caracterização mecânica das espécies.	120
Tabela 9: Resultados da densidade da MLCC, em kg/m ³	121
Tabela 10: Resultados médios de delaminação total, em porcentagem.....	122
Tabela 11: Resultados da resistência média ao cisalhamento das linhas de cola, em MPa. ...	124
Tabela 12: Resultados da espessura das linhas de cola.	127
Tabela 13: Espessura das linhas de cola de acordo com a pressão de colagem, em µm.	127
Tabela 14: Resultados de rigidez G_{vt} da MLCC associada ao <i>rolling shear</i>	129
Tabela 15: Resultados de rigidez G_{vt} descritos na literatura por diferentes pesquisadores. ...	130
Tabela 16: Relações simplificadas dos valores médios de rigidezes G_{vt}	131
Tabela 17: Resultados de resistência f_{vt} da MLCC associada ao <i>rolling shear</i>	132
Tabela 18: Resultados de rigidez f_{vt} descritos na literatura por outros pesquisadores.....	133
Tabela 19: Relações simplificadas entre valores característicos de resistência.....	134
Tabela 20: Resultados analíticos para espécie de <i>P. elliottii</i>	153
Tabela 21: Resultados analíticos para espécie de <i>E. grandis</i>	154
Tabela 22: Resultados analíticos para espécie de <i>T. ciliata</i>	155
Tabela 23: Resultados analíticos para espécie de <i>A. fraxinifolius</i>	156
Tabela 24: Propriedades e relações entre propriedades adotadas para os modelos numéricos (Tabelas 25 a 32).....	178
Tabela 25: Propriedades adotadas para a viga de <i>P. elliottii</i> com vão livre de 450 milímetros.	179
Tabela 26: Propriedades adotadas para a viga de <i>E. grandis</i> com vão livre de 450 milímetros.	180
Tabela 27: Propriedades adotadas para a viga de <i>T. ciliata</i> (cedro australiano) com vão livre de 450 milímetros.....	181
Tabela 28: Propriedades adotadas para a viga de <i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano) com vão livre	

de 450 milímetros.	182
Tabela 29: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento vertical de <i>P. elliotii</i> e <i>E. grandis</i> , respectivamente.	183
Tabela 30: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento vertical de <i>T. ciliata</i> (cedro australiano) e <i>A. fraxinifolius</i> (cedo indiano), respectivamente.	184
Tabela 31: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado de <i>P. elliotii</i> e <i>E. grandis</i> , respectivamente.	185
Tabela 32: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado de <i>T. ciliata</i> (cedro australiano) e <i>A. fraxinifolius</i> (cedo indiano), respectivamente.	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
CE	Comissão de Estudo
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
DAP	Diâmetro na altura do peito (1,5 m do solo)
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
NBR	Norma Brasileira Registrada
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	ângulo de inclinação do corpo de prova
A_1	área da seção transversal da lamela superior
A_3	área da seção transversal da lamela inferior
a_1	distância do centroide da camada superior até a linha neutra da seção
a_3	distância do centroide da camada inferior até a linha neutra da seção
b_{lc}	largura da seção da linha de cola
CA	coeficiente de anisotropia
C_{total}	comprimento total das linhas de cola do corpo de prova
Del	delaminação total do corpo de prova
del_i	delaminação da linha de cola i
D_p	diâmetro da porca
$d_{10\%}$	deslocamento referente a força aplicada na amostra até 10% da força máxima estimada
$d_{40\%}$	deslocamento referente a força aplicada na amostra até 40% da força máxima estimada
$\Delta\varepsilon$	diferença média dos índices de retração
E_1	módulo de elasticidade na flexão das lamelas superiores
E_2	módulo de elasticidade na flexão perpendicular das lamelas intermediárias
E_3	módulo de elasticidade na flexão das lamelas inferiores
E_{c0}	módulo de elasticidade no sentido longitudinal às fibras
E_{c90}	módulo de elasticidade no sentido transversal às fibras
E_{c012}	módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras corrigido para 12% de umidade
E_{c0U}	módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras na umidade inicial
EIA	rigidez efetiva da viga A
EIB	rigidez efetiva da viga B
EI_{eff}	rigidez efetiva do elemento de MLCC
$E_{m,app}$	módulo de elasticidade aparente do corpo de prova
$E_{M,0}$	o módulo de elasticidade na flexão das lamelas
$E_{M,0,eff}$	rigidez efetiva à flexão do elemento de MLCC
$\varepsilon_{r,1}$	deformação devido a retração no sentido longitudinal
$\varepsilon_{r,2}$	deformação devido a retração no sentido radial
$\varepsilon_{r,3}$	deformação devido a retração no sentido tangencial
$F_{0,15\%}$	força no meio do vão com flecha igual a 0,15% do vão livre
$F_{0,3\%}$	força no meio do vão com flecha igual a 0,3% do vão livre
$F_{10\%}$	força aplicada na amostra até 10% da força máxima estimada
$F_{40\%}$	força aplicada na amostra até 40% da força máxima estimada
$F_{25\%}$	força equivalente a 25% da carga de ruptura estimada
$F_{50\%}$	força equivalente a 50% da carga de ruptura estimada
f_{c01}	resistência à compressão paralela às fibras da lamela superior
f_{c012}	resistência à compressão paralela às fibras corrigida para 12% de umidade
f_{c012m}	resistência à compressão paralela às fibras média à 12% de umidade
f_{cok}	resistência à compressão paralela às fibras característica
f_{c0U}	resistência à compressão paralela às fibras na umidade inicial
F_{max}	força máxima aplicada no corpo de prova antes de sua ruptura
$f_{M,0}$	resistência à flexão das lamelas
$f_{M,0,eff}$	resistência efetiva à flexão do elemento de MLCC
F_p	força exercida por cada porca na barra roscada
f_{i03}	resistência à tração paralela às fibras da lamela inferior
f_{i90}	resistência à tração perpendicular às fibras

f_{v0}	resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
f_{vt}	resistência ao cisalhamento por <i>rolling shear</i>
f_{vlc}	resistência ao cisalhamento na linha de cola
G_0	módulo de elasticidade transversal ou módulo cisalhante
G_1	módulo de cisalhamento da lamela superior
G_3	módulo de cisalhamento da lamela inferior
G_{vt}	rigidez ao cisalhamento por <i>rolling shear</i>
GA_{eff}	módulo de cisalhamento efetivo da viga B
h	altura total do elemento de MLCC
h_{lc}	altura da seção da linha de cola
h_1	altura da camada superior
h_2	altura da camada interna, que sofre o <i>rolling shear</i>
h_3	altura da camada inferior
I_1	momento de inércia da lamela superior
I_3	momento de inércia da lamela inferior
I_{eff}	momento de inércia do elemento de MLCC
k	fator de redução da resistência colada
K	fator de forma do coeficiente de cisalhamento
k_1	fator k de redução de rigidez
k_g	fator de rigidez de forma
L	comprimento do elemento de MLCC
L_0	distância entre apoios
M	momento fletor máximo aplicado no elemento de MLCC
MOE_d	módulo de elasticidade dinâmico na flexão “fora-do-plano”
P	força aplicada no meio do vão
ρ_{12}	densidade aparente a 12% de umidade
ρ_{bas}	densidade básica da amostra
ρ_U	densidade da amostra em sua umidade inicial
σ_{c01}	tensão de compressão na lamela superior
$\sigma_{max,eff}$	tensão máxima efetiva aplicada no elemento
σ_{t03}	tensão de tração na lamela inferior
T	torque aplicado em cada porca
τ_{vt2}	tensão de cisalhamento na camada interna
U	teor de umidade inicial
$u_{0,15\%}$	flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,3\%}$
$u_{0,3\%}$	flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,15\%}$
$u_{25\%}$	deslocamento devido a aplicação de $F_{25\%}$
$u_{50\%}$	deslocamento devido a aplicação de $F_{50\%}$
μ	coeficiente de Poisson
v	velocidade de aplicação de carga no meio do vão
V	força de corte atuante no elemento de MLCC
v_y	flecha no meio do vão para uma carga concentrada
w	largura do elemento de MLCC
W	módulo de resistência elástico da seção de MLCC
γ_1	coeficiente redutor de rigidez da lamela superior
γ_3	coeficiente redutor de rigidez da lamela inferior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2.2	JUSTIFICATIVA	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)	25
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS PARA MLCC	32
3.2.1	Madeiras de reflorestamento	32
3.2.2	Adesivos estruturais	37
3.3	PROCESSO PRODUTIVO DA MLCC	39
3.4	CONTROLE DA QUALIDADE DE COLAGEM	47
3.4.1	Norma europeia EN 14080 (2013)	47
3.4.2	Procedimentos do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022)	48
3.4.2.1	Ensaio de delaminação	48
3.4.2.2	Ensaio de cisalhamento da linha de cola	50
3.5	EFEITO <i>ROLLING SHEAR</i>	52
3.6	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ELEMENTO DE MLCC NA FLEXÃO	55
3.6.1	Método Gama	58
3.6.2	Método K	62
3.6.3	Método de analogia por cisalhamento (método de Kreuzinger)	65
3.7	ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MLCC	67
3.8	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTUDOS COM MLCC	70
3.9	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	77
4	MATERIAIS E MÉTODOS	80
4.1	MATERIAIS	80
4.2	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	80
4.3	ENSAIOS PRELIMINARES	84
4.3.1	Fabricação da MLCC	84
4.3.2	Ensaio de delaminação	89
4.3.3	Ensaio de cisalhamento das linhas de cola	92
4.3.4	Medição das espessuras das linhas de cola através de microscopia	95
4.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE <i>ROLLING SHEAR</i> PARA A MLCC	97
4.4.1	Ensaio de flexão com vão variável	97
4.4.2	Ensaio de cisalhamento vertical	99

4.4.3	Ensaio de cisalhamento inclinado.....	102
4.5	METODOLOGIA NUMÉRICA.....	108
4.5.1	Pré-processamento.....	109
4.5.1.1	Elemento SOLID45.....	109
4.5.1.2	Definição da malha do modelo.....	109
4.5.1.3	Estratégias de simulação adotadas.....	111
4.5.1.4	Vinculações e carregamentos.....	113
4.5.2	Estudo da influência das propriedades mecânicas nos modelos numéricos.....	115
4.5.3	Processamento e pós-processamento.....	116
4.6	METODOLOGIA ANALÍTICA.....	116
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	117
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
5.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS.....	118
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	121
5.2.1	Densidade da MLCC.....	121
5.2.2	Delaminação da MLCC.....	122
5.2.3	Resistência ao cisalhamento na linha de cola da MLCC.....	124
5.2.4	Variação da espessura da linha de cola da MLCC.....	126
5.3	RESULTADOS DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA AO <i>ROLLING SHEAR</i> PARA A MLCC	128
5.3.1	Resultados da rigidez associada ao efeito de <i>rolling shear</i>	128
5.3.2	Resultados da resistência associada ao efeito de <i>rolling shear</i>	131
5.4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	134
5.4.1	Influência das propriedades elásticas na resposta do modelo numérico.....	147
5.5	RESULTADOS ANALÍTICOS.....	151
6	CONCLUSÕES	159
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	160
	REFERÊNCIAS.....	162
	APÊNDICE A	176
	APÊNDICE B	177
	APÊNDICE C	187
	APÊNDICE D	209
	APÊNDICE E	222

1 INTRODUÇÃO

Cross-Laminated Timber (CLT), também conhecida no meio técnico como Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), é um compósito (ou produto industrializado) à base de madeira colada com adesivo estrutural, e é utilizado na construção civil como elemento de parede ou piso. O início de sua fabricação, em escala industrial, ocorreu nos anos 1980, na Europa, sendo este produto recentemente incorporado ao mercado brasileiro.

A MLCC é um material com elevado potencial de fabricação e uso no Brasil, devido ao grande volume de florestas plantadas no país. O seu uso como material estrutural vem alavancando, juntamente com a Madeira Lamelada Colada (MLC), maior utilização na construção civil nacional, especialmente por serem esses produtos com alto grau de industrialização.

O método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022), publicado em junho de 2022, descreve as metodologias de ensaios e de projetos de elementos de MLCC. No entanto, alguns métodos de caracterização da MLCC ainda precisam ser mais bem estudados e definidos, por ser este um produto novo no Brasil, para o qual as pesquisas estão se iniciando. Além disso, existe a necessidade de se obter um melhor conhecimento sobre o nível de pressão de colagem a ser considerado na confecção dos elementos de MLCC, como também sobre a resposta de combinações espécie/adesivo.

Dentre as propriedades da MLCC que precisam ser mais bem compreendidas, encontram-se aquelas relacionadas ao *rolling shear*. O *rolling shear* é um fenômeno que provoca a falha do elemento de MLCC por cisalhamento ou rolamento da camada cruzada de madeira quando o elemento é solicitado na flexão com força aplicada na direção perpendicular ao seu plano, sendo este considerado um fator limitante para projetos estruturais.

Além disso, como as camadas cruzadas dos painéis de MLCC são compostas por lamelas adjacentes com direções radial e tangencial não coincidentes, os modos de ruptura por *rolling shear* podem ocorrer ao longo do comprimento em função de diferentes tipos de solicitação presentes nesta região, as quais não são exatamente conhecidas. Nesse sentido, a avaliação numérica por MEF, da distribuição das tensões, presentes nas regiões sujeitas ao *rolling shear*, pode auxiliar na interpretação dos tipos de solicitação e dos modos de ruptura obtidos nos ensaios experimentais.

Neste contexto, este trabalho de pesquisa teve a finalidade de avaliar o comportamento estrutural de elementos de MLCC produzidos a partir de quatro diferentes espécies de

madeiras nacionais de florestas plantadas, com foco no efeito de *rolling shear*. Foi avaliada a qualidade de colagem das espécies de madeira a partir de cinco diferentes níveis de pressão na confecção dos elementos de MLCC e quatro diferentes combinações espécie adesivo. Também foram realizadas simulações numéricas, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), para a avaliação do comportamento do material e identificação dos principais modos de ruptura obtidos a partir da distribuição das tensões, presentes nos diferentes modelos de corpos de prova utilizados nas análises experimentais. Além disto, fez-se uma avaliação complementar dos métodos analíticos disponíveis na literatura para a avaliação de elementos de MLCC.

Buscou-se, sobretudo, a partir do desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa, dar subsídios para a literatura nacional sobre o assunto construções em MLCC, que atualmente encontra-se em fase de desenvolvimento no Brasil.

6 CONCLUSÕES

Os índices de retratibilidade diferiram significativamente entre as espécies de madeira. Além disso, os resultados de resistência e de rigidez obtidos a partir da caracterização mecânica das madeiras se apresentaram proporcionais às densidades aparentes, com exceção da resistência à tração normal às fibras que resultaram na mesma ordem de grandeza independente do tipo de madeira.

As porcentagens de delaminação total dos painéis de *P. elliottii* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano) ficaram abaixo do limite de 10% estipulado por Betti *et al.* (2016), indicando uma boa interação espécie/adetivo. As delaminações das espécies *E. grandis* e *T. ciliata* ficaram em torno de 20% e 34%, respectivamente. Além disso, não foi observada relação entre o coeficiente de anisotropia CA , a diferença média dos índices de retração $\Delta\varepsilon$ e a espessura da linha de cola (medida com uso de microscopia óptica) com a porcentagem de delaminação das amostras.

O limite de 10% de delaminação total, proposto por Betti *et al.* (2016), se mostrou mais representativo para a análise da delaminação total dos corpos de prova de elementos de MLCC, quando comparados com os limites de 4% e 6% propostos pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022) utilizado para MLC.

A pressão de colagem utilizada na fabricação dos elementos MLCC não exerceu influencia significativa nos valores das porcentagens de delaminação, ao contrário da resistência ao cisalhamento e espessura das linhas de cola, que apresentaram desempenho superior quando da utilização do valor de pressão de colagem igual a 0,7 MPa. Não foi observada relação entre a porcentagem de falha na madeira na linha de cola e a pressão de colagem dos painéis, assim como não houve compatibilidade entre os resultados obtidos pelo imageJ e as relações entre indicadas na EN 16351 (2015).

As madeiras de maior densidade (*A. fraxinifolius*-cedro indiano e *E. grandis*) apresentaram maiores valores de G_{vt} e f_{vt} em todos os métodos de ensaio, exceto no ensaio de cisalhamento vertical pelo “método 2”, onde não houve diferença significativa entre as espécies. Os valores obtidos de G_{vt} foram mais próximos daqueles observados na literatura pelo método de flexão e de cisalhamento inclinado, enquanto para os resultados de f_{vt} , os três métodos de ensaio geraram valores semelhantes em termos de ordem de grandeza.

Os modos de falha obtidos nos ensaios de *rolling shear* foram dependentes da espécie de madeira, sendo observada falha predominante por tensões normais na flexão do *T. ciliata* e falha por esmagamento no ensaio de cisalhamento vertical para ambos os cedros. Para os

ensaios de cisalhamento inclinado foram observadas apenas falha por *rolling shear* em todas as espécies de madeira caracterizadas.

Os modelos numéricos foram capazes de reproduzir os comportamentos dos corpos de prova ensaiados experimentalmente, inclusive pela análise das curvas força x deslocamento obtidas pelo método de correlação digital de imagem, no caso do cisalhamento inclinado. Além disto, o estudo numérico complementar permitiu concluir que ao se adotar na modelagem o valor de G_{vt} obtido experimentalmente no ensaio de *rolling shear*, se obtem tensões de cisalhamento na camada interna mais próximas dos valores esperados para f_{vt} .

A melhor estratégia de simulação numérica foi com a consideração de um modelo ortoróptico não linear e com utilização dos valores experimentais da rigidez ao *rolling shear* G_{vt} para abastecimento dos dados de entrada do modelo.

Dentre os três modelos de corpo de prova estudados para a determinação da rigidez e resistência ao *rolling shear*, o que apresentou os melhores resultados foi o corpo de prova de cisalhamento inclinado com as lamelas externas encurtadas, pois a falha por *rolling shear* ocorreu em todas as amostras (independente da espécie). Apesar dos valores dos coeficientes de variação terem sido superiores aos obtidos nos ensaios de flexão, este modelo de corpo de prova ainda foi mais interessante, devido ao seu tamanho e por requerer dispositivo de ensaio mais simples, especialmente em relação ao ensaio de cisalhamento vertical descrito na norma ABNT NBR 7190-7 (2022).

Cada método de cálculo analítico gerou uma resposta com base nas propriedades adotadas, sendo o método de Kreuzinger o mais conservador e o método Gama o mais sensível aos valores de G_{vt} e f_{vt} , sendo este último o mais recomendado para o cálculo de elementos de MLCC devido à menor diferença percentual quando comparado com os resultados experimentais. Porém, trata-se de um modelo simplificado que tem como base o comportamento de viga sem consideração da resistência e rigidez na direção transversal do painel.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- Desenvolver estudos numéricos para MLCC utilizando outros critérios de resistência ao invés do critério de resistência de Hill;
- Testar outros adesivos na fabricação de MLCC a fim de verificar a interação espécie/adesivo;

- Verificar o desempenho ao *rolling shear* de painéis MLCC, pelos três métodos de ensaio, com o uso de outros ângulos para as lamelas das camadas internas, por exemplo a 45° com relação as lamelas externas;
- Estudar a resistência e a rigidez de elementos de MLCC que considerem também a contribuição das lamelas posicionadas de forma transversal ao carregamento (comportamento de placa ao invés de viga).

REFERÊNCIAS

- AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; HIRSCH, M. Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. **Holzforschung**, Berlin, v. 70, n. 8, p.773-781, 1 jan. 2016.
- AICHER, S.; DILL-LANGER, G. Basic considerations to rolling shear modulus in wooden boards. **Otto-graf-journal**, Stuttgart, v. 11, p. 157-166, 2000.
- ALBINO, V. C. do S. *et al.* Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis compensados de *Toona ciliata* M. Roem. var. *australis*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 103-108, jan. 2011.
- ALMEIDA, A. C.; SILVA, R. D. Potencial de implantação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT no Brasil. *In: Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (ENANPARO)*, 6., 2021, Brasília, Brasil. **Anais [...]**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UnB, 2021.
- ALMEIDA, N. A. *et al.* Biodeterioração de produtos à base da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem. var. *australis*). **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 17-26, jan. 2012.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). **ANSI 320**: standard for performance-rated cross-laminated timber. Nova Iorque: APA, 2019. 26 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D198**: standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, PA: ASTM, 2015. 28 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D2718**: standard test methods for structural panels in planar shear (rolling shear). West Conshohocken, PA: ASTM, 2015. 6 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E1876-15**: standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken: ASTM International, 2015. 17p.
- AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, suplemento, 8 jan. 2018.
- ANSYS, versão Student 10.0 Documentation. ANSYS, Inc.
- APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **History of APA, plywood, and engineered wood**: 1905: an industry is born. 2020. Disponível em: <https://www.apawood.org/apas-history>. Acesso em: 15 maio 2020.
- ARAÚJO, S. O. *et al.* Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira - critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-2**: estruturas de madeira – critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-3**: estruturas de madeira – métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-6**: estruturas de madeira – métodos de ensaio para madeira lamelada colada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-7**: estruturas de madeira – métodos de ensaio para madeira lamelada colada cruzada estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ARAÚJO, A. B. *et al.* Reflorestamento como ação mitigadora das emissões de CO₂ em um o restaurante popular. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, João Pessoa, v. 5, n. 10, p.565-573, 2018.

BAJZECEROVA, V.; KOVAC, M.; KANOCZ, J. Structural analysis of cross-laminated timber slabs subjected to bending – state of the art. **Selected Scientific Papers - Journal Of Civil Engineering**, Košice, v. 13, n. 1, p. 133-140, 1 dez. 2018.

BERG, S. *et al.* Finite element analysis of bending stiffness for cross-laminated timber with varying board width. **Wood Material Science & Engineering**, Londres, v. 14, n. 6, p. 392-403, 7 mar. 2019.

BERTOLINI, M. S. *et al.* Painéis de partículas provenientes de rejeitos de *Pinus sp.* tratado com preservante CCA e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 339–346, 2014.

BERTOLINI, M. da S. *et al.* Emprego de resíduos de *Pinus sp.* tratado com CCB e resina PU de mamona na produção de chapas de partículas. In: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (org.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013.

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**, Guildford, v. 125, p. 952-963, 2016.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Nova Iorque: Van Nostrand, 1982.

BRANDON, D.; SJÖSTRÖM, J.; KAHL, F. **Post-Fire Rehabilitation of CLT**. Gotemburgo: Digitala Vetenskapliga Arkivet, 2021. 33 p.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal Of Wood And Wood Products**, Berlin, v. 74, n. 3, p.331-351, 19 jan. 2016.

- BRANDT, K. *et al.* Techno-economic analysis for manufacturing cross-laminated timber. **Bioresources**, Raleigh, v. 14, n. 4, p.7790-7804, 9 ago. 2019.
- BRAZ, R. L. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 4, p. 663-670, out. 2013.
- BRITISH STANDARD (BS). **EN 384**: structural timber — determination of characteristic values of mechanical properties and density. Londres: BSI Standards Publication, 2004.
- BRITISH STANDARD (BS). **EN 391**: glued laminated timber — delamination test of glue lines. Londres: BSI Standards Publication, 2001.
- BRITISH STANDARD (BS). **EN 392**: Glued laminated timber - Shear test of glue lines. Londres: BSI Standards Publication, 2013.
- BRITISH STANDARD (BS). **EN 408**: timber structures — structural timber and glued laminated timber: determination of some physical and mechanical properties. Londres: BSI Standards Publication, 2012.
- BRITISH STANDARD (BS). **EN 789**: timber structures - test methods: determination of mechanical properties of wood based panels. Londres: BSI Standards Publication, 2004.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **EN 14080**: timber structures – glued laminated timber and glued solid timber – requirements. Londres: BSI Standards Publication, 2013.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **EN 15425**: Adhesives - One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements. Londres: BSI Standards Publication, 2017.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **EN 16351**: timber structures – cross laminated timber – requirements, 2015.
- BUCK, D.; HAGMAN, O. Production and in-plane compression mechanics of alternatively angled layered cross-laminated timber. **Bioresources**, Raleigh, v. 13, n. 2, p.4029-4045, 18 abr. 2018.
- BUDYNAS, R. G.; NISBTT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda, 2016.
- BUFALINO, L. *et al.* Modelagem de propriedades físicas e mecânicas em painéis aglomerados de cedro australiano. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 243-249, 2012.
- BURATTA, C. C. **Adesão de peças de madeira de reflorestamento coladas com adesivo estrutural**. 2019. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.
- CAMPOS, C. I. de; GONÇALVES, R.; SILVA, S. A. M. da. Caracterização de painéis de fibra de média densidade (MDF) confeccionados com resina poliuretana mono-componente e

bicomponente derivada de óleo de mamona. *In*: LAHR, R. A. R. (org.). **Produtos derivados da madeira**. São Carlos: EESC/USP, 2008. cap. 2, p. 29-47.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA 0122**: structural glued-laminated timber. Toronto: CSA Group, 2016. 50 p.

CANGEMI, J. M. **Biodegradação de PU derivado do óleo de mamona**. 2006. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências - Química Analítica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

CARLSON, C. **Ascent skyscraper in Milwaukee becomes world's tallest timber building**. 2022. Disponível em: <https://www.dezeen.com/2022/08/03/ascent-tower-milwaukee-worlds-tallest-timber-building/#:~:text=Ascent%2C%20an%2086.6%2Dmetre%2D,the%20world's%20tallest%20timber%20building..> Acesso em: 02 nov. 2022.

CARVALHO, P. E. R. Espécies introduzidas alternativas às dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para reflorestamento no Centro-Sul do Brasil. *In*: GALVÃO, A. P. M. **Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais**. Colombo: Embrapa, 1998. p. 75-99.

CIFLORESTAS. **Cedro Australiano**: Utilização de produtos. Disponível em: http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=cedro_australiano. Acesso em: 18 maio 2020.

CROSSLAM. **CLT - CROSS LAMINATED TIMBER**. 2016. Disponível em: <http://crosslam.com.br/home/>. Acesso em: 01 nov. 2020.

CROVELLA, P.; SMITH, W.; BARTCZAK, J. Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 229, p. 116895, dez. 2019.

CRUZ, H.; CUSTÓDIO, J. Adhesives for on-site rehabilitation of timber structures. **Journal Of Adhesion Science And Technology**, Utrecht, v. 24, n. 8-10, p.1473-1499, jan. 2010

DIAS, A. **Madeira laminada colada cruzada (CLT)**: produção e desenvolvimento. 2018. Disponível em: <https://carpinteria.com.br/2018/04/08/madeira-laminada-cruzada-clt/>. Acesso em: 13 maio 2020.

DIAS, A. M. P. G. **Mechanical behavior of timber-concrete joints**. 2005. 293f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – University of Delft, Holanda, 2005.

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**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p.17-25, jan. 2017.

EHRHART, T. *et al.* Rolling shear properties of some European timber species with focus on cross laminated timber (CLT): test configuration and parameter study. *In*: International network on timber engineering research (INTER), 2., 2015, Sibenik, Croácia. **Proceedings** [...]. Sibenik, Croácia: ETH Zurich Research Collection, 2015. p. 1 - 15.

ESTEVEES, R. A.; MARTINS, J. H.; FERREIRA, W. R. Viabilidade do reflorestamento com eucalipto para produção de carvão. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 6, n. 1, p.796-805, jan. 2020.

FARIA, D. L. *et al.* Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, e014819, dez. 2019.

FERK, H. J. Sound insulation in lightweight constructions: Austrian experiences with solid wood panel buildings. *In: INTER-NOISE AND NOISE-CON CONGRESS*, 2006, Honolulu. **Proceedings** [...]. Honolulu: Institute Of Noise Control Engineering, 2006.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of European design principles to cross laminated timber. **Engineering Structures**, Oxford, v. 171, p.934-943, set. 2018.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B. de; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 41, n. 2, p. 160-160, jun. 2015.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2007.

FLORES, E. I. S. *et al.* Analysis of cross-laminated timber by computational homogenization and experimental validation. **Composite Structures**, Oxford, v. 121, p.386-394, 2015.

FLORES, E. I. S.; SAAVEDRA, K.; DAS, R. A computational approach for the modelling of rolling shear cracks in cross-laminated timber structures. *In: The 6th International Conference on Computational Methods*, 6., 2015, Auckland. **Proceedings** [...]. Auckland: 2015.

FLORES, E. I. S. *et al.* Multi-scale modelling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zone models. **International Journal Of Solids And Structures**, Nova Iorque, v. 81, p.219-232, mar. 2016.

FLORES, E. I. S. *et al.* Multi-scale structural mechanics for the modelling of cross-laminated timber buildings. *In: 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials / 11th National Congress on Experimental Mechanics*, 1., 2018, Porto, Portugal. **Proceedings** [...]. Porto, Portugal: INEGI/FEUP, 2018. p.353-358.

FLORES, E. S.; RIOSECO, C. A.; MATAMAL, A. V. Calibración del modelo de Hill modificado para el Pino Radiata Chileno en conexiones dell cizalle doble sometidas à compression paralela. *In: II Jornadas Chilenas de Estructuras de Madera*, Santiago, Chile. **Proceedings** [...]. Chile: 2007.

FOLLRICH, J. *et al.* Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat grain joints of defect-free softwood timber. **Wood Science and Technology**, Nova Iorque, v. 41, p.501-509, abr. 2007.

FORTUNA, B. *et al.* Tension strength capacity of finger joined beech lamellas. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 78, n. 5, p. 985-994, 2020.

FRANKE, S. Mechanical Properties of Beech CLT. *In: World Conference on Timber Engineering*, 14, 2016, Vienna, Austria. **Proceedings** [...]. Vienna, Austria: 2016.

FRANZONI, L. *et al.* Elastic behavior of Cross Laminated Timber and timber panels with regular gaps: thick-plate modeling and experimental validation. **Engineering Structures**, Oxford, v. 141, p.402-416, jun. 2017.

FRIHART, R. C. Wood Adhesion and Adhesives. *In: ROWELL, M. R. Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton: CRC Press, 2012. cap. 9.

FRITZ, E. The redwoods of California: largest of economic plants. **Economic Botany**, Bronx, v. 21, n. 1, p. 51-56, jan. 1967. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4252839>. Acesso em: 3 mar. 2020.

FUPEF. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná. **Laudo técnico para caracterização de madeiras do gênero *Eucalyptus***. Curitiba: UFPR, 16 dez. 2010. Disponível em: <https://silo.tips/download/fupez-2-coleta-de-dados>. Acesso em: 16 mar. 2021.

GAGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. *In: GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Cross-laminated timber handbook*. Québec: FPInnovations, 2011. Cap. 3.

GARLIPP, R. C. D. **Biomassa de florestas plantadas como fonte alternativa de energia na substituição do óleo combustível industrial no estado de São Paulo**. Piracicaba: IPEF, 1981. 14 p.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**. 2003. Universidade Federal de Uberlândia, 93 p. Notas de aula.

GILEWSKI, W.; GLEGOLA, A. Computational modelling of cross-laminated timber panels. *In: XXVIII R-S-P SEMINAR*, 28., 2019, Žilina. **Proceedings** [...]. Žilina: Iop Publishing, 2019.

GOMES, N. B. **Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013**. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

GONÇALEZ, J. C.; BRENDA, L. de C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F. da; VALE, A. T. do. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GUGGENBERGER, W.; MOOSBRUGGER, T. Mechanics of cross-laminated timber plates under uniaxial bending. *In: World Conference on Timber Engineering*, 9., 2006, Portland. **Proceedings** [...]. Portland: 2006.

GRANDMONT, J.-F.; YEH, B.; DAGENAIS, C. Cross-laminated timber manufacturing. *In: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. (Ed.). Canadian CLT Handbook*. 2019. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 2, p. 1-45.

HARCH, B. J. L. **The investigation into the optimisation of cross laminated timber panels for use in the Australia building industry**. 2010. 109 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – University Of Southern Queensland, Toowoomba, 2010.

HUANG, H.; GAO, Y.; CHANG, W.-S. Human-induced vibration of cross-laminated timber (CLT) floor under different boundary conditions. **Engineering Structures**, Oxford, v. 204, p. 1-23, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2021**. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores, 2022. 176 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16696-1: Timber structures — Cross laminated timber — Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme**. Genebra: International Organization for Standardization, 2019.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba, PR: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação do potencial de uso da madeira de *Acrocarpus fraxinifolius*, *Grevilea robusta*, *Melia azedarach* e *Toona ciliata* para produção de painéis OSB. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 277-284, jun. 2014.

JAUKE, G. **100,000 m³ cross-laminated timber factories as default?** 2019. Traduzida por Susanne Höfler. Disponível em: https://www.timber-online.net/wood_products/2019/11/100000-m3-cross-laminated-timber-factories-as-default.html. Acesso em: 12 maio 2020.

JELEČ, M.; VAREVAC, D.; RAJČIĆ, V. Cross-laminated timber (CLT): a state of the art report. **Journal Of The Croatian Association Of Civil Engineers**, Zagreb, v. 70, n. 02, p.75-95, mar. 2018.

JOSÉ, F. J. **Chapa de partículas homogêneas de bambu aglomeradas com resina poliuretana bi-componente à base de óleo de mamona**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. Introduction to cross-laminated timber. *In*: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. (Ed.). **Canadian CLT Handbook**. 2019. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 1, p. 1-35.

KEHL. **Aglomerantes**. São Carlos: Kehl Ind e Com Ltda, 2011. 5 p. Disponível em: https://www.kehl.ind.br/catalogos/KEHL_-_Aglomerante_1.pdf. Acesso em: 14 abr. 2020.

KOHNKE, P. SOLID45 – 3D. *In*: ANSYS Inc. **ANSYS Theory reference**. 11th ed. Southpoint: SAS IP Inc., 1999.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology: wood based materials**. Berlin: Springer-Verlag, v. 2. p. 86-88, 1975.

LAM, F.; LI, Y.; LI, M. Torque loading tests on the rolling shear strength of cross-laminated timber. **Journal Of Wood Science**, Tokio, v. 62, n. 5, p.407-415, 28 jun. 2016.

- LI, Y. **Duration-of-load and size effects on the rolling shear strength of cross laminated timber**. 2015. 268 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – University of British Columbia, Vancouver, 2015.
- LOGSDON, N. B. Adaptação do diagrama de Kollmann às folhosas brasileiras. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v. 9, n.2, p.269-280, ago. 2005.
- MADEIRA REAL. **Cedro australiano**. 2018. Disponível em: <https://www.madeirarealserraria.com.br/cedro-australiano.html>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- MARCH, H. W. Bending of a centrally loaded rectangular strip of plywood. **Physics**, Nova Iorque, v. 7, n. 1, p.32-41, jan. 1936.
- MARTÍNEZ, P. E. *et al.* Cultivo intercalado de cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight) y su efecto sobre el contenido de materia orgánica en el suelo. **Revista Científica Udo Agrícola**, Cumana, v. 6, n. 1, p. 109-113, 2006.
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J. E. *et al.* Finite element analysis of composite laminated timber. In: 2nd International Research Conference On Sustainable Energy, Engineering, Materials And Environment, 2., 2018, Mieres. **Proceedings** [...]. Mieres: MDPI, 2018.
- MASCIA, N. T. Análise de tensões e deslocamentos em peças cilíndricas de madeira devido à retração. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 32-46, 2015.
- MASCIA, N. T.; SIMONI, R. A. Análise de critérios de resistência aplicados à madeira. In: XIII Encontro Brasileiro de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Vitória, Espírito Santo. **Anais** [...]. Vitória: 2012.
- MASSETTO, G. **Brasil terá fábrica de madeira engenheirada, usada na construção de prédios**: Material, considerado o futuro da construção civil, já está sendo utilizado pela empresa Amata na estrutura de dois prédios em São Paulo. 2020. Disponível em: <https://blogs.canalrural.com.br/florestasa/2020/02/19/fabrica-para-producao-de-madeira-engenheirada/>. Acesso em: 13 maio 2020.
- MELO, R. R. *et al.* Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* engelm. com diferentes idades. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 1, p.83-92, maio 2013.
- MENDES, G. M. P. **Caraterização de proveniências de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* para instalação de ensaios de proveniências**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior Agrária Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2017.
- MISHRA, G. *et al.* Global Scenario of *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.: a future tree of agro forestry. **International Letters Of Natural Sciences**, Bach, v. 3, p. 25-29, 2015.
- MOELVEN. **Mjøstårnet**: Standing 85,4 meters tall, Mjøstårnet is officially the world's tallest timber building. 2020. Disponível em: <https://www.moelven.com/mjostarnet/>. Acesso em: 15 maio 2020.

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

MOOSBRUGGER, T.; GUGGENBERGER, W.; BOGENSPERGER, T. Cross-laminated timber wall segments under homogeneous shear: with and without openings. *In: World Conference on Timber Engineering*, 9., 2006, Portland. **Proceedings** [...]. Portland: 2006.

MUSZYNSKI, L. *et al.* Insights into the Global Cross-Laminated Timber Industry. **Bioproducts Business**, Monona, v. 2, n. 8, p.77-92, 10 dez. 2017.

NAKAYAMA, F. T.; SILVA, B. E. da; CURI, A. S. Avaliação de 12 espécies de eucalipto para reflorestamento para as condições edafoclimáticas da região da Alta Paulista. **Revista Científica ANAP Brasil**, Tupã, v. 10, n. 19, p.27-35, 17 dez. 2017.

NASCIMENTO, M. F. *et al.* Painéis OSB fabricados com madeiras da caatinga do nordeste do Brasil. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 15, n. 1, p.41-48, mar. 2015.

NIE, X. **Failure mechanism of rolling shear failure in cross-laminated timber**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – University of British Columbia, Vancouver, 2015.

NICOLAS, E. A. **Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira**. 2006. 238 f. Tese (Doutorado em estruturas) – Universidade de Campinas, Campinas, 2006.

O'CEALLAIGH, C.; SIKORA, K.; HARTE, A. The Influence of Panel Lay-Up on the Characteristic Bending and Rolling Shear Strength of CLT. **Buildings**, Basel, v. 8, n. 9, p. 114, 2018.

OLIVEIRA, C. A. B. *et al.* Influence of indian cedar particle pretreatments on cement-wood composite properties. **Bioresources**, Raleigh, v. 15, n. 1, p.1656-1664, 21 jan. 2020.

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

OLIVEIRA, G. L.; OLIVEIRA, F. L. de. As interferências do processo produtivo na concepção de projeto de edifícios em CLT – Cross Laminated Timber. *In: 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos*, 1., 2017, Campinas-SP. **Anais** [...]. Campinas-SP: ANTAC, 2017.

OLIVEIRA, K. A.; OLIVEIRA, C. A. B.; MOLINA, J. C. Physical, chemical and mechanical characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* cultivated in São Paulo. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 24, n. 9, p.1-8, 2022.

OLIVEIRA, R. G. E. de *et al.* Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020.

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

PACE, M. **Sviluppo di bioceramici cellulari da polimeri preceramici con micro e nano fillers**. 2012. 144 f. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais) - Università Degli Studi di Padova, Padova, 2012.

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

PARTHIBAN, K.T. *et al.* Wood and plywood quality characterization of new and alternate species amenable for composite wood production. **Wood And Fiber Science**, Madison, v. 51, n. 4, p. 1-8, 2019.

PASSARELI, R. N. **Cross laminated timber**: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PEREIRA, M. C. de M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

PEREIRA, M. C. de M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT**: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas. 2019. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

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

PINATI, E. *et al.* Painéis compensados sarrafeados produzidos com *Pinus oocarpa*, *Castilla ulei* e *Acrocarpus fraxinifolius*. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, Pelotas, v. 9, n. 3, p. 199-208, 11 out. 2018.

POPOVSKI, M. *et al.* Structural design of cross-laminated timber elements. *In*: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. (Ed.). **Canadian CLT Handbook**. 2019. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 3, p. 1-62.

PRADO, C. de A. *et al.* **Características Físicas e Químicas da Madeira de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.** 14ª ed. Colombo: Embrapa, 2003. 14 p.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

REIS, A. H. S. *et al.* Physical-mechanical properties of plywood produced with *Acrocarpus fraxinifolius* and *Pinus oocarpa*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 26, n. 4, e20170157, 2019.

RIBEIRO, A. de O. *et al.* Retratibilidade da madeira de *Toona ciliata* M. Roem proveniente de três municípios do sul de Minas Gerais. **CERNE**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 351-361, Set. 2014 .

RIBEIRO, A. de O.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Características das dimensões das fibras e análise do ângulo microfibrilar de *Toona ciliata* cultivada em diferentes localidades. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 47-56, jan. 2011.

RICKEN, P. *et al.* **Crescimento diamétrico de povoamento de *Toona ciliata* var. *australis* em Adrianópolis, PR**. 285. Colombo: Embrapa, 2011. 4 p.

SÁ, V. A. de *et al.* Manufatura de painéis cimento-madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) de diferentes procedências e idade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 559-566, dez. 2010.

SANDOLI, A.; CALDERONI, B. The Rolling Shear Influence on the Out-of-Plane Behavior of CLT Panels: a comparative analysis. **Buildings**, Basel, v. 10, n. 3, p. 42, mar. 2020.

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

SCOPUS. **Base de dados bibliográficas**. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 15 nov. 2022.

SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, 2017.

SELLERS, T. Wood adhesive innovations and applications in North America. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 6, p. 12–22, 2001.

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

SERRANO, L. J. P. **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na cecânica de vigas laminadas coladas**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, Dez. 2012.

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**, Philadelphia, v. 92, n. 7-9, p.758-777, 30 mar. 2016.

SILVA, J. V. F. **Desempenho físico-mecânico de painéis OSSB (Oriented Structural Straw Board) produzidos com palha de soja e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona**. 2020. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

SILVA, S. A. M. da; AZAMBUJA, M. dos A.; SEGANTINI, A. A. da S. Avaliação da densidade aparente de chapas de madeira aglomerada confeccionadas com partículas de madeira tropical e poliuretano derivado de óleo de mamona. *In*: LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. (org.). **Painéis de partículas de madeira e de materiais lignocelulósicos**. São Carlos: EESC/USP, 2013. p. 91-110.

SKYSCRAPPER CITY. **São Paulo (SP)**. Elaborado por pereira951. Disponível em: <https://www.skyscrapercity.com/threads/s%C3%A3o-paulo-sp.987415/page-2607>. Acesso em: 27 maio 2020.

SMITH, R. E. Interlocking cross-laminated timber: alternative use of waste wood in design and construction. *In*: BTES Conference 2011 – convergence and confluence, 2011, Toronto, Canada. **Proceedings** [...].Toronto, Canada: 2011.

SMITH, D.; LARSON, K. **Washington Mill Survey 2016**. 24. Olympia: Washington State Dept Of Natural Resources, 2017. 88 p.

SOUZA, C. L. *et al.* Balanço de carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**, Montes Claros, v. 11, p.1-8, 2019.

STECHEER, G. *et al.* Curved cross-laminated timber elements. *In*: World Conference on Timber Engineering, 14, 2016, Vienna, Austria. **Proceedings** [...]. Vienna, Austria: 2016.

TANG, Y. *et al.* A formaldehyde free flame retardant wood particleboard system based on two-component polyurethane adhesive. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 108, n. 2, p.1216-1222, 2008.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. Avaliação de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 20, n. 3, p. 49-58, set. 2014.

TRIANOSKI, R. *et al.* Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus* spp. para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 343-350, set. 2011.

TURESSON, J. *et al.* Shear modulus analysis of cross-laminated timber using picture frame tests and finite element simulations. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 53, n. 4, ago. 2020.

VALE DO CEDRO. **O Cedro Indiano é uma madeira reflorestada de crescimento rápido, opção sustentável e protetiva de nossas florestas nativas**. Ribeirão Branco, 12 dez. 2019. Facebook: @Fazendavaledocedro. Disponível em: <https://www.facebook.com/Fazendavaledocedro/posts/1241850606023081/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

VÁZQUEZ, C. *et al.* Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and Comparison with static compression and bending methods. **Wood Science Technology**, Berlin, v. 49, p. 607-622, 2015.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials. Forest Products Laboratory. *In: Forest Products Laboratory. Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison: Forest Products Laboratory, 1999.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de cross laminated timber submetidas à flexão**. 2020. 249 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

VILGUTS, A.; SERDJUKS, D.; PAKRASTINS, L. Design methods of elements from cross-laminated timber subjected to flexure. **Procedia Engineering**, São Petersburgo, v. 117, p. 10-19, 2015.

WALSH, F. J.; WATTS, R. L. **Composite lumber**. US nº 1,465,383, 21 ago. 1923. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/e1/69/852461675334db/US1465383.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

WANG, B.; PIRVU, C.; LUM, C. Manufacturing: Cross-laminated timber manufacturing. *In: GAGNON, S.; PIRVU, C. (Ed.). Cross-laminated timber handbook*. Québec: FPInnovations, 2011. Cap. 2.

WANG, H. *et al.* Walnut Meal as Formaldehyde-free Adhesive for Plywood Panels. **Bioresources**, Raleigh, v. 13, n. 2, p.4301-4309, 2018a.

WANG, M.; SONG, X.; GU, X. Three-Dimensional Combined Elastic-Plastic and Damage Model for Nonlinear Analysis of Wood. **Journal Of Structural Engineering**, Nova Iorque, v. 144, n. 8, 04018103, ago. 2018.

WANG, Z. *et al.* Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 151, p.172-177, out. 2017.

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**, Concepcion, v. 20, n. 3, p.469-478, 2018b.

WEB OF SCIENCE. **Base de dados bibliográficas**. Disponível em: <http://login.webofknowledge.com>. Acesso em: 15 nov. 2022.

YUSOH, A. S. *et al.* Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 273, p. 121721, mar. 2021.

ZHOU, Q. *et al.* Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction And Building Materials**, Guildford, v. 64, p.379-386, ago. 2014.