

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

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

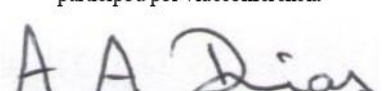
Orientador - USP

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 entabicadas 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
$\Delta\epsilon$	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
EI_A	rigidez efetiva da viga A
EI_B	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
$\epsilon_{r,1}$	deformação devido a retração no sentido longitudinal
$\epsilon_{r,2}$	deformação devido a retração no sentido radial
$\epsilon_{r,3}$	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.

2 OBJETIVOS

Realizar a análise numérica e experimental sobre a resistência e da rigidez, relativas ao efeito de *rolling shear*, em elementos de Madeira Lamelada Colada Cruzada, fabricados com madeiras de florestas plantadas brasileiras, e avaliar sua qualidade de colagem.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar a:

- Caracterização física e mecânica das quatro espécies de madeiras de reflorestamento (*Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* e *Acrocarpus fraxinifolius*) utilizadas na fabricação dos elementos de MLCC;
- Avaliação do efeito da pressão de fabricação da MLCC na qualidade de colagem, para determinação do nível de pressão que promove melhor união os elementos produzidos;
- Determinação experimental da rigidez (G_{vt}) e da resistência (f_{vt}), associada ao *rolling shear*, a partir de ensaios de flexão por vão variável e em corpos prova de cisalhamento direto (vertical e inclinado);
- Comparação estatística dos resultados experimentais obtidos para (G_{vt}) e (f_{vt});
- Simulação numérica, com base no MEF, do comportamento mecânico dos corpos de prova de flexão e de cisalhamento, para avaliação da distribuição das tensões e melhor entendimento dos modos de ruptura obtidos nos testes experimentais;
- Avaliação das equações analíticas propostas pelos métodos Gama, K e Kreuzinger aplicadas aos resultados experimentais obtidos.

2.2 JUSTIFICATIVA

Os produtos industrializados estruturais de madeira, em especial, a MLC e a MLCC, vêm cada vez mais sendo utilizados no Brasil e a pesquisa científica nacional sobre o tema MLCC ainda se encontra em fase de desenvolvimento no país. Nesse sentido, são necessários estudos teóricos, numéricos e experimentais para uma adequada análise do seu comportamento e eficiência estrutural.

Por outro lado, existem poucos estudos no Brasil avaliando os métodos de ensaio propostos pelo documento brasileiro ABNT NBR 7190-7 (2022), para elementos de MLCC, como também não existe uma abordagem de cálculo universalmente aceita pelos pesquisadores, projetistas, e fabricantes de MLCC. Os métodos de dimensionamento vêm se desenvolvendo baseando-se nas teorias de vigas, não incorporando a resistência e rigidez na direção transversal do painel.

Também não se conhece exatamente o verdadeiro comportamento dos parâmetros de resistência e de rigidez relativos ao fenômeno *rolling shear* presente nos elementos de MLCC e não existe um modelo definido de corpo de prova para determinação dos parâmetros de resistência e de rigidez relacionados ao *rolling shear*.

Além disso, ainda existe a necessidade de se conhecer quais são as melhores combinações espécie de madeira/adesivo, para a confecção dos elementos de MLCC, tendo-se em vista a grande disponibilidade de madeiras de florestas plantadas no Brasil e os diferentes tipos de adesivos estruturais (poliuretanos e à base de formaldeído) disponíveis no mercado brasileiro.

Também não se conhece exatamente os valores de pressão de colagem a serem utilizados na confecção dos elementos de MLCC considerando os diferentes tipos de madeiras brasileiras possíveis para a confecção do produto.

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos ou em desenvolvimento no país, até o momento, têm cunho experimental, e utilizam madeiras de pinus (coníferas), sendo também necessário o desenvolvimento de estudos numéricos para complementar o rol de informações sobre o comportamento da MLCC.

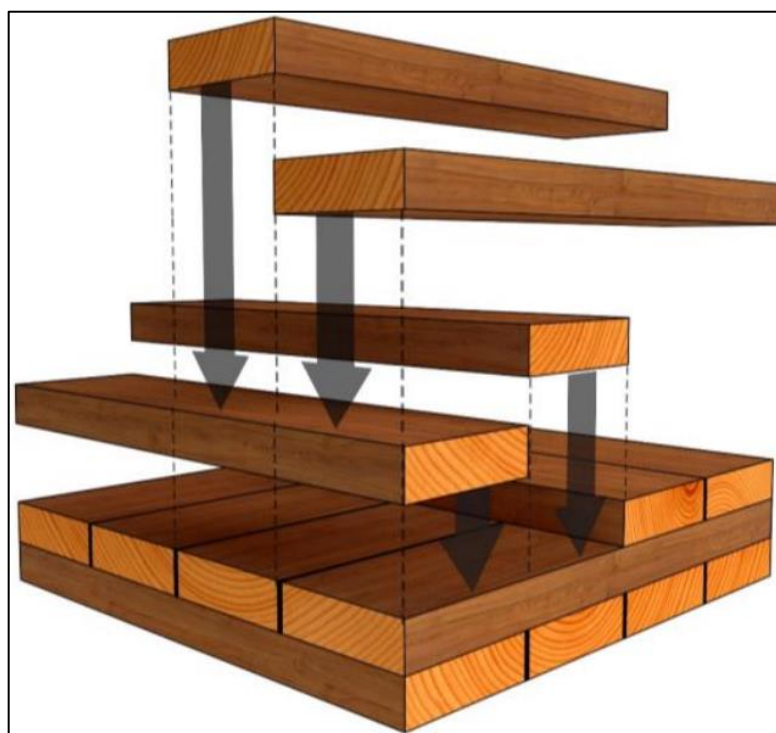
Esse trabalho é o primeiro de uma série de outros trabalhos a serem desenvolvidos no Instituto de Ciências e Engenharia da UNESP de Itapeva junto ao Programa de Pós Graduação em Engenharia da FEG/UNESP para a implantação do tema “Madeira Lamelada Colada Cruzada” como uma das linhas de pesquisa da unidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)

Os painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (sigla MLCC), também conhecidos no meio técnico pela sigla CLT (em inglês *Cross Laminated Timber*), são elementos de alta resistência e rigidez, confeccionados em forma de placa, fabricados em camadas (usualmente em números ímpares: 3, 5 ou 7), sendo cada camada composta por lamelas adjacentes com alternância de 90° (JELEČ; VAREVAC; RAJČIĆ, 2018; BRANDT *et al.*, 2019), como indicado na Figura 1.

Figura 1 - Disposição das peças serradas de madeira no processo de montagem de um painel de MLCC.



Fonte: Adaptado de Buck e Hagman (2018).

Os painéis de MLCC têm comprimentos entre 3 m e 18 m e espessuras variando de 57 mm a 400 mm, limites estes impostos de acordo com o fabricante (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017). Karacabeyli e Gagnon (2019) afirmam que as lamelas podem ter de 16 mm a 45 mm de espessura, as quais dependem de especificações de projeto.

A MLCC tem menor variação de suas propriedades em comparação com a madeira maciça e tem como característica baixa massa específica associada à alta rigidez e resistência à compressão, à flexão e ao cisalhamento (FLORES *et al.*, 2018; VILELA, 2020).

A interação entre as várias camadas da MLCC promove a homogeneização das suas propriedades mecânicas, reduzindo o efeito de rachaduras, trincas, desvios de grã, influência dos nós e variação da largura dos anéis de crescimento, de forma que a rigidez do produto final se compara às placas de concreto armado com ampla possibilidade de utilização no mercado da construção civil (PEREIRA, 2014; LI, 2015; BUCK e HAGMAN, 2018).

Walsh e Watts (1923) foram os primeiros a reportar um método de fabricação de um compósito que faz uso de lamelas de madeira coladas em camadas cruzadas, sendo indicado por eles o uso de lamelas de coníferas, com 6,5 mm de espessura, aderidas com material cimentício ou equivalente, e prensadas. Diferentemente da MLCC produzida atualmente, os autores descreveram o uso de pressões variando entre 4,79 MPa a 10,5 MPa para promover não apenas a adesão das camadas, mas também a redução do volume da madeira através da densificação e distorção das paredes das fibras.

Contudo, foi apenas na década de 1990, na Europa (Áustria, Alemanha e Suíça) que se desenvolveu a MLCC como é fabricada atualmente, sendo que a produção em larga escala deste produto demorou cerca de 20 anos para ocorrer (CROSSLAM, 2016; MUSZYNSKI *et al.*, 2017). A MLCC ganhou atenção no século XXI, devido a sua baixa pegada de carbono, renovabilidade, baixo peso em comparação com métodos de construção tradicionais e curto período de construção (NIE, 2015).

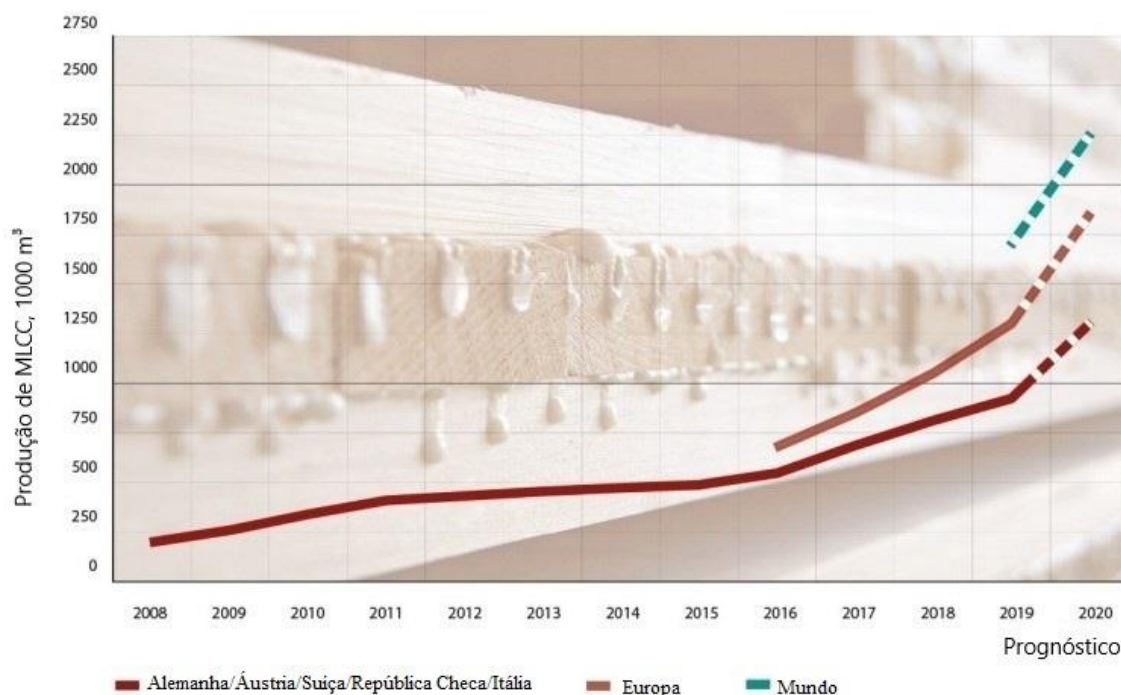
De acordo com Jauk (2019), o volume de produção mundial de MLCC pode chegar a dois milhões de metros cúbicos por ano, com fábricas com capacidade de 15.000 a 100.000 m³/ano. Os gráficos de crescimento de produção desde 2008 da MLCC são apresentados na Figura 2. Vale mencionar que mais da metade desse volume foi fabricado pela Alemanha, Áustria, Suíça, República Checa e Itália (indicadas pela linha vermelha).

Atualmente existem duas empresas que fabricam MLCC, uma localizada em Suzano - SP (CROSSLAM, 2016) e outra em Curitiba-PR, com capacidade de 100.000 m³/ano, da empresa Urbem.

Arquitetos e engenheiros estão cada vez mais conscientes do uso da MLCC, especialmente por ser um material estrutural de construção ambientalmente sustentável (BRANDT *et al.* 2019). Smith e Larson (2017) afirmam que são armazenadas aproximadamente 1,3 toneladas de CO₂ para cada metro cúbico de MLCC produzida,

enquanto na produção deste mesmo volume de concreto são liberadas 1,3 toneladas de CO₂ no meio ambiente.

Figura 2 – Volume de produção mundial de painéis MLCC.



Fonte: Adaptado de Jauk (2019).

De acordo com ANSI 320 (2019) e Flores *et al.* (2018), os painéis de MLCC são usados geralmente com dimensões modulares (Figura 3), desde que possuam o desempenho mecânico mínimo para tais aplicações. Para Oliveira e Oliveira (2017) e Massetto (2020), o campo de aplicação dos sistemas construtivos que se utiliza deste material abrange praticamente todo o setor de edificações, ou seja, para a construção de residências, escolas, museus, hospitais e prédios comerciais e residenciais.

Figura 3 – Edificação construída com MLCC de três camadas.



Fonte: Adaptado de Smith e Larson (2017).

Segundo Smith e Larson (2017), a MLCC é um dos materiais de construção mais resistentes disponível, podendo, inclusive, ser utilizados para construção de edifícios, poços de elevadores e salas seguras para regiões atingidas por furacões.

As principais vantagens da construção com a MLCC são sua fácil manipulação durante a construção e o alto nível de pré-fabricação, além do fato do material ter bom isolamento térmico e acústico e bom desempenho frente aos incêndios, abalos sísmicos e explosões (FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; SMITH; LARSON, 2017; KARACABEYLI; GAGNON, 2019). Os autores incluem o fato de ser um material mais leve, em relação ao concreto e à alvenaria, sendo necessários equipamentos menos robustos na obra além de fundações menores.

A maior edificação europeia atualmente construída com MLCC se encontra na Noruega, com 18 andares e 85,4 metros (FIGURA 4). Já no continente americano a maior edificação fica nos Estados Unidos, finalizada em 2022, com 25 andares e 86,6 metros de altura (FIGURA 5).

A fabricação da MLCC no Brasil iniciou-se em 2012, sendo que sua aplicação tem se voltado para a construção de residências unifamiliares, com um total de 31 residências produzidas até 2018 (OLIVEIRA, 2018). Em 2019 se iniciou a construção do primeiro prédio no Brasil feito com MLCC, na cidade de São Paulo, pela empresa REWOOD® associada a outras empresas brasileiras do setor, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 4 – Edifício Mjøstårnet, Noruega.



Fonte: Adaptado de Moelven (2020).

Figura 5 – Edifício Ascent em Milwaukee, EUA.



Fonte: Adaptado de Carlson (2022).

Figura 6 – Primeiro prédio em MLCC do Brasil durante sua construção.



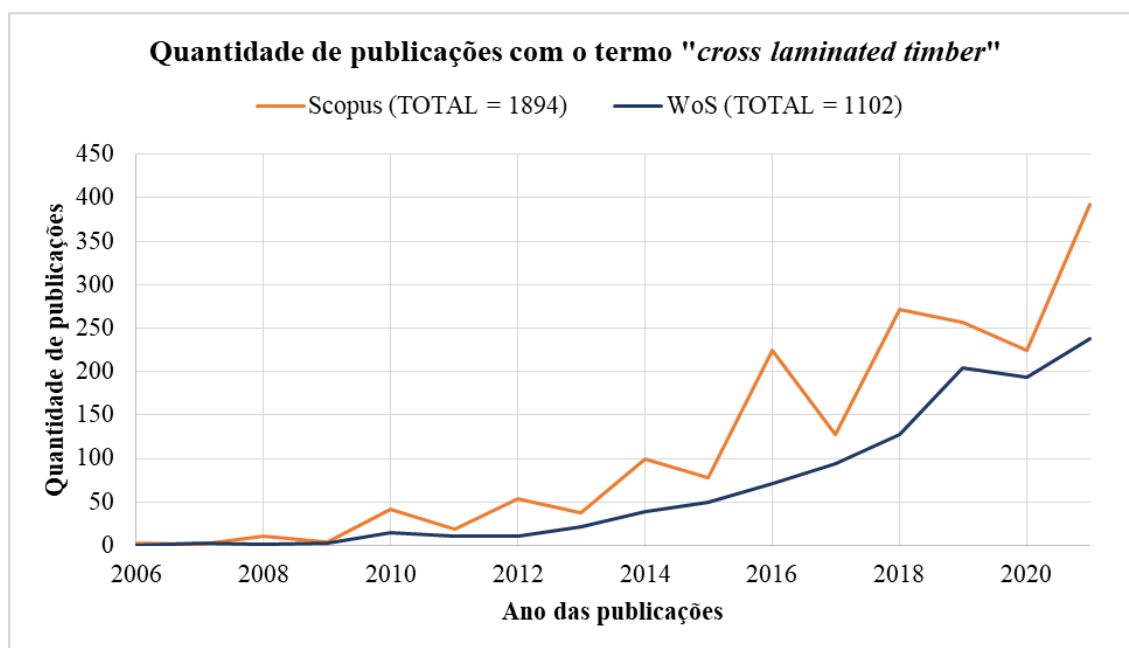
Fonte: Adaptado de Skyscraper City (2020).

Apesar de a MLCC ter seu uso altamente difundido em países da Europa e da América do Norte, no Brasil ainda se encontra em fase de desenvolvimento (ALMEIDA; SILVA,

2021). Assim, se faz necessária a realização de estudos que envolvam este compósito, especialmente por se tratar de um material de construção relativamente novo (NIE, 2015). Além disso, existe no Brasil a necessidade de mais recomendações normativas específicas sobre MLCC, além da ABNT NBR 7190-7 (2022), para orientar os projetos como também os ensaios com este material.

Um levantamento bibliográfico inicial, nas bases de dados Scopus e Web of Science, sobre o número de publicações indexadas referentes ao tema MLCC é apresentado na Figura 7. É notável o aumento da quantidade de publicações nesta área e como o assunto teve crescente interesse por parte da sociedade científica, especialmente no Canadá, Estados Unidos e Itália.

Figura 7 - Total de publicações em bases de dados com o termo “*Cross Laminated Timber*”.



Fonte: Adaptado de Scopus e Web of Science (2022).

Os três primeiros artigos publicados sobre MLCC, de acordo com estas bases, foram em 2006, sendo dois destes artigos sobre as propriedades mecânicas do material (MOOSBRUGGER; GUGGENBERGER; BOGENSPERGER, 2006; GUGGENBERGER; MOOSBRUGGER, 2006) e um sobre o seu isolamento acústico em construções leves (FERK, 2006). O trabalho de Ferk (2006), encontra-se fora do escopo do presente trabalho, apesar de apresentar uma área de estudo relevante para projetos com painéis de MLCC, assim como o estudo de vibração neste tipo de material (HUANG; GAO; CHANG, 2020).

Moosbrugger, Guggenberger e Bogensperger (2006) estudaram os efeitos do carregamento do painel em seu plano, utilizando inclusive simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Guggenberger e Moosbrugger (2006) discutiram formulações baseadas em deformações para placas de MLCC, submetidas à flexão fora do plano do painel.

No Brasil o primeiro trabalho publicado sobre esse tema foi desenvolvido por Passareli (2013), no qual foram analisadas as diretrizes de projetos com este material, visando às adequações necessárias para sua inserção no setor produtivo do estado de São Paulo.

É importante citar também que existem outras configurações de MLCC em desenvolvimento (FIGURA 8), além do método convencional colado considerado neste estudo, sendo estes: MLCC unido por cavilhas (*Dowel Cross Laminated Timber*), MLCC unido por encaixes sem adesivo (*Interlocking Cross Laminated Timber*) e MLCC curvo (STECHER *et al.*, 2016; PEREIRA, 2019; KARACABEYLI; GAGNON, 2019).

Figura 8 – Classes de MLCC em fase de desenvolvimento: a) MLCC com cavilhas; b) MLCC unido por encaixes sem adesivo; e c) MLCC curvo.



Fonte: Adaptado de Smith (2011), Stecher *et al.* (2016) e Pereira (2019).

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA MLCC

Existem diversos fatores que influenciam na escolha das matérias-primas utilizadas na fabricação de painéis de MLCC, tais como as espécies vegetais disponíveis e o clima, de forma que cada país deve ajustar seu processo baseado nestes fatores (OLIVEIRA, 2018).

A produção em larga escala de MLCC na Europa e América do Norte utiliza quase que exclusivamente de madeiras de coníferas e adesivos fenol-resorcinol/melamina formaldeído, emulsão de isocianato polimérico e poliuretano monocomponente (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019).

No Brasil até o momento só se fabrica MLCC com madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* e adesivo poliuretano monocomponente (CROSSLAM, 2016; MASSETTO, 2020; VILELA, 2020). Breves descrições sobre as madeiras e adesivo utilizados neste trabalho estão apresentadas nos itens 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente.

3.2.1 Madeiras de reflorestamento

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2022), o Brasil possui cerca de 9,55 milhões de hectares com florestas plantadas, sendo a maior parte composta por madeiras dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Além disso, houve um incremento de 10,2% no valor da cadeia produtiva no setor de árvores, sendo este muito maior que o aumento do PIB nacional que foi de apenas 2,7%.

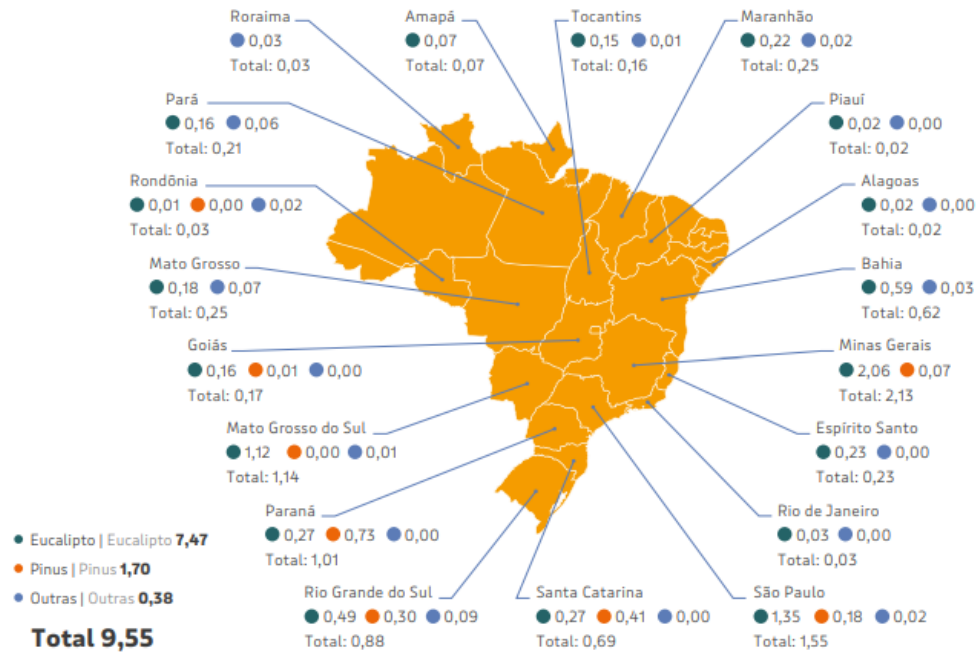
Apresenta-se na Figura 9 os estados brasileiros que possuem áreas com árvores de reflorestamento plantadas, de acordo com o gênero da madeira. Nota-se que, no estado de São Paulo e, de forma geral, no Brasil, a madeira de *Eucalyptus* é predominante.

O reflorestamento é uma das possíveis soluções para a mitigação das emissões de CO₂, pois além de gerar renda com a venda de produtos, madeireiros e não madeireiros, pode inclusive auxiliar na recuperação de terras degradadas e na melhoria da cobertura vegetal (ARAÚJO *et al.*, 2018; ESTEVES; MARTINS; FERREIRA, 2020). De acordo com Souza *et al.* (2019), esse fato decorre da fixação de carbono pela árvore, especialmente em espécies com rápido crescimento, o que justifica, do ponto de vista ambiental, a importância do uso de espécies de reflorestamento.

Um levantamento bibliográfico sobre a quantidade de publicações científicas indexadas, com o termo madeira de reflorestamento, é apresentado na Figura 10. Nota-se que o aumento significativo nas publicações sobre o tema “madeira de reflorestamento” começou em 2008,

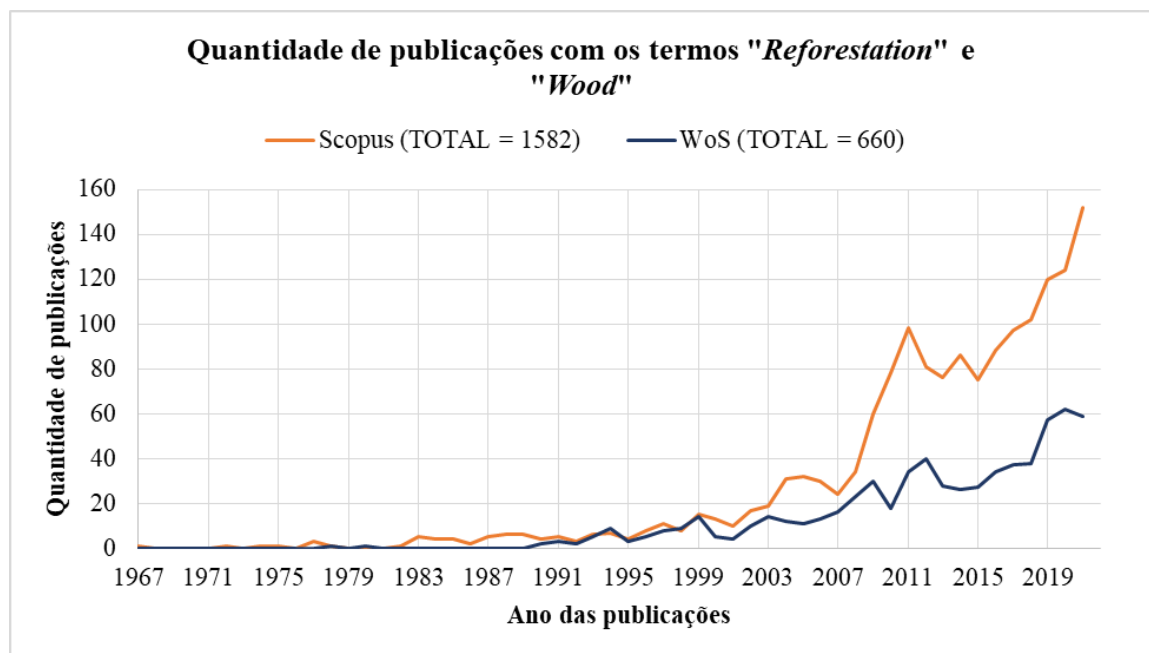
sendo que este assunto é mais pesquisado nos Estados Unidos, Brasil e Canadá, respectivamente.

Figura 9 – Áreas com árvores plantadas por estado e por gênero em 2021 no Brasil.



Fonte: Adaptado de Indústria Brasileira de Árvores (2022).

Figura 10 - Total de publicações em bases de dados com os termos "reforestation" e "wood".



Fonte: Adaptado de Scopus e Web of Science (2022).

O início das publicações sobre “madeira de reflorestamento” ocorreu na década de 1960, com o trabalho de Fritz (1967), sobre a madeira de sequoias da Califórnia (*Sequoia sempervirens* Endl.) e seu valor econômico. O autor indicou a necessidade de gerenciamento das florestas, incluindo a plantação de novas árvores, como forma de obtenção de madeira e de outros bioprodutos melhorados.

No Brasil, o primeiro documento publicado nesta área foi de Garlipp (1981), no qual consta uma análise da viabilidade do uso de biomassas florestais do estado de São Paulo na produção de energia para substituição do uso de óleo combustível. Os principais gêneros de madeiras consideradas no estudo foram *Pinus* e *Eucalyptus*, visto que estas eram as madeiras de maior disponibilidade no estado.

Foram utilizadas quatro espécies de reflorestamento para a produção de elementos de MLCC neste estudo, sendo estas: *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* e *Acrocarpus fraxinifolius*.

Conforme citado anteriormente, as madeiras dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* já foram amplamente estudadas e são bastante utilizadas no território brasileiro, não apenas para a fabricação de MLCC e MLC, mas também nos demais setores da indústria da madeira. De fato, a plantação de árvores destes gêneros é uma atividade que se destaca no setor industrial e agropecuário, visto que a madeira proveniente de reflorestamentos possui ainda diversas outras aplicações (GARLIPP, 1981; NAKAYAMA; SILVA; CURI, 2017).

Contudo, outras espécies têm sido avaliadas para uso industrial, na busca por alternativas às madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* (IWAKIRI *et al.*, 2014). Dentre estas espécies estão a *T. ciliata* e a *A. fraxinifolius*, que, apesar de serem promissoras na obtenção de produtos de madeira sólida, foram pouco estudadas até o momento (BRAZ *et al.*, 2013).

A espécie *T. ciliata* (também conhecida como Cedro Australiano) é de grande porte e pertence à família *Meliaceae*, podendo atingir 50 m de altura e diâmetro de DAP de 150 cm (medida do diâmetro à uma distância de 1,50 m do solo). Geralmente as árvores são abatidas entre 10 a 12 anos e a madeira possui massa específica aparente entre 330 e 640 kg/m³ (CARVALHO, 1998; RICKEN *et al.*, 2011; CIFLORESTAS, 2020).

A madeira proveniente desta espécie tem características intermediárias entre o mogno (*Swietenia macrophylla*) e o cedrilho (*Cedrela odorata*), com aparência marrom-avermelhada de textura grossa, sendo amplamente difundida na Austrália e em países da Ásia, como Índia, China e Filipinas (ALBINO *et al.*, 2010; RIBEIRO; MORI; MENDES, 2010; CIFLORESTAS, 2020). No Brasil a *T. ciliata* tem maior disponibilidade no sudeste de Minas Gerais e no sul da Bahia (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Suas principais características são a fácil trabalhabilidade e secagem além da boa resistência ao ataque de brocas (*Hypsipyla grandella*) e pragas em geral (RIBEIRO; MORI; MENDES, 2010; RICKEN *et al.*; 2011; ALMEIDA *et al.*, 2012; BRAZ *et al.*, 2013). Atualmente é utilizada na fabricação de painéis de madeira (compensados e laminados), mobílias de luxo, acabamentos na construção civil e construção de navios e aviões, além de ornamentos de interior, instrumentos musicais, caixas de charuto e lápis (ALBINO *et al.*, 2010; RIBEIRO; MORI; MENDES, 2010; BRAZ *et al.*, 2013; CIFLORESTAS, 2020).

A espécie *A. fraxinifolius* (conhecida com Cedro Indiano) pertence à família *Fabaceae*, subfamília *Caesalpiniaceae*, e é proveniente de regiões tropicais com alta pluviosidade da Ásia (TRIANOSKI *et al.*, 2011; FIRMINO; MORAES; FURTADO, 2015). As árvores desta espécie podem atingir 30 metros de altura com diâmetros de tronco variando entre 0,9 a 2,4 m, sendo mais cultivadas na região sudeste, centro oeste e norte do Paraná em conjunto com café e cacau (PRADO *et al.*, 2003; MARTÍNEZ *et al.*, 2006; TRIANOSKI *et al.*, 2011; FIRMINO; MORAES; FURTADO, 2015).

A madeira desta espécie tem como características: dureza, textura grossa, densidade variando entre 440 a 680 kg/m³, cerne avermelhado, baixo coeficiente de retratibilidade total, boa resistência mecânica, fácil usinabilidade, impregnabilidade de preservantes e fácil colagem (PRADO *et al.*, 2003; MARTÍNEZ *et al.*, 2006; TRIANOSKI *et al.*, 2011; FIRMINO; MORAES; FURTADO, 2015; MISHRA *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2019).

As principais aplicações da *A. fraxinifolius* são na construção civil, mobiliários, pisos, compensados, papel e celulose, produção de goma e resina, carvão e carpintaria (PRADO *et al.*, 2003; TRIANOSKI *et al.*, 2011; FIRMINO; MORAES; FURTADO, 2015; MISHRA *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2019). As aparências das espécies utilizadas neste trabalho são apresentadas na Figura 11 e algumas de suas propriedades são indicadas na Tabela 1.

Estudos foram desenvolvidos na fabricação de painéis de madeira com estas espécies, tais como: painéis particulados unidos com cimento (SÁ *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2020) e uréia-formaldeído (TRIANOSKI *et al.*, 2011; BUFALINO *et al.*, 2012; TRIANOSKI; IWAKIRI; MATOS, 2014), painéis OSB (ALMEIDA *et al.*, 2012; IWAKIRI *et al.*, 2014), compensados (ALBINO, 2010; PARTHIBAN *et al.*, 2019; REIS *et al.*, 2019) e painéis sarrafeados (PINATI *et al.*, 2018).

Oliveira (2016) e Faria *et al.* (2019), estudaram a fabricação de MLC de *A. fraxinifolius* e *T. ciliata* com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, respectivamente. Os autores verificaram uma boa qualidade de colagem da madeira com o adesivo e sua viabilidade na

fabricação de elementos estruturais para aplicação na construção civil, justificando assim a investigação do uso destas espécies na fabricação da MLCC.

Figura 11 – Madeira proveniente das espécies de: a) *Pinus elliottii*; b) *Eucalyptus grandis*; c) *Toona ciliata*; e d) *Acrocarpus fraxinifolius*.



Fonte: Adaptado de FUPEF (2010); Mendes (2017); Madeira Real (2018); Vale do Cedro (2019).

Tabela 1: Algumas propriedades das madeiras de floresta plantadas.

Espécie	Densidade [kg/m ³]	f_{c0} [MPa]	E_{M0} [MPa]	f_{M0} [MPa]	Referências
<i>P. elliottii</i>	360-520	23-33	7496	40-76	Serpa <i>et al.</i> (2003); Araujo <i>et al.</i> (2012)
<i>E. grandis</i>	490 - 690	30-40	15600	78-86	Serpa <i>et al.</i> (2003); Gonzalez <i>et al.</i> (2006)
<i>T. ciliata</i>	330 -640	27	5105	46	Braz <i>et al.</i> (2013); Carvalho (1998)
<i>A. fraxinifolius</i>	440 - 680	32	7506	50	Mishra <i>et al.</i> (2015); Oliveira; Oliveira; Molina (2022)

Fonte: Produção do próprio autor.

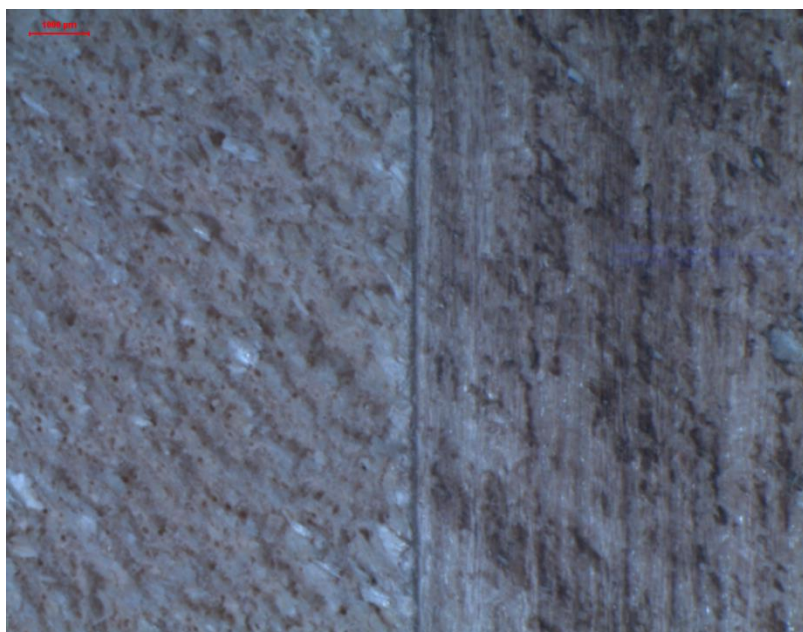
3.2.2 Adesivos estruturais

Adesivos estruturais são produtos capazes de unir outros materiais através de suas superfícies de contato pela formação de ligações fortes e duradouras (IWAKIRI, 2005). Os adesivos estruturais possuem bom desempenho de colagem em longo prazo, sendo frequentemente expostos a ambientes com alta umidade e suportando cargas externas em condições de serviço durante a vida útil do elemento estrutural (CRUZ; CUSTÓDIO, 2010).

O adesivo é fator crítico na fabricação da MLCC, pois é um dos principais elementos que garante a segurança dos usuários das edificações construídas com esse material (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019). Por isso, os painéis precisam passar por controle de qualidade, desde as etapas de ensaios iniciais de caracterização do material até o monitoramento da produção fabril (BETTI *et al.*, 2016).

A característica mais importante do adesivo é a resistência ao cisalhamento quando a MLCC é submetida a carregamentos externos, especialmente devido à espessura da linha de cola (FIGURA 12) ser praticamente negligenciável (HARCH, 2010).

Figura 12 – Micrografia da linha de cola de painel de MLCC.



Fonte: Produção do próprio autor.

Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975) e Vick (1999) relatam que os adesivos sintéticos, usados na fabricação de madeira reconstituída, são classificados como termoplásticos ou termorrígidos. De acordo com os autores, estes últimos consistem na melhor opção para usos

estruturais, pois o processo de cura ocorre por mudanças químicas irreversíveis que resistem à umidade e as cargas externas e têm poucas mudanças com a variação de temperatura.

Frihart (2012) relata que a adesão entre duas superfícies ocorre em três etapas: preparação da superfície do substrato onde devem ser removidas as irregularidades e compostos prejudiciais à colagem; processo de interação entre o material adesivo e o substrato a nível molecular; e, por fim, solidificação do adesivo e término da colagem.

As características a se levar em conta na escolha de um adesivo, além de seu custo, são: tempo de montagem do painel e tempo de cura (fatores dependentes da umidade relativa e da temperatura ambiente), coloração, viscosidade, gramatura, número de componentes, presença de solvente ou formaldeído, sensibilidade e reatividade à umidade além da capacidade de preencher lacunas (viscosidade) (GRANDMONT; YEH; DAGENAI, 2019). Os principais adesivos estruturais utilizados no Brasil, na fabricação de painéis de madeira, são fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeído e MDI-isocianato (SELLERS, 2001; IWAKIRI, 2005; BURATTA, 2019).

Campos, Gonçalves e Silva (2008) e Wang *et al.* (2018a) relatam que tem se buscado o uso de adesivos com baixa ou nenhuma emissão de formaldeído, visto que este composto, liberado no processo de fabricação e durante o uso do painel de madeira, é um agente carcinogênico confirmado para seres humanos.

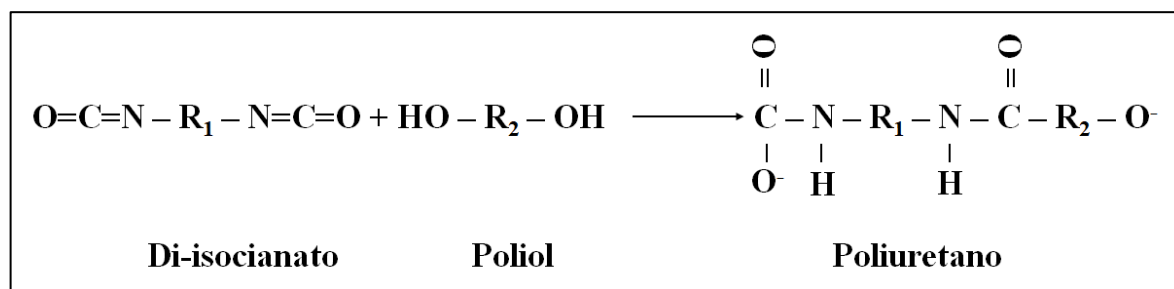
Dentre as alternativas encontra-se o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, que é um tipo de adesivo que não contém formaldeído em sua composição, possui alto desempenho mecânico e tem grande disponibilidade comercial em território brasileiro (BERTOLINI *et al.*, 2014; NASCIMENTO *et al.*, 2015).

O adesivo poliuretano foi desenvolvido por Otto Bayer em 1937 pela reação química entre um poliol e um pré-polímero (isocianato derivado do petróleo), Figura 13, podendo ser incluídos catalizadores e extensores, (SILVA; AZAMBUJA; SEGANTINI, 2013). Os adesivos poliuretanos são os mais utilizados na fabricação de MLCC na América do Norte e na Europa (GRANDMONT; YEH; DAGENAI, 2019), assim como nas pesquisas em escala laboratorial (VILGUTS; SERDJUKS; PAKRASTINS, 2015; TURESSON *et al.*, 2020).

No caso do adesivo à base de óleo de mamona, o poliol é derivado da planta *Ricinus communis*, que é de origem renovável (CANGEMI, 2006). Este adesivo, disponível em nível comercial, tem apelo ambiental em seu uso por liberar menos poluentes e requerer menos energia para sua cura, já que esta pode ocorrer sem a aplicação de calor por fonte externa na própria temperatura ambiente (BERTOLINI *et al.*, 2013; NASCIMENTO *et al.* 2015).

De acordo com Pace (2012) e Silva (2020), as resinas poliuretanas se dividem em duas classes: as monocomponentes, que possuem polímero e agente de reticulação juntos, e as bicomponentes, que possuem seus compostos a serem misturados no momento da fabricação do painel devido ao menor tempo de solidificação.

Figura 13 – Reação química da formação do poliuretano.



Fonte: Adaptado de José (2006).

É importante esclarecer que os poliuretanos também possuem outras aplicações, de acordo com as propriedades e características iniciais do polioli e pré-polímero que os compõe, sendo estas: fabricação de tintas, fibras, revestimentos e elastômeros (TANG *et al.*, 2008). Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) recomendam que sejam feitos ensaios com adesivos alternativos em escala laboratorial antes de testá-los em escala industrial, justificando o presente estudo, já que este adesivo se encontra em fase de testes na fabricação da MLCC.

É imperativo que o adesivo estrutural, utilizado na fabricação de compósitos à base de madeira, não deve sob qualquer circunstância ser o fator limitante no desempenho do produto (GRANDMONT; YEH; DAGENAI, 2019). Ressalta-se ainda que a colagem da madeira, especificamente em painéis de MLCC, não depende apenas do desempenho do adesivo, mas também da combinação de múltiplos elementos de produção.

Desta forma, os parâmetros de produção da MLCC também devem ser cuidadosamente analisados e controlados a fim de garantir um produto com desempenho mecânico suficiente para sua aplicação final. Uma descrição mais detalhada do processo produtivo da MLCC é feita na seção 3.3.

3.3 PROCESSO PRODUTIVO DA MLCC

De acordo com Grandmont, Yeh e Dagenais (2019), o processo produtivo da MLCC em escala industrial se divide em nove etapas, conforme se segue:

Primeira etapa - Seleção primária das lamelas (com controle do teor de umidade, classificação visual e mecânica), cujo principal objetivo consiste em descartar peças inadequadas para aplicações estruturais, tais como as que apresentarem nós e rachaduras devido à secagem inadequada (PEREIRA, 2014).

A qualidade das peças de madeira, especialmente daquelas aplicadas nas camadas internas do elemento estrutural (onde existe menor efeito das tensões normais) podem ser, teoricamente, de classe inferior, tais como madeira de desbaste, atacada por insetos e recuperadas de incêndios florestais (LI, 2015; SMITH; LARSON, 2017).

A ABNT NBR 7190-2 (2022) recomenda a classificação das lamelas em três diferentes classes, sendo a madeira de *Pinus* classificada de acordo com a Tabela 2 e as demais espécies segundo os critérios da Tabela 3.

Tabela 2: Procedimento de classificação de lamelas de *Pinus spp.*

Defeito	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	-	Não se admite		
Nós na face	-	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	-	$\leq 1/5$	$\leq 1/4$	$\leq 1/3$
Inclinação das fibras	$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\leq 1:9$	$\leq 1:6$	$\leq 1:3$
Fissuras não passantes	m	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 metro e nem $\frac{1}{4}$ da peça		
Fissuras passantes	m	Somente se permitem fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior que a largura da peça		
Encurvamento	mm	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento		
Arqueamento	mm	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento		
Torcimento	$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento		
Encanoamento	mm	Sem restrições		
Esmoados	$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça		
Ataques biológicos	-	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão Se admitem zonas atacadas por fungos cromógenos Se admitem orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm		
Madeira de Reação	$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$	Menor ou igual a 1/5		
Outros	-	Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-2 (2022).

A classificação mecânica em conjunto com a visual é necessária, visto que no Brasil os fornecedores geralmente não possuem controle de umidade ou agrupamento por classe da matéria-prima (OLIVEIRA, 2018).

Tabela 3: Procedimento de classificação de lamelas de folhosas.

Defeito	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	-	Não se admite		
Nós na face	-	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	-	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Inclinação das fibras	$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\leq 1/12$	$\leq 1/9$	$\leq 1/6$
Fissuras não passantes	m	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 metro e nem $\frac{1}{4}$ da peça Somente se permitem fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior que a largura da peça		
Fissuras passantes	m			
Encurvamento	mm	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento		
Arqueamento	mm	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento		
Torcimento	$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento		
Encanoamento	mm	Sem restrições		
Esmoadado	$\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento Não se admitem zonas atacados por fungos causadores de podridão Admitem-se zonas atacadas por fungos cromógenos		
Ataques biológicos	-			
Outros	-	Admitem-se orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm Danos mecânicos, presença de bolsa de resina e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190-2 (2022).

Segunda etapa - Agrupamento das lamelas por classe, consistindo na seleção de lamelas que serão utilizadas na camada longitudinal ou transversal do painel.

Para Pereira (2014), o agrupamento deve levar em conta a rigidez das lamelas e o teor de umidade, que deve estar dentro de uma faixa de valores baseado no tipo de adesivo que será utilizado na fabricação.

Terceira etapa - Aplainamento das superfícies das lamelas, garantindo a remoção da camada superficial oxidada da madeira, promovendo a abertura dos poros e, conseqüentemente, melhorando a penetração do adesivo e a colagem das adequadas das lamelas (PEREIRA, 2014; GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019).

Quarta etapa - Seccionamento das peças serradas no comprimento adequado, de acordo com as especificações do produto.

O corte das peças no comprimento (denominado destopo) define sua dimensão final, e deve ser realizado de acordo com as limitações dos equipamentos utilizados na produção e/ou no transporte até o canteiro de obras (PEREIRA, 2014).

Nesta etapa, também é feita também a união longitudinal das lamelas por emendas do tipo *finger-joint*, sendo as propriedades mecânicas desta região particular de ligação e crítica na resistência do elemento estrutural (ABNT NBR 7190-6, 2022; FORTUNA *et al.*, 2020).

Quinta etapa - Aplicação de adesivo nas faces das lamelas, seguindo as recomendações de tempo máximo de fabricação e temperatura ambiente mínima, especificadas pelo fabricante de adesivo.

Esta etapa deve ser realizada em até 24 horas após o aplainamento das peças, de forma que suas superfícies estejam limpas e livres de óleos e graxas, visto que a presença destes componentes dificulta a penetração do adesivo na madeira (PEREIRA, 2014; OLIVEIRA, 2018).

Os adesivos utilizados em MLCC são, de maneira geral, de cura em temperatura ambiente não sendo necessário aquecer o painel ou as lamelas, o que reduz o consumo de energia nesta etapa do processo produtivo (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019).

Oliveira (2018) indica que pode ser feita a colagem lateral das lamelas, sendo vantajoso em relação à estanqueidade do ar, resistência ao fogo e acústica do material. No entanto, a adição desta etapa provoca fissuras nas superfícies do painel, devido à variação dimensional da madeira pela mudança de umidade e temperatura.

A falta de colagem entre lamelas adjacentes, nas camadas ortogonais, influência no comportamento ao *rolling shear* e na distribuição das tensões internas (*rolling shear* é um fenômeno presente na MLCC discutido em detalhes no item 3.5 (LI, 2015)).

Sexta etapa - Montagem do painel, pelo posicionamento das lamelas com adesivo em suas respectivas posições e camadas.

Nesta etapa é feita a orientação das lamelas em cada camada do painel, de acordo com sua classe previamente definida durante a caracterização da madeira. Pereira (2014) indica que a orientação dos anéis de crescimento deve ser “invertida” na camada inferior, de forma a minimizar a flecha ao longo da vida útil da estrutura.

Sétima etapa - Prensagem (uma das etapas mais críticas da produção da MLCC), que consiste na aplicação de pressão nas superfícies da chapa para a penetração e cura do adesivo nas lamelas de madeira.

Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) afirmam que os dois principais tipos de prensas utilizadas são: prensa a vácuo (por membrana flexível) e prensa hidráulica (de pratos rígidos), sendo estas apresentadas na Figura 14 e na Figura 15, respectivamente. Dias (2018) também indica a possibilidade do uso de prensas mecânicas (sargentos, pregos e parafusos) na fabricação da MLCC, sendo uma opção não automatizada e de mais baixo custo.

O nível de pressão de colagem utilizado na fabricação do painel ou elemento de MLCC geralmente está de acordo com as recomendações do fabricante de adesivo. No entanto, este valor pode ser maior ou menor (*e.g.* quando o painel possuir elementos e matéria-prima diferentes do usual) desde que se justifique a melhor qualidade de colagem (GRANDMONT; YEH; DAGENAI, 2019).

Figura 14 – Prensa à vácuo de membrana flexível.



Fonte: Adaptado de Dias (2018).

Figura 15 – Prensa hidráulica de pratos rígidos.



Fonte: Adaptado de Dias (2018).

Prensas a vácuo atingem pressões até 0,1 MPa, enquanto nas prensas hidráulicas as pressões atuantes estão entre 0,1 e 1,0 MPa (PEREIRA, 2014; OLIVEIRA, 2018). Os adesivos à base de melamina e fenol exigem pressão até 2,0 MPa, enquanto os adesivos poliuretanos permitem pressões até 1,0 MPa (OLIVEIRA, 2018).

Com base no exposto, observa-se que são necessários mais estudos a respeito da pressão de colagem em painéis de MLCC, visando especialmente à análise de seus efeitos na resposta da qualidade de colagem dos painéis, para posterior aplicação a nível industrial (WANG; PIRVU; LUM, 2011; BRADNER *et al.*, 2016; SIKORA; MCPOLIN; HARTE, 2016).

Oitava etapa - Controle de qualidade da MLCC, lixamento e acabamento.

O controle de qualidade envolve a remoção de amostras de algumas das placas produzidas para análise da colagem e das propriedades físico-mecânicas. De acordo com Pereira (2014), nesta etapa também é feita a calibração da espessura do painel e os cortes de aberturas (para portas e janelas) com máquinas de comando numérico computadorizado.

Desta forma, as canaletas para passagem de eletrodutos, portas, janelas e parte hidráulica são inseridas, com alta precisão, nos painéis de MLCC ainda na fábrica (OLIVEIRA, 2018). Assim, a maior parte do processo produtivo da MLCC ocorre dentro da indústria, reduzindo significativamente o tempo de construção de obras (em comparação com outros métodos de construção), visto que as placas ou painéis de MLCC são montadas no canteiro de obras sem a necessidade de processamento adicional (BAJZECEROVA; KOVAC; KANOCZ, 2018; GILEWSKI; GLEGOLA, 2019).

No Brasil, a MLCC pode ser tratada contra a demanda biológica com soluções de Boro ou ser produzida com madeira sem tratamento, sendo necessária, neste último caso, a

aplicação de inseticida e/ou cupinicida logo após o acabamento para garantir a durabilidade do elemento na edificação (CROSSLAM, 2016; OLIVEIRA, 2018).

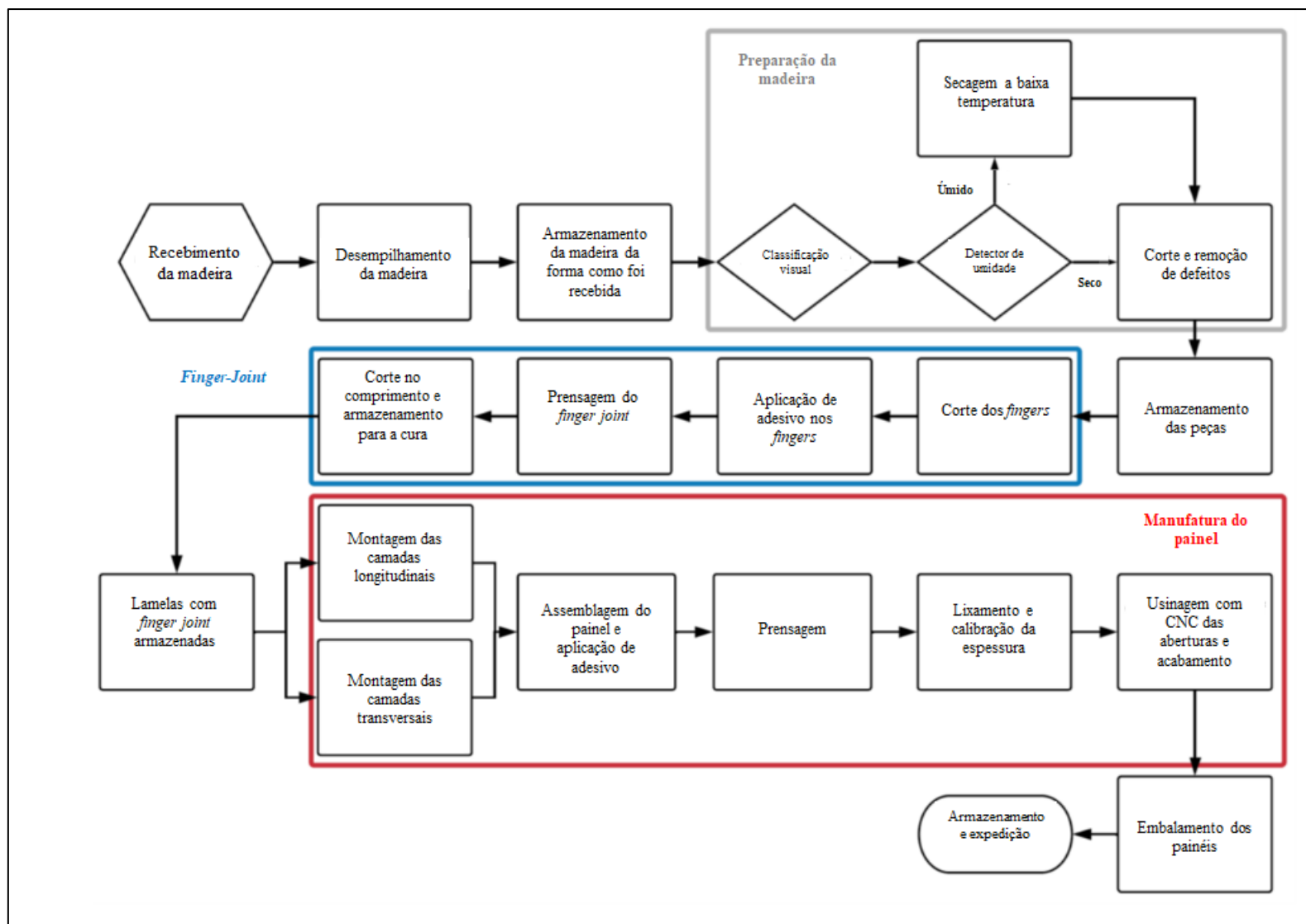
Nona etapa - Identificação do produto, embalagem e despacho.

A última etapa envolve a identificação do produto com o logo do fabricante e informações técnicas (dimensões, indicação para uso e local adequado para a fixação de conectores), a embalagem do produto para evitar a troca excessiva de umidade da MLCC com o ambiente, e finalmente seu despacho até o canteiro de obras.

Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) relatam que as pesquisas voltadas para a MLCC, especialmente aquelas relacionadas ao seu processo produtivo, devem ser voltadas na determinação de parâmetros de produção, tais como preparação de superfície, tolerâncias dimensionais e pressão de colagem.

Um fluxograma do processo produtivo resumido, conforme apresentado nos parágrafos anteriores, é apresentado na Figura 16, onde foram incluídas as etapas de união longitudinal de lamelas por *finger joint* e armazenamentos das peças entre as etapas de produção dentro da fábrica.

Figura 16 – Etapas de fabricação de um painel de MLCC em escala industrial.



Fonte: Adaptado de Brandt *et al.* (2019).

3.4 CONTROLE DA QUALIDADE DE COLAGEM

Ainda não existe no Brasil uma norma específica aprovada para o controle da qualidade de elementos de MLCC, sendo que esse controle pode ser feito através de ensaios de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola. Porém, o método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022) propõe algumas recomendações para os testes de qualidade em elementos de MLCC.

Portanto, esse trabalho de pesquisa busca também colaborar com recomendações para a proposição do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022) relativo ao controle da qualidade de elementos de MLCC. Cabe ressaltar que existem as seguintes normas internacionais relativas à caracterização da MLCC: ISO 16696-1 (2019), ANSI 320 (2019) e EN 16351 (2015).

3.4.1 Norma europeia EN 14080 (2013)

A norma europeia EN 14080 (2013) descreve a metodologia necessária para a realização do ensaio de delaminação. Segundo esta norma, o ambiente onde será exposto o adesivo influencia no tipo de procedimento a ser adotado para analisar a delaminação. Por esse motivo, existem três métodos distintos de avaliação nesse documento (Métodos A, B e C).

O ciclo de delaminação na autoclave é composto, principalmente, por um vácuo de 85 kPa seguido de uma pressão de 600 kPa. Após o término do ciclo, as amostras são colocadas em uma estufa com velocidade do ar entre 2 m/s e 3m/s, além de uma temperatura e teor de umidade que dependem do procedimento adotado.

No método A, destinado para avaliação do adesivo tipo II (para uso interno) (EN 391, 2001), o vácuo e a pressão são aplicados, respectivamente, durante 5 minutos e uma hora, e o ciclo é feito por duas vezes sem a abertura da autoclave. Na estufa, as amostras são confinadas durante 22 horas em uma temperatura entre 60°C e 70°C com uma umidade relativa menor do que 15%. Por fim, repete-se o procedimento após o período de secagem. A delaminação total permitida, neste caso, é de 5%.

No método B da EN 14080 (2013), destinado para avaliação do adesivo tipo II (EN 391, 2001), as amostras devem ser expostas ao vácuo e à pressão durante 30 minutos e 2 horas, respectivamente. Na estufa, a secagem é feita por um período de 15 horas em uma temperatura de 65°C a 75°C e umidade relativa de 10%. A delaminação total permitida, neste caso, é de 4%.

No método C da EN 14080 (2013), destinado para avaliação do adesivo tipo I (para uso externo) (EN 391, 2001), os corpos de prova são submetidos ao vácuo por 30 minutos e à pressão por 2 horas. Esse ciclo é realizado novamente totalizando 5 horas de ensaio. Em seguida, o material é seco durante um período de 90 horas sobre uma temperatura de 25°C a 35°C e umidade relativa de 25% a 35%. A delaminação total permitida, neste caso, é de 10%.

3.4.2 Procedimentos do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022)

3.4.2.1 Ensaio de delaminação

O procedimento de delaminação proposto no método de ensaio brasileiro se baseia no Método B da norma europeia EN 14080 (2013) e é idêntico aquele utilizado para o controle da qualidade de elementos de MLC no método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022). O ensaio de delaminação é utilizado como procedimento para adesivos usados em ambientes externos.

Os corpos de prova para os ensaios de delaminação devem ser representativos da produção, sendo extraídos dos painéis de MLCC em formato aproximadamente quadrado com dimensões laterais de (100 ± 5) mm e área da superfície superior de no mínimo 10 000 mm². A espessura dos corpos de prova é a espessura do painel do qual foram extraídos, não havendo referências ao número mínimo de corpos de prova a ser ensaiado.

Antes de colocar os corpos de prova na autoclave, estes devem ter suas massas determinadas com precisão de um grama e essas massas servirão de controle para o término do ensaio de delaminação. Também deverão ter todas as suas linhas de cola medidas (com paquímetro ou instrumento similar) em todo o perímetro do corpo de prova. É recomendável que o corpo de prova de delaminação esteja com umidade de $12 \pm 1\%$ antes do procedimento em autoclave.

No início do ensaio, as amostras são submersas em água a uma temperatura de 20 °C e, na sequência, aplica-se um vácuo entre 70 kPa a 85 kPa durante 30 minutos. Posteriormente, os corpos de prova ficam submetidos por duas horas a uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa. Após um único ciclo de vácuo-pressão, as amostras ficam em climatizadora ou estufa de secagem com o fluxo com velocidade entre 2 e 3 m/s. Durante a secagem, os corpos de prova devem estar distanciados entre si de 50 mm, no mínimo. Nada é descrito sobre o posicionamento dos corpos de prova no interior da câmara climatizadora, no que se refere à orientação das seções cortadas em relação ao fluxo de ar.

O tempo real de secagem deve ser controlado pela massa dos corpos de prova. Assim, a secagem dos corpos de prova na câmara climatizadora ou estufa deve continuar até que a massa do corpo de prova alcance um valor compreendido entre 0% e 10% acima da massa inicial do corpo de prova.

A medição da delaminação e avaliação do resultado devem ser realizadas em até 1 hora depois de finalizado o procedimento de secagem, sendo que a delaminação total da linha de cola deve ser medida em milímetros.

A delaminação máxima e a delaminação total do corpo de prova são calculadas pela Equação 1 e Equação 2, respectivamente. A delaminação é avaliada para todo o perímetro do corpo de prova, sobre as linhas de cola inicialmente medidas.

$$Del_m = \frac{del_i}{C_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

Del_m : é a delaminação máxima de uma linha de cola do corpo de prova, em %;

del_i : é a delaminação da linha de cola i, em mm;

C_i : é o comprimento da linha de cola i, em mm.

$$Del_t = \frac{\sum_{i=1}^2 del_i}{C_{total}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

Del_t : é a delaminação total do corpo de prova, em %;

C_{total} : é o comprimento total das linhas de cola do corpo de prova, em mm.

O método de ensaio brasileiro ABNT NBR 7190-7 (2022) referente à MLCC não especifica limites para as porcentagens máximas de delaminação em função do tipo de madeira utilizada. Betti *et al.* (2016) indicam como referência os valores máximos de delaminação total e delaminação máxima de 10% e 40%, respectivamente. Por outro lado, o método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022) indica os limites de 4% e 6%, para elementos de MLC, confeccionados com coníferas e folhosas, respectivamente.

As aberturas na linha de cola descritas a seguir devem ser consideradas como delaminações para os corpos de prova de MLCC após o ensaio:

- Fissura consistente dentro da camada do adesivo;
- Uma falha na linha de cola precisamente entre a camada de adesivo e o substrato de madeira. Nenhuma fibra de madeira pode permanecer incorporada na camada de adesivo;
- Uma falha na madeira que está invariavelmente dentro da primeira ou segunda camada de células, além da camada de adesivo, na qual o caminho da fratura não é influenciado pelo ângulo da fibra e por anéis de crescimento da estrutura. É caracterizada por uma aparência fina e aveludada das fibras da madeira que se localizam na borda da interface entre a superfície da madeira e a camada de adesivo.

3.4.2.2 Ensaio de cisalhamento da linha de cola

Neste ensaio uma força que gera uma tensão de cisalhamento é aplicada na linha de cola até que ocorra uma falha. Durante o ensaio, a força deve ser aplicada a uma velocidade constante, de maneira que a falha ocorra no mínimo em 20 s.

Para tanto, um equipamento para este ensaio deve ser testado e ajustado de acordo com a capacidade de aplicação da força de compressão do dispositivo, que deve estar articulada de tal forma que a força atue sobre a superfície transversal do corpo de prova, com uma distribuição uniforme de pressão, em toda a largura do corpo de prova. A medição da carga aplicada não pode ter um erro maior que $\pm 3\%$. O equipamento de ensaio deverá seguir o esquema apresentado na Figura 17.

Os corpos de prova para cisalhamento das linhas de cola (entre lamelas ortogonais) deverão ser retirados dos painéis produzidos, mas também podem ser aproveitados das áreas recortadas dos painéis originais. As dimensões dos corpos de prova deverão seguir as recomendações descritas na Figura 18.

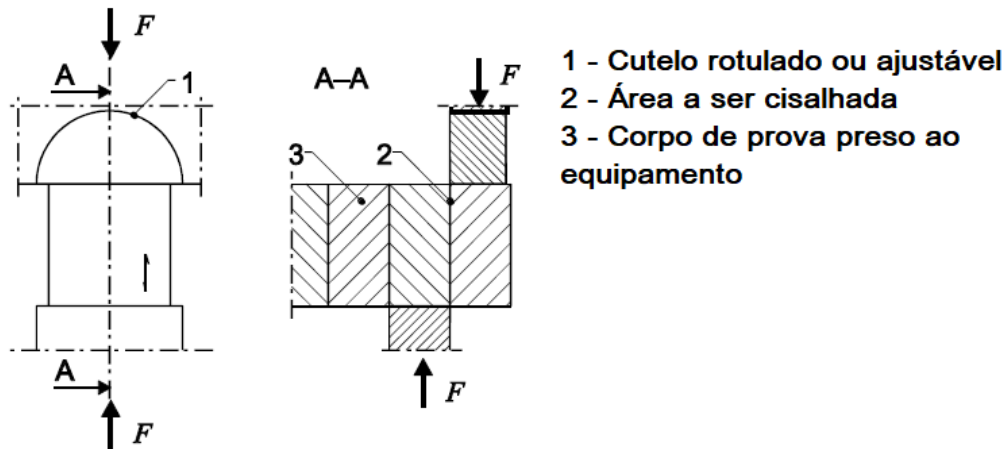
Para o ensaio de cisalhamento entre as camadas, todas as linhas de cola devem ser ensaiadas, e o número de corpos de prova depende da largura original do painel, conforme indicações da Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de corpos de prova a extrair em função da largura do painel

Largura do painel MLCC (mm)	≤ 600	$600 \leq 1200$	> 1200
Número de corpos de prova	1	2	3

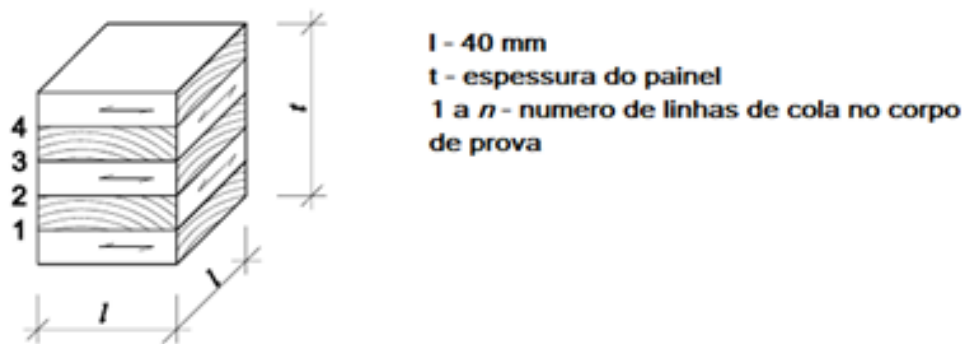
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7 (2022).

Figura 17 – Dispositivo metálico para o ensaio de cisalhamento da linha de cola.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7 (2022).

Figura 18 – Corpo de prova para o ensaio de cisalhamento das linhas de cola.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7 (2022).

Antes do ensaio, a unidade do corpo de prova deve ser medida e isso pode ser feito com uso de equipamento específico (medidor elétrico de umidade, por exemplo). As medidas do corpo de prova devem ser tomadas com precisão de 0,5 mm com uso de paquímetro.

A linha de cola deve ser posicionada de modo que a distância entre o dispositivo de ensaio e a área de colagem não exceda 1 mm. A resistência ao cisalhamento da linha de cola deve ser calculada pela Equação 3, com duas casas decimais de precisão, em MPa segundo a EN 16351 (2015).

$$f_{vlc} = k \frac{F_{max}}{b_{lc} \cdot h_{lc}} = (0,78844 + 0,0044 \cdot h_{lc}) \frac{F_{max}}{b_{lc} \cdot h_{lc}} \quad (3)$$

Onde:

f_{vlc} : é a resistência ao cisalhamento na linha de cola, em MPa;

k = fator de redução da resistência colada, adimensional;

F_{max} : é a força máxima aplicada no corpo de prova antes de sua ruptura, em N;

b_{lc} : é a largura da seção da linha de cola, em mm;

h_{lc} : é a altura da seção da linha de cola, em mm.

NOTA: O fator k reduz a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova onde a espessura na direção da área cortada é inferior a 50 mm. Este coeficiente é adotado como “1” quando a espessura na direção da área cortada é maior que 50 mm (EN 16351, 2015).

A resistência ao cisalhamento da linha de cola entre lamelas ortogonais da MLCC será considerada suficiente, se o valor característico de resistência ao cisalhamento da linha de cola f_{vlc} , obtido no ensaio, for maior ou igual a 1,25 N/mm². Se a linha de cola ensaiada obtiver resistência de cisalhamento menor que 1,0 N/mm², a porcentagem de falha nesta linha de cola deverá ser considerada como sendo de 100% (EN 16351, 2015). Neste caso, o método para MLCC não especifica claramente como deve ser quantificada a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo.

3.5 EFEITO *ROLLING SHEAR*

O comportamento mecânico dos painéis MLCC é complexo devido a vários fatores, tais como: ortogonalidade da direção das fibras das camadas consecutivas; ligações coladas; distribuição não uniforme das tensões nas camadas perpendiculares ao carregamento; e anisotropia inerente à madeira (LI, 2015; AMORIM; MANTILLA; CARRASCO, 2018).

A existência de painéis de madeira com arranjo em camadas ortogonais não é novidade, visto que as chapas de compensados são fabricadas desde o início do século XX (APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION, 2020). Porém, a MLCC apresenta descontinuidades em cada camada, devido à largura e espessura das lamelas, que são maiores que as lâminas dos compensados (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019).

Em razão destas características, quando o painel de MLCC é solicitado na flexão fora do plano da placa ocorre cisalhamento nas camadas centrais, ortogonais às camadas das extremidades, efeito este conhecido de *rolling shear* (EHRHART *et al.*, 2015). As fibras de madeira tendem a romper suas ligações quando submetidas a esta solicitação, devido às

tensões tangenciais e distorções no plano perpendicular à direção longitudinal, rolando umas sobre as outras (PEREIRA, 2014; FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; LI, 2015; VILELA, 2020).

O *rolling shear* constitui um potencial mecanismo de falha na MLCC, especialmente no caso dos elementos sujeitos à flexão fora do plano em vãos curtos, de forma que a determinação de seus parâmetros é de extrema importância na escolha de matérias-primas para um projeto adequado de estruturas com este material (EHRHART *et al.*, 2015; NIE, 2015; LI, 2015; GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019; POPOVSKI *et al.*, 2019; VILELA, 2020). Na Figura 19 apresenta-se um corpo de prova flexionado com ruptura devido ao efeito *rolling shear*.

Figura 19 - Falha por *rolling shear* em um corpo de prova de MLCC submetido à flexão.



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

Li (2015) afirma que a tensão máxima suportada pelo elemento de MLCC não é atingida quando ocorre a falha por *rolling shear*, mas sim com carga cerca de 30% superior, quando ocorre falha por tração na lamela inferior. Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) e Vilela (2020) descrevem que o *rolling shear* é o resultado da menor resistência à tração da lamela, que ocorre na direção normal às fibras. Os autores ainda indicam que a falha mais comum ocorre no sentido tangencial aos anéis de crescimento, de acordo com a resistência dos lenhos iniciais e dos raios.

Os tipos de falha na flexão de painéis MLCC, devido ao *rolling shear*, são apresentados na Figura 20. Nota-se que este efeito provoca ruptura do tipo frágil na madeira, sendo a combinação do cisalhamento com a tração perpendicular às fibras (LI, 2015; NIE, 2015).

Diversos fatores afetam os parâmetros relacionados ao *rolling shear*, tais como: espécie de madeira, densidade das camadas transversais, largura e espessura das lamelas, teor de umidade e orientação dos anéis de crescimento (LI, 2015; NIE, 2015; POPOVSKI *et al.*, 2019; VILELA, 2020).

O efeito de *rolling shear* está relacionado à capacidade da MLCC, quando esta é submetida ao carregamento fora do plano, com baixo valor da relação entre vão livre e espessura do painel, pois a rigidez e a resistência ao cisalhamento das camadas orientadas ortogonalmente são relativamente inferiores (FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; NIE, 2015).

Figura 20 - Tipos falha em painéis de MLCC na camada perpendicular ao carregamento.



Fonte: Adaptado de Nie (2015).

Li (2015) afirma que este tipo de falha provoca a redistribuição das tensões internas para os outros elementos das camadas ortogonais, enfraquecendo a MLCC e provocando a perda de rigidez global do sistema.

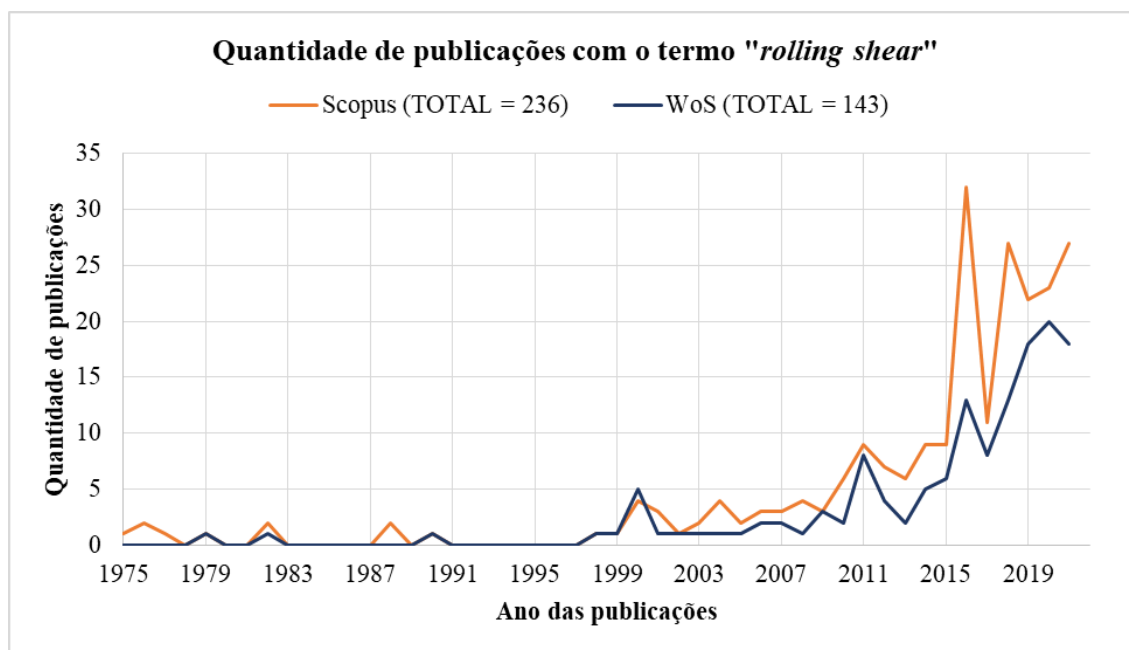
Na Figura 21 estão apresentados os resultados de um levantamento bibliográfico da quantidade de trabalhos publicados com o termo “*rolling shear*”. De acordo com a base Scopus (2020), os estudos sobre o efeito de *rolling shear* foram iniciados em 1975 (como visualizado na Figura 21). No entanto, o primeiro trabalho publicado sobre o tema foi o de March (1936), onde o autor estudou analiticamente o efeito gerado nas camadas perpendiculares de painéis compensados submetidos à flexão, através da teoria clássica da flexão e do módulo de elasticidade efetivo.

Os países que mais pesquisaram sobre o tema até o momento foram: China, Canadá e Estados Unidos, respectivamente.

O primeiro trabalho sobre o tema MLCC desenvolvido no Brasil foi apresentado por Pereira (2014), no qual o autor desenvolveu metodologias de ensaio para analisar as propriedades elásticas associadas ao *rolling shear*.

Os elementos de MLCC podem ser projetados utilizando-se métodos analíticos, programas de computador desenvolvidos especificamente para este fim ou ainda *softwares* comerciais que se utilizem do método dos elementos finitos (POPOVSKI *et al.*, 2019).

Figura 21 - Total de publicações em bases de dados com o termo “*rolling shear*”.



Fonte: Adaptado de Scopus e Web of Science (2022).

3.6 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA ELEMENTO DE MLCC NA FLEXÃO

O método analítico, desde que validado por ensaios experimentais, é a alternativa menos onerosa para avaliar o comportamento do painel MLCC na flexão. Entretanto, toda vez que se promove uma alteração no produto ou no processo de fabricação são necessários mais testes para caracterizar o novo material (POPOVSKI *et al.*, 2019).

Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) afirmam que os cálculos analíticos das propriedades de um painel de MLCC se baseiam nos valores de cálculo de cada uma das lamelas que o compõe e em suas posições relativas. Bajzecerova, Kovac e Kanocz (2018) ressaltam ainda que o ponto principal em projetos com MLCC é a baixa resistência e rigidez das camadas cruzadas ao carregamento principal.

Os projetos com MLCC assumem, costumeiramente, as relações descritas na Equação 4 e 5 para as propriedades mecânicas de rigidez das lamelas de madeira, sendo considerados iguais os valores nas direções radial e tangencial (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019).

Nota-se pela Equação 4 que o módulo de cisalhamento G_{vt} é dado como 10% em relação ao G_0 , indicando que deslocamentos devido à ação cortante ou cisalhante não devem ser desprezados em projetos de MLCC (AMORIM; MANTILLA; CARRASCO, 2018; VILELA, 2020).

$$E_{C0} = 30 \cdot E_{C90} = 16 \cdot G_0 = 160 \cdot G_{vt} \quad (4)$$

Onde:

E_{C0} : é o módulo de elasticidade no sentido longitudinal às fibras, em MPa;

E_{C90} : é o módulo de elasticidade no sentido transversal às fibras, em MPa;

G_0 : é módulo de elasticidade transversal ou módulo cisalhante, em MPa;

G_{vt} : é a rigidez ao cisalhamento por *rolling shear*, em MPa.

$$f_{v0} = 3 \cdot f_{vt} \quad (5)$$

Onde:

f_{v0} : é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, em MPa;

f_{vt} : é a resistência ao cisalhamento por *rolling shear*, em MPa.

Os equacionamentos apresentados nesta seção para elementos de MLCC, submetidos à flexão fora do plano, foram ajustados para painéis de três camadas conforme indicado na Figura 22. É importante salientar que a terminologia utilizada para as propriedades relacionadas ao *rolling shear* foi adotada com base na ABNT NBR 7190-7 (2022). Na literatura, o valor de G_{vt} pode ser encontrado como G_{9090} , G_{rt} , G_{rs} , G_r , G'_{90} e G e o valor de f_{vt} como f_{v9090} , f_{rs} , f_s , f_r e $F_{s,0}$.

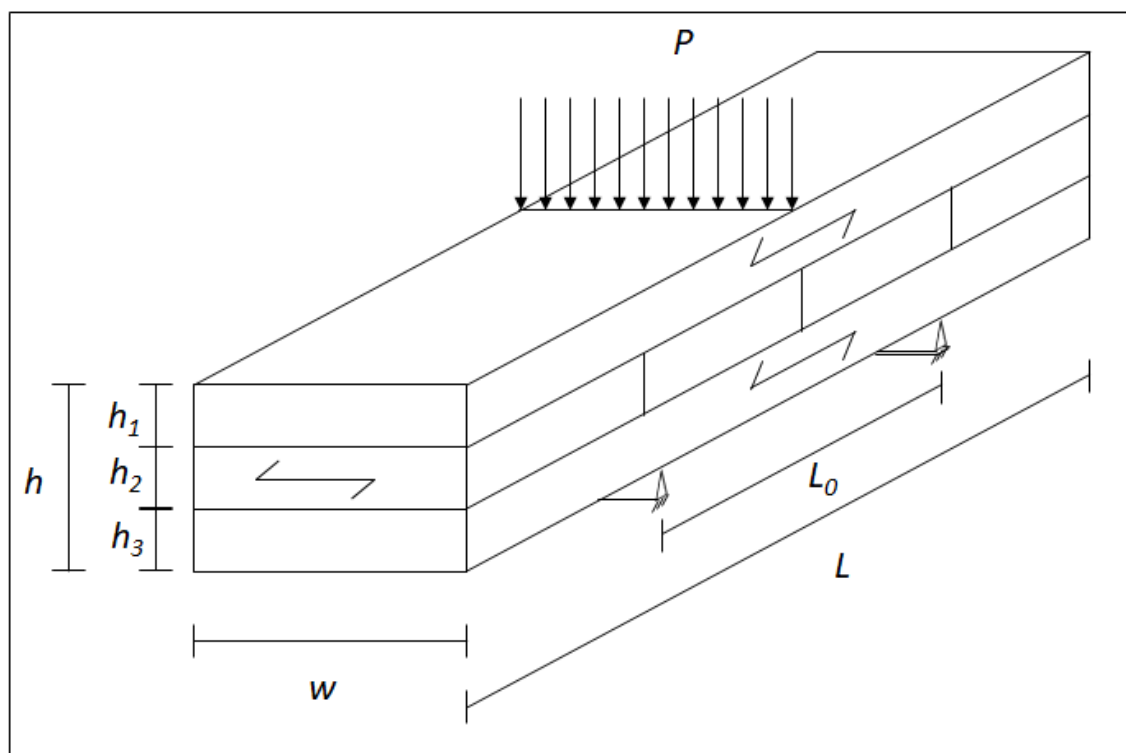
As duas situações mais comuns de cargas centradas em elementos de MLCC são: cargas concentradas por ponto de levantamento de guindastes e suportes concentrados, pelo apoio de colunas de edifícios (LI, 2015; BAJZECEROVA; KOVAC; KANOCZ, 2018).

De acordo com Ehrhart *et al.* (2015) e Pereira (2019), o efeito de *rolling shear* deve ser considerado nos cálculos dos Estados Limites Últimos (tensões normais e tensões de cisalhamento) e nos Estados Limites de Serviço (flecha no meio do vão) da MLCC.

Um dos fatores limitantes do sistema construtivo MLCC em edifícios residenciais é a dificuldade de se atingir vãos livres amplos devido à deformação excessiva das placas de MLCC, por sua baixa rigidez, levando o dimensionamento a ser governado pelo

comportamento nos Estados Limites de Serviço (ELS). Isso pode ser observado no trabalho desenvolvido por Popovski *et al.* (2019) e Vilela (2020) que afirmam que a MLCC utilizada como pisos é, geralmente, calculada em condições de serviço (deflexão, vibração e fluência) ao invés de sua resistência mecânica (resistência à flexão e ao cisalhamento), pois é um compósito relativamente leve e flexível que pode apresentar deslocamento excessivo.

Figura 22 - Elemento de MLCC biapoiado com carregamento centrado no meio do vão.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

h_1 : é a altura da camada superior, em mm;

h_2 : é a altura da camada interna, que sofre o *rolling shear*, em mm;

h_3 : é a altura da camada inferior, em mm;

h : é a altura total do elemento de MLCC, em mm;

w : é a largura do elemento de MLCC, em mm;

L : é o comprimento do elemento de MLCC, em mm;

L_0 : é a distância entre apoios, em mm;

P : é a força aplicada no meio do vão, em N.

Vale mencionar que as placas de MLCC são projetadas como biapoiadas, resistentes em uma direção, e nas edificações funcionam como vigas biapoiadas que podem ser contínuas e suportadas pelos painéis portantes do tipo parede. Esse arranjo estrutural, em que os painéis não funcionam como placas, não permite o aproveitamento de sua capacidade portante no sentido transversal. Porém, o uso desse tipo de modelo estrutural, ou seja, do painel MLCC se comportando como viga, se explica pelas condições de fabricação, uma vez que a dimensão transversal do painel MLCC está limitada à largura da prensa, de aproximadamente 3 m, e pela logística de transporte. Assim, a dimensão transversal é bem menor que seu comprimento, já que dimensão longitudinal não precisa ser restringida e pode alcançar grandes dimensões (BRANDNER *et al.*, 2016).

Além disso, nas instruções técnicas, manuais de utilização, e nas recomendações para testes laboratoriais, os painéis de MLCC são tratados como vigas biapoiadas e não se prevê a sua utilização como placa.

Amorim, Mantilla e Carrasco (2018), descrevem a existência de três principais métodos analíticos utilizados em projetos de MLCC, que são os seguintes: Método Gama (seção 3.6.1), Método K (seção 3.6.2) e Método de Analogia por Cisalhamento ou Método de Kreuzinger (seção 3.6.3). Os equacionamentos descritos nestes itens admitem o comportamento da MLCC como uma viga biapoiada com base na Figura 22. Dessa forma, o comprimento do elemento estudado deve ser mais que o dobro do valor de sua largura, evitando assim o efeito de placa (VILELA, 2020).

Os equacionamentos apresentados para cada metodologia de cálculo foram adaptados para painéis de MLCC de três camadas, visto que este foi o tipo de compósito analisado experimentalmente neste trabalho. É importante salientar também que não foram incluídos os coeficientes de minoração da rigidez e da resistência e nem os coeficientes de majoração das ações.

3.6.1 Método Gama

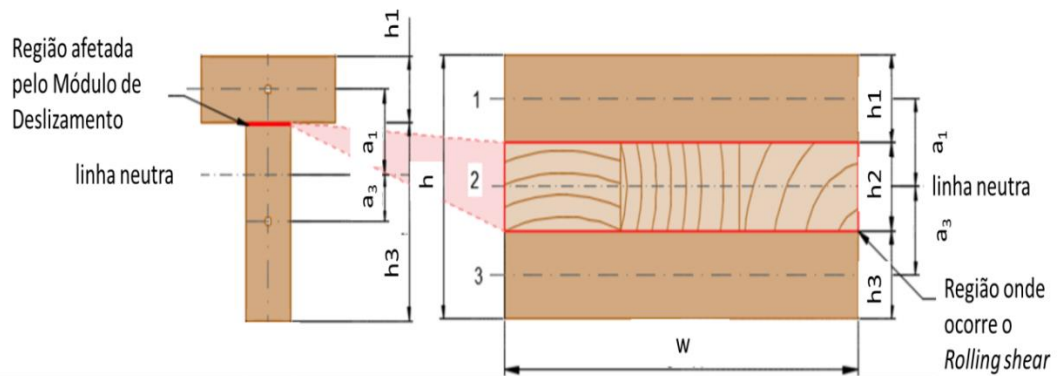
O método Gama (também conhecido como teoria das vigas unidas mecanicamente) é o mais utilizado na Europa nos projetos de elementos de MLCC (BAJZECEROVA; KOVAC; KANOCZ, 2018; POPOVSKI *et al.*, 2019). Este método considera a rigidez efetiva do painel na flexão, que depende das propriedades de elasticidade e geométricas da seção transversal e do fator γ de eficiência da conexão.

Amorim, Mantilla e Carrasco (2018) e Popovski *et al.* (2019) afirmam que foram feitas modificações no equacionamento deste método (basendo-se no modelo de Mohler disponível no Eurocode 5 para vigas compostas unidas por conectores de cisalhamento em ligações flexíveis), visto que a MLCC é um material unido por adesivo (ligação rígida).

O método considera que apenas as lamelas orientadas longitudinalmente recebem o carregamento, enquanto as lamelas orientadas transversalmente são consideradas como os conectores (FIGURA 23). Assim, a deformação causada pelo efeito de *rolling shear* é considerada, por analogia, como o deslizamento de conectores mecânicos semirrígidos.

De acordo com Pereira (2019), para o cálculo de seção mínima de painéis de MLCC deve ser determinado a rigidez efetiva (EI_{eff}). Inicialmente se calcula as distâncias entre os centroides das camadas superior e inferior e a linha neutra (LN) como também as áreas das seções dos elementos envolvidos, pelas Equações 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

Figura 23 – Comparação de uma seção “T” com a seção de um elemento de MLCC de três camadas para o dimensionamento.



Fonte: Adaptado de Pereira (2019).

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + h_2 + \frac{h_3}{2} - a_3 \quad (6)$$

Onde:

a_1 : é a distância do centroide da camada superior até a linha neutra da seção, em mm;

a_3 : é a distância do centroide da camada inferior até a linha neutra da seção, em mm;

h_1 : é a altura da camada superior, em mm;

h_2 : é a altura da camada interna, que sofre o *rolling shear*, em mm;

h_3 : é a altura da camada inferior, em mm.

$$a_3 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (\frac{h_1}{2} + h_2 + \frac{h_3}{2})}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3} \quad (7)$$

Onde:

γ_1 : é coeficiente redutor de rigidez da lamela superior, valor adimensional;

E_1 : é módulo de elasticidade na flexão das lamelas superiores, em MPa;

A_1 : é a área da seção transversal da lamela superior, em mm²;

γ_3 : é coeficiente redutor de rigidez das lamelas inferiores, valor adimensional;

E_3 : é módulo de elasticidade na flexão da lamela inferior, em MPa;

A_3 : é a área da seção transversal da lamela inferior, em mm².

$$A_1 = w \cdot h_1 \quad (8)$$

w : é a largura do elemento de MLCC, em mm.

$$A_3 = w \cdot h_3 \quad (9)$$

No caso de um elemento de MLCC biapoiado com distância entre apoios no valor de L_0 , os fatores gama (γ) das lamelas superior e inferior são determinados utilizando-se a Equação 10 e a Equação 11, respectivamente.

$$\gamma_1 = \frac{1}{(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot h_2}{G_{vt} \cdot L_0^2 \cdot w})} \quad (10)$$

L_0 : é a distância entre apoios, em mm.

G_{vt} : é a rigidez ao cisalhamento por rolling shear, em MPa (obtido por ensaio em corpo de prova, ou na ausência de valores mais precisos, estimado por $E_{c0}/160$, conforme Equação 4)

$$\gamma_3 = 1 \quad (11)$$

A rigidez efetiva do elemento de MLCC é determinado pelo uso da Equação 12 que depende das Equações 13 e 14.

$$EI_{eff} = E_1 \cdot I_1 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + E_3 \cdot I_3 + \gamma_3 \cdot E_3 \cdot A_3 \cdot a_3^2 \quad (12)$$

Onde:

EI_{eff} : é a rigidez efetiva do elemento de MLCC, em N.mm²;

I_1 : é o momento de inércia da lamela superior, em mm⁴;

I_3 : é o momento de inércia da lamela inferior, em mm⁴.

$$I_1 = \frac{w \cdot h_1^3}{12} \quad (13)$$

$$I_3 = \frac{w \cdot h_3^3}{12} \quad (14)$$

As verificações para os Estados Limites Últimos (tensão de compressão na lamela superior, tensão de tração na lamela inferior e tensões de cisalhamento nas lamelas intermediárias) devem ser feitas pelas Equações 15, 17, 18 e 20.

$$\sigma_{c01} = \frac{E_1 \cdot M \cdot (\gamma_1 \cdot a_1 + 0,5 \cdot h_1)}{EI_{eff}} \leq f_{c01} \quad (15)$$

Onde:

σ_{c01} : é a tensão de compressão na lamela superior, em MPa;

M : é o momento fletor máximo aplicado no elemento de MLCC para uma carga concentrada no meio do vão, em N.mm (Equação 16);

f_{c01} : é a resistência à compressão paralela às fibras da lamela superior, em MPa.

$$M = \frac{P \cdot L_0}{4} \quad (16)$$

$$\sigma_{t03} = \frac{E_3 \cdot M \cdot (\gamma_3 \cdot a_3 + 0,5 \cdot h_3)}{EI_{eff}} \leq f_{t03} \quad (17)$$

Onde:

σ_{t03} : é a tensão de tração na lamela inferior, em MPa;

f_{t03} : é a resistência à tração paralela às fibras da lamela inferior, em MPa.

$$\tau_{vt2} = (\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + 0,5 \cdot E_2 \cdot w \cdot h_2^2) \cdot \frac{V}{w \cdot El_{eff}} \leq f_{vt} \quad (18)$$

Onde:

τ_{vt2} : é a tensão de cisalhamento na camada interna, em MPa;

f_{vt} : é a resistência ao cisalhamento na camada interna, em MPa;

E_2 : é módulo de elasticidade na flexão perpendicular das lamelas intermediárias, em MPa;

V : é a força de corte atuante no elemento de MLCC, em N (Equação 19).

$$V = \frac{P}{2} \quad (19)$$

A verificação em relação ao Estado Limite de Serviço para uma carga concentrada no meio do vão deve ser feita em relação à flecha no meio do vão, de acordo com a Equação 20.

$$\delta_y = \frac{P \cdot L_0^3}{48 \cdot El_{eff}} \leq \frac{L_0}{300} \quad (20)$$

Onde:

δ_y : é a flecha no meio do vão para uma carga concentrada, em mm.

As desvantagens do uso deste método são: a desconsideração da deformação por cisalhamento na flecha obtida, a dependência do módulo de elasticidade efetivo em relação ao comprimento do vão livre, e a complexidade do equacionamento quando o painel tem sete camadas ou mais (POPOVSKI *et al.*, 2019).

3.6.2 Método K

O método K é comumente utilizado em cálculos estruturais com painéis compensados, por ser mais eficiente para vigas com alta razão de vão por espessura (GRANDMONT; YEH;

DAGENAIS, 2019). Os autores afirmam que neste método pode-se adotar a rigidez das camadas perpendiculares ao carregamento como sendo nula.

Gagnon e Popovski (2011) apresentam as hipóteses admitidas nesta metodologia de cálculo, conforme se seguem:

- a) Existe uma relação linear entre tensão e deformação, assim como a adoção da hipótese de Bernoulli, onde a seção transversal permanece plana após as deformações;
- b) Caso seja considerada a resistência e a rigidez de todas as camadas, faz-se uso da relação descrita na Equação 21;
- c) A deformação das camadas por cisalhamento não é levada em consideração;
- d) O valor de “ k_1 ” depende da configuração de carregamento no elemento.

$$E_{c90} = \frac{E_{c0}}{30} \quad (21)$$

No carregamento do elemento de MLCC fora do plano, com as lamelas externas paralelas ao vão, o valor de “ k_1 ” é determinado pela Equação 22.

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{c90}}{E_{c0}}\right) \cdot \frac{h_2^3}{(h)^3} \quad (22)$$

Onde:

k_1 : é o fator k de redução de rigidez, adimensional.

Levando-se em consideração a configuração apresentada na Figura 22, onde as três camadas da MLCC têm a mesma espessura, k_1 assume o valor de $\frac{781}{810}$ (aproximadamente 0,96).

A rigidez e a resistência efetivas do elemento de MLCC na flexão são determinadas pela Equação 23 e Equação 24, respectivamente.

$$E_{M,0,eff} = E_{M,0} * k_1 \quad (23)$$

Onde:

$E_{M,0,eff}$: é a rigidez efetiva à flexão do elemento de MLCC, em MPa;

$E_{M,0}$: é o módulo de elasticidade na flexão das lamelas, em MPa.

$$f_{M,0,eff} = f_{M,0} * k_1 \quad (24)$$

Onde:

$f_{M,0,eff}$: é a resistência efetiva à flexão do elemento de MLCC, em MPa;

$f_{M,0}$: é a resistência à flexão das lamelas, em MPa.

A próxima etapa é o cálculo do momento de inércia do elemento pela Equação 25. O módulo de elasticidade efetivo é, então, determinado pela Equação 26.

$$I_{eff} = \frac{w \cdot h^3}{12} \quad (25)$$

Onde:

I_{eff} : é o momento de inércia do elemento de MLCC, em mm⁴.

$$EI_{eff} = E_{M,0,eff} \cdot I_{eff} = \frac{E_{M,0} \cdot k_1 \cdot w \cdot h^3}{12} \quad (26)$$

A verificação quanto à tensão normal máxima efetiva é feita pelo uso da Equação 27. Este método não considera a verificação das tensões de cisalhamento no elemento.

$$\sigma_{max,eff} = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot P \cdot L_0}{2 \cdot w \cdot k_1 \cdot (h)^2} \leq f_{M,0,eff} \quad (27)$$

Onde:

$\sigma_{max,eff}$: é a tensão máxima efetiva aplicada no elemento, em MPa;

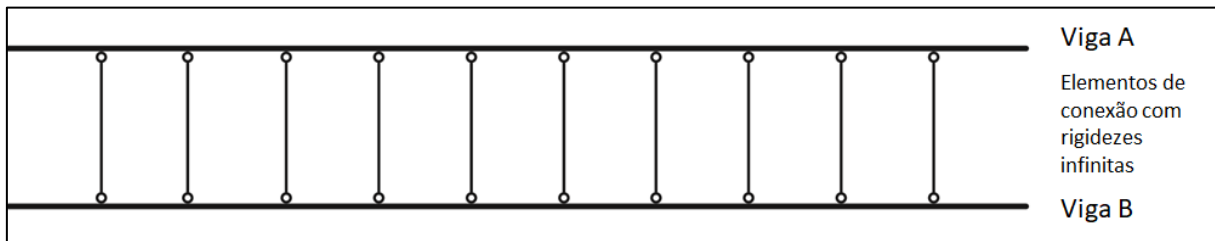
W : é o módulo de resistência elástico da seção de MLCC, em mm³.

A verificação da flecha máxima permitida para o elemento (pelo método K) deve ser calculada pela Equação 20, porém, utilizando-se do módulo de elasticidade efetivo do elemento, determinado pela Equação 26.

3.6.3 Método de analogia por cisalhamento (método de Kreuzinger)

De acordo com Pereira (2019) e Popovski *et al.* (2019), o método de Kreuzinger consiste em substituir o elemento de MLCC por duas vigas virtuais unidas por elementos infinitamente rígidos, conforme indicado na Figura 24. Os símbolos utilizados nos equacionamentos foram os mesmos dos indicados na Figura 22.

Figura 24 – Sistema de vigas virtuais utilizadas no método de analogia por cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Gagnon e Popovski (2011).

O módulo de elasticidade efetivo do elemento é a soma das rigidezes EI da viga A e da viga B, conforme Equação 28, que é dependente das Equações 29 e 30. A rigidez da viga A é a soma das rigidezes das três camadas do elemento de MLCC, enquanto a rigidez da viga B é a soma dos componentes de Steiner das lamelas, ou seja, a rigidez proveniente do distanciamento do elemento até a linha neutra da seção da viga (GAGNON; POPOVSKI, 2011; ZHOU *et al.*, 2014).

$$EI_{eff} = EI_A + EI_B \quad (28)$$

Onde:

EI_A : é a rigidez efetiva da viga A, em N.mm²;

EI_B : é a rigidez efetiva da viga B, em N.mm².

$$EI_A = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 \quad (29)$$

$$EI_B = E_1 \cdot A_1 \cdot \left(\frac{h_1+h_2}{2}\right)^2 + E_3 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_2+h_3}{2}\right)^2 \quad (30)$$

Em relação ao módulo de cisalhamento, tem-se que a viga A é infinitamente rígida e a viga B sofre deformação por cisalhamento, e esse efeito é quantificado pela Equação 31.

$$GA_{eff} = \frac{(h - \frac{h_1}{2} - \frac{h_3}{2})^2}{\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot w} + \frac{h_2}{G_{vt} \cdot w} + \frac{h_3}{2 \cdot G_3 \cdot w}} \quad (31)$$

Onde:

GA_{eff} : é o módulo de cisalhamento efetivo da viga B, em N.mm²;

G_1 : é o módulo de cisalhamento da lamela superior, em MPa;

G_3 : é o módulo de cisalhamento da lamela inferior, em MPa.

As verificações para os Estados Limites Últimos (ELU) são feitas pelas Equações 32, 33 e 34 considerando à resistência à compressão da lamela superior, à tração da lamela inferior e ao cisalhamento da camada intermediária, respectivamente.

$$\sigma_{c01} = \frac{E_1 \cdot M}{2} \cdot \left[\frac{h_1}{EI_A} + \frac{(h_1 + h_2)}{EI_B} \right] \leq f_{c01} \quad (32)$$

$$\sigma_{t03} = \frac{E_3 \cdot M}{2} \cdot \left[\frac{h_3}{EI_A} + \frac{(h_2 + h_3)}{EI_B} \right] \leq f_{t03} \quad (33)$$

$$\tau_{vt2} = \frac{V}{2} \cdot \left[\frac{3 \cdot I_2 \cdot E_2}{EI_A \cdot w \cdot h_2} + \frac{E_3 \cdot A_3}{EI_B} \right] \leq f_{vt} \quad (34)$$

A verificação quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS) é feita de acordo com a Equação 35, onde é determinada a flecha no meio do vão. O deslocamento total do elemento é a soma dos deslocamentos da viga A e da viga B.

$$\delta_y = \frac{P \cdot L_0^3}{48 \cdot EI_{eff}} \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot EI_{eff} \cdot K}{GA_{eff} \cdot L_0^2} \right] \leq \frac{L_0}{300} \quad (35)$$

Onde:

K : é o fator de forma do coeficiente de cisalhamento, adotado como aproximadamente 1,5.

Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) afirmam que esta última metodologia leva em consideração a deformação por cisalhamento de todas as camadas do painel. Este método de cálculo é utilizado pelas normas americana e canadense, pois gera resultados mais próximos da realidade de acordo com os autores.

No entanto, Popovski *et al.* (2019) apontam que este método só deve ser utilizado para elementos simétricos, onde a linha neutra fica no centro do elemento de MLCC. Em outros casos, os autores sugerem o uso do método gama.

Ressalta-se que não existe método universalmente aceito por fabricantes e projetistas de MLCC, visto que a maior parte se baseia em resultados experimentais ou em metodologia de cálculo com coeficientes de segurança altamente conservadores (FLORES *et al.*, 2015; FLORES *et al.*, 2016).

3.7 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MLCC

O método convencional de ensaio na flexão da MLCC consiste na aplicação de carga concentrada no meio do vão (ou também nos terços do vão) em corpos de prova representativos do elemento e comportamento reais a serem utilizados. São necessários equipamentos robustos de ensaio (conforme pórtico apresentado na Figura 25), tornando a caracterização mecânica das propriedades do elemento um processo oneroso e de reduzido número de amostras.

Figura 25 - Ensaio de flexão realizado em painel de MLCC.

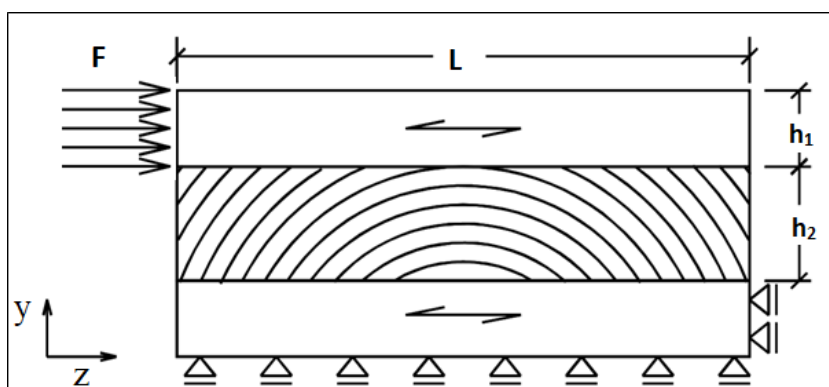


Fonte: Adaptado de Dias (2018).

Além do método convencional, utilizado para a caracterização dos parâmetros relacionados à flexão e ao efeito de *rolling shear*, existe a caracterização através de corpos de prova com menores dimensões, os quais procuram representar o efeito de cisalhamento presente na camada central do painel de MLCC.

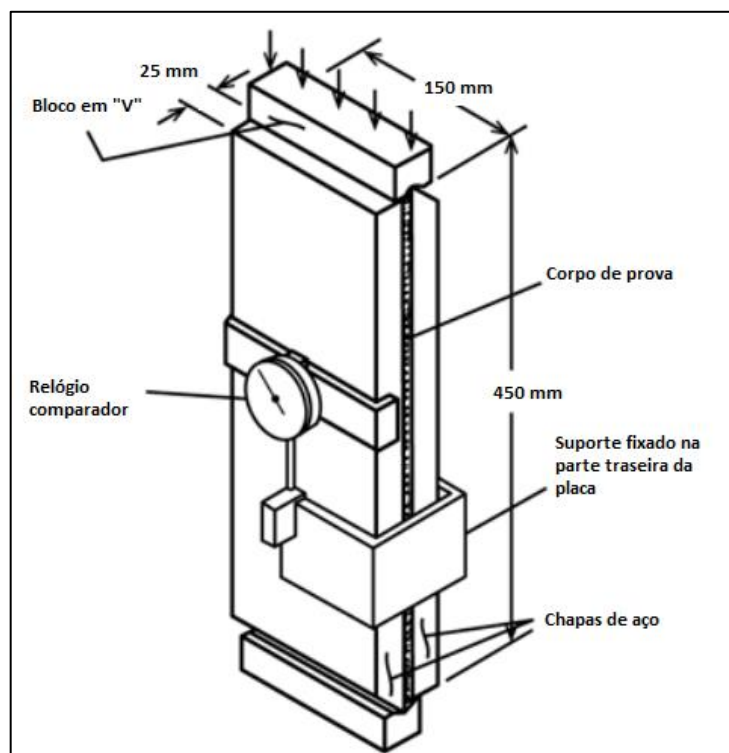
Aicher e Dill-Langer (2000) propõem um modelo para avaliar o comportamento de elementos de MLCC, seguindo as condições de vinculação e carregamento indicados na Figura 26. Esta metodologia é semelhante àquela utilizada em estudos do efeito *rolling shear* que envolvem painéis OSB e compensados, onde o compósito é colado entre duas placas metálicas (FIGURA 27) e submetido a um carregamento no sentido do plano longitudinal da chapa.

Figura 26 - Modelo para determinação de parâmetros relacionados ao *rolling shear* em amostras de menores dimensões.



Fonte: Adaptado de Aicher e Dill-Langer (2000).

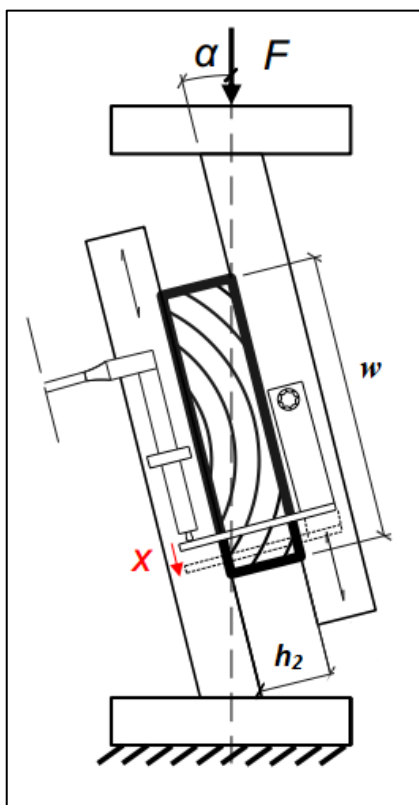
Figura 27 - Modelo experimental para determinação de parâmetros relacionados ao *rolling shear* em painéis OSB e compensados.



Fonte: Adaptado de ASTM D2718 (2018).

Para estudos com madeira maciça utiliza-se da configuração de ensaio por pratos colados, de acordo com a ASTM D2718 (2018), conforme indicado na Figura 28. Nesse caso “ α ” é o ângulo de inclinação do corpo de prova - 14° para estudos com elementos de madeira maciça (BS EN 408, 2012) - e “ x ” é a direção de deslocamento provocado pela aplicação da força “ F ”.

Figura 28 - Configuração de ensaio por pratos colados para determinação da rigidez e resistência ao *rolling shear* de madeiras maciças.



Fonte: Adaptado de Ehrhart *et al.* (2015).

Zhou *et al.* (2014) e Sikora, McPolin e Harte (2016) utilizaram o método de cisalhamento direto por pratos colados na determinação dos parâmetros de *rolling shear* e observaram alta variabilidade dos resultados, atribuindo essas diferenças ao arranjo do teste, espessura do painel e dimensões da amostra de MLCC.

Fink, Kohler e Brandner (2018) também afirmam que resultados de ensaios de *rolling shear* por cisalhamento direto por pratos, conduzidos em peças de madeira, apresentam variabilidade de resultados significativamente superior quando comparados com resultados de ensaios de flexão em elementos da MLCC. Isto também foi observado no estudo de Wang *et al.* (2017), que testaram painéis fabricados com madeira SPF (*Spruce-pine-fir*) e adesivo poliuretano mono componente.

Portanto, maneiras alternativas de se medir os parâmetros relacionados ao *rolling shear* devem ser pesquisadas, especialmente pelo fato do método por pratos colados exigir alto tempo de ensaio e empenho devido à colagem e a limpeza dos pratos metálicos, além de grande variabilidade nos resultados obtidos (WANG *et al.*, 2018b).

De acordo com Jeleč, Varevac e Rajčić (2018), diversos estudos foram conduzidos para a determinação dos parâmetros de rigidez e resistência da MLCC relacionados ao efeito de *rolling shear*, sendo que a maioria destes ensaios foi desenvolvido com madeiras de coníferas europeias, já extensamente descritas na literatura. Os autores afirmam ainda que novos estudos têm surgido para testar outras espécies de madeira, enfatizando o uso de madeira de folhosas.

Aicher, Christian e Hirsch (2016) e Franke (2016) observaram que a madeira de folhosa da espécie *Fagus sylvatica* apresentou resistência e rigidez ao efeito de *rolling shear* de 4 a 7 vezes superior quando comparadas a outras madeiras comumente utilizadas na fabricação do MLCC.

Pangh *et al.* (2019) testaram na flexão painéis de MLCC produzidos com madeira de *Eucalyptus* e constataram que a espécie e a classe de resistência utilizadas influenciam nas propriedades finais. Os autores sugerem que pesquisas futuras foquem na caracterização dos parâmetros relacionados ao *rolling shear* e nas propriedades de delaminação de painéis fabricados com madeiras deste gênero.

Diante disso, constata-se que estudos com diferentes espécies de madeira na produção do MLCC podem contribuir para a obtenção de painéis MLCC com desempenho mecânico superior. Para Ecker, Miotto e Turmina (2017) e Vilela (2020) é primordial o desenvolvimento de estudos experimentais com painéis de MLCC fabricados com espécies brasileiras de florestas plantadas, especialmente para descrever o comportamento destes elementos sob o efeito de *rolling shear*.

3.8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ESTUDOS COM MLCC

Li (2015), Flores *et al.* (2018) e Vilela (2020) afirmam que os métodos analíticos para MLCC possuem certas restrições e simplificações e podem não prever com exatidão o comportamento mecânico do painel (especialmente o efeito de *rolling shear* e o seu complexo mecanismo de falha). Por outro lado, os métodos experimentais geram os resultados mais confiáveis, porém a altos custos e inviabilidade de se testar todas as possíveis combinações entre espécies de madeira, adesivos estruturais e configurações de camadas.

Além disso, o uso da simulação numérica pelo método dos elementos finitos é uma abordagem primordial em projetos e análises que envolvem elementos de MLCC. A modelagem computacional possibilita a reprodução numérica do comportamento dos elementos de MLCC evitando-se custos inerentes à realização de ensaios experimentais, sem a necessidade do desenvolvimento analítico, em geral, descritos por equacionamentos custosos em razão da considerável complexidade da análise nos campos das tensões e deformações (MOLINA, 2008).

O método dos elementos finitos se fundamenta em modelos matemáticos para a discretização de elementos contínuos do material, que apresentam a mesma propriedade, sendo aplicados na resolução de problemas analiticamente complexos com uso de computador (VILELA, 2020). Engenheiros e cientistas, em nível mundial, usam simulações numéricas para prever o comportamento de estruturas, sistemas mecânicos, térmicos, químicos ou elétricos em projetos e na análise de desempenho (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

Os estudos numéricos, voltados para a análise do comportamento mecânico da MLCC, fazem uso de *softwares* comerciais que tem como base o método dos elementos finitos, tais como: ANSYS (FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; FLORES *et al.*, 2015; LI, 2015; NIE, 2015; BETTI *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2016; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2018), ABAQUS (BERG *et al.*, 2019; GILEWSKI; GLEGOLA, 2019; TURESSON *et al.*, 2020) e RFEM 5 - Dublái (BAJZECEROVA; KOVAC; KANOCZ, 2018; VILELA, 2020).

O principal objetivo destes estudos avaliados foi a determinação da distribuição de tensões e deformações nos elementos estudados (posteriormente comparadas com resultados analíticos e/ou experimentais), visando prevenir futuros danos às estruturas de MLCC (FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; BETTI *et al.*, 2016).

Nos estudos numéricos é necessário definir experimentalmente as propriedades mecânicas do material analisado. Na ausência de valores mais precisos é possível a utilização de relações simplificadas para estimar as propriedades de interesse (ABNT NBR 7190, 2022; BODIG; JAYNE, 1993; VÁZQUES *et al.*, 2015). No caso da madeira, deve-se levar em conta seu comportamento ortotrópico, ou seja, propriedades mecânicas variando nas suas três direções ortogonais (R, T e L), embora alguns autores adotem a isotropia transversal ($E_L \neq E_T = E_R$) para analisar a madeira (DIAS, 2005; MOLINA, 2008).

Martínez-Martínez *et al.* (2018) atribuem o pequeno número de estudos numéricos desenvolvidos com MLCC pela complexidade gerada pela ortotropia do material.

Deve ser salientado que a análise do comportamento ortotrópico da madeira não é aleatório, mas sim uma consequência do formato cilíndrico da madeira em seu estado natural,

(GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019). Tem-se ainda que o efeito de *rolling shear* é dependente da orientação dos anéis de crescimento, e, se for utilizado um sistema de coordenadas polar na simulação, cada lamela deve ser mapeada levando-se em consideração a localização da medula, o ângulo da grã e o padrão dos anéis de crescimento (LI, 2015; NIE, 2015).

Esta metodologia (modelagem polar ortotrópica) é a ideal, mas se torna desafiadora na prática pela madeira ainda apresentar um padrão cônico de crescimento, com presença de nós, ramificações e anéis de crescimento descontínuos ou falsos (VILELA, 2020).

Para fins práticos, são assumidas simplificações na modelagem numérica da madeira como também nas relações entre as suas propriedades de resistência e elasticidade (DIAS, 2005; MOLINA, 2008). Além disso, em termos de simplificação, a modelagem ortotrópica polar só é apropriada quando o volume estudado apresenta simetria polar (LI, 2015; NIE, 2015).

Em relação aos critérios de resistência adotados para a madeira nas simulações numéricas, o ideal seria a utilização de critérios que considerassem, além da ortotropia do material, a assimetria de resistência (comportamentos diferentes na tração e na compressão) e mecânica do dano para o material. No entanto, a maioria dos *softwares* de análise numérica, utilizados na verificação do comportamento estrutural de elementos e estruturas, não é específica para a madeira, e não disponibilizam, em suas bibliotecas internas, todos os critérios de resistência necessários para os diferentes materiais que compõem as estruturas, limitando muitas vezes a análise computacional associada a forma de ruptura do material.

Uma forma de minimizar essa deficiência está na utilização sub-rotinas específicas e externas ao *software*, que considerem o critério de resistência de interesse, uma vez que o *software* permita essa possibilidade da entrada externa de uma sub-rotina. Nos parágrafos seguintes são relacionados alguns dos principais critérios de resistência utilizados para analisar a ruptura da madeira, com os comentários mais relevantes sobre as vantagens e deficiências de cada critério.

O critério de resistência de Hill tem sido o mais utilizado em trabalhos que envolvem a simulação numérica da madeira a partir da utilização do *software* ANSYS (DIAS, 2005; FLORES, RIOSECO e MATAMAL, 2007; MOLINA, 2008). O critério de Hill é uma extensão do critério de von Mises (critério da máxima energia de distorção) para a consideração da anisotropia dos materiais onde a ruptura do material independe das tensões hidrostáticas, e considera um endurecimento de trabalho junto com diferentes tensões de plastificação nas três direções ortogonais do material (MOLINA, 2008). De acordo com

Mascia e Simoni (2012), as teorias de resistência que estimam resistências iguais na tração e na compressão para materiais assimétricos são indesejáveis e alguns pesquisadores aplicam a teoria de Hill somente para casos de tração biaxial.

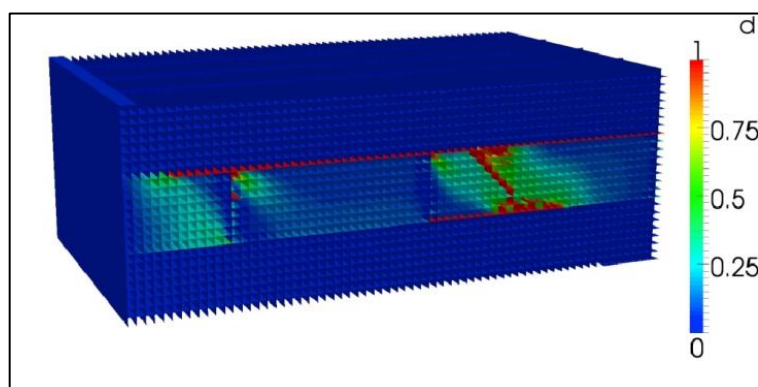
Nicolas (2006) afirma que vários outros critérios de resistência podem ser aplicados à madeira, dentre os quais podem ser citados: critério de Norris, Hoffman e Tsai-Wu, sendo o critério de Hoffman uma extensão do critério de Hill ou ainda uma simplificação do critério de Tsai-Wu. No entanto, estes critérios de resistência não estão disponíveis nos principais *softwares* de análise numérica.

Vale mencionar também que o estudo de critérios de resistência para a madeira não foi o objetivo principal do presente trabalho, mas as informações sobre os critérios de resistência, neste caso, tornam-se importantes na medida em que justificam as limitações observadas na consideração dos modelos computacionais para a análise de alguns resultados experimentais, envolvendo a ruptura dos corpos de prova, seja na simulação de ensaios de flexão ou de cisalhamento para a avaliação do efeito *rolling shear*.

Alguns estudos numéricos foram desenvolvidos para simular o efeito de *rolling shear* em elementos de MLCC, carregados na flexão, tendo-se em vista interpretar o tipo de falha apresentado pelo referido material.

Outros estudos buscaram reproduzir o comportamento da madeira em várias escalas, considerando a resistência e a rigidez das paredes das células, das fibras e dos anéis de crescimento, até atingir a escala do painel de MLCC (FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; FLORES *et al.*, 2015; FLORES *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2018). Nestes estudos, os autores buscaram determinar com precisão qual seria o caminho formado pela trinca devido à falha por *rolling shear*, como apresentado na Figura 29.

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.



Fonte: Adaptado de Flores *et al.* (2016).

Essa análise considerou algumas simplificações em relação à anatomia da madeira, visto que foi desenvolvida especificamente para coníferas que, por sua vez, possuem estrutura relativamente homogênea e composta basicamente por fibras longas.

Esta mesma abordagem não seria viável no presente estudo, pois três espécies, das quatro estudadas, são madeiras de folhosas, as quais apresentam elementos anatômicos pouco visíveis, ou seja, elementos de vasos e parênquimas, além de duas estruturas bem definidas, como o cerne e o alburno. O desenvolvimento de modelo preditivo do comportamento mecânico de madeiras com estrutura anatômica mais complexa também esteve fora do escopo do presente trabalho.

Outras duas abordagens, desenvolvidas por Nie (2015) e Li (2015), foram utilizadas na caracterização do efeito de *rolling shear* na flexão da MLCC. Em ambos os casos os autores não determinaram com precisão o caminho formado pelas trincas devido à falha por *rolling shear*, mas sim quais foram as lamelas que apresentaram maior tendência de falha e quais os níveis de tensão que elas estavam sujeitas.

Nie (2015) determinou os valores das tensões normais e de cisalhamento a partir da carga última aplicada a viga de MLCC, a qual foi determinada experimentalmente. Em seguida, o autor usou conceitos do círculo de Mohr e determinou quais nós e elementos estavam sujeitos às maiores tensões de cisalhamento e em quais ângulos ocorreram as tensões de tração máximas.

Flores *et al.* (2016) determinaram a partir de análises multi escala que a tensão de tração máxima ocorreu entre ângulos de 35° a 50° (em relação ao plano da viga), coincidindo com os resultados analíticos obtidos por Nie (2015). A metodologia de Nie (2015) indicou resultados satisfatórios, sendo necessária a determinação experimental da carga máxima suportada pelo elemento de MLCC.

Li (2015), por outro lado, realizou a modelagem do comportamento mecânico da MLCC considerando a ortotropia e não linearidade do material, a partir da utilização da tensão de escoamento e módulo tangente. O uso da não linearidade física na simulação numérica com elementos de madeira foi igualmente utilizada por Vilela (2020), por melhor representar o comportamento deste material.

Li (2015) utilizou modelo com curvas tri lineares, indicando que quando a tensão de cisalhamento, na camada ortogonal da MLCC, atingiu o valor máximo suportado pelo elemento (resistência ao *rolling shear*) este se deformou sem o aumento de carga. Consequentemente, ocorreu a redistribuição das tensões para as outras partes e elementos do painel de MLCC e a rigidez ao cisalhamento foi suavizada. O autor relata ainda que o

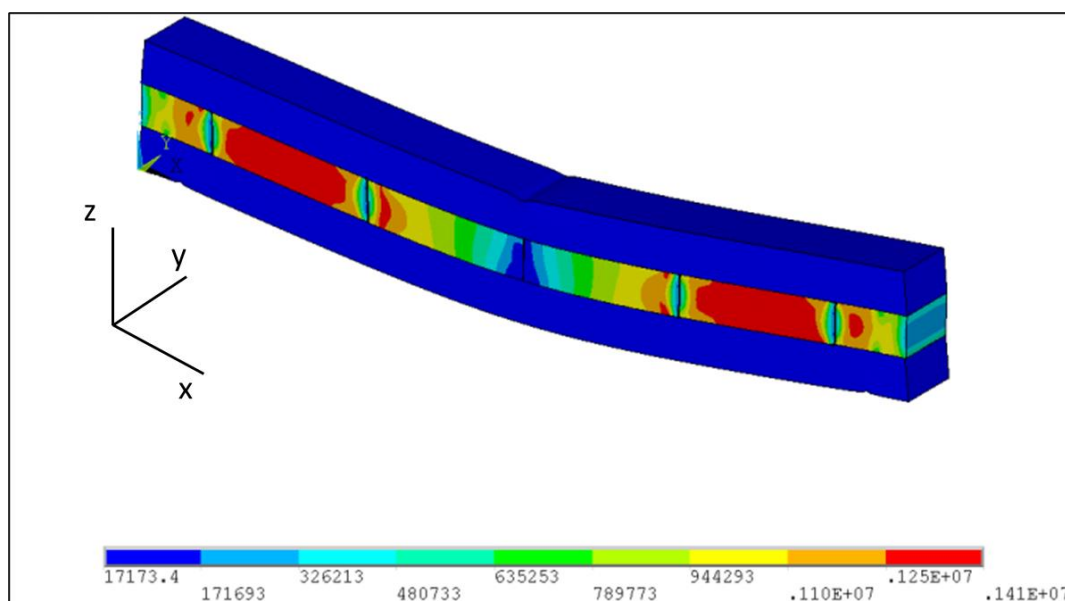
comportamento ao cisalhamento com fratura frágil não pode ser definido como não linear e que este não suporta altos níveis de tensão com aumento da deformação. Levando-se em conta estas características, deve-se modelar a perda de rigidez global do material devido às zonas com fraturas, simulando a falha por *rolling shear* sem efetivamente modelar geração e propagação de trincas na madeira.

O uso desta metodologia permite simular o elemento de MLCC a partir das propriedades das lamelas de madeira sem a necessidade dos resultados experimentais para cada situação estudada. Vale mencionar que o autor não levou em consideração a resistência à tração perpendicular às fibras em seu modelo, sendo que este é um dos principais fatores relacionados com a falha por *rolling shear* (STECHER *et al.*, 2016).

Li (2015) afirma ainda que este método simula a distribuição das tensões de forma razoável e limita as tensões de cisalhamento na solução numérica. A Figura 30 mostra a distribuição das tensões de cisalhamento em uma viga de MLCC de três camadas submetida a um carregamento concentrado no meio do vão.

Quando uma viga de MLCC é submetida à flexão de três pontos, as tensões de *rolling shear* são nulas nas regiões próximas das bordas das lacunas e máxima em 1/3 do vão (LI, 2015; NIE, 2015). Essa característica permite alocar as lamelas com maior resistência mecânica nestas posições, de forma a elevar a carga máxima suportada pelo painel antes de sua falha.

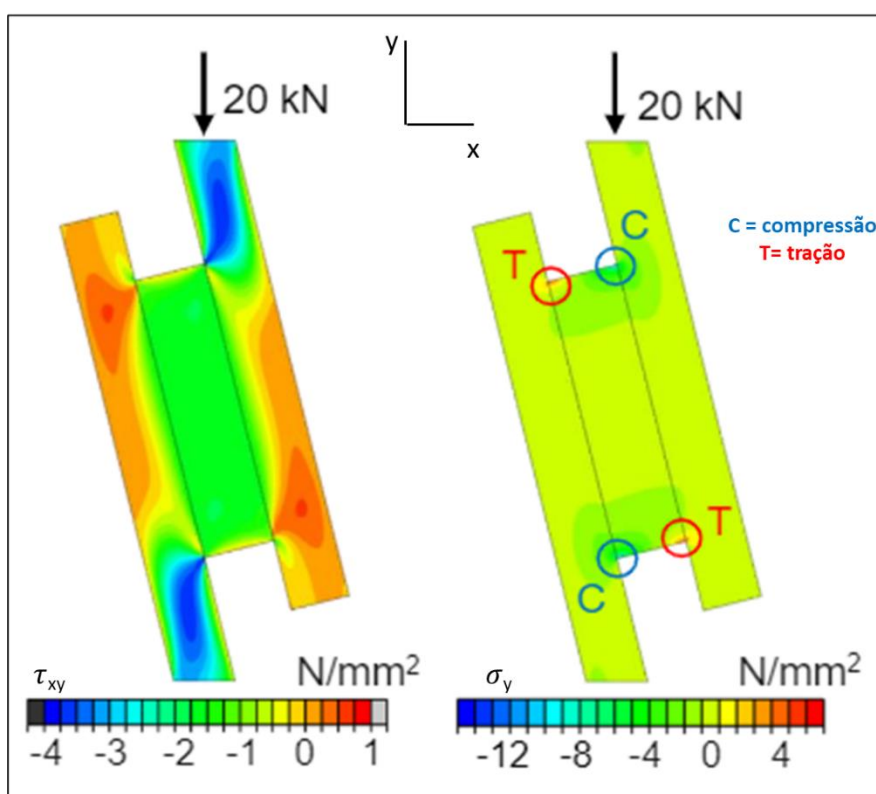
Figura 30 - Distribuição das tensões de cisalhamento (plano xy) em elemento de MLCC de três camadas submetido à flexão de três pontos, tensões em Pa – *software* ANSYS.



Fonte: Adaptado de Li (2015).

Ehrhart *et al.* (2015) realizaram simulações numéricas utilizando modelos bidimensionais, para simular o ensaio de cisalhamento por pratos colados em lamelas de madeira e notaram que a distribuição de tensões de cisalhamento foram uniformes nos elementos (FIGURA 31). Em contrapartida, as tensões normais excederam a resistência da madeira nos cantos da amostra, sendo responsáveis pelo início das trincas que levaram à ruptura do material.

Figura 31 - Tensões de cisalhamento e tensões normais no ensaio por pratos colados.



Fonte: Adaptado de Ehrhart *et al.* (2015).

Conforme apresentado nesta seção, as simulações numéricas, validadas por ensaios experimentais, foram realizadas para predizer o comportamento esperado de elementos de MLCC. Contudo, observa-se que não há consenso sobre a metodologia mais adequada para simular estes elementos, apesar dos diversos estudos terem sido desenvolvidos neste sentido até o momento (EHRHART *et al.*, 2015; FLORES; SAAVEDRA; DAS, 2015; BETTI *et al.*, 2016).

3.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A MLCC é um produto industrializado relativamente novo no Brasil e com grande potencial de crescimento na construção civil. Consequentemente, ainda não existem recomendações normativas nacionais e nem estrangeiras universalmente aceitas para o cálculo e nem para os ensaios com esse produto.

A confecção do elemento de MLCC pressupõe o uso de uma pressão de fabricação específica que é dependente do tipo de madeira e de adesivo utilizado, a qual não é exatamente conhecida e estudos experimentais são necessários para a determinação do valor de pressão de colagem mais conveniente para cada combinação espécie-adesivo.

É fundamental a definição e proposição de métodos de ensaio nacionais que possibilitem uma adequada análise do comportamento estrutural do MLCC. A quantificação experimental de parâmetros de resistência e de rigidez, para diferentes combinações espécie-adesivo, aumenta o número de informações sobre o comportamento estrutural deste produto.

O controle da qualidade da colagem de elementos de MLCC é realizado a partir de testes experimentais de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola. Dentro deste contexto, não se conhece exatamente os limites de delaminação para a MLCC, assim como as características das regiões coladas, e nem o modo de ruptura predominante nessas regiões quando se utiliza diferentes combinações espécie-adesivo com madeiras brasileiras.

O documento normativo ABNT NBR 7190-7 (2022) traz recomendações de ensaios para a determinação dos valores de resistência e de rigidez de elementos de MLCC a partir de ensaios em corpos de prova de cisalhamento e em vigas com cargas nos terços do vão. O referido documento traz também algumas recomendações para a avaliação da qualidade de colagem em elementos de MLCC. Este método se baseia no método B da norma europeia EN 14080 (2013), para ambientes externos, e propõe recomendações para os ensaios de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola, em corpos de prova de MLCC.

No entanto, o referido método de ensaio brasileiro, no caso dos ensaios de delaminação, não especifica claramente os limites máximos de abertura das linhas de cola a serem considerados em função do tipo de madeira utilizada. Também não indica o número mínimo de corpos de prova a serem ensaiados, assim como não especifica, para o período de secagem, como deve ser o posicionamento dos corpos de prova no interior da estufa, de acordo com a orientação das seções cortadas em relação ao fluxo de ar, a exemplo do que recomenda o método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022) para MLC.

No caso dos ensaios de cisalhamento das linhas de cola, o método brasileiro não especifica exatamente como devem ser quantificadas as porcentagens de ruptura no adesivo e na madeira, após o ensaio de cisalhamento da linha de cola, e a separação das partes unidas na região de colagem após a realização do ensaio.

Além disso, poucos trabalhos foram encontrados na literatura envolvendo ensaios de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola para elementos de MLCC, especialmente com amostras confeccionadas com madeiras brasileiras.

Os painéis de MLCC podem ser utilizados nas construções como elemento de piso e parede. Sobre os parâmetros de cálculo, vale dizer que os elementos de MLCC fletidos estão sujeitos às falhas por *rolling shear*. O *rolling shear* é considerado como o fator limitante em projetos com MLCC, pois provoca a redução da resistência e da rigidez do elemento estrutural, causando grandes deflexões em vãos relativamente curtos. Estudos envolvendo estes parâmetros são de grande interesse no meio técnico e científico.

O desenvolvimento de metodologias de caracterização mais precisa para as propriedades relacionadas ao *rolling shear*, relativas às amostras dos elementos confeccionados, também é de suma importância para alavancar a produção deste material e para garantir a eficiência e a qualidade do produto.

Dentro do contexto experimental, é preciso definir o melhor modelo de ensaio e de corpo de prova para determinação dos parâmetros relativos ao *rolling shear*, seja por ensaios realizados em corpos de prova de cisalhamento, para uma determinada configuração, ou por ensaios de flexão em elementos de viga ou de placa. Por se tratar de uma temática de estudo relativamente nova no Brasil, observa-se que os autores não relatam os principais detalhes das dificuldades e facilidades encontradas nos ensaios experimentais com os diferentes modelos de corpos de prova, embora elas existam.

De forma geral, nas aplicações práticas, nos estudos avaliados, e nas instruções técnicas existentes, os painéis de MLCC, apesar de bidirecionais, são considerados resistentes em uma única direção e dimensionados a partir das teorias de vigas, não sendo tratados como placa.

Dentre os diversos métodos de cálculo para verificação analítica de elementos de MLCC, três se destacam: Método gama; Método K; e Método de analogia por cisalhamento. Cada metodologia possui suas características próprias e limitações específicas, não sendo nenhuma aceita totalmente pela comunidade de projetistas de MLCC. Todas essas metodologias se baseiam no modelo de viga e não de placa.

Uma das maneiras de complementar, em conjunto com ensaios experimentais, o estudo da MLCC na determinação e investigação do comportamento relacionado ao *rolling shear*, é o

estudo numérico com base no Método dos Elementos Finitos. Os estudos numéricos auxiliam, entre outras possibilidades, no mapeamento da distribuição de tensões e deformações nos elementos de MLCC parâmetros estes não observados claramente nos ensaios experimentais. No entanto, os modelos numéricos encontrados na literatura consideram análises simplificadas, muitas vezes a partir de modelos bidimensionais e isotrópicos, em regime linear, e não indicam exatamente os critérios de resistência admitidos para os modelos numéricos propostos, os quais são importantes para uma adequada avaliação do comportamento do sistema. Também não informam exatamente o tipo de análise realizada (linear ou não linear) e nem as propriedades mecânicas (elásticas e plásticas) e suas relações utilizadas para a calibração dos modelos.

Por fim, vale dizer que a literatura nacional sobre o tema MLCC encontra-se em fase de desenvolvimento. Assim, com base no exposto, os resultados obtidos a partir do presente estudo poderão contribuir para aumentar o número de informações sobre a resistência e a rigidez relativa ao *rolling shear* para diferentes modelos de corpos de prova e diferentes combinações espécie adesivo, além de informações sobre a resposta da qualidade de colagem para diferentes níveis de pressão de fabricação considerados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as informações sobre os materiais utilizados na confecção dos painéis de MLCC, assim como as metodologias utilizadas nos ensaios experimentais e no estudo numérico para determinação da resistência e rigidez ao *rolling shear*. Também são apresentadas as principais informações sobre as verificações efetuadas a partir dos modelos analíticos de cálculo dos painéis MLCC, análises de deslocamentos por imagens, e comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos de ensaio considerados nesta pesquisa. São também apresentados os detalhes sobre as análises de qualidade de colagem para as diferentes combinações espécie adesivo.

4.1 MATERIAIS

As espécies de madeiras utilizadas na fabricação dos elementos de MLCC, provenientes de uma empresa madeireira localizada na cidade de Riberão Branco – SP, foram: *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Toona ciliata* (conhecido como Cedro Australiano) e *Acrocarpus fraxinifolius* (conhecido como Cedro Indiano).

O adesivo utilizado na colagem dos painéis foi o poliuretano bicomponente (AG101) produzido pela empresa KEHL[®], sendo o componente A o isocianato polifuncional (coloração escura com densidade de 1240 kg/m³) e o componente B um poliól para aglomerante derivado de óleos vegetais (líquido colorido com densidade de 1000 kg/m³), na proporção de 1 : 1, com tempo de início de cura de aproximadamente 30 minutos (KEHL, 2011).

4.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

Todas as madeiras utilizadas na confecção dos painéis de MLCC foram previamente caracterizadas física e mecanicamente na ABNT NBR 7190-3 (2022). Os parâmetros $\Delta\epsilon$ e CA foram adaptados de Grandmont, Yeh e Dagenais (2019).

As propriedades físicas determinadas foram: umidade, densidade aparente, densidade básica, retratibilidade, coeficiente de anisotropia (Equação 36) e o índice $\Delta\epsilon$ (Equação 37), sendo utilizadas mais de 100 amostras por espécie estudada. Os índices utilizados na Equação 36 são ilustrados pela Figura 32.

$$CA = \frac{\varepsilon_{r,3}}{\varepsilon_{r,2}} \quad (36)$$

Onde:

CA : é o coeficiente de anisotropia, valor adimensional;

$\varepsilon_{r,2}$: é a deformação devido a retração no sentido radial, em %;

$\varepsilon_{r,3}$: é a deformação devido a retração no sentido tangencial, em %.

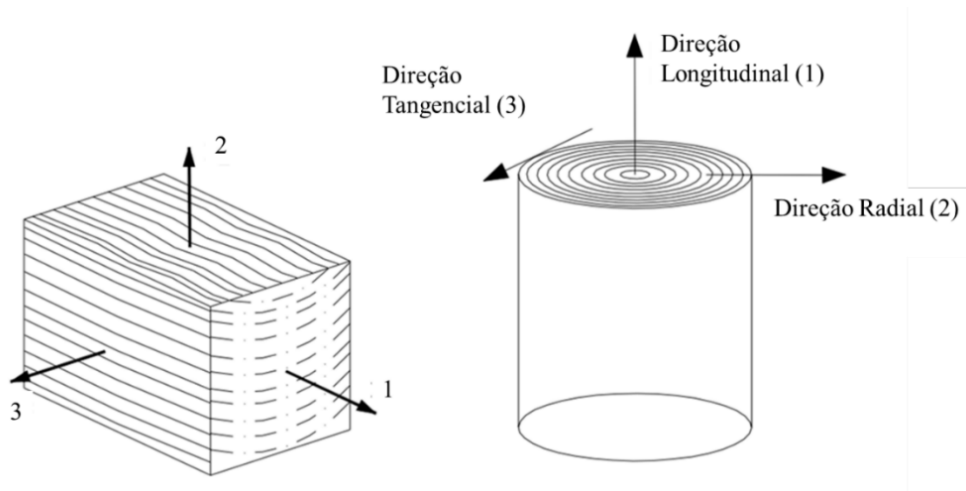
$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon_{r,3} + \varepsilon_{r,2}}{2} \right) - \varepsilon_{r,1} \quad (37)$$

Onde:

$\Delta\varepsilon$: é a diferença média dos índices de retração, em %;

$\varepsilon_{r,1}$: é a deformação devido a retração no sentido longitudinal, em %.

Figura 32 – Identificação dos índices das direções da madeira.



Fonte: Adaptado de Gesualdo (2003).

Os valores das densidades aparentes a 12% de umidade foram obtidos a partir da Equação 38, recomendada pela norma BS EN 384 (2004). Assim, foi possível converter o valor da densidade referente ao teor de umidade do corpo de prova no momento do ensaio para a densidade referente ao teor de umidade de 12%. Vale mencionar que a conversão do valor da densidade, na umidade que o corpo de prova se encontra no momento do ensaio, para o valor de densidade aparente, na umidade de 12%, também pode ser feita pelo gráfico de Kollmann (LOGSDON, 2005).

$$\rho_{12} = \rho_U \cdot \left[1 + \frac{0,5 \cdot (12 - U)}{100} \right] \quad (38)$$

Onde:

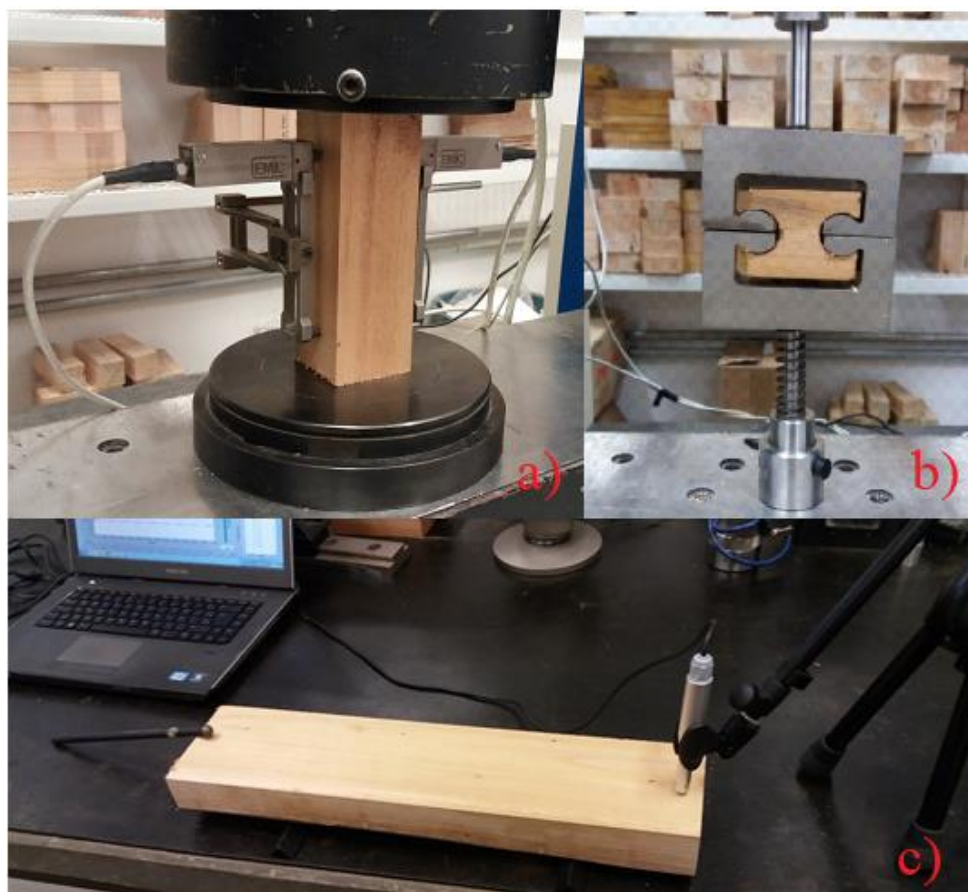
ρ_{12} : é a densidade aparente a 12% de umidade, em kg/m³;

ρ_U : é a densidade da amostra em sua umidade inicial, em kg/m³;

U : teor de umidade inicial, em %.

As propriedades mecânicas, elásticas e de resistência, determinadas foram: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{c0}) e resistência a tração normal às fibras (f_{t90}). Foi realizada também a determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo ensaio de excitação por impulso, segundo a norma ASTM E1876 (2015), através do equipamento Sonelastic®. Na Figura 33 são apresentados os detalhes dos corpos de prova durante os ensaios, sendo consideradas pelo menos 25 repetições por espécie.

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.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores de elasticidade e de resistência à compressão paralela às fibras foram corrigidos para a umidade de 12% pela Equação 39 e Equação 40, respectivamente.

$$E_{c012} = E_{coU} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U-12)}{100} \right] \quad (39)$$

Onde:

E_{c012} : é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras corrigido para 12% de umidade, em MPa;

E_{coU} : é o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras na umidade inicial, em MPa.

$$f_{c012} = f_{coU} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U-12)}{100} \right] \quad (40)$$

Onde:

f_{c012} : é a resistência à compressão paralela às fibras corrigida para 12% de umidade, em MPa;

f_{coU} : é a resistência à compressão paralela às fibras na umidade inicial, em MPa.

Tabela 5: Dimensões dos corpos de prova dos ensaios realizados.

Ensaio	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Número de amostras
Umidade	50	30	20	540
Densidade Aparente	50	30	20	540
Retratibilidade	50	30	20	540
$\Delta\epsilon$	50	30	20	540
Coeficiente de Anisotropia	50	30	20	540
Rigidez à compressão paralela às fibras	150	50	50	296
Resistência à compressão paralela às fibras	150	50	50	296
Resistência à tração normal às fibras	63,5	50	50	272
Módulo de elasticidade dinâmico	500	120	50	319
Delaminação	80	80	75	240
Resistência ao cisalhamento na linha de cola	80	80	75	240
Espessura da linha de cola	80	80	75	40
Flexão com vão variável	1200	110	75	21
Cisalhamento vertical	300	110	75	49
Cisalhamento inclinado	120	110	75	25

Fonte: Produção do próprio autor.

A classificação visual das lamelas teve por base a Tabela 2 e a Tabela 3, conforme apresentado no item 3.3. A partir das propriedades obtidas na caracterização visual e mecânica das lamelas de madeira, foi possível realizar o posicionamento destas nos painéis de MLCC, de forma que fossem utilizadas nas camadas externas lamelas de maior módulo de elasticidade e com menor número de defeitos. Na Tabela 5 são apresentadas as dimensões dos corpos de prova para cada um dos ensaios realizados neste trabalho.

4.3 ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares consistiram na determinação da pressão mínima de colagem necessária para promover a união eficiente entre as lamelas dos painéis de MLCC, de forma que este fator não interferisse negativamente no estudo dos parâmetros relacionados ao *rolling shear*. Foram testados cinco níveis de pressão de colagem (de 0,1 MPa a 1,3 MPa), para cada uma das espécies de madeira, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Nomenclatura para identificar os níveis de pressão nos ensaios preliminares.

Espécie	Pressão de 0,1 MPa	Pressão de 0,4 MPa	Pressão de 0,7 MPa	Pressão de 1,0 MPa	Pressão de 1,3 MPa
Pinus	P01	P04	P07	P10	P13
Eucalipto	E01	E04	E07	E10	E13
Cedro Australiano	T01	T04	T07	T10	T13
Cedro Indiano	A01	A04	A07	A10	A13

Fonte: Produção do próprio autor.

Foram fabricados um total de vinte painéis de MLCC, com dimensões de 50 cm x 50 cm (com total de 3 camadas com lamelas de espessuras iguais a 2,5 cm cada), para cada uma das condições descritas na Tabela 6.

De cada painel produzido foram retirados 12 corpos de prova para os ensaios de delaminação e outros 12 para os ensaios de cisalhamento das linhas de cola, totalizando 480 amostras.

4.3.1 Fabricação da MLCC

O primeiro procedimento para a fabricação dos elementos de MLCC foi a preparação das lamelas que o compunham. As lamelas foram obtidas a partir de tábuas com dimensões comerciais (3000 mm x 140 mm x 75 mm).

Estes ensaios e procedimentos foram realizados no Laboratório de Serraria e Beneficiamento e no Laboratório de Propriedades dos Materiais, ambos da UNESP – Instituto de Ciência e Engenharia de Itapeva.

As tábuas foram aplainadas com o uso de uma desempenadeira e uma desengrossadeira (FIGURA 34), com o objetivo de se produzir superfícies longitudinalmente paralelas e remover as tortuosidades provenientes do processo de secagem e de imperfeições naturais das próprias peças.

Figura 34 – Aplainamento das tábuas: (a) Desempenadeira; (b) Desengrossadeira.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após o aplainamento das peças, a seção transversal inicial passou de $140 \times 75 \text{ mm}^2$ para $120 \times 50 \text{ mm}^2$. A próxima etapa foi o seccionamento das tábuas (FIGURA 35), para que cada elemento apresentasse o comprimento final desejado para a fabricação da MLCC, ou seja, 500 mm para os ensaios preliminares, e 1500 mm para os ensaios de determinação dos parâmetros relacionados ao *rolling shear*.

Figura 35 – Seccionamento das tábuas com uso de esquadrejadeira.



Fonte: Produção do próprio autor.

Além do corte das lamelas nas dimensões desejadas, foram retirados de cada tábua corpos de prova de densidade, compressão paralela às fibras e tração normal às fibras, de acordo com as recomendações normativas da ABNT NBR 7190-3 (2022).

Foi realizado o acondicionamento das lamelas ao ar livre até que elas atingissem o teor de umidade de 12% (± 3). Para isto as lamelas foram entabicadas (FIGURA 36) e tiveram suas massas medidas periodicamente até que a umidade desejada fosse atingida, baseando-se nos resultados dos ensaios de teor de umidade.

Figura 36 – Lamelas de madeira entabicadas para secagem natural.



Fonte: Produção do próprio autor.

No dia da fabricação dos painéis de MLCC, as lamelas foram aplainadas (FIGURA 34) até atingirem dimensões de 100 x 25 mm² e 120 x 25 mm² para suas seções transversais, tendo-se em vista seus usos nos ensaios preliminares e na determinação dos parâmetros associados ao *rolling shear*, respectivamente, seguindo-se o procedimento preposto por Wang, Pirvu e Lum (2011).

Foram utilizadas lamelas com razão entre a largura e a espessura maior que 3,5, visto que este é o valor mínimo exigido quando não se realiza colagem lateral das camadas (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019). Vale mencionar que o uso de lamelas com razão largura/espessura menores pode gerar os seguintes inconvenientes: formação de lacunas excessivas, dar origem a pontos de concentração de tensão na MLCC e aumentar a fluência do material produzido.

As lamelas foram limpas com ar comprimido, visando à remoção de sujeiras e pó proveniente do aplainamento, e assim, se garantiu-se que as superfícies das peças estivessem limpas antes da colagem. O adesivo poliuretano bicomponente foi aplicado com o uso de um pincel nas superfícies das lamelas em linha de cola simples (FIGURA 37) na gramatura de 200 g/m², conforme indicado por Gomes (2018).

Figura 37 – Aplicação de adesivo nas lamelas durante a produção do MLCC.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a aplicação do adesivo, foi feita a montagem do painel MLCC de forma que a posição de cada lamela no painel foi determinada de acordo com sua classificação visual e mecânica, conforme descrito no item 4.2.

A prensagem das lamelas foi realizada em uma prensa mecânica, conforme mostrado na Figura 38. A pressão aplicada foi controlada pelo torque nos parafusos posicionados nas extremidades das barras roscadas.

Os torques aplicados nos parafusos, conforme pressões de colagem necessárias para a fabricação dos elementos de MLCC, em ordem crescente foram: 13, 53, 93, 133, 173 N.m.

Figura 38 – Prensagem de quatro placas de MLCC simultaneamente para os ensaios preliminares.



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram colocadas duas chapas metálicas revestidas com uma camada de plástico entre os painéis e barras metálicas, de forma que a pressão fosse distribuída ao longo dos elementos de MLCC e para impedir que o adesivo excedente entrasse em contato direto com a prensa.

A força total aplicada na prensagem dos elementos de MLCC foi a soma das forças exercidas por cada uma das porcas em suas respectivas barras roscadas. O torque foi aplicado com o uso de um torquímetro de estalo, sendo este valor definido de acordo com a Equação 41, proposta por Budynas e Nisbtt (2016).

$$T = 0,21 \cdot F_p \cdot D_p \quad (41)$$

Onde:

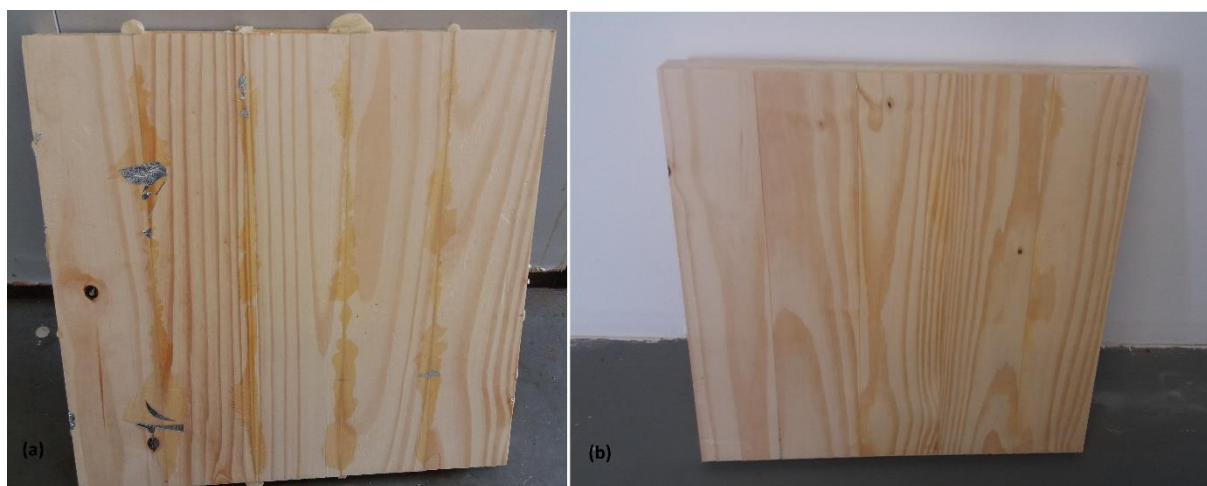
T : é o torque aplicado em cada porca, em N.mm;

F_p : é a força exercida por cada porca na barra roscada, em N;

D_p : é o diâmetro da porca (= 25,4 mm), em mm.

A etapa de prensagem foi realizada em temperatura ambiente e teve duração mínima de 24 horas, sendo que nessa etapa a pressão aplicada foi acompanhada e compensada, sempre que necessário, visando manter o valor inicial de pressão aplicada aos painéis. Foi realizado o acabamento (FIGURA 39) dos elementos confeccionados após a prensagem dos painéis. Os painéis foram então lixados em uma lixadeira de cinta (grã 120) e tiveram suas bordas seccionadas em uma esquadrejadeira para a remoção do excesso de cola.

Figura 39 – Pannel de MLCC para os ensaios preliminares: (a) Antes do acabamento; (b) Depois do acabamento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Dessa forma, foram produzidos painéis de MLCC com dimensões de 500 mm x 500 mm x 75 mm para os ensaios preliminares e painéis com 1500 mm x 480 mm x 75 mm para a determinação dos parâmetros associados ao *rolling shear*. As dimensões dos elementos de MLCC fabricados se basearam nas limitações dos equipamentos de prensagem e de ensaios.

4.3.2 Ensaios de delaminação

Os ensaios de delaminação foram realizados de acordo com o método B da norma europeia EN 391 (2001), para ambientes externos, e também com base nas recomendações de Betti *et al.* (2016), que sugerem as dimensões máximas dos corpos de prova de 80 x 80 mm². Essa opção foi considerada em função das dimensões dos painéis produzidos nessa pesquisa e em função das dimensões necessárias para promover a ruptura da área colada nos ensaios de cisalhamento das linhas de cola, posteriormente. Na Figura 40, apresenta-se o modelo de

corpo de prova utilizado na determinação das porcentagens de delaminação, sendo testados 12 amostras para cada espécie/pressão de colagem.

Figura 40 – Corpo de prova para os ensaios de delaminação e de cisalhamento das linhas de cola.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios de delaminação foram realizados em uma autoclave (FIGURA 41), com água em temperatura ambiente e aplicação de ciclos de vácuo e pressão, seguindo-se o procedimento descrito pela EN 14080 (2013). Os corpos de prova foram submetidos ao ciclo de teste composto por: vácuo inicial de 80 kPa por 30 minutos; aplicação de pressão de 550 kPa por duas horas; remoção da autoclave e secagem forçada em estufa de ar quente (65 °C) até que fosse atingida a massa do corpo de prova de 100% a 110% de seu valor inicial.

Antes dos ciclos de pressão e vácuo em autoclave, todos os corpos de prova de delaminação tiveram suas massas medidas, assim como todos os comprimentos das linhas de cola. Uma vez finalizados os ensaios em autoclave e estufa, foram realizadas as medidas dos comprimentos de abertura de cada linha de cola, conforme indicado na Figura 42, utilizando-se um paquímetro com resolução de medida de 0,01 milímetros. As porcentagens de delaminação foram obtidas pela Equação 2.

Figura 41 – Autoclave utilizada para realização dos ensaios de delaminação.



Fonte: Produção do próprio autor.

As porcentagens de delaminação para cada uma das combinações espécie/adesivo avaliadas foram comparadas com o limite de 10% recomendado por Betti *et al.* (2016) para delaminação total da linha de cola. As porcentagens de delaminação foram também comparadas com os limites de 4% e 6% recomendados pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022), dependendo do tipo de madeira utilizada na confecção do corpo de prova avaliado.

Figura 42 – Corpo de prova após o ensaio de delaminação.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.3 Ensaio de cisalhamento das linhas de cola

O ensaio de cisalhamento da linha de cola também seguiu a metodologia descrita pela EN 392 (2013), sendo que os corpos de prova possuíam a mesma dimensão do ensaio de delaminação (FIGURA 40). As dimensões utilizadas para o corpo de prova, neste caso, buscaram diminuir a área de cisalhamento, tendo em vista garantir o bom funcionamento do dispositivo metálico do ensaio, confeccionado para esta finalidade e seguindo-se as recomendações normativas citadas.

A determinação da resistência ao cisalhamento nas linhas de cola foi realizada em uma máquina universal de ensaios (EMIC – 300 kN), garantindo-se que a falha do corpo de prova, na linha de cola, ocorresse com um tempo mínimo de 20 segundos. O arranjo do corpo de prova no dispositivo de cisalhamento é indicado na Figura 43.

Figura 43 – Arranjo do ensaio de cisalhamento na linha de cola em dispositivo metálico acoplado à máquina universal de ensaios EMIC.



Fonte: Produção do próprio autor.

O valor de resistência ao cisalhamento da linha de cola foi determinado pela máxima carga suportada pela amostra para provocar a ruptura na região de colagem, de acordo com a Equação 3. Foram observados experimentalmente três tipos de falhas nos corpos de prova após os ensaios de cisalhamento nas linhas de cola, Figura 44, conforme se segue:

- a) Falha do tipo I: Separação da região de colagem (os únicos utilizados na análise dos resultados, variando de 8 a 24 amostras por tratamento, totalizando 75% das linhas de cola analisadas);
- b) Falha do tipo II: Falha por compressão perpendicular às fibras em uma das camadas, ou seja, não houve separação das lamelas na região de colagem (totalizando 19% das linhas de cola analisadas);
- c) Falha do tipo III: Falha devido ao posicionamento incorreto da amostra no dispositivo de ensaio (totalizando 6% das linhas de cola analisadas).

Figura 44 – Tipos de falhas observadas no ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Produção do próprio autor.

Não foi possível identificar visualmente a porcentagem de ruptura na madeira e no adesivo nas regiões de colagem após a ruptura nos ensaios de cisalhamento na linha de cola, pois o adesivo poliuretano utilizado se tornou translúcido após sua cura.

Assim, foi utilizado uma metodologia alternativa para a determinação da porcentagem de adesivo na superfície fraturada através do processamento de imagem, com uso do *software* ImageJ. As superfícies de cada uma das amostras que apresentaram falha do tipo I foram escaneadas para identificação das porcentagens de ruptura na madeira e no adesivo.

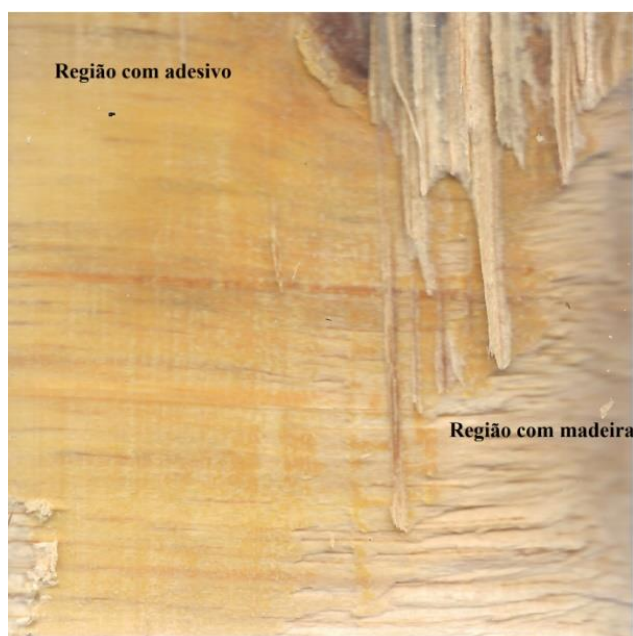
A metodologia consistiu na aquisição da imagem pelo escaneamento da superfície fraturada da amostra (FIGURA 45) no formato de imagem RGB. Em seguida, com o uso do *software* ImageJ, foi feita a separação da imagem em três partes, de acordo com o espectro de cores, sendo estas em vermelho, verde e azul (FIGURA 46). A imagem de cada espectro foi transformada em escala cinza para melhor visualização dos resultados.

Notou-se que apenas o espectro azul destacou com maior clareza a região da imagem que continha o adesivo. Logo, apenas este espectro foi utilizado na determinação da porcentagem de adesivo na região de colagem.

Por fim, foi realizada a limiarização da imagem pelo algoritmo de Otsu (FIGURA 47), por este apresentar melhor divisão das regiões madeira/adesivo em relação aos outros algoritmos disponíveis. A porcentagem de pixels em branco foi contabilizada e considerada como sendo a % de falha na madeira.

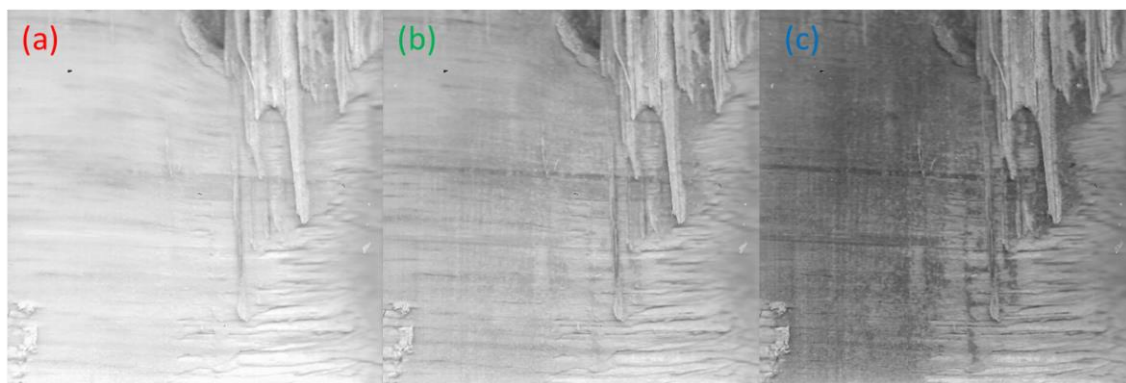
É importante ressaltar que este método está sujeito a erros, pois em alguns casos regiões como nós ou rachaduras (que apresentam tons de coloração mais escuros) são identificados como região de adesivo.

Figura 45 – Superfície da região de colagem escaneada após o ensaio de cisalhamento na linha de cola.



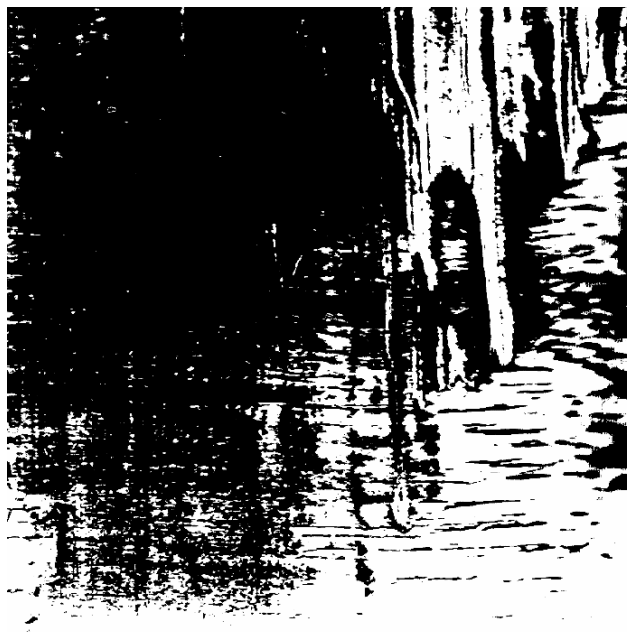
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 – Divisão da Figura 45 em três espectros de cores: (a) Vermelho; (b) Verde; e (c) Azul, respectivamente.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 47 – Limiarização pelo algoritmo de Otsu da região de colagem.



Fonte: Produção do próprio autor.

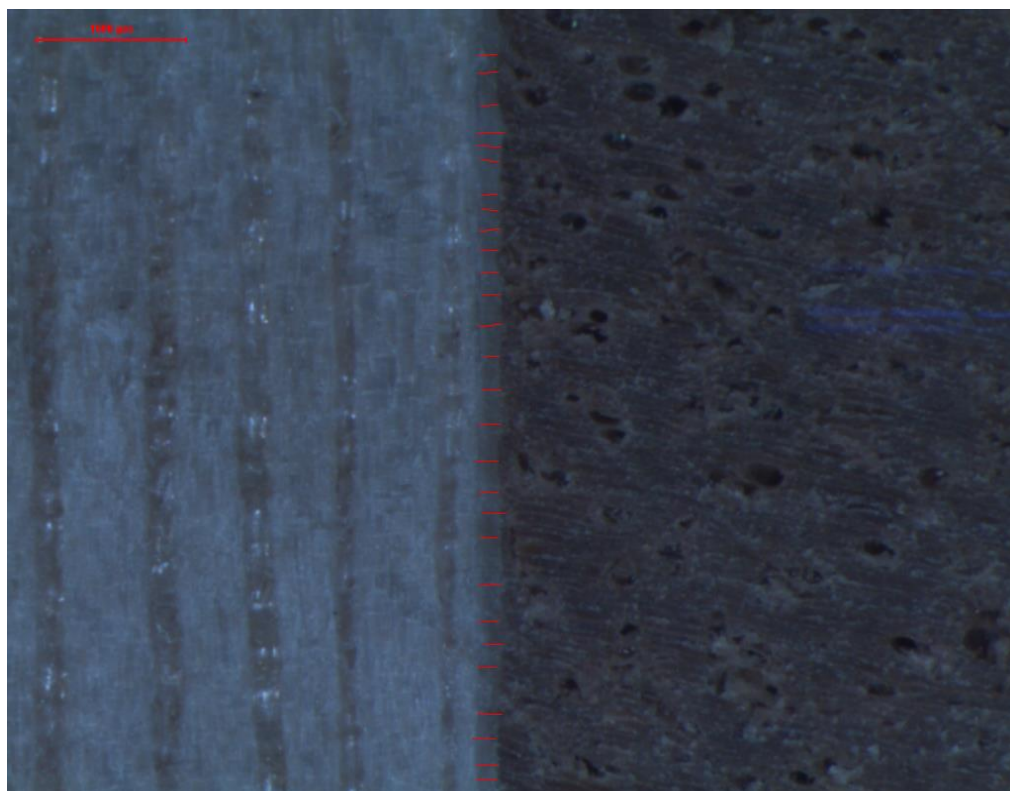
4.3.4 Medição das espessuras das linhas de cola através de microscopia

As variações das espessuras das linhas de cola ao longo dos comprimentos colados dos corpos de prova, Figura 40, foram quantificadas por análises de microscopia ótica. Cada amostra de linha de cola analisada no microscópio foi confeccionada com dimensões 80 mm x 80 mm x 50 mm.

Foram retiradas as medidas de espessura ao longo das linhas de cola dos corpos de prova confeccionados, conforme apresentado na Figura 48. Ao todo foram realizadas 1764 medidas de espessura ao longo das linhas de cola.

O microscópio utilizado nas análises é apresentado na Figura 49. As medições no microscópio foram realizadas com uso de uma lupa M80 da marca Leica®, ampliação de 60x, iluminação refletida, câmera (modelo LEICA DFC295) acoplada a um computador e com uso do *software* Leica QWin Standard V 3.5.1 de 2008.

Figura 48 – Medições da espessura ao longo da linha de cola – Madeira de Cedro Indiano.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 49 – Análise de microscopia ótica das linhas de cola em corpo de prova de dimensões 80 mm x 80 mm x 50 mm.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE *ROLLING SHEAR* PARA A MLCC

Ao término dos ensaios preliminares de delaminação e de resistência ao cisalhamento das linhas de cola, foram analisados os resultados obtidos, e identificado o nível de pressão ideal para o processo de produção da MLCC que correspondeu àquele que resultou na menor porcentagem de delaminação associada ao maior valor de resistência ao cisalhamento na linha de cola. Os elementos de MLCC produzidos na segunda etapa da pesquisa utilizaram apenas este nível de pressão ideal em sua confecção.

Os métodos utilizados para a determinação dos parâmetros relacionados ao efeito de *rolling shear* estão descritos nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 Ensaio de flexão com vão variável

O ensaio de flexão por vão variável, utilizado na determinação dos parâmetros de rigidez e de resistência relacionados ao *rolling shear*, foram baseados na metodologia descrita pela norma ASTM D198 (2015) que tem como base um modelo de viga com força aplicada no centro do vão entre apoios. Foi realizado o ensaio de flexão de três pontos, com carga concentrada no meio do vão (FIGURA 50), dentro do regime elástico do elemento.

Figura 50 – Detalhe do corpo de prova de flexão por vão variável durante o ensaio.



Fonte: Produção do próprio autor.

O procedimento para a determinação da rigidez G_{vt} , associada ao efeito *rolling shear* no caso da flexão, consistiu na medida dos módulos de elasticidade aparentes obtidos na flexão em seis diferentes medidas de vão livre: 400 mm, 540 mm, 680 mm, 820 mm, 960 mm e 1100 mm. A flecha no meio do vão foi medida com um transdutor de deslocamento do tipo LVDT fixado por base magnética. O limite de flecha para garantir o comportamento dentro do trecho linear foi igual a $L_0/300$. O módulo de elasticidade aparente para todos os vãos foi calculado de acordo com a Equação 42, sendo testado um total de 21 amostras de vigas na flexão.

$$E_{m,app} = \frac{L_0^3 \cdot (F_{0,3\%} - F_{0,15\%})}{48 \cdot I_{eff} \cdot (u_{0,3\%} - u_{0,15\%})} \quad (42)$$

Onde:

$E_{m,app}$: é o módulo de elasticidade aparente do corpo de prova, em MPa;

$F_{0,3\%}$: é a força no meio do vão com flecha igual a 0,3% do vão livre, em N;

$F_{0,15\%}$: é a força no meio do vão com flecha igual a 0,15% do vão livre, em N;

I_{eff} : é o momento de inércia do elemento de MLCC, em mm⁴;

$u_{0,3\%}$: é a flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,3\%}$, em mm;

$u_{0,15\%}$: é a flecha no meio do vão devido a aplicação de $F_{0,15\%}$, em mm.

O valor de G_{vt} foi calculado com base no coeficiente angular da reta apresentada na Figura 51, sendo seu valor definido pela Equação 43, onde foi adotado $K = 1,5$ de acordo com a norma americana ASTM D198 (2015). A Equação 43 foi gerada a partir da equação de *Timoshenko*, sendo a demonstração desta equação detalhada no Apêndice A. Note também que os símbolos “ Δ ” da Equação 43 indicam as variações do numerador e denominador para a definição da inclinação da reta da Figura 51 e, conseqüentemente, do valor de G_{vt} .

$$G_{vt} = K \cdot \frac{\Delta\left(\frac{h}{L_0}\right)^2}{\Delta\frac{1}{E_{m,app}}} \quad (43)$$

Onde:

G_{vt} : é a rigidez ao cisalhamento por rolling shear, em MPa ;

K : é o fator de forma do coeficiente de cisalhamento, adotado como aproximadamente 1,5;

h : é a altura total do elemento de MLCC, em mm;

L_0 : é a distância entre apoios, em mm;

$E_{m,app}$: é o módulo de elasticidade aparente do corpo de prova, em MPa.

Posteriormente, foi aplicado o carregamento na viga de MLCC até sua ruptura (em um único ciclo), com vão de 450 mm, de forma que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi calculada com base na Equação 44 descrita por Santos (2016). O uso do vão equivalente a seis vezes a altura da peça se justifica pelas tensões de cisalhamento geradas na camada interna da MLCC, fazendo com que a falha ocorra nesta região.

$$f_{vt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{max}}{w \cdot h} \quad (44)$$

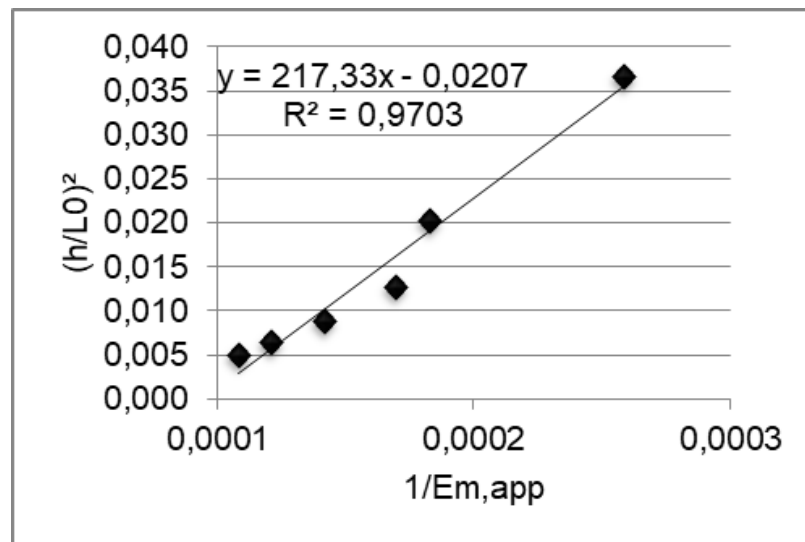
A taxa de carregamento foi definida pela Equação 45, sendo esta de 4,5 mm/min.

$$Ve = 0,06 \cdot h \quad (45)$$

Onde:

Ve : é a velocidade de aplicação de carga no meio do vão, em $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Figura 51 – Determinação do módulo de cisalhamento pelo coeficiente angular.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4.2 Ensaio de cisalhamento vertical

A metodologia empregada no ensaio de cisalhamento vertical dos elementos de MLCC seguiu as recomendações do método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022), onde o corpo de

prova utilizado possuía dimensões de 301 mm x 110 mm x 75 mm (FIGURA 52), sendo considerado o ângulo de 14° entre vértices opostos, sendo o mesmo ângulo exigido pela BS EN 408 (2012) em ensaios de rigidez ao cisalhamento. O valor de G_{vt} foi determinado de duas maneiras neste ensaio: no “método 1” (que é o método com a instrumentação proposta pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-7:2022) o deslocamento vertical foi medido apenas na lamela externa com uso de transdutor de deslocamento LVDT (FIGURA 52a). Posteriormente, no “método 2” (avaliado simplesmente para comparação dos resultados experimentais) foi medido o deslocamento relativo entre as lamelas externas com uso de transdutores de deslocamento (LVDT) em ambas as laterais do corpo de prova (FIGURA 52b). Os ensaios nos corpos de prova de cisalhamento vertical (modelo 1) para a determinação da rigidez ao *rolling shear* foram realizados no Laboratório de Propriedades dos Materiais – Instituto de Ciência e Engenharia da UNESP de Itapeva. Para o modelo 2, os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estrutura de Madeiras – EESC/USP. Foi utilizada uma taxa de carregamento de 0,5 mm/min, seguindo as recomendações da BS EN 408 (2012), sendo caracterizado um total de 61 corpos de prova. A rigidez G_{vt} foi determinada de acordo com a Equação 46, onde foi utilizada a força medida em dois pontos de deslocamento dentro do regime elástico.

Figura 52 – Determinação experimental da rigidez ao *rolling shear* (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.



Fonte: Produção do próprio autor.

$$G_{vt} = \frac{(F_{40\%} - F_{10\%}) \cdot h_2}{(d_{40\%} - d_{10\%}) \cdot w \cdot L} \quad (46)$$

Onde:

$F_{40\%}$: é a força aplicada na amostra até 40% da força máxima estimada, em N;

$F_{10\%}$: é a força aplicada na amostra até 10% da força máxima estimada, em N;

$d_{40\%}$: é o deslocamento referente a força aplicada na amostra até 40% da força máxima estimada, em N;

$d_{10\%}$: é o deslocamento referente a força aplicada na amostra até 10% da força máxima estimada, em N;

h_2 : é a altura da camada interna, que sofre o *rolling shear*, em mm;

w : é a largura do elemento de MLCC, em mm;

L : é o comprimento do elemento de MLCC, em mm.

Figura 53 – Carregamento das amostras de cisalhamento vertical até a ruptura realizadas no LaMEM/EESC/USP.



Fonte: Produção do próprio autor.

As resistências ao cisalhamento nos corpos de prova sujeitos ao cisalhamento vertical foram determinada pela Equação 47 sendo estes ensaios realizados no LAMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras) da Escola de Engenharia de São Carlos da USP. O carregamento das amostras foi realizado na máquina de ensaios AMSLER com capacidade de 25 toneladas, conforme apresentado na Figura 53.

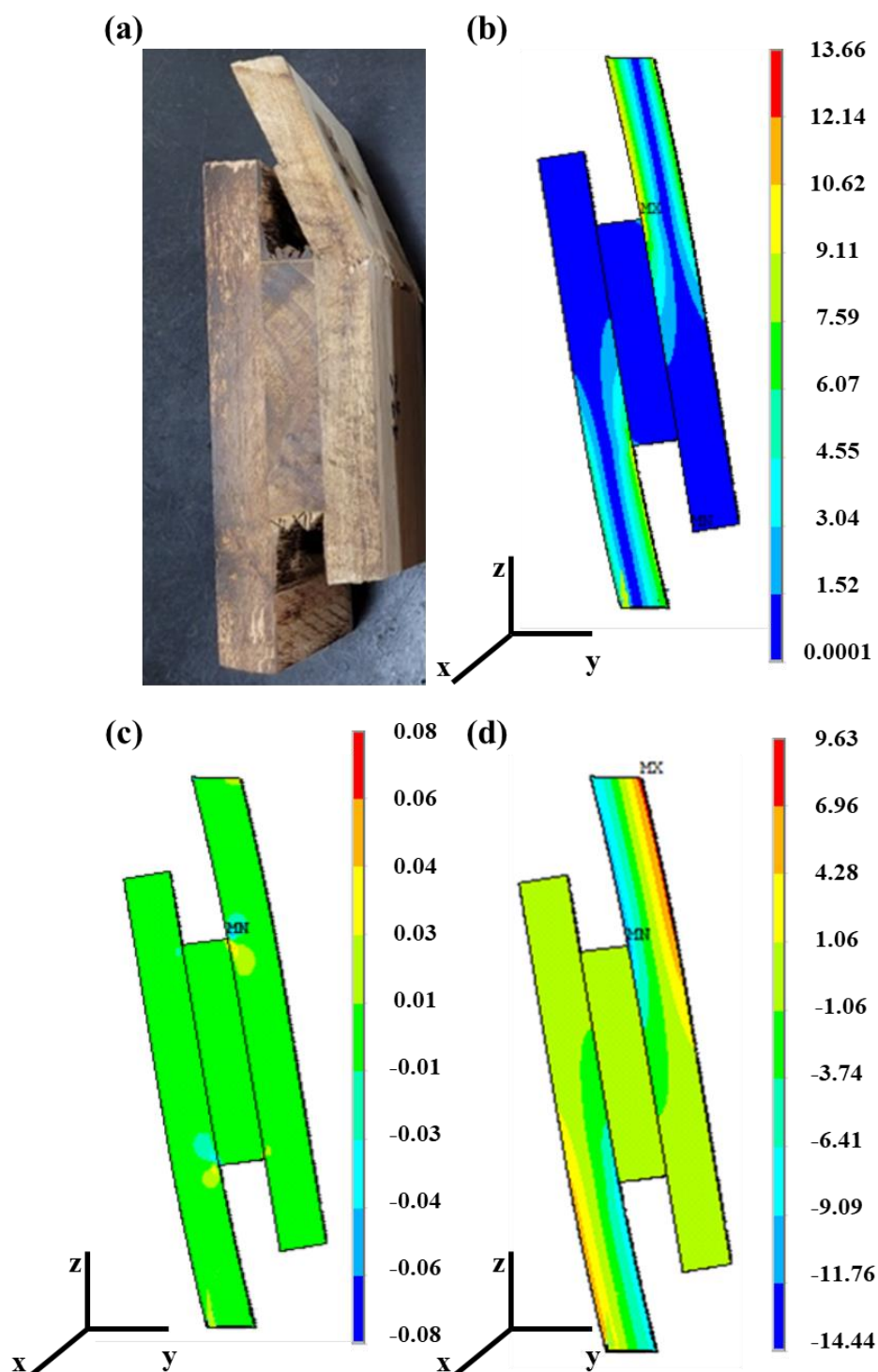
$$f_{vt} = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{w \cdot L} \quad (47)$$

4.4.3 Ensaio de cisalhamento inclinado

A metodologia empregada no ensaio de cisalhamento inclinado foi baseada inicialmente no modelo de corpo de prova, descrito por Ehrhart *et al.* (2015), apresentado na Figura 28, o qual apresenta duas “pernas alongadas” laterais. Esses corpos de prova foram retirados dos próprios painéis de MLCC confeccionados nesta pesquisa. As dimensões e forma deste

modelo corpo de prova foram posteriormente alteradas com relação à proposta inicial do projeto, visto que nos ensaios preliminares apenas o corpo de prova de *P. elliottii* com esta configuração sofreu falha por *rolling shear*, e os demais falharam por ruptura das lamelas externas do corpo de prova (FIGURA 54a). As lamelas externas que sofreram ruptura, nos ensaios subsequentes foram sendo diminuídas até a obtenção de uma nova configuração definitiva de corpo de prova de cisalhamento inclinado, que não considerava as lamelas externas alongadas (Figura 55). Para tanto, foi realizada a modelagem numérica deste modelo de corpo de prova para a verificação da concentração de tensões nas regiões onde as rupturas das lamelas laterais alongadas foram observadas. Pela distribuição de tensões de von Mises (FIGURA 54b) e distribuição de tensões principais no eixo z (FIGURA 54d), notou-se que a região com maior concentração de tensões ficou localizada nas lamelas externas, nas proximidades da linha de cola, de forma que a madeira falhou por flexão da lamela alongada com ruptura por tração na parte externa e esmagamento da parte interna. Além disso, pela distribuição de tensões de cisalhamento observada no plano radial/tangencial da lamela interna (FIGURA 54c) não foi possível observar concentração de tensão em nenhuma região da camada interna que deveria sofrer algum tipo de falha por *rolling shear*. Vale reforçar que os ensaios com este modelo de corpo de prova de cisalhamento inclinado, com as lamelas externas encurtadas não estavam previstos no cronograma inicial do presente trabalho de pesquisa e foram considerados para complemento dos resultados de rigidez e resistência ao *rolling shear*, permitindo assim a posterior comparação com os resultados obtidos no modelo de corpo de prova de cisalhamento vertical e ampliando os resultados da pesquisa.

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.



Fonte: Produção do próprio autor.

Em função da deficiência observada para ensaio do corpo de prova com pernas alongadas e dos modos de ruptura obtidos (Figura 54), foi então definido um segundo modelo

de modelo de corpo de prova de cisalhamento inclinado, com dimensões de 110 mm de largura e 120 mm de altura, conforme apresentado na Figura 55. As medições de deslocamento relativo entre as lamelas de extremidade foram realizadas com uso de relógios comparadores fixados em ambos os lados da amostra na direção inclinada do corpo de prova.

Figura 55 – Carregamento da amostra de cisalhamento inclinado sem as pernas alongadas durante o ensaio para determinação da rigidez ao *rolling shear*.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os corpos de prova de cisalhamento inclinados foram carregados até 50% da carga máxima prevista, baseado na força máxima determinada na ruptura de um corpo de prova gêmeo. A rigidez ao *rolling shear* foi calculada pela Equação 48, neste caso.

$$G_{vt} = \frac{(F_{50\%} - F_{25\%}) \cdot h_2 \cdot \cos(14^\circ)}{(u_{50\%} - u_{25\%}) \cdot w \cdot L} \quad (48)$$

Onde:

$F_{50\%}$: é a força equivalente a 50% da carga de ruptura estimada, em N;

$F_{25\%}$: é a força equivalente a 25% da carga de ruptura estimada, em N;

h_2 : é a altura da camada interna, que sofre o *rolling shear*, em mm;

$u_{50\%}$: é o deslocamento devido a aplicação de $F_{50\%}$, em mm;

$u_{25\%}$: é o deslocamento devido a aplicação de $F_{25\%}$, em mm;

w : é a largura do elemento de MLCC, em mm;

L : é o comprimento do elemento de MLCC, em mm.

Posteriormente aos ensaios de determinação da rigidez ao *rolling shear*, foram removidos os relógios comparadores e os corpos de prova foram carregados até a ruptura. A resistência ao rolling shear (f_{vt}) foi determinada por uso da Equação 47, também, neste caso.

4.4.3.1 – Análise dos deslocamentos dos corpos de prova por imagem

Numa terceira bateria de ensaios, somente para esse segundo modelo de corpo de prova (corpo de prova de cisalhamento inclinado com as lamelas externas encurtadas), foi também realizada a medição dos deslocamentos dos corpos de prova por DIC (*Digital Image Correlation*) utilizando-se *software* GOM Correlate®.

O objetivo de utilização desta técnica de imagem, além daquelas convencionais usadas por relógio comparador e transdutor (LVDT), na medida dos deslocamentos, foi aumentar as possibilidades análise dos corpos de prova com obtenção das curvas força *versus* deslocamento para valores últimos de força aplicada aos corpos de prova de cisalhamento por *rolling shear*.

Sabe-se que nem sempre é possível a utilização de relógios comparadores ou transdutores de deslocamento em ensaios de cisalhamento de corpos de prova desta natureza, para a obtenção dos deslocamentos para valores de força última aplicada, uma vez que os relógios são retirados com aproximadamente 70% da força de ruptura prevista para evitar a danificação do dispositivo.

Para tanto, uma das superfícies laterais de cada corpo de prova foi pintada com tinta branca fosca, de forma que durante as medições não houvesse interferência nos resultados devido o reflexo de luzes no ambiente (Figura 56).

Figura 56 – Corpos de prova de cisalhamento inclinado após a pintura de uma das faces (superfícies laterais).



Fonte: Produção do próprio autor.

Posteriormente, foi feita a pintura parcial da superfície branca com tinta spray da cor preta fosca, de forma a criar padrões aleatórios (superfície chapiscada com pontuações na cor preta) que o *software* pudesse identificar e medir os deslocamentos relativos dos corpos de prova.

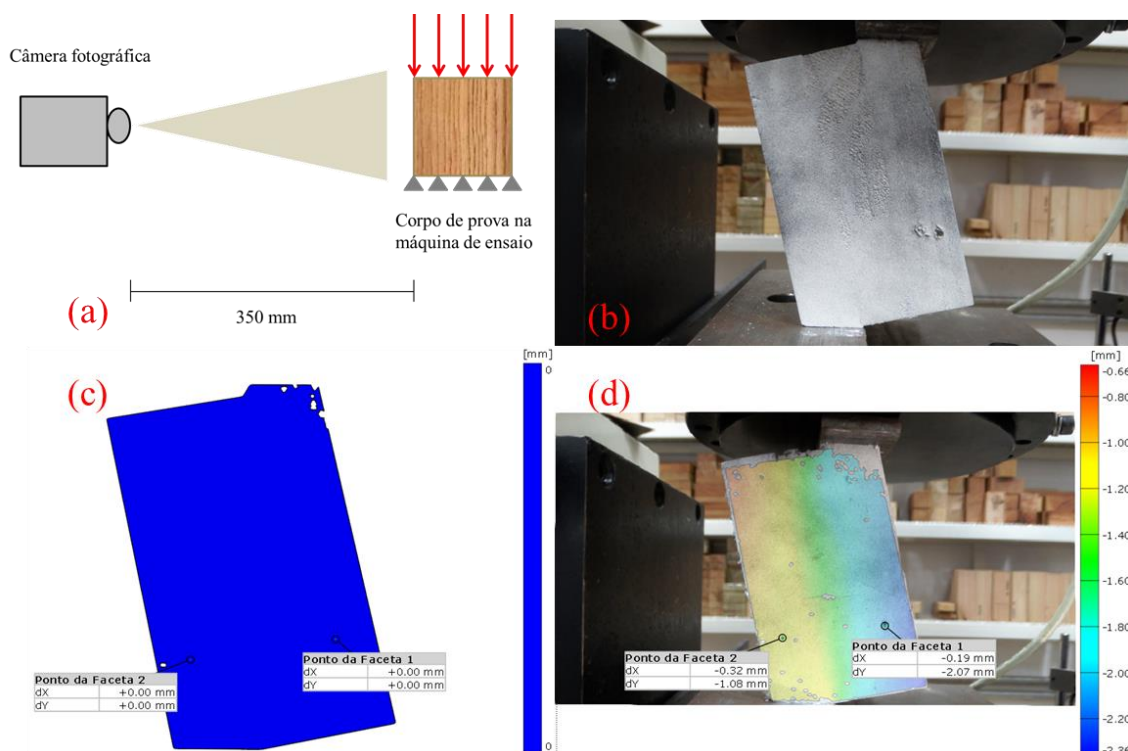
Para a aquisição das imagens foi utilizada uma câmera SONY DSC-HX300 com 20,4 megapixels e tempo de exposição de 1/30 s, posicionada a uma distância fixa de aproximadamente 35 cm do corpo de prova.

Na Figura 57 apresentam-se os detalhes do corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento inclinado, para a identificação da superfície pintada pelo *software* e a identificação dos deslocamentos nas direções horizontal e vertical das lamelas externas, pelo método de DIC.

O corpo de prova foi então fotografado em tempos determinados para cada incremento de carga aplicada, de forma que uma imagem fosse capturada a cada 10% de aumento da força, com base no valor de força última determinado pelo corpo de prova gêmeo.

A resistência ao *rolling shear* (f_{vi}) foi determinada pela Equação 63, sendo ao todo caracterizadas 31 amostras neste tipo de ensaio.

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 *software* GOM Correlate®; (d) Indicação dos deslocamentos relativos na amostra pelo *software*.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 METODOLOGIA NUMÉRICA

O estudo numérico foi realizado no *software* ANSYS, versão Student, que tem como base o método dos elementos finitos (MEF). A escolha deste *software* para a realização da simulação numérica se justifica pelo seu uso em número relevante de outros estudos desenvolvidos para MLCC (FLORES *et al.*, 2015; LI, 2015; NIE, 2015; BETTI *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2016; FLORES *et al.*, 2018), assim como pela possibilidade de análise de modelos em regime de não linearidade física e geométrica, com consideração de plasticidade para os materiais envolvidos.

O estudo numérico se dividiu em três etapas: Pré-processamento; Processamento; e Pós-processamento para cada um dos modelos de corpo de prova (flexão, cisalhamento vertical e cisalhamento inclinado) ensaiados experimentalmente. Cada uma destas etapas está descrita detalhadamente nas seções 4.5.1 e 4.5.3. Além disso, o estudo numérico considerou

inicialmente modelos puramente ortotrópicos e num segundo momento foram avaliadas as respostas dos modelos com base numa simplificação das propriedades elásticas e plásticas.

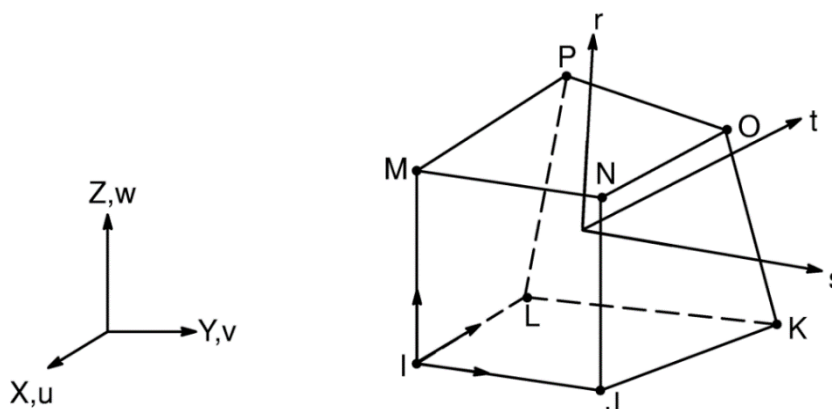
4.5.1 Pré-processamento

O pré-processamento consistiu na determinação do tipo de elemento finito a ser utilizado na geração da malha, na consideração das propriedades do material e nas condições de vinculação e de contorno do modelo.

4.5.1.1 Elemento SOLID45

Na atribuição das propriedades para as lamelas, optou-se pelo uso do SOLID45 (FIGURA 58), por se tratar de um elemento isoparamétrico de primeira ordem com oito nós e três graus de liberdade que permite representar adequadamente as propriedades ortotrópicas da madeira e sua plasticidade (MOLINA, 2008; FLORES *et al.*, 2015; NIE, 2015; BETTI *et al.*, 2016).

Figura 58 – Elemento finito SOLID45.



Fonte: Adaptado de Kohnke (1999).

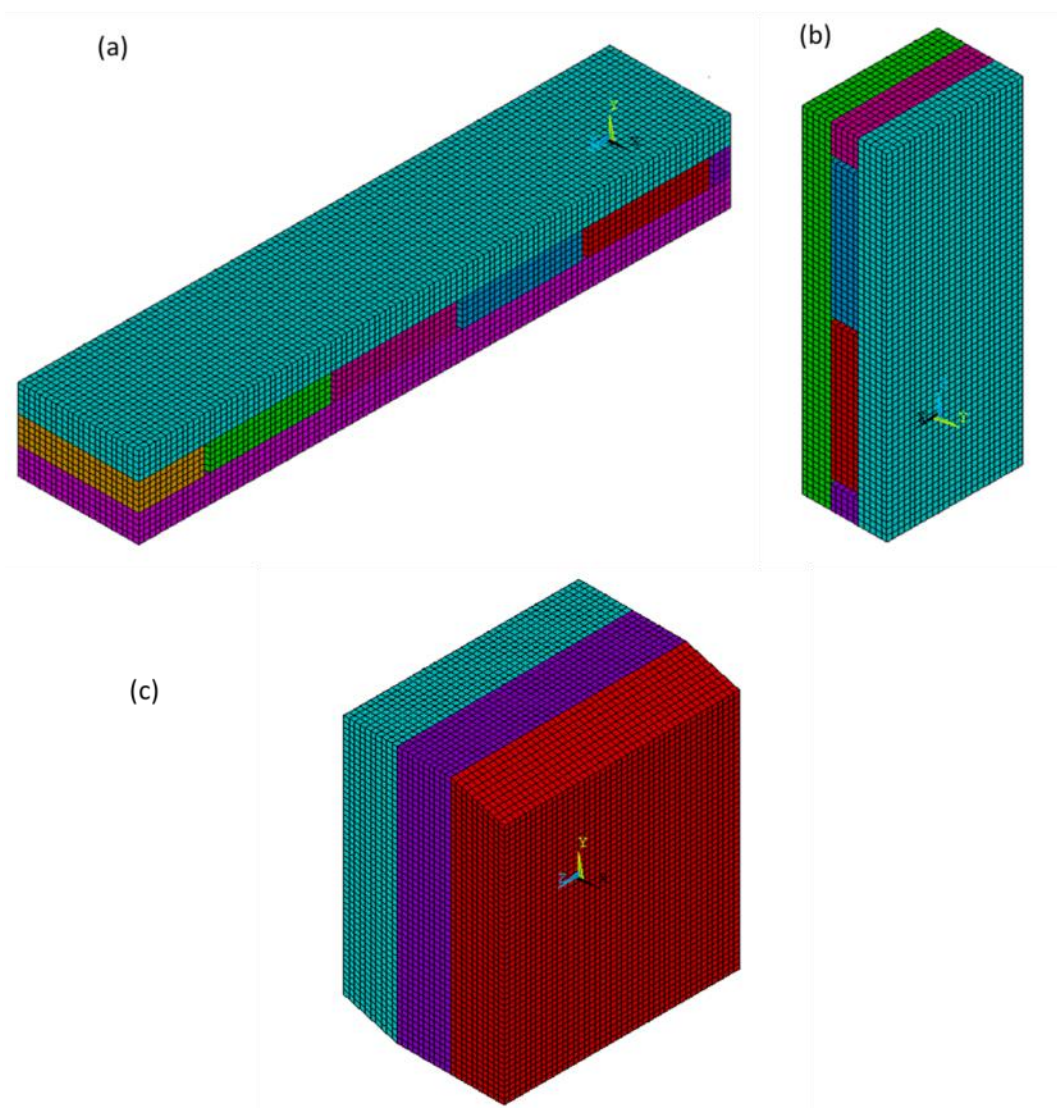
4.5.1.2 Definição da malha do modelo

Foram considerados três modelos numéricos, sendo um para analisar o corpo de prova de flexão por vão variável, outro para o corpo de prova de cisalhamento vertical e um terceiro para avaliar o corpo de prova de cisalhamento inclinado. As malhas das lamelas de madeira

foram representadas por elementos hexaédricos regulares com as mesmas dimensões nas três direções ortogonais (x, y e z) do ANSYS.

Foram construídos modelos tridimensionais de corpos de prova e cada lamela de madeira foi discretizada separadamente, de forma que os nós das interfaces das camadas fossem coincidentes. Nas camadas internas (lamelas centrais) foram admitidas com lacunas, conforme indicado na Figura 59, sendo toda a malha gerada no próprio ANSYS. A inclusão de lacunas entre as lamelas da camada que sofre *rolling shear*, de acordo com Li (2015), gera resultados mais conservadores, pois, na prática, uma pequena quantidade de adesivo penetra nestas lacunas e influencia na continuidade das lamelas adjacentes e, conseqüentemente, nos resultados associados ao *rolling shear*.

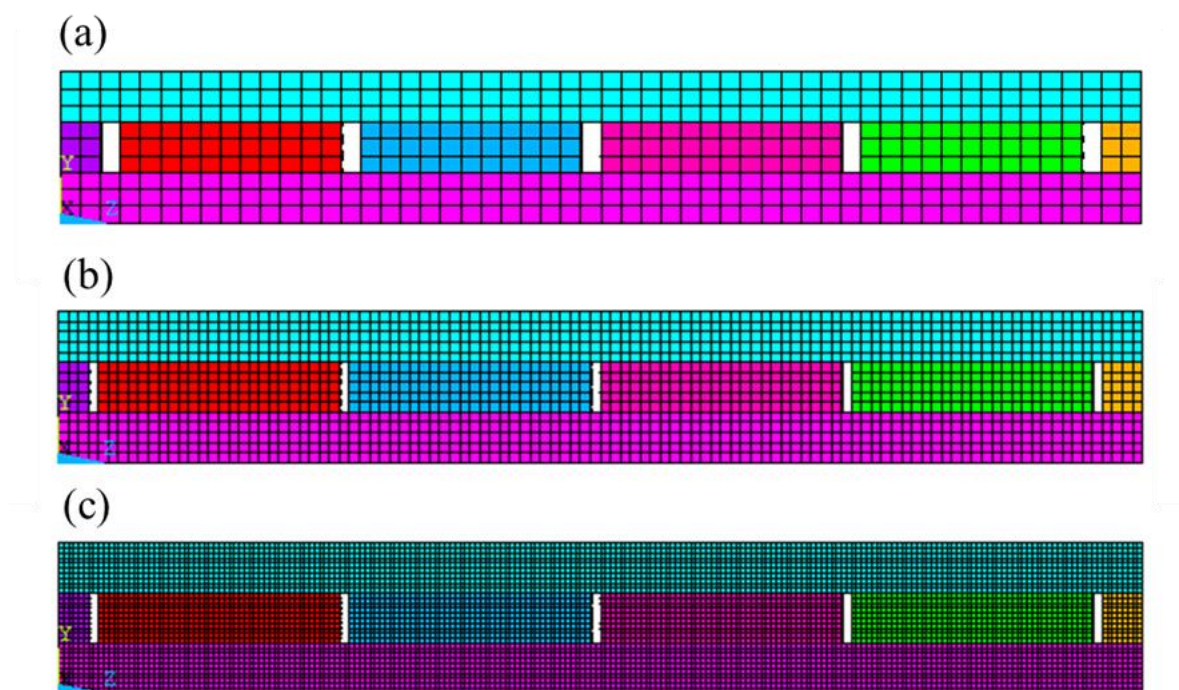
Figura 59 – Malhas dos modelos: (a) modelo de flexão por vão variável; (b) modelo de cisalhamento vertical (método 1); e (c) modelo de cisalhamento inclinado (modelo adicional).



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram considerados três níveis de refinamentos para as malhas de todos os modelos, sendo utilizados elementos finitos com 10 mm, 5 mm e 2,5 mm (FIGURA 60). A discretização da malha é uma etapa importante nos estudos numéricos, pois é nessa etapa que se verifica a convergência dos resultados numéricos para que estes representem adequadamente o modelo real a ser simulado (VILELA, 2020). No presente trabalho, após a avaliação das densidades das malhas, foram adotados os modelos que utilizaram elementos de 5 mm devido a melhor aproximação com os resultados experimentais quando comparado com o modelo que utilizou a malha de 10 mm e devido ao menor esforço computacional quando comparados aos modelos com elementos de 2,5 mm, exceto para o modelo de cisalhamento inclinado para o qual adotou-se a malha com elementos de 2,5 mm.

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.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5.1.3 Estratégias de simulação adotadas

Na primeira tentativa de modelagem dos elementos de MLCC, na fase dos estudos preliminares, utilizou-se um modelo linear ortotrópico admitindo-se somente as propriedades elásticas da madeira em cada direção (módulos de elasticidade - E , coeficientes de Poisson - ν

e módulos transversais ou de cisalhamento - G), com base nas tabelas de classe de resistência da norma ABNT NBR 7190-1 (2022). O modelo ortotrópico, neste caso, considerou diferentes propriedades elásticas nas três direções ortogonais (R , T e L) da madeira. Estes modelos foram mais conservadores, conforme também verificado por Vilela (2020), visto que estes apresentaram baixa rigidez em comparação com os resultados experimentais, mesmo com o maior refinamento da malha.

As relações entre as propriedades de elasticidade e resistência adotadas para os modelos foram tomadas inicialmente com base nos trabalhos desenvolvidos por Flores, Rioseco e Matamal (2007), Molina (2008) e também Bodig e Jayne (1993), as quais estão apresentadas no Apêndice B. Na modelagem das lamelas externas dos modelos foram admitidas as seguintes direções ortogonais: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z (longitudinal); enquanto para as lamelas da camada central do elemento MLCC foram admitidas as seguintes direções: x (longitudinal); direção y (radial) e direção z (tangencial). Essa estratégia foi utilizada para considerar a ortogonalidade entre as propriedades da madeira admitidas nas lamelas externas e internas dos elementos de MLCC.

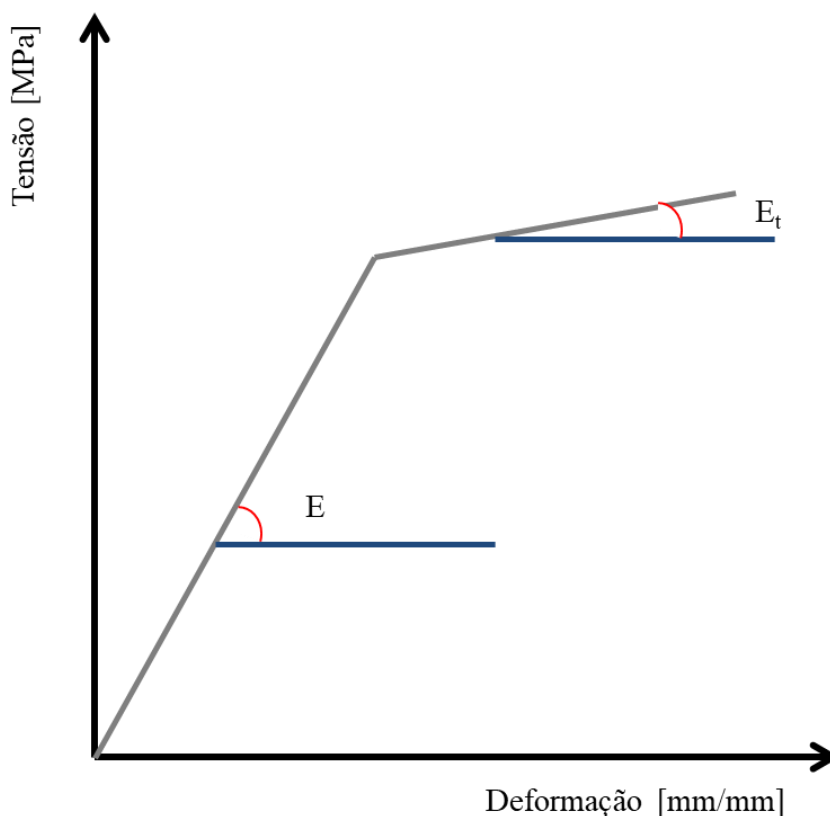
Na segunda tentativa de modelagem dos elementos de MLCC, utilizou-se novamente um modelo linear com ortotropia, porém utilizando-se agora as propriedades elásticas reais, obtidas experimentalmente em laboratório durante a caracterização das madeiras, para cada uma das lamelas constituintes do elemento simulado. Nesta segunda estratégia de modelagem, a curva de calibração apresentou melhor aproximação com a curva experimental. É importante salientar, que no caso dos modelos lineares, não se considerou a plastificação do material. Para a consideração da plastificação do material no ANSYS devem ser informadas, nos dados de entrada, as propriedades plásticas das lamelas.

Na terceira tentativa de modelagem, os modelos consideraram, além das propriedades elásticas ortotrópicas, também as propriedades plásticas ortotrópicas. Foi adotado o critério de resistência de Hill, sendo que este critério é o único disponibilizado para materiais ortotrópicos na biblioteca interna do ANSYS.

Para a simulação do comportamento elasto-plástico da madeira foram utilizadas curvas bi-lineares, conforme apresentado na Figura 61. Para o segundo trecho da curva (após o limite elástico) foi considerado o módulo de elasticidade tangente E_t equivalente a 0,1% do módulo de elasticidade em regime elástico (comportamento elasto-plástico quase perfeito, a fim de evitar problemas de convergência no ANSYS).

A curva numérica bi-linear adotada no ANSYS buscou reproduzir a curva tensão versus deformação experimental de forma simplificada.

Figura 61 – Modelo constitutivo de curva bi-linear.



Fonte: Produção do próprio autor.

As propriedades adotadas em cada um dos modelos propostos estão descritas no Apêndice B, sendo discriminados os valores experimentais das propriedades para cada lamela dos corpos de prova simulados considerando as quatro espécies de madeira utilizadas.

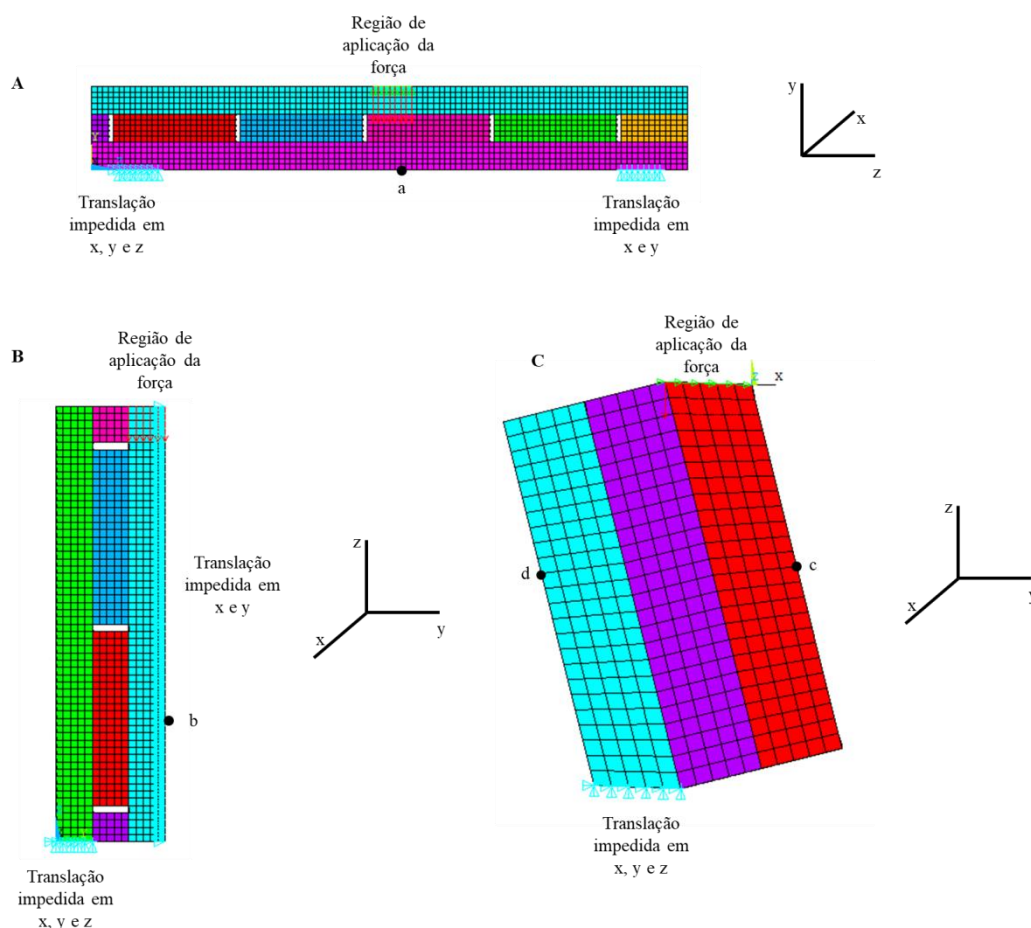
4.5.1.4 Vinculações e carregamentos

As vinculações admitidas nos modelos numéricos que representaram os corpos de prova de flexão foram coincidentes com aquelas utilizadas nos ensaios experimentais para o vão de 450 mm. Os valores de carga de ruptura obtidos nas análises experimentais dos corpos de prova foram aplicados aos nós centrais superiores (carregamento total dividido pelo número de nós nesta região) dos modelos propostos. Para evitar problemas de convergência, os nós superiores onde as forças foram aplicadas (FIGURA 62a), foram acoplados para que todos possuísem o mesmo valor de deslocamento vertical (FIGURA 62).

No segundo e terceiro modelo numérico (corpo de prova de cisalhamento vertical e de cisalhamento inclinado) também foram mantidas as configurações de vinculação e de carregamento em concordância com o que foi considerado nos ensaios experimentais. Neste

caso, primeiramente foram inseridas as restrições de apoio na base da lamela externa apoiada. No caso do cisalhamento vertical foram restringidos dos deslocamentos horizontais (translações nas direções x e y) da lamela externa vertical oposta. O carregamento foi aplicado nos nós superiores da parte central da lamela oposta, conforme indicado na Figura 62b considerando também o acoplamento dos nós de forma semelhante àquela utilizada para os modelos de viga.

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).



Fonte: Produção do próprio autor.

Os carregamentos nos modelos lineares foram aplicados em apenas um passo de carga. Por outro lado, nos modelos não lineares (aqueles que consideram a plastificação dos materiais), os carregamentos foram aplicados de forma incremental em um total de 60 passos de carga.

Além disso, foi necessário incluir restrições de deslocamentos para uma das direções transversais dos modelos (translações em x). Em outras palavras, admitiu-se que os modelos apresentaram somente deslocamentos verticais em função da carga aplicada, conforme ocorreu nos ensaios experimentais.

Estes passos foram necessários para garantir a convergência do modelo numérico não linear, sendo que todos os outros parâmetros de simulação foram adotados conforme os padrões do ANSYS (e.g. parâmetros de convergência e métodos de resolução).

Para garantir que os nós coincidentes, de diferentes lamelas, trabalhassem em conjunto e com os mesmos deslocamentos, foi utilizado o comando “NUMMRG”. Esse comando também contribuiu para evitar problemas de convergência.

4.5.2 Estudo da influência das propriedades mecânicas nos modelos numéricos

Os modelos numéricos considerados nesta pesquisa consideram inicialmente um comportamento puramente ortotrópico, ou seja, para cada uma das direções ortogonais da madeira (R, T e L) foram admitidas propriedades elásticas e plásticas.

Posteriormente, de forma a complementar o estudo numérico realizado, foi avaliada também a influência das propriedades elásticas e plásticas adotadas inicialmente no modelo ortotrópico nas respostas numéricas obtidas. Para tanto, foram realizadas três principais verificações para os modelos numéricos do corpo de prova de flexão de *A. fraxinifolius* (cedro indiano), de forma a observar se a variação das propriedades elásticas e plásticas alteravam significativamente a curva de validação e a distribuição de tensões:

A primeira consideração de simplificação, para o modelo ortotrópico não linear analisado inicialmente, foi a consideração de *isotropia transversal*, ou seja, nenhuma distinção foi feita para as direções radial e tangencial ($E_T = E_R$). Neste caso, as propriedades elásticas e plásticas foram definidas a partir da caracterização experimental das madeiras e suas relações com base em Bodig e Jayne (1993) que propõe que o valor para o módulo de cisalhamento seja obtido em função do valor do módulo de elasticidade longitudinal ($G_{LR} = E_L/16$) e os outros dois módulos de cisalhamento como uma parcela de G_{LR} ($G_{LT} = 0,94; G_{LR}$ e $G_{RT} = 0,10 G_{LR}$);

A segunda verificação da influência das propriedades elásticas na resposta dos modelos foi a adoção do valor de rigidez ao *rolling shear* G_{vt} , obtido experimentalmente nos ensaios de corpo de prova de MLCC, como dados de entrada para os módulos de cisalhamento G_{RT} , G_{LR}

e G_{LR} , ao invés de se adotar os valores de G pelas relações de Bodig e Jayne (1993), no modelo ortotrópico não linear.

4.5.3 Processamento e pós-processamento

Após a etapa de pré-processamento dos modelos foi realizada a etapa numérica seguinte (processamentos dos modelos). Durante a etapa de processamento, o *software* gerou os sistemas lineares e resolveu as respectivas equações. Os resultados foram validados de acordo com as curvas de força x deslocamento obtidas nos ensaios experimentais. Para tanto, foram considerados, em cada modelo, nós específicos (pontos a, b, c e d, conforme Figura 62) para o controle dos deslocamentos, sendo estes nós relativos aos pontos de medida dos deslocamentos com o transdutor LVDT nos ensaios experimentais. No caso da simulação das vigas, foi utilizado o deslocamento do nó central localizado da camada inferior (Figura 62A, ponto a). No caso do corpo de prova de cisalhamento vertical, foi considerado o deslocamento vertical da lamela carregada, localizado a um terço da altura do corpo de prova (Figura 62B, ponto b), onde foi feita a validação pelo método 1 de ensaio. O deslocamento do corpo de prova de cisalhamento inclinado foi medido pelo deslocamento relativo nos terços das duas lamelas externas (Figura 62C, pontos c e d). As distribuições de tensões foram analisadas para cada modelo de corpo de prova de MLCC confeccionado, a partir de cada espécie de madeira, de forma a avaliar os modos de ruptura obtidos experimentalmente.

Vale mencionar que para a análise dos modelos no ANSYS foram criados *scripts*, com as sequências de comandos, os quais foram executados pelo ANSYS e permitiram a geração e a análise automática dos modelos. O *script* construído para o modelo da viga está apresentado no Apêndice C, enquanto os *scripts* para os modelos dos corpos de prova de cisalhamento vertical e cisalhamento inclinado estão apresentados nos Apêndices D e E, respectivamente.

4.6 METODOLOGIA ANALÍTICA

A metodologia analítica consistiu na aplicação das Equações 6 a 35 para o cálculo de um elemento de MLCC de três camadas (Figura 22). Foram avaliados os três métodos de cálculo (método gama, método k e método de Kreuzinger), utilizando-se os resultados obtidos experimentalmente de G_{vt} e f_{vt} das quatro espécies de madeira, para uma viga de MLCC com 450 mm de comprimento, 110 mm de espessura e 75 mm de espessura.

Foi determinado também o fator limitante a partir da força aplicada, considerando:

- as resistências à tração/compressão;
- a resistência ao cisalhamento;
- a flecha no meio do vão.

Os valores das propriedades elásticas e plásticas utilizadas nos modelos numéricos foram valores médios, os quais foram obtidos nos ensaios experimentais, para as diferentes espécies de madeira utilizadas na confecção dos elementos de MLCC.

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados experimentais foi realizada pela análise de variância (ANOVA) de acordo com o teste de Tukey, com 5% de nível de significância.

Foram realizados os testes de normalidade dos dados e de homogeneidade da variância pelo teste de *Shapiro-Wilk* e de *Bartlett*, respectivamente.

Todas as análises foram realizadas com auxílio do *software* R versão 4.0.4 para análises estatísticas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo estão apresentados nos itens seguintes. Foi feita a comparação dos resultados obtidos neste estudo com os estudos correlatos e com as exigências normativas, quando existentes.

5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS

Os resultados médios obtidos para a caracterização física das espécies de madeira são apresentados na Tabela 7, com os respectivos desvios-padrão entre parênteses e coeficiente de variação entre colchetes. Letras iguais na vertical indicam que não existiram diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

Tabela 7: Resultados médios da caracterização física das espécies.

Espécie	ρ_{12}^* [kg/m³]	ρ_{bas} [kg/m³]	$\varepsilon_{r,1}$ [%]	$\varepsilon_{r,2}$ [%]	$\varepsilon_{r,3}$ [%]	CA	$\Delta\varepsilon$ [%]
<i>P. elliottii</i>	383C (43) [11,23%]	319C (35) [10,97%]	1,01AB (0,37) [36,63%]	3,43D (0,82) [23,91%]	5,75C (0,94) [16,35%]	1,8A (0,7) [38,89%]	3,58C (0,75) [20,95%]
<i>E. grandis</i>	413B (34) [8,23%]	345B (27) [7,83%]	0,91B (0,28) [30,77%]	4,18C (0,99) [23,68%]	6,76B (1,12) [16,57%]	1,7AB (0,4) [23,53%]	4,56B (0,84) [18,42%]
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	357D (32) [8,96%]	292D (25) [8,56%]	1,03AB (0,34) [33,01%]	4,65B (1,15) [24,73%]	6,78B (1,07) [15,78%]	1,6AB (0,7) [43,75%]	4,68B (0,68) [14,53%]
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	480A (72) [15,00%]	393A (58) [14,76%]	1,05A (0,52) [49,52%]	5,32A (1,21) [22,74%]	7,61A (2,84) [37,32%]	1,5B (0,7) [46,67%]	5,41A (1,60) [29,57%]

* ρ_{12} = densidade aparente a 12% de umidade; ρ_{bas} = densidade básica; $\varepsilon_{r,1}$ = retratibilidade na direção longitudinal às fibras; $\varepsilon_{r,2}$ = retratibilidade na direção radial; $\varepsilon_{r,3}$ = retratibilidade na direção tangencial; CA = Coeficiente de Anisotropia; $\Delta\varepsilon$ = diferença média dos índices de retração.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores das densidades aparentes das madeiras variaram entre 383 kg/m³ e 480 kg/m³, sendo que estes valores diferiram significativamente para cada espécie, onde as madeiras de *A. fraxinifolius* (cedro indiano) e de *T. ciliata* (cedro australiano) apresentaram maior e menor densidade, respectivamente.

A densidade mínima exigida para a produção de MLCC, nos Estados Unidos e no Canadá, é de 350 kg/m³ (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019). No Brasil, a ABNT

NBR 7190-1 (2022) sugere que devam ser empregadas lamelas de madeira com densidade aparente a 12% entre 400 kg/m³ e 750 kg/m³.

Considerando os valores descritos nas classes de resistência da ABNT NBR 7190-1 (2022), todas as madeiras de folhosas apresentaram valores médios de densidade inferiores ao descrito na norma e na literatura correlata (PRADO *et al.*, 2003; SETTE JUNIOR *et al.*, 2012; MELO *et al.*, 2013; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Madeiras com densidades menores, em comparação com os valores médios da respectiva espécie, indicam que as árvores foram abatidas com menor tempo de crescimento (MELO *et al.*, 2013). A pouca idade da madeira também significa que seus elementos de vasos possuem menor diâmetro (SETTE JUNIOR *et al.*, 2012), justificando assim parte dos resultados de delaminação apresentados no item 5.2.2.

Os valores de retratibilidade observados no sentido tangencial foram superiores aos valores obtidos para o sentido radial, e estes, por sua vez, foram maiores que os valores observados no sentido longitudinal ($T > R \gg L$). Os resultados no plano transversal (direções 2 e 3, Figura 32) das espécies de madeira diferiram significativamente entre si, sendo que os maiores valores foram observados para as madeiras de *A. fraxinifolius* (cedro indiano) e os menores para as madeiras de *P. elliottii*.

Os valores obtidos para os Coeficientes de Anisotropia (CA) indicaram que a madeira de *P. elliottii* foi a mais propensa a apresentar trincas e rachaduras devido às variações de umidade, enquanto o *A. fraxinifolius* (cedro indiano) foi o mais estável. Vale mencionar que, valores próximos de 1 indicariam uma situação mais próxima da ideal no que se refere à estabilidade dimensional, considerando que são geradas tensões pela retração que podem conduzir a fissuras na madeira (MASCIA, 2015).

Por outro lado, a diferença média dos índices de retração ($\Delta\epsilon$) apresentou situação oposta ao Coeficiente de Anisotropia, onde a madeira de *P. elliottii* obteve os menores valores. A variação dimensional máxima da MLCC em determinado sentido, devido à mudança de umidade, seria limitada pela camada com fibras orientadas naquela dimensão. Logo, a diferença média dos índices de retração $\Delta\epsilon$ seria uma variável proporcional às tensões geradas na linha de cola, conforme descrito no item 5.2.2.

Os resultados médios obtidos para a caracterização mecânica das espécies de madeira foram expressos na Tabela 8, com os respectivos desvios-padrão entre parênteses e coeficiente de variação entre colchetes. Letras iguais na vertical indicaram que não houve diferença significativa ao nível de 5% de significância.

A partir da resistência à compressão paralela às fibras característica, determinada na caracterização mecânica das madeiras, foi definida a classe de resistência de cada espécie de acordo com ABNT NBR 7190-1 (2022). As classes de resistência obtidas para cada madeira caracterizada foram: *P. elliottii* - C20, *T. ciliata* (cedro australiano) - D20, *E. grandis* - D30 e *A. fraxinifolius* (cedro indiano) - D40. De forma geral, o aumento dos valores das densidades das espécies de madeira relacionou-se com o aumento dos valores de suas propriedades mecânicas, como era de se esperar.

Tabela 8: Resultados da caracterização mecânica das espécies.

Espécie	f_{c012m}^* [MPa]	E_{c012m} [MPa]	f_{t9012m} [MPa]	MOE_d [MPa]	f_{c012k} [MPa]
<i>P. elliottii</i>	22,98D (2,91) [12,66%]	3612D (760) [21,04%]	2,52B (0,72) [28,57%]	4853D (981) [20,21%]	20
<i>E. grandis</i>	35,49B (3,24) [9,13%]	7947B (1178) [14,82%]	2,84A (0,64) [22,54%]	10631B (1266) [11,91]	33
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	26,79C (3,27) [12,21%]	6102C (997) [16,34%]	3,06A (0,76) [24,84%]	6882C (1083) [15,74%]	23
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	46,31A (5,32) [11,49%]	11361A (2056) [18,10%]	2,79AB (0,55) [19,71%]	11858A (1658) [13,98%]	41

* f_{c012m} = resistência média à compressão paralela às fibras com umidade de 12%; E_{c012m} = Módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras com umidade de 12%; f_{t9012m} = Resistência média à tração normal às fibras com umidade de 12%; MOE_d = Módulo de elasticidade dinâmico na flexão; f_{c012k} = resistência característica à compressão paralela às fibras com umidade de 12%.

Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando que a resistência característica à compressão normal às fibras da madeira equivale a 25% da resistência à compressão paralela às fibras (ABNT NBR 7190-1, 2022), seriam necessárias respectivas pressões de colagem superiores a 5 MPa e 5,84 MPa, no caso das madeiras de *P. elliottii* e *T. ciliata* (cedro australiano), e de 8,22 MPa e 10,36 MPa, no caso das madeiras de *E. grandis* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano), para promover o esmagamento das lamelas na direção normal às fibras durante a colagem dos elementos de MLCC. Portanto, é seguro afirmar que as faixas de pressões testadas no estudo preliminar (de 0,1 MPa a 1,3 MPa) não superaram as tensões de esmagamento na direção normal às fibras das madeiras utilizadas.

Grandmont, Yeh e Dagenais, (2019) afirmam que, para uso na fabricação de MLCC, a resistência e rigidez à compressão paralela às fibras da madeira devem ser de no mínimo 6 MPa e 6200 MPa, para lamelas no sentido transversal, e de 15 MPa e 8300 MPa, para lamelas no sentido longitudinal, respectivamente. O método de ensaio ABNT NBR 7190-7 (2022)

para MLCC, não apresenta limites quanto a estas propriedades utilizadas na fabricação de MLCC.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

5.2.1 Densidade da MLCC

Os resultados médios das densidades dos painéis de MLCC confeccionados, juntamente com a análise de variância, o desvio padrão entre parênteses e o coeficiente de variação entre colchetes, estão apresentados na Tabela 10. Letras minúsculas iguais na horizontal e maiúsculas na vertical indicaram que não houve diferença significativa ao nível de 5% de significância.

Tabela 9: Resultados da densidade da MLCC, em kg/m³.

Espécie	Pressão de 0,1 MPa	Pressão de 0,4 MPa	Pressão de 0,7 MPa	Pressão de 1,0 MPa	Pressão de 1,3 MPa	Média
<i>P. elliottii</i>	401a (39) [9,73%]	413a (38) [9,20%]	399a (25) [6,27%]	401a (24) [6,08%]	407a (34) [8,27%]	404C (32) [7,98%]
<i>E. grandis</i>	427b (16) [3,75%]	434ab (18) [4,20%]	445a (26) [5,73%]	433ab (20) [4,60%]	441ab (19) [4,39%]	436B (21) [4,75%]
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	353b (14) [3,87%]	367ab (20) [5,33%]	367ab (9) [2,55%]	377a (22) [5,89%]	369ab (27) [7,25%]	367D (21) [5,60%]
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	497a (39) [7,77%]	470b (29) [6,27%]	480ab (24) [4,92%]	487ab (16) [3,29%]	490ab (24) [4,81%]	485A (28) [5,86%]
Média	420a (60) [14,29%]	421a (46) [10,93%]	423a (48) [11,35%]	425a (46) [10,82%]	427a (52) [12,18%]	423 (51) [12,06%]

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir dos resultados de densidade da MLCC, notou-se que houve diferença significativa desta propriedade entre as espécies estudadas, seguindo o mesmo padrão da Tabela 7. É importante ressaltar que, quando comparada à densidade do painel de MLCC com a madeira *in natura*, apenas o *A. fraxinifolius* (cedro indiano) não apresentou diferença significativa. Vale mencionar que as diferenças observadas nos valores de densidade dos painéis, neste caso, se devem a utilização do adesivo e à prensagem dos painéis durante a colagem, o que aumenta a massa do painel com o preenchimento dos poros pelo adesivo.

5.2.2 Delaminação da MLCC

Os resultados médios dos ensaios de delaminação total, juntamente com a análise de variância, o desvio padrão entre parênteses e o coeficiente de variação entre colchetes, estão apresentados na Tabela 10. Letras minúsculas iguais na horizontal e maiúsculas na vertical indicam que não existiram diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

Tabela 10: Resultados médios de delaminação total, em porcentagem.

Espécie	Pressão de 0,1 MPa	Pressão de 0,4 MPa	Pressão de 0,7 MPa	Pressão de 1,0 MPa	Pressão de 1,3 MPa	Média
<i>P. elliottii</i>	12,14a (15,04) [123,89%]	0,72a (2,00) [277,78%]	4,21a (11,76) [279,33%]	3,87a (5,94) [153,49%]	3,99a (10,28) [257,64%]	5,00C (10,47) [209,40%]
<i>E. grandis</i>	23,47a (16,68) [71,07%]	22,26a (22,98) [103,23%]	26,61a (23,10) [86,81%]	11,63a (19,60) [168,53%]	13,35a (15,99) [119,78%]	19,46B (20,11) [103,34%]
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	18,33a (22,79) [124,33%]	43,56a (34,31) [78,76%]	33,35a (32,40) [97,15%]	32,31a (23,13) [71,59%]	39,10a (31,60) [80,82%]	33,33A (29,53) [88,60%]
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	21,62a (29,15) [134,83%]	2,38a (3,67) [154,20%]	8,66a (10,46) [120,79%]	14,72a (12,36) [83,97%]	19,58a (26,65) [136,11%]	13,39BC (19,83) [148,10%]

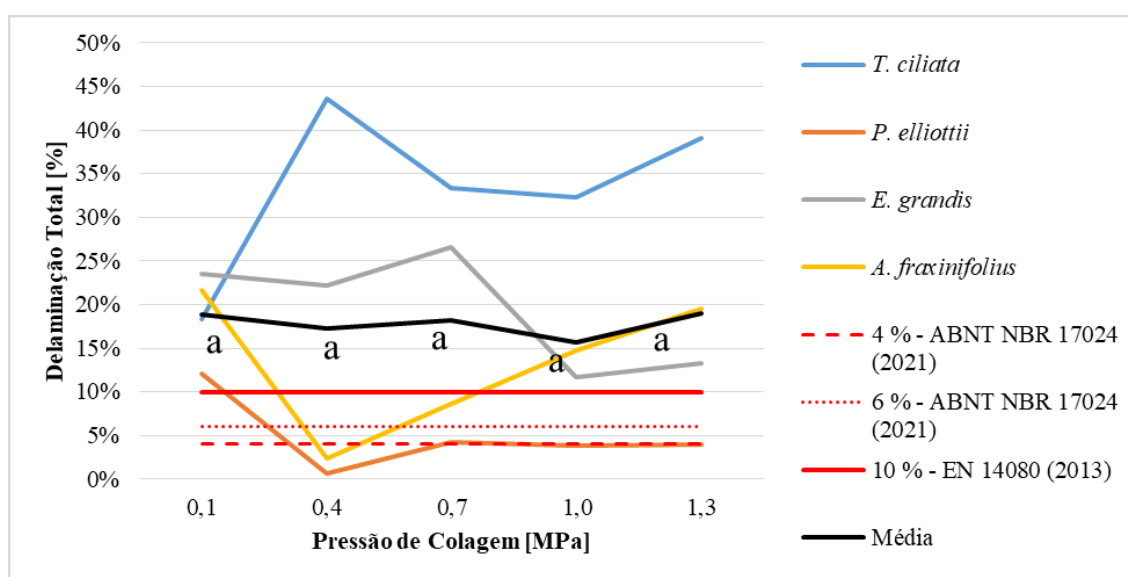
Fonte: Produção do próprio autor.

Os graus de delaminação total variaram de acordo com a espécie, sendo significativamente menores nos elementos de MLCC confeccionados com madeiras de *P. elliottii* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano). Por outro lado, de forma geral, os diferentes níveis de pressão aplicados na fabricação dos painéis de MLCC, para uma determinada espécie, não resultaram em diferenças estatísticas significativas nos valores de delaminação, assim como verificado por Yusho *et al.* (2021).

A partir da análise da Figura 63, observou-se uma tendência da diminuição da porcentagem da delaminação total, na faixa de pressão aplicada com valores entre 0,4 MPa e 1,0 MPa, para os painéis confeccionados com *T. ciliata* (cedro australiano) e *E. grandis*. Para os painéis fabricados com madeiras de *P. elliottii*, o valor a porcentagem de delaminação total se manteve praticamente constante entre as pressões 0,7 MPa e 1,0 MPa. Para os painéis de *A. fraxinifolius* (cedro indiano), de maior densidade, houve uma tendência de aumento da porcentagem de delaminação total a partir da pressão aplicada com valor de 0,4 MPa até 1,3 MPa.

A partir da análise dos resultados da Figura 63, foi observado que apenas os painéis fabricados com *P. elliotii* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano), com pressões entre 0,4 e 0,7 MPa, apresentaram porcentagem de delaminação total para os corpos de prova abaixo de 10%, conforme sugere Betti *et al.* (2016). Os limites de 4% e 6% propostos pelo método de ensaio ABNT NBR 7190-6 (2022), para elementos de MLC (com lameladas coladas paralelamente umas às outras), se mostraram muito baixos, não condizendo a realidade de delaminação para a MLCC.

Figura 63 – Verificação dos limites de delaminação total dos corpos de prova.



Fonte: Produção do próprio autor.

Faria *et al.* (2019) não observaram delaminação em MLC fabricado com madeira de *T. ciliata* e adesivo poliuretano, indicando que o sentido das lamelas na colagem da MLCC pode ser responsável pela delaminação ocorrida.

As tensões geradas devido ao inchamento e retração da madeira em painéis de MLCC são geralmente maiores que em painéis de MLC, pois a restrição à variação dimensional é maior pelo arranjo em camadas ortogonais (GRANDMONT; YEH; DAGENAIS, 2019). Esse aumento das tensões pode provocar maior nível de delaminação em comparação com amostras de MLC. Além disso, segundo os mesmos autores, a colagem de elementos de madeira dispostos ortogonalmente, entre si, pode não ser tão efetiva quanto à colagem de elementos dispostos na mesma direção das fibras.

Oliveira (2018) afirma que painéis de MLCC com três camadas não são estanques à passagem de ar e água, o que pode ter causado porcentagem acentuada de delaminação nos corpos de prova.

Betti *et al.* (2016) e Grandmont, Yeh e Dagenais (2019) indicam que os níveis de retração e inchamento da madeira geram tensões nas linhas de cola, sendo estas proporcionais ao tamanho da amostra. Assim, os altos valores de delaminação também se justificam pelo tamanho da amostra ser maior que os utilizados em elementos de MLC.

Testes de qualidade de colagem em painéis de MLCC ainda não possuem normas específicas com os requisitos mínimos de qualidade (GRANDMONT; YEH; DAGENAI, 2019).

5.2.3 Resistência ao cisalhamento na linha de cola da MLCC

Os resultados médios dos valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola, juntamente com o desvio padrão entre parênteses, coeficiente de variação entre colchetes e análise de variância, são apresentados na Tabela 11. Letras minúsculas iguais na horizontal e maiúsculas na vertical indicam que não houve diferença significativa ao nível de 5% de significância.

Tabela 11: Resultados da resistência média ao cisalhamento das linhas de cola, em MPa.

Espécie	Pressão de 0,1 MPa	Pressão de 0,4 MPa	Pressão de 0,7 MPa	Pressão de 1,0 MPa	Pressão de 1,3 MPa	Média
<i>P. elliottii</i>	2,26a (0,65) [28,76%]	2,12a (0,47) [22,17%]	2,43a (0,71) [29,22%]	2,30a (0,56) [24,35%]	2,08a (0,45) [21,63%]	2,22A (0,56) [25,22%]
<i>E. grandis</i>	2,12a (0,52) [24,53%]	2,19a (0,40) [18,26%]	2,44a (0,69) [28,28%]	2,24a (0,57) [25,45%]	2,20a (0,38) [17,27%]	2,24A (0,53) [23,66%]
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	1,62b (0,23) [14,20%]	1,95ab (0,42) [21,54%]	2,44a (0,53) [21,72%]	2,07ab (0,64) [30,92%]	1,98ab (0,44) [22,22%]	1,98B (0,51) [25,76%]
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	2,23a (0,91) [40,81%]	2,10a (0,49) [23,33%]	2,28a (0,30) [13,16%]	2,21a (0,65) [29,41%]	2,12a (0,40) [18,87%]	2,18AB (0,58) [26,61%]

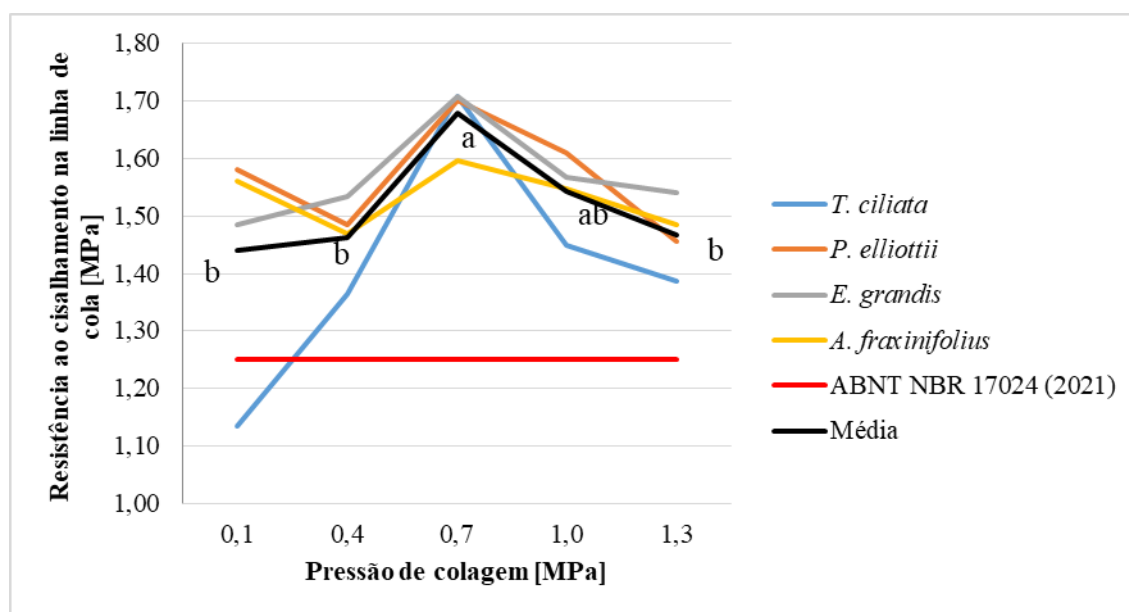
Fonte: Produção do próprio autor.

Diferentemente dos resultados de delaminação, os resultados de resistência ao cisalhamento nas linhas de cola foram influenciados pela pressão utilizada durante a fabricação dos painéis. Os painéis de MLCC fabricados com pressões de 0,7 MPa obtiveram melhor resistência em relação aos painéis fabricados com pressões de 0,1, 0,4 e 1,3 MPa. Os painéis fabricados com pressão de colagem de 1,0 MPa obtiveram resultados intermediários de resistência ao cisalhamento das linhas de cola.

De acordo com Vilguts, Serdjuks e Pakrastins (2015), a pressão necessária para a produção de MLCC deve ser de pelo menos 0,6 MPa, para promover a qualidade adequada das partes em contato. Por outro lado, todas as madeiras utilizadas na confecção dos painéis, desta pesquisa, apresentaram densidades aparentes a 12% de umidade menores que 500 kg/m³. Nesse sentido, a recomendação de utilização de uma pressão de colagem igual a 0,7 MPa, segundo a ABNT NBR 7190-6 (2022), feito para elementos de MLC, parece ser também adequada também para os painéis de MLCC.

É apresentada na Figura 64 a relação entre o nível de pressão aplicado na fabricação dos painéis e a resistência característica ao cisalhamento na linha de cola, para cada uma das espécies utilizadas.

Figura 64 – Relação entre a resistência característica na linha de cola em função do nível de pressão na fabricação da MLCC.



Fonte: Produção do próprio autor.

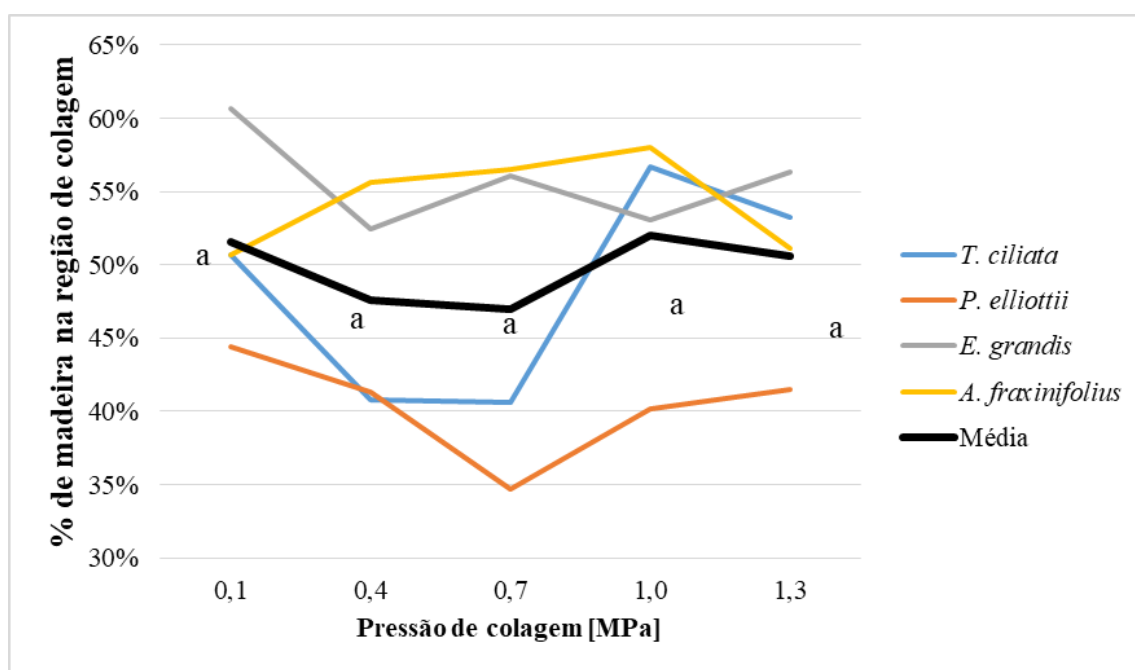
A resistência ao cisalhamento na linha de cola característica obtida nos ensaios foi superior a 1,25 MPa para todos os tratamentos, exceto para T01. Todas as amostras caracterizadas, com falha do tipo I (item 5.3.3), obtiveram resistência maior a 1,0 MPa. Dessa forma, entende-se que a ruptura ocorreu predominantemente na madeira.

Os resultados da análise das superfícies obtidos pelo *software* ImageJ estão apresentados na Figura 65. Não foi observada relação entre a resistência ao cisalhamento na linha de cola e a porcentagem de madeira na região de colagem após a ruptura do corpo de prova, sendo que estes valores variaram de 35% a 60%. O fato de o adesivo ser translúcido

pode ter contribuído para a variabilidade dos resultados, dificultando a visualização de uma relação entre esta propriedade e a resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Uma alternativa para trabalhos futuros é o uso de um corante no adesivo, que não afete a sua qualidade resistente, para melhor visualização da porcentagem de madeira resultante na superfície fraturada. Os valores de porcentagem de falha na madeira obtidos pela análise de superfície não possuíram correspondência com a relação apresentada no item 3.5, na qual se é feita a comparação entre resistência na linha de cola da amostra e porcentagem de falha na madeira na região de colagem.

Figura 65 – Porcentagem de falha na madeira na região de colagem, pelo *software* ImageJ.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2.4 Variação da espessura da linha de cola da MLCC

Os resultados médios das espessuras da linha de cola obtidos por microscopia estão apresentados na Tabela 12, juntamente com a análise de variância, desvio-padrão, coeficiente de variação e medidas máximas e mínimas obtidas para todas as espécies.

Tabela 12: Resultados da espessura das linhas de cola.

	<i>P. elliottii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)
Média [μm]	177b	192a	126c	179b
D.P. [μm]	73	55	73	66
C.V. [%]	41,29%	28,55%	57,94%	36,99%
Min. [μm]	66	20	39	26
Máx. [μm]	553	402	592	388

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 13 são apresentados os valores médios de espessura da linha de cola para cada espécie de madeira em função de cada pressão de colagem caracterizada. Letras iguais na horizontal indicam que não existiu diferença significativa ao nível de 5% de significância.

Tabela 13: Espessura das linhas de cola de acordo com a pressão de colagem, em μm .

Espécie	Pressão de colagem				
	0,1 MPa	0,4 MPa	0,7 MPa	1,0 MPa	1,3 MPa
<i>P. elliottii</i>	248	141	207	122	172
	41,47%	11,77%	21,23%	18,45%	16,82%
<i>E. grandis</i>	183	147	190	224	221
	24,00%	36,73%	22,54%	19,93%	25,23%
<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	117	129	186	117	78
	26,36%	24,03%	71,20%	37,56%	23,01%
<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)	151	192	139	254	162
	35,10%	26,48%	15,47%	30,98%	27,43%
Média	175 AB	152 C	180 A	179 A	158 BC

Fonte: Produção do próprio autor.

Não houve tendência de aumento ou diminuição da espessura da linha de cola em função da pressão de fabricação da MLCC para as espécies individualmente. Contudo, na média, as linhas de cola ficaram mais espessa em MLCC fabricadas nas pressões de 0,7 MPa e 1,0 MPa seguindo o mesmo padrão obtido no ensaio de cisalhamento da linha de cola.

Não houve relação entre a espessura da linha de cola e a delaminação das amostras com base na pressão de colagem e na espécie de madeira. Além disso, observou-se grande variação dos resultados para todas as espécies.

Os valores de espessura média da linha de cola variaram de 126 μm para a espécie *T. ciliata* a 192 μm para o *E. grandis*. Yusho *et al.* (2021) determinaram, através de microscopia eletrônica de varredura, as espessuras da linha de cola de MLCC fabricados com quatro

espécies de madeira tropicais e encontraram valores entre 126 μm e 230 μm , próximos aos valores encontrados no presente trabalho.

Em um estudo de reabilitação estrutural de MLCC colado com resina fenol formaldeído, Brandon, Sjöström e Kahl (2021) verificaram espessuras de linha de cola variando de 100 μm a 200 μm . Contudo, em regiões próximas às bordas da chapa ou cujas superfícies das lamelas estavam imperfeitas antes da colagem, a espessura da linha de cola chegou a até 1500 μm .

Não existe normatização em relação à espessura da linha de cola para MLCC fabricada com adesivo poliuretano bi componentente. Entretanto, de acordo com a EN 15425 (2017), o valor máximo de espessura na linha de cola de painéis fabricados com adesivo poliuretano mono componente, é de 300 μm . Vick (1999) afirma que as linhas de cola de compósitos à base de madeira, que apresentam maior resistência às cargas mecânicas e às variações dimensionais possuem a espessura da linha de cola no intervalo entre 76 μm a 152 μm .

Em painéis de MLC fabricados com madeira de *Eucalyptus*, a espessura da linha de cola variou de 7 μm a 270 μm , de acordo com a espécie, pressão de colagem e, principalmente, pelo tipo e gramatura utilizada para o adesivo (SERRANO, 2013; SEGUNDINHO *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

5.3 RESULTADOS DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA AO *ROLLING SHEAR* PARA A MLCC

5.3.1 Resultados da rigidez associada ao efeito de *rolling shear*

Os valores médios de rigidez (G_{vt}) dos painéis MLCC de cada espécie, associados ao efeito de *rolling shear*, são apresentados na Tabela 14, juntamente com os desvios padrão (entre parênteses), coeficiente de variação (entre colchetes) e análises de variância. Mesmas letras (maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal) indicam que não existiram diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

Tabela 14: Resultados de rigidez G_{vt} da MLCC associada ao *rolling shear*.

Método	<i>P. elliottii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)
Flexão [MPa]	291Ab (45) [15,32%]	329Aab (19) [5,83%]	254Ab (8) [3,05%]	368Aa (61) [16,49%]
Cisalhamento (vertical) método 1* [MPa]	21,5Db (4,0) [18,43%]	27,9Da (5,2) [18,60%]	15,5Cc (2,4) [15,75%]	25,0Cab (3,0) [12,20%]
Cisalhamento (vertical) método 2** [MPa]	82,0Ca (6,8) [8,30%]	121,6Ca (7,3) [6,01%]	96,9BCa (28,1) [29,00%]	81,3Ca (13,5) [16,66%]
Cisalhamento (inclinado) [MPa]	157Bc (37) [23,46%]	269Ba (34) [12,55%]	134ABbc (117) [87,25%]	241Bab (58) [23,92%]

*Método 1: proposto pela ABNT NBR 7190-7 (2022) onde se utiliza um transdutor LVDT na lamela exterior onde se aplica o carregamento para medir o deslocamento; **Método 2: foram utilizados dois transdutores LVDT nas laterais dos corpos de prova para medida dos deslocamento relativo entre as lamelas externas.

Fonte: Produção do próprio autor.

As madeiras de *E. grandis* e de *A. fraxinifolius* (cedro indiano) apresentaram valores de rigidez G_{vt} superiores às outras duas espécies em análise neste estudo para todos os métodos de ensaio avaliados (flexão e cisalhamentos vertical- “método 1” e inclinado), exceto para o ensaio de cisalhamento vertical “método 2”, onde não houve diferença significativa entre as espécies. Em relação aos valores obtidos pelo método de flexão, as rigidezes (G_{vt}) obtidas apresentam valores superiores aos resultados obtidos pelos métodos de cisalhamento vertical e inclinado.

Alguns resultados de rigidez G_{vt} obtidos na literatura por outros pesquisadores são apresentados na Tabela 15, juntamente com a espécie de madeira utilizada e sua respectiva densidade. O método de obtenção do parâmetro G_{vt} nestas pesquisas foi o de pratos colados.

Ehrhart *et al.* (2015) afirmam que os valores de G_{vt} são proporcionais a densidade da madeira, e este fato também foi observado no presente trabalho, já que as madeiras de *A. fraxinifolius* e *E. grandis* apresentaram maior rigidez (G_{vt}) e densidade aparente a 12% (ρ_{ap}) em relação às outras espécies caracterizadas. De maneira geral, os valores de G_{vt} obtidos pelo método de flexão e de cisalhamento inclinado foram mais próximos dos resultados descritos na literatura, indicando que estes métodos geram resultados mais próximos do método realizado com pratos colados.

Tabela 15: Resultados de rigidez G_{vt} descritos na literatura por diferentes pesquisadores.

Autor	Madeira	G_{vt} [MPa]	ρ_{12} [kg/m³]
Wang <i>et al.</i> (2017)	SPF (spruce-pine-fir)	84,92	-
Wang <i>et al.</i> (2018b)	SPF (spruce-pine-fir)	104 a 126	470
Aicher, Christian e Hirsch (2016)	<i>Picea abies</i> (abeto)	40 a 60	450 a 540
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Picea abies</i> (abeto)	100	439
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Populus tremula</i> L. (populos)	127	463
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Pinus</i> L. (pinus)	158	521
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Betula</i> L. (bétula)	188	612
Zhou <i>et al.</i> (2014)	<i>Picea mariana</i> (abeto negro)	255 a 313	459 a 534
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Fagus sylvatica</i> (faia)	357	720
Aicher, Christian e Hirsch (2016)	<i>Fagus sylvatica</i> (faia)	400 a 500	650 a 760
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Fraxinus</i> L. (freixo)	401	798

Fonte: Produção do próprio autor.

Para projetos, o valor de G_{vt} costuma ser adotado como 50 MPa (AICHER, S.; DILL-LANGER, 2000; VILELA, 2020). Além disso, Brandner *et al.* (2016) e Jeleč, Varevac e Rajčić (2018) propõem adotar um valor médio de 100 MPa para MLCC que respeitem a relação largura/altura da lamela maior que 4. Para modelagem numérica, os valores adotados para G_{vt} variam de 30 MPa a 280 MPa de acordo com cada autor, geralmente baseado-se na espécie de madeira considerada (Li, 2015; Nie, 2015; Lam; Li; Li, 2016; Berg, 2019; Gilewski; Glegola, 2019; Pereira, 2019).

Outra questão, levantada pela EN 789 (2004) e Li (2015), é que os resultados de caracterização da rigidez G_{vt} , para MLCC de alta rigidez, apresentam altos coeficientes de variação, podendo chegar a 50%, especialmente para MLCC de três camadas. No entanto, o coeficiente máximo de variação obtido no presente estudo foi de 29% (com exceção do ensaio de cisalhamento inclinado com madeiras de *T. ciliata*-cedro australiano), indicando que os métodos de obtenção do G_{vt} geraram resultados consistentes.

Na Tabela 16 são apresentadas as relações simplificadas obtidas entre os valores médios da rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) e de rigidez à compressão paralela às fibras (E_{c0}), obtidas experimentalmente.

Tabela 16: Relações simplificadas dos valores médios de rigidezes G_{vt} .

Método	<i>P. elliotii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)
$E_{c0,m}/G_{vt,m}$ (Flexão)	19	31	31	46
$E_{c0,m}/G_{vt,m}$ (Cisalhamento vertical método 1)	215	365	550	483
$E_{c0,m}/G_{vt,m}$ (Cisalhamento vertical método 2)	56	84	88	149
$E_{c0,m}/G_{vt,m}$ (Cisalhamento inclinado)	23	30	46	47

Fonte: Produção do próprio autor.

As relações simplificadas utilizando o método de ensaio de flexão e de cisalhamento inclinado mostram grande variação de resultados (entre 19 e 47), de acordo com a espécie considerada. Da mesma forma, as relações simplificadas obtidas pelo método de cisalhamento vertical variaram entre 215 e 550.

Comparando-se a rigidez ao *rolling shear* G_{vt} experimental com a rigidez teórica apresentada pela Equação 4, proposta por Grandmont, Yeh e Dagenais (2019), o valor obtido para a madeira de *P. elliotii* pelo método de ensaio de cisalhamento vertical foi o que forneceu o valor mais próximo de 160 (valor aproximadamente 25% maior que 160), enquanto as demais madeiras apresentaram valores inferiores de G_{vt} por este mesmo método. Isto se deve ao fato da madeira de *P. elliotii* gerar, proporcionalmente, maiores valores de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}) em relação à sua rigidez à compressão paralela às fibras ($E_{c0,m}$). Portanto, não é interessante generalizar a Equação 4 para todas as espécies de madeira.

5.3.2 Resultados da resistência associada ao efeito de *rolling shear*

Os valores médios de resistência (f_{vt}) dos painéis MLCC de cada espécie, associados ao efeito de *rolling shear*, são apresentados na Tabela 17, juntamente com o desvio padrão entre parênteses, o coeficiente de variação entre colchetes e a análise de variância. Mesmas letras

(maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal) indicam que não existiram diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

Tabela 17: Resultados de resistência f_{vt} da MLCC associada ao *rolling shear*.

Método	<i>P. elliotii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)
Flexão [MPa]	2,45Ab (0,30) [12,39%]	3,18Aa (0,34) [10,68%]	2,53Bb (0,15) [5,94%]	3,22Ba (0,35) [10,91%]
Cisalhamento vertical [MPa]	2,14Ab (0,29) [13,34%]	2,74Ba (0,30) [10,94%]	2,05Cb (0,13) [6,13%]	2,98Ba (0,18) [6,23%]
Cisalhamento inclinado [MPa]	2,54Ac (0,60) [23,57%]	3,52Aab (0,39) [11,07%]	3,03Abc (0,37) [12,05%]	3,90Aa (0,48) [12,23%]

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) diferiram significativamente de um método para outro, com exceção dos resultados obtidos para a madeira de *P. elliotii* para a qual não existiu diferença significativa entre os métodos. Foi observado também a mesma ordem de grandeza em todos os ensaios, indicando que não houve grande variação dos resultados obtidos entre os métodos no caso da determinação da resistência f_{vt} .

Assim, como nos resultados de rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), os valores de f_{vt} das madeiras de *E. grandis* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano) foram superiores em relação às outras duas espécies (*T. ciliata*-cedro australiano e *P. elliotii*). Ressalta-se que os valores de f_{vt} são dependentes da presença de medula na lamela e proporcionais a densidade da madeira (EHRHART *et al.*, 2015; AICHER; CHRISTIAN; HIRSCH, 2016).

Os resultados de resistência f_{vt} , obtidos por diferentes autores, são apresentados na Tabela 18, juntamente com a espécie de madeira testada e a densidade da madeira. Assim, como na Tabela 15, o método utilizado por outros autores para a obtenção dos valores experimentais foi o de pratos colados. De maneira geral, os resultados de resistência ao *rolling shear* obtidos no presente trabalho concordaram com os resultados publicados na literatura, os quais variaram de 0,64 MPa a 8,2 MPa.

Em relação à normatização do valor de f_{vt} , para projetos em MLCC, não existe consenso entre os pesquisadores. Popovski *et al.* (2019) especificam valores de f_{vt} de acordo com a classe da madeira, variando de 0,43 a 0,63 MPa, enquanto Vilela (2020) sugere 1 MPa ou 0,77 MPa para projetos especiais. Além disso, Jeleč, Varevac e Rajčić (2018) propõem o uso de um valor médio de f_{vt} de 1,4 MPa para camadas com relação largura/altura igual ou maior que 4 e a ANSI 320 (2019) propõe valores variando de 2,38 MPa a 3,90 MPa.

Tabela 18: Resultados de rigidez f_{vt} descritos na literatura por outros pesquisadores.

Autor	Madeira	f_{vt} [MPa]	ρ_{12} [kg/m ³]
Wang <i>et al.</i> (2017)	SPF (spruce-pine-fir)	1,41	-
Wang <i>et al.</i> (2018b)	SPF (spruce-pine-fir)	1,15 a 1,52	470
Li (2015)	SPF (spruce-pine-fir)	1,23 a 1,68	-
Lam, Li e Li (2016)	SPF (spruce-pine-fir)	3,86	-
Aicher, Christian e Hirsch (2016)	<i>Picea abies</i> (abeto)	4,2	450 a 540
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Picea abies</i> (abeto)	1,88	439
Fink, Kohler e Brandner (2018)	<i>Picea abies</i> (abeto)	1,01 a 1,61	430 a 492
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Populus tremula</i> L. (populos)	2,88	463
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Pinus</i> L. (pinus)	2,29	521
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Betula</i> L. (bétula)	3,45	612
Zhou <i>et al.</i> (2014)	<i>Picea mariana</i> (abeto negro)	1,19 a 1,61	459 a 534
Franke (2016)	<i>Fagus sylvatica</i> (faia)	3,8	-
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Fagus sylvatica</i> (faia)	5,37	720
Aicher, Christian e Hirsch (2016)	<i>Fagus sylvatica</i> (faia)	8,2	650 a 760
Ehrhart <i>et al.</i> (2015)	<i>Fraxinus</i> L. (freixo)	5,57	798

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 19 são apresentadas as relações simplificadas obtidas pela comparação dos valores característicos de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) com a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) obtidas experimentalmente, conforme ABNT NBR 7190-3 (2022).

As relações simplificadas obtidas para a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foram próximas entre as espécies, diferentemente das relações simplificadas obtidas para a rigidez G_{vt} . Os valores obtidos indicaram que esta propriedade equivaleu entre 6% e 13% da resistência característica à compressão paralela às fibras, acima dos valores propostos por Grandmont, Yeh e Dagenais (2019), que seriam de 5% e 4% para coníferas e folhosas, respectivamente.

Tabela 19: Relações simplificadas entre valores característicos de resistência.

Método	<i>P. elliotii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>T. ciliata</i> (cedro australiano)	<i>A. fraxinifolius</i> (cedro indiano)
$f_{vt,k}/f_{c0,k}$ (Flexão)	0,10	0,08	0,10	0,06
$f_{vt,k}/f_{c0,k}$ (Cisalhamento direto)	0,09	0,07	0,08	0,07
$f_{vt,k}/f_{c0,k}$ (Cisalhamento inclinado)	0,09	0,10	0,13	0,08

Fonte: Produção do próprio autor.

Li (2015) e Stecher *et al.* (2016) indicam que a tração normal às fibras possui relação direta com o efeito de *rolling shear*. Os valores de resistência ao *rolling shear* obtidos neste trabalho foram próximos aos valores de resistência à tração normal, obtidos a partir da caracterização experimental das madeiras estudadas (TABELA 8). Entretanto, esta relação não foi diretamente proporcional, já que a espécie com maior valor de resistência a tração f_{t90} (*T. ciliata*-cedro australiano) não apresentou maior valor de resistência ao *rolling shear* f_{vt} . Diversos fatores contribuem para a falha por *rolling shear*, tais como a distribuição de tensão nos corpos de prova (apresentados na seção 5.4) e a orientação dos anéis de crescimento nas lamelas da camada interna (Figura 20), que provocam a falha pela combinação de tração normal às fibras com cisalhamento no plano tangencial/radial (NIE, 2015).

Outra questão, levantada por Sikora, McPolin e Harte (2015) e Betti *et al.* (2016), é que a resistência ao *rolling shear* é, frequentemente, menor que a resistência ao cisalhamento da linha de cola, independente da pressão de colagem e do adesivo utilizado, pois os ensaios de cisalhamento na linha de cola induzem a tensão por *rolling shear* na lamela perpendicular ao carregamento. Notou-se, porém, que os valores resistência ao *rolling shear* f_{vt} , obtidos por ambos os métodos de ensaio (cisalhamento vertical e flexão), foram da mesma ordem de grandeza dos valores de resistência ao cisalhamento da linha de cola f_{vlc} (Equação 3, item 4.4.2.2), sendo inclusive maior para algumas espécies.

Assim, é possível afirmar que os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento na linha de cola não foram afetados pela resistência ao *rolling shear*.

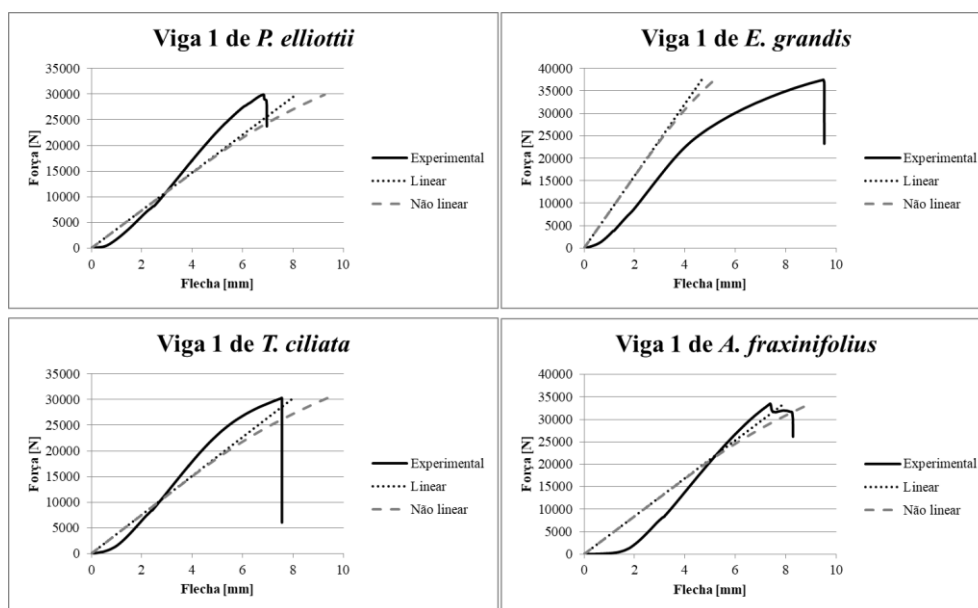
5.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para os modelos numéricos analisados (vigas e corpos de prova de cisalhamento vertical e inclinado) as curvas “força” versus “deslocamento” foram plotadas até o ponto de

convergência máxima dos resultados (com tolerância de 0,001), em comparação com as curvas experimentais obtidas para os valores últimos de força de ruptura.

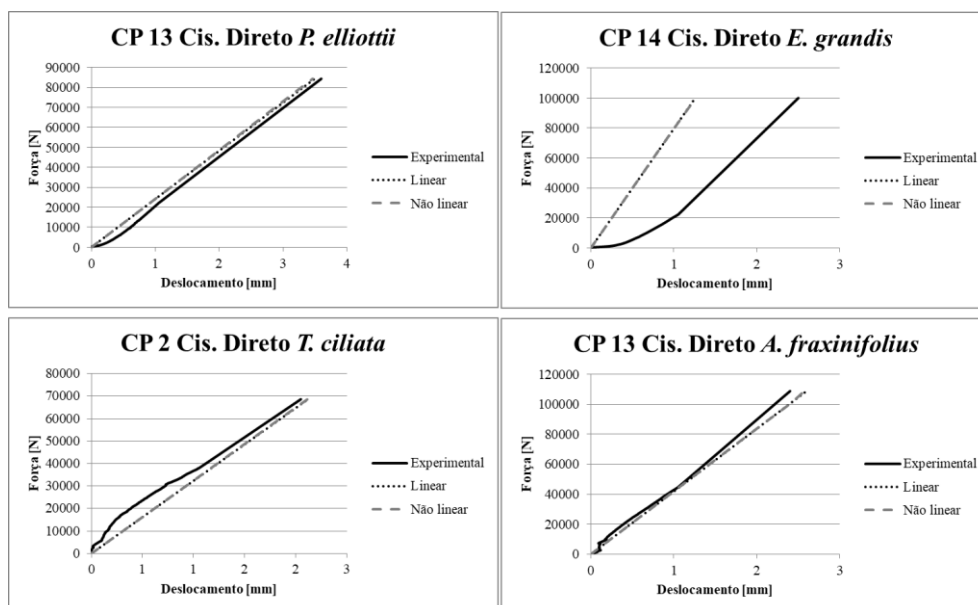
As curvas de validação (numérica – experimental) dos modelos numéricos são apresentadas na Figura 66, Figura 67 e Figura 68.

Figura 66 – Curvas de validação dos modelos numéricos das vigas.



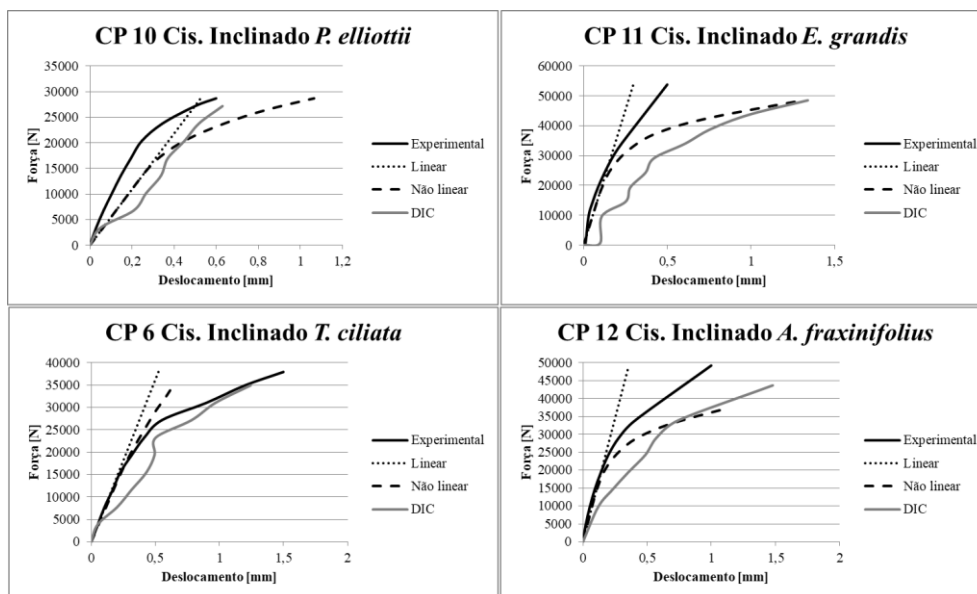
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 67 – Curvas de validação dos modelos numéricos dos corpos de prova de cisalhamento vertical.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 68 – Curvas de validação dos modelos numéricos dos corpos de prova de cisalhamento inclinado.



Fonte: Produção do próprio autor.

As curvas numéricas, obtidas pelos modelos lineares e não lineares apresentaram boa correspondência com as curvas experimentais (assim como com a curva obtida pelo método *Digital Image Correlation* - DIC, no caso do cisalhamento inclinado) obtidas para as forças últimas de ruptura dos corpos de prova de flexão e de cisalhamento vertical e inclinado. Dentre todos os modelos analisados, as respostas para as madeiras de *E. grandis* apresentaram as maiores diferenças quando comparados os modelos numérico e experimental.

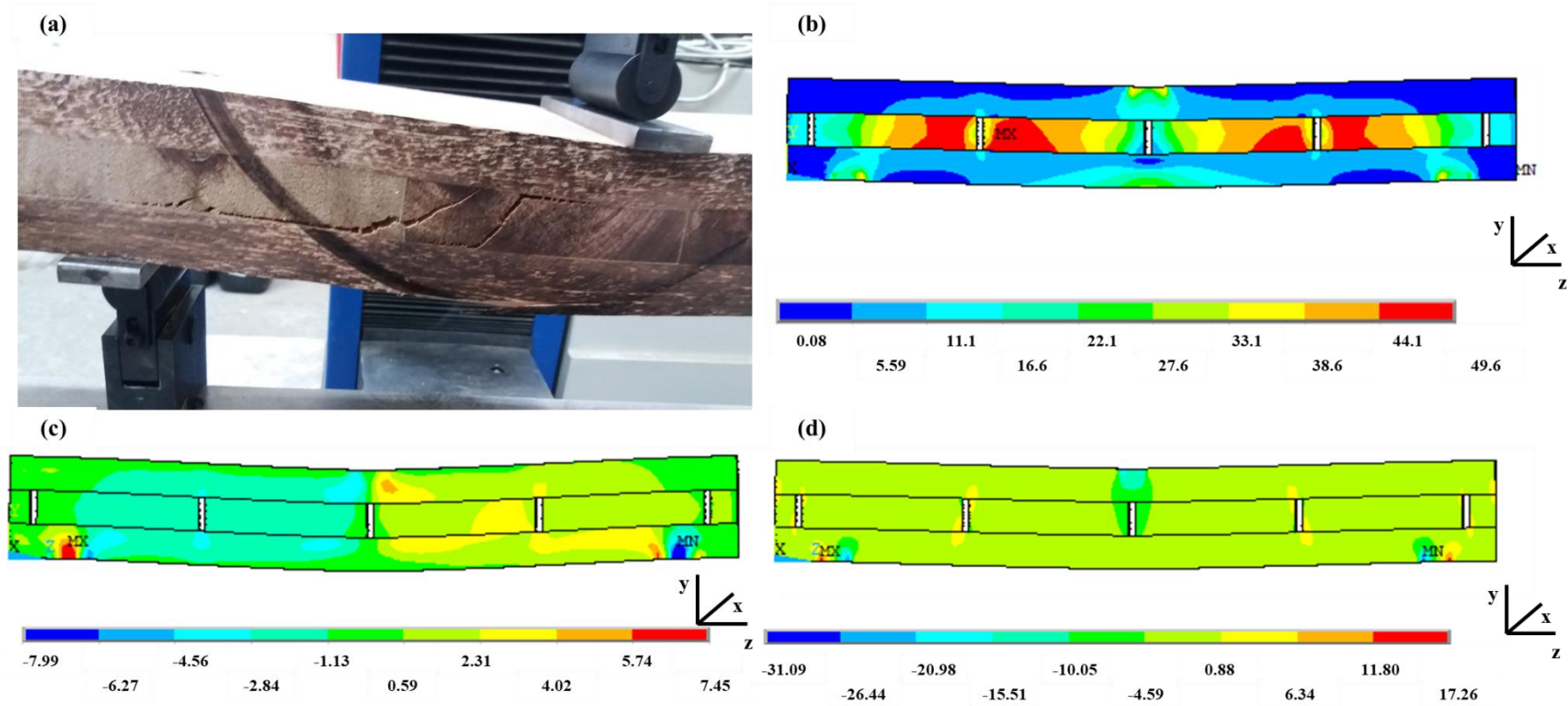
A seguir são apresentadas as distribuições das tensões de von Mises, obtidas em MPa, para os modelos numéricos propostos neste trabalho e os respectivos modos de falha experimentais obtidos em cada caso. Foram observados, nessas simulações numéricas realizadas, os modos de ruptura (ou de falha) predominantes, tanto para os corpos de prova de flexão como também de cisalhamento vertical e inclinado, sendo estes exibidos nas figuras seguintes (Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 74).

Os modos de falha observados experimentalmente nos ensaios de flexão foram o cisalhamento/tração (como observado na Figura 19, Figura 20 e Figura 69a) por *rolling shear* na camada central do corpo de prova, o esmagamento normal às fibras na região de contato do dispositivo de aplicação de carga com a madeira na parte superior da peça (Figura 70a), e também a ruptura na parte inferior da viga de MLCC por tração paralela às fibras.

O primeiro modo de falha (*rolling shear*) ocorreu com maior frequência nos ensaios de flexão das vigas de MLCC confeccionadas com madeira de *P. elliottii*, *A. fraxinifolius* (cedro indiano) e *E. grandis*, sendo a falha ocorrida, neste caso, por tração inclinada associada ao

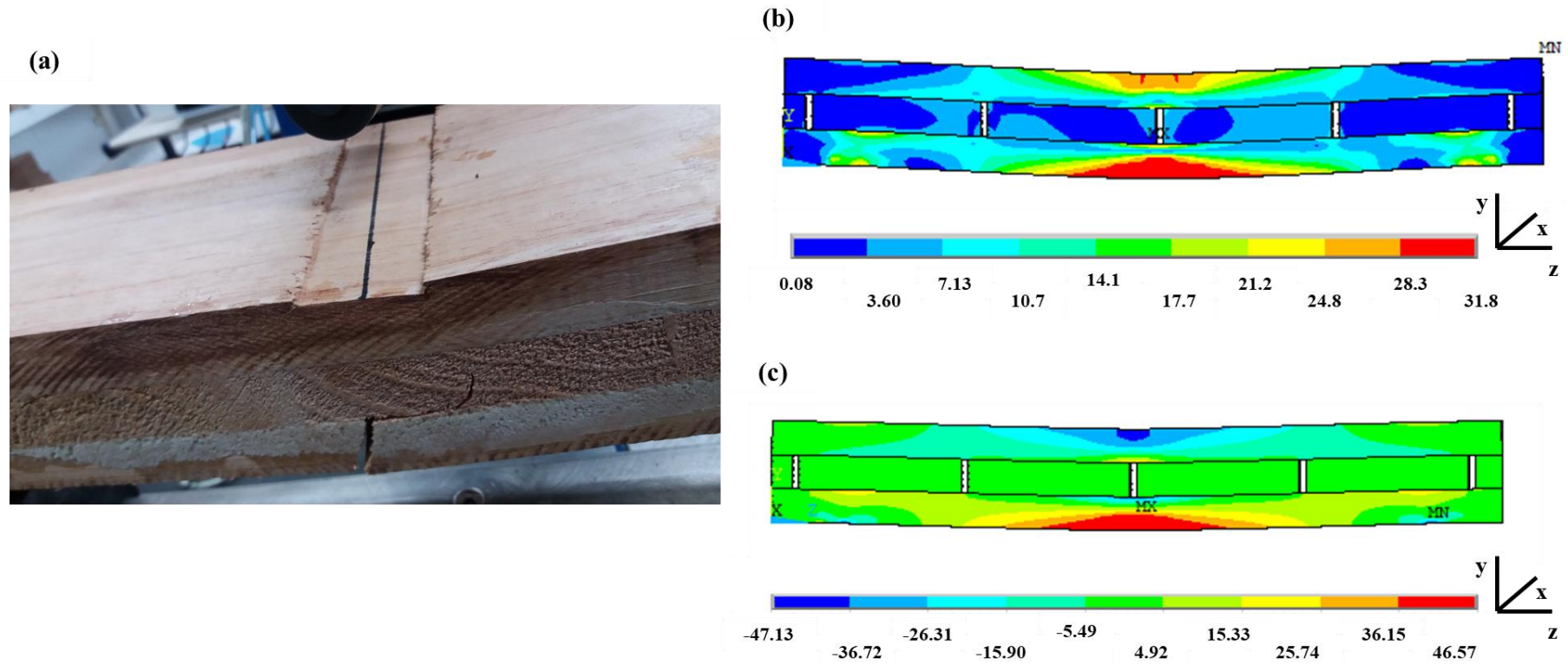
rolling shear com ângulo de ruptura entre 35° e 50° (NIE, 2015; LI, 2015). Como pode ser observado pela distribuição de tensão de von Mises (Figura 69b), houve a concentração de tensão nas lamelas da camada interna nos terços do vão, sendo nestas regiões que ocorreu a ruptura da madeira. A respeito da distribuição das tensões de cisalhamento no plano radial/tangencial da camada interna (Figura 69c), foi possível observar tensões de entre 2,3 MPa e 4,0 MPa, que são próximas da resistência ao cisalhamento da madeira por *rolling shear*. A partir da distribuição de tensões principais no eixo y (Figura 69d) observou-se tensões entre 0,88 MPa 6,34 MPa nos vértices das lamelas da camada interna localizadas nos terços dos vão, sendo estas as regiões que falharam por tração normal às fibras durante o ensaio com as vigas de MLCC.

Figura 69 – (a) Falha por *Rolling Shear* obtido no ensaio de flexão da viga (V1 – *E. grandis*); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 70 – (a) Falha por compressão normal (na lamela superior)/ e tração paralela (na lamela inferior) obtido no ensaio de flexão da viga (V1 – *T. ciliata*- cedro australiano); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões normais no eixo z em MPa.



Fonte: Produção do próprio autor.

O segundo modo de falha (ruptura por tensão normal: tração na lamela inferior ou compressão na lamela superior) ocorreu somente nas vigas confeccionadas com madeiras de *T. ciliata* (cedro australiano) (Figura 70a). A partir da distribuição de tensão de von Mises (Figura 70b) nota-se a concentração de tensões nas regiões de aplicação da carga e na região inferior central da camada inferior do MLCC. Pela distribuição de tensão principal no eixo z (Figura 70c) foi observado o mesmo comportamento, com tensões de compressão e tração próximas a 47 MPa, bem acima do determinado nos ensaios de compressão de *T. ciliata* (cedro australiano), indicando que as falhas ocorreram nestas regiões.

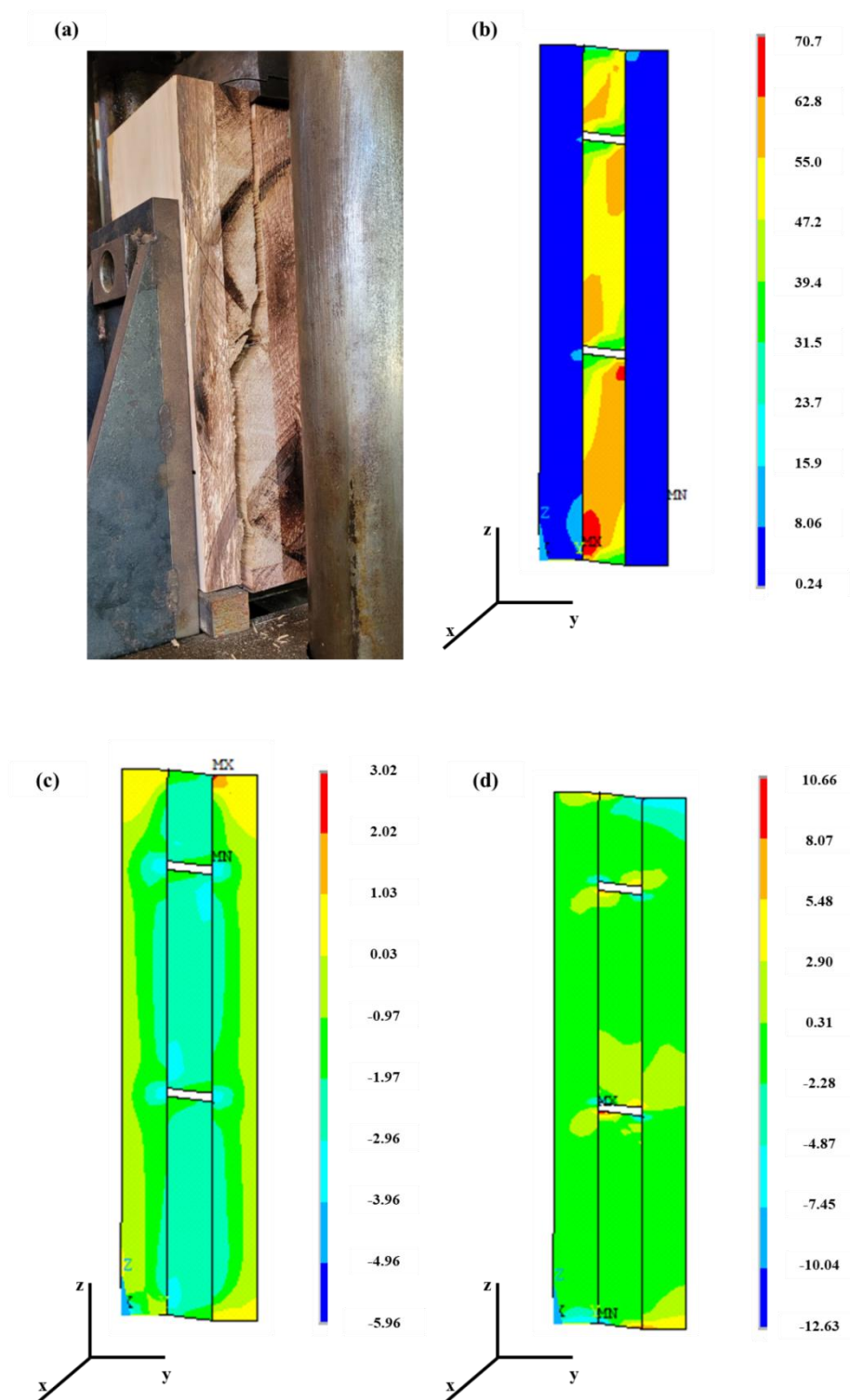
Este último modo de falha também foi observado no modelo numérico desenvolvido por Martínez-Martínez *et al.* (2018). É importante ressaltar que a escolha da área de aplicação de força no modelo numérico foi a mesma que a área ocupada pela placa metálica em contato com o corpo de prova em teste, cuja largura não excedeu a metade da espessura do corpo de prova, seguindo a recomendação da EN 408 (1995).

Os modos de falha obtidos no ensaio de cisalhamento vertical, apresentados na Figura 71 e Figura 72, foram referentes ao cisalhamento por *rolling shear* na camada central da peça, e, no segundo caso, por esmagamento por compressão normal no contato do dispositivo de aplicação do carregamento com a madeira, associado à ruptura na parte inferior da peça por tração.

Para o primeiro modo de falha no ensaio de cisalhamento vertical (Figura 71a), a distribuição de von Mises (Figura 71b) indicou que a concentração de tensões ocorreu nas lamelas da camada interna próximas aos seus vértices. As tensões de cisalhamento no plano radial/tangencial da camada interna (Figura 71c) foram entre 2,96 MPa a 3,96 MPa, muito próximas do observado nos resultados numéricos da viga (Figura 69c). Da mesma forma ocorreu com os resultados referentes à distribuição de tensões principais no eixo y do modelo de cisalhamento vertical (Figura 71d), onde ocorreu concentração de tensões de tração entre 2,9 MPa e 5,5 MPa nos vértices das lamelas da camada interna, muito próximas do determinado experimentalmente pelos ensaios de tração normal às fibras.

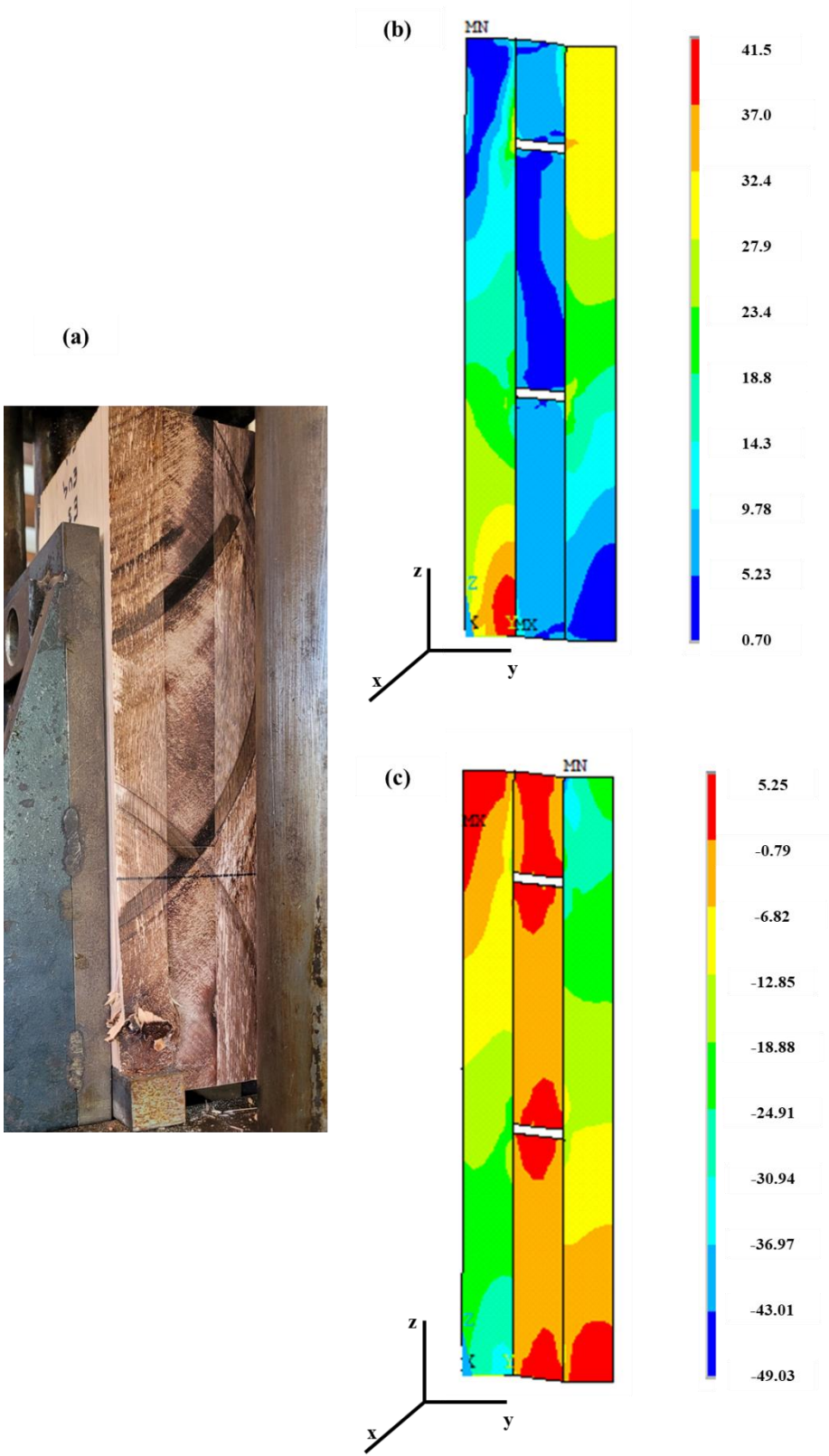
O segundo modo de falha do ensaio de cisalhamento vertical ocorreu por esmagamento das lamelas externas na região de aplicação do carregamento (Figura 72a). Foi possível observar a concentração de tensão de von Mises (Figura 72b) e de tensões principais no eixo z (Figura 72c) nestas mesmas regiões do modelo numérico, de forma que as tensões de compressão nestas regiões foram de aproximadamente 49 MPa, superiores ao determinado experimentalmente pelo ensaio de compressão paralela às fibras, indicando que a falha muito provavelmente fosse ocorrer nesta região do corpo de prova.

Figura 71 – (a) Falha por *rolling shear* obtido no ensaio do corpo de prova de cisalhamento vertical: (CP13 – *P. elliotii*); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.



Fonte: Produção do próprio autor.

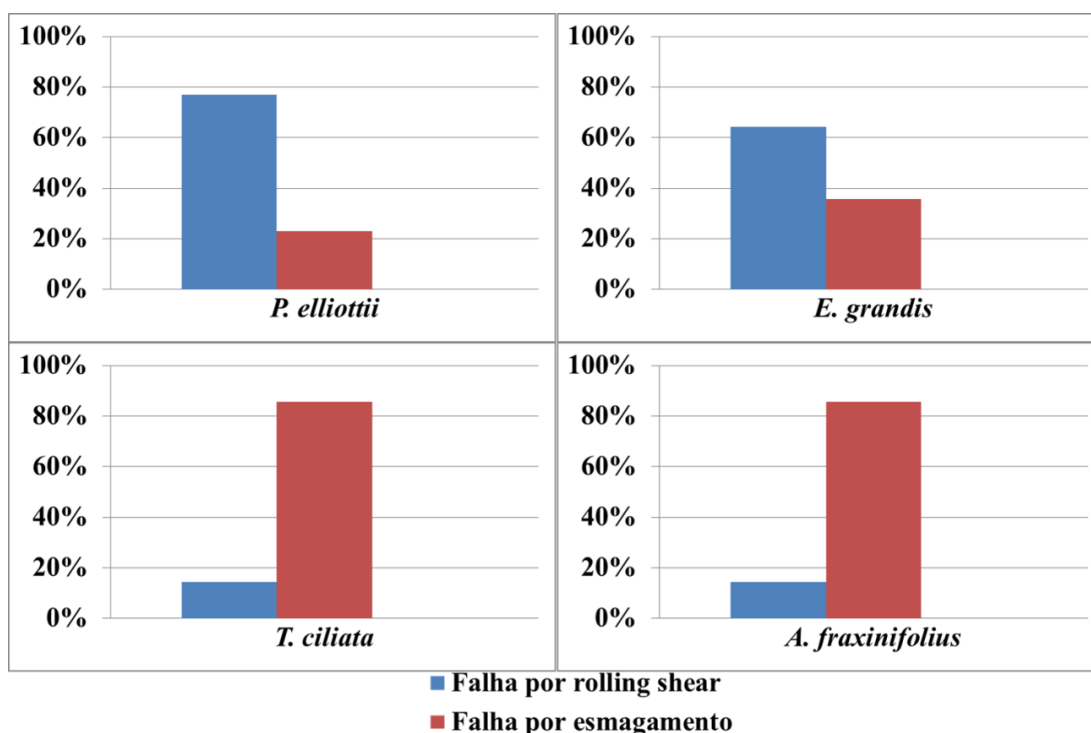
Figura 72 – (a) Falha por esmagamento na base da lamela externa obtida no ensaio do corpo de prova de cisalhamento vertical: (CP2 – *T. ciliata*); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões normais no eixo z em MPa.



Fonte: Produção do próprio autor.

As porcentagens dos modos de falha observados nos ensaios de cisalhamento vertical são apresentadas na Figura 73. As madeiras de *P. elliotii* e *E. grandis* falharam com maior frequência devido ao *rolling shear* da camada central, enquanto as madeiras de *T. ciliata* (cedro australiano) e *A. fraxinifolius* (cedro indiano) falharam por esmagamento ou ruptura das lamelas externas.

Figura 73 – Porcentagens dos modos de falha obtidos nos ensaios de *rolling shear* por cisalhamento vertical.



Fonte: Produção do próprio autor.

As distribuições de tensões do corpo de prova de cisalhamento inclinado estão apresentadas na Figura 74, juntamente com o corpo de prova rompido após o ensaio ter sido finalizado, sendo que todas as amostras falharam por *rolling shear* (ruptura da camada central). A partir da distribuição de tensões de von Mises (Figura 74b) nota-se que houve concentração de tensão próximo à linha de cola, justamente onde ocorreu o início da falha por *rolling shear*. A concentração de tensão de cisalhamento no plano radial/tangencial da lamela interna (Figura 74c) também foi localizada na proximidade com a linha de cola, onde foram atingidos valores de 1,90 MPa, inferiores aos observados nos outros dois modelos numéricos. Situação semelhante ocorreu em relação com a tensão principal no eixo y (Figura 74d), onde os valores de tração na lamela interna 1,5 MPa e 3,0 MPa, sendo estes localizados próximos da região fraturada do corpo de prova.

Figura 74 – (a) Falha por *rolling shear* obtido no ensaio do corpo de prova de cisalhamento inclinado: (CP11 – *E. grandis*); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.

(continua)

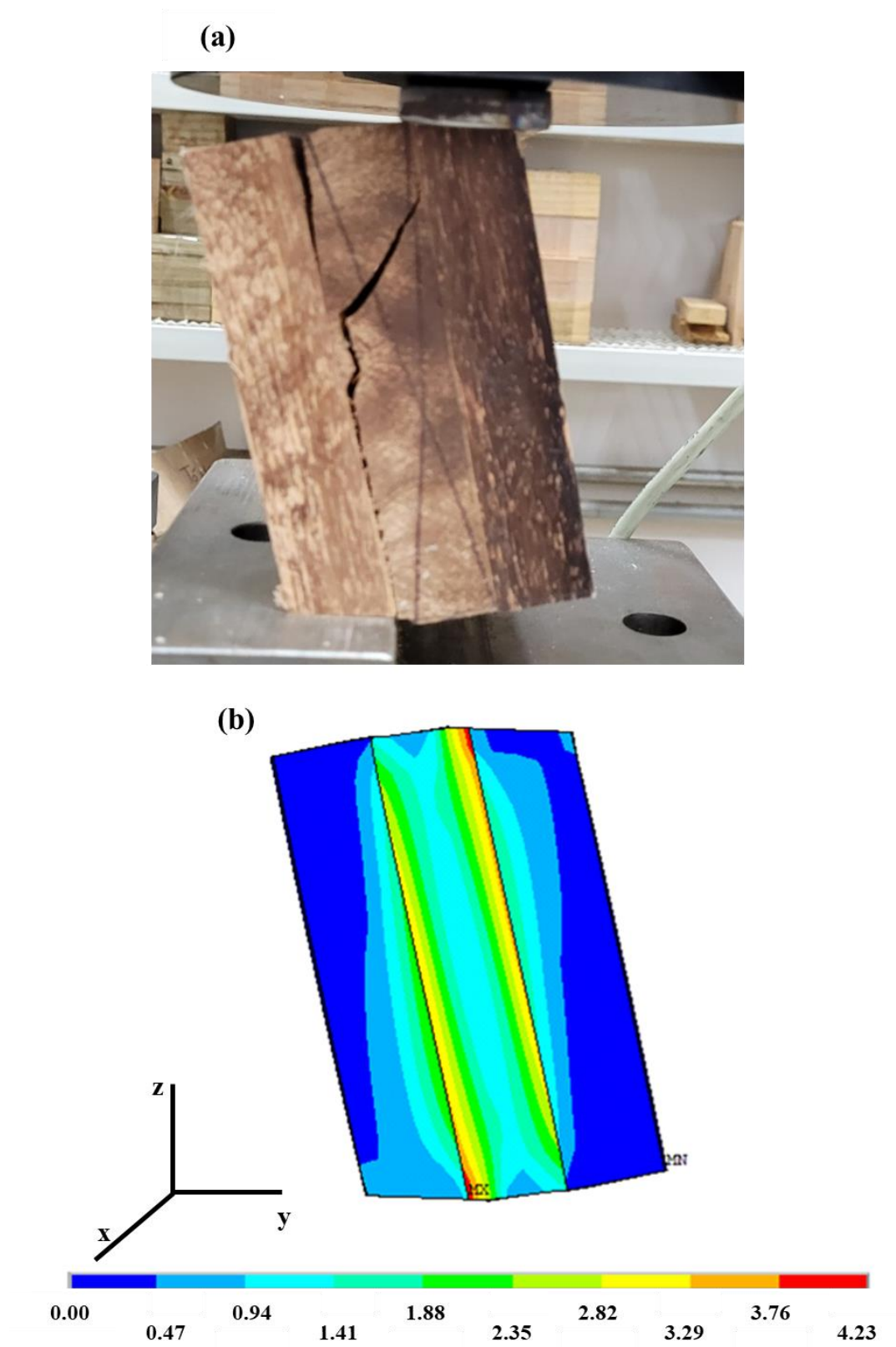
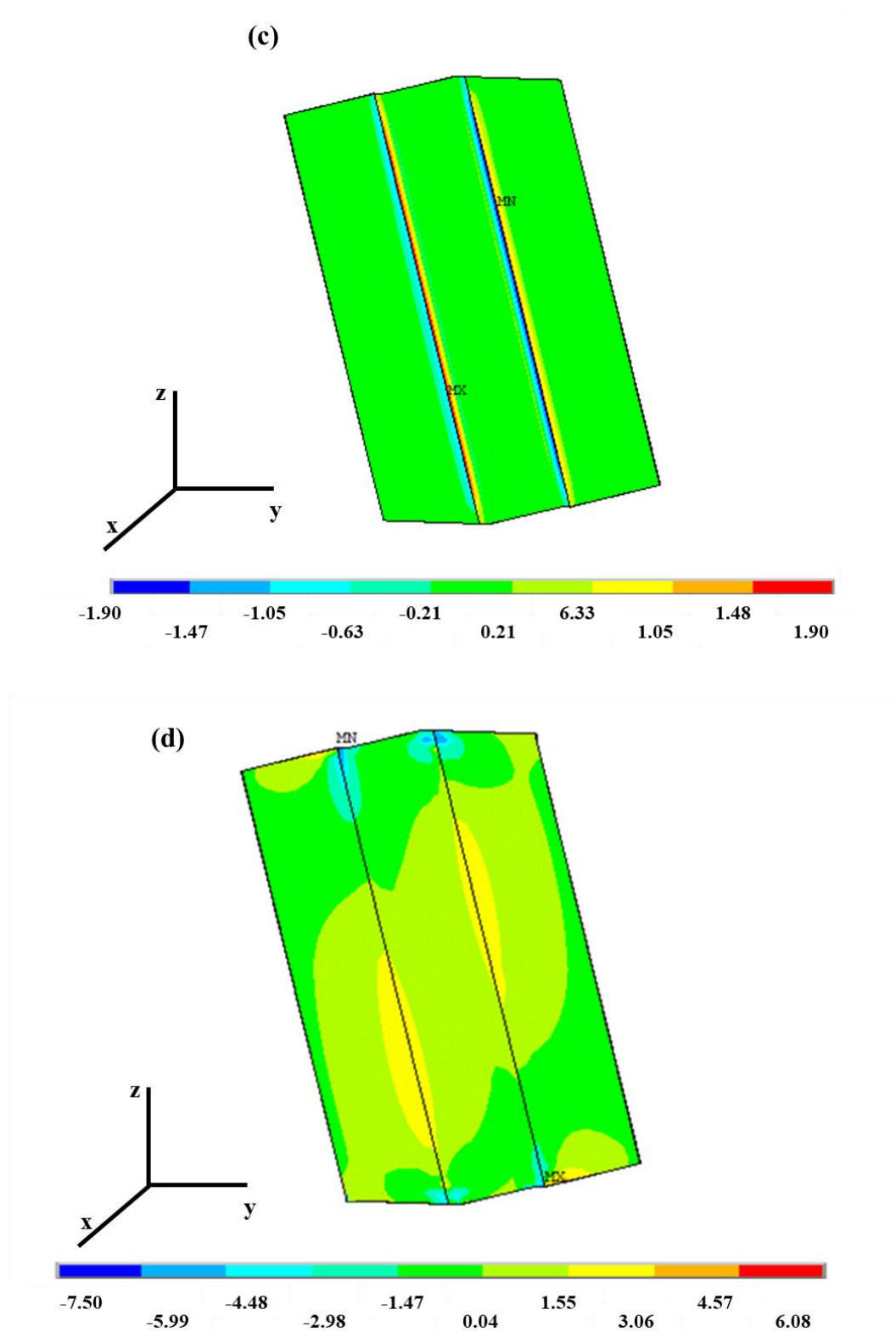


Figura 74 – (a) Falha por *rolling shear* obtido no ensaio do corpo de prova de cisalhamento inclinado: (CP11 – *E. grandis*); (b) Tensões de von Mises em MPa; (c) Tensões de cisalhamento no eixo yz em MPa; (d) Tensões normais no eixo y em MPa.

(conclusão)



Com relação aos modelos numéricos utilizados (linear e não linear) observou-se que o modelo não linear, por ser um modelo mais completo e que utilizou além das propriedades elásticas as propriedades plásticas da madeira, forneceu valores numéricos de tensões mais próximos aos valores das tensões de ruptura obtidos nos ensaios experimentais, tanto no caso dos corpos de prova de cisalhamento vertical e inclinado como nos de flexão.

Vários fatores podem ser atribuídos às diferenças observadas entre os resultados numéricos e experimentais:

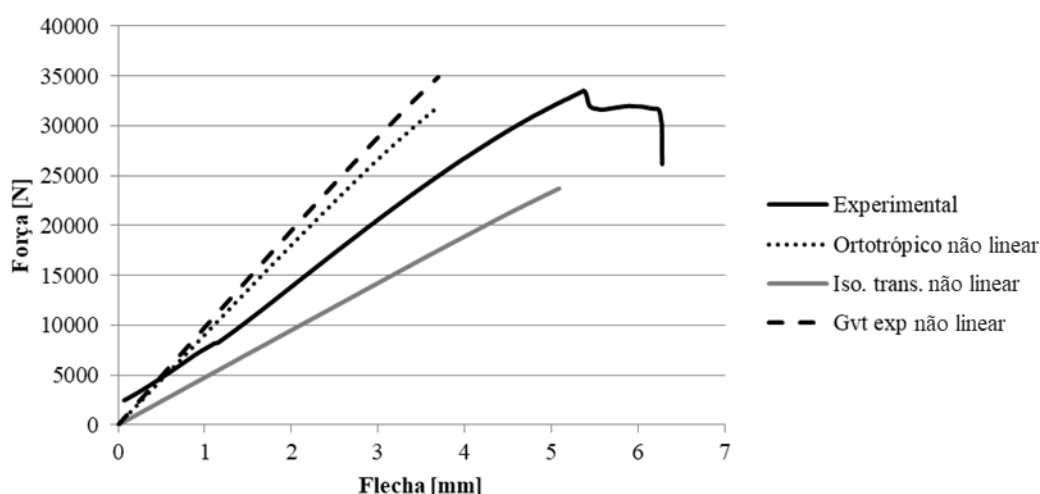
- Na atribuição das propriedades plásticas das madeiras, foram utilizados valores aproximados para estas propriedades, sendo tais propriedades determinadas com base na resistência à compressão paralela às fibras da madeira;
- Características próprias das madeiras (presença de defeitos, distorção das fibras, variação dos valores das propriedades ao longo do comprimento das peças etc.) não foram consideradas nos modelos propostos;
- A madeira é um material ortotrópico, com diferentes propriedades em cada uma das direções ortogonais: direção longitudinal (paralela às fibras) e direção radial e tangencial (ambas ortogonais à direção longitudinal das fibras e entre si). Além disso, a orientação dos anéis de crescimento e a distância da lamela de madeira em relação à medula da árvore não foram fatores controlados nos modelos;
- A madeira apresenta, também, propriedades e comportamentos diferentes na tração e na compressão, ou seja, na compressão o comportamento da madeira é relativamente plástico e pode ser aproximado por uma relação constitutiva elasto-plástica com endurecimento, enquanto na tração o comportamento da madeira é relativamente frágil e o modelo elasto-plástico, neste caso, não é representativo deste material;
- Por fim, vale mencionar que o elemento finito SOLID45 é um elemento bastante simples e rígido, e considera somente as propriedades elásticas e plásticas das madeiras. Neste caso, por mais que se refine a malha não se obtém melhoras nas respostas das curvas “força” versus “deslocamento” e, conseqüentemente, no valor das tensões associadas aos modelos. Considerações da mecânica do dano seriam interessantes para melhorar a análise desses modelos, as quais não são consideradas pelo ANSYS.

De forma geral, os modelos numéricos aqui propostos, analisados com ortotropia (diferentes propriedades elásticas e plásticas para as três direções R, T e L da madeira) foram capazes de simular, com relativa aproximação, o comportamento dos corpos de prova de flexão e de cisalhamento vertical e inclinado, tanto na fase inicial do ensaio para valores de força aplicados dentro do regime linear dos materiais, como também na fase final para valores de força última de ruptura aplicada. As distribuições de tensões permitiram o melhor entendimento das falhas experimentais observadas, apesar dos valores das tensões numéricas terem sido relativamente superiores aos valores das tensões experimentais, com excessão do modelos de cisalhamento inclinado, cujos valores obtidos foram ligeiramente menores. As falhas por *rolling shear* observadas nos modelos de corpos de prova foram resultados de uma combinação de tensões, em especial, de cisalhamento e de tração perpendicular às fibras numa direção inclinada com relação ao eixo horizontal da lamela central.

5.4.1 Influência das propriedades elásticas na resposta do modelo numérico

As curvas de validação para ambas as verificações estão apresentados na Figura 75, juntamente com a curva experimental e a curva numérica obtida originalmente.

Figura 75 – Curvas de validação comparativas para o estudo numérico complementar.

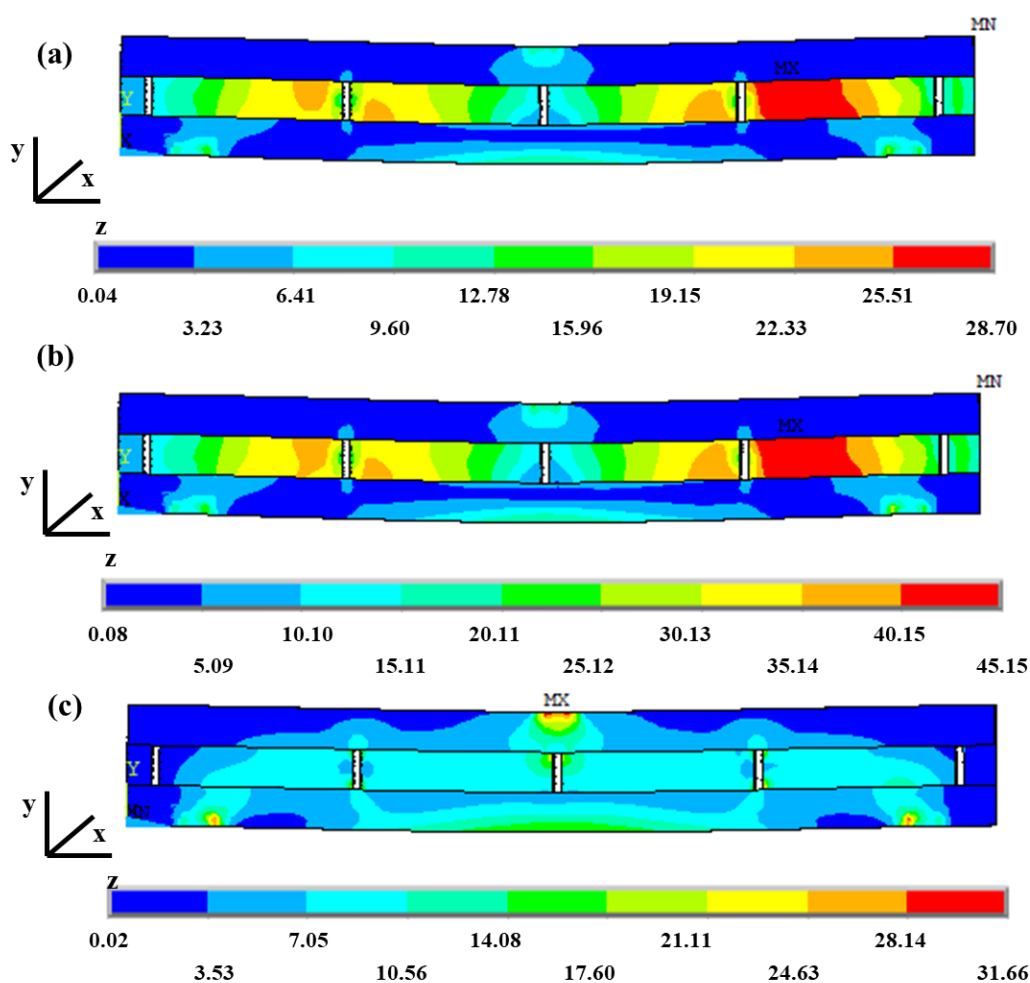


Fonte: Produção do próprio autor.

Através das curvas de validação foi possível observar que o uso do valor de G_{vt} , obtido experimentalmente, na modelagem numérica proporcionou convergência até maior valor de força em comparação com o modelo numérico original, visto que este ficou mais rígido. Por outro lado, o uso de isotropia transversal na modelagem numérica não permitiu a

convergência até maiores valores de força, já que que o modelo se tornou mais flexível. O comparativo das distribuição de tensão de von Mises, tensão de cisalhamento no plano yz e tensão principal no eixo y, para ambas as verificação,são apresentados na Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

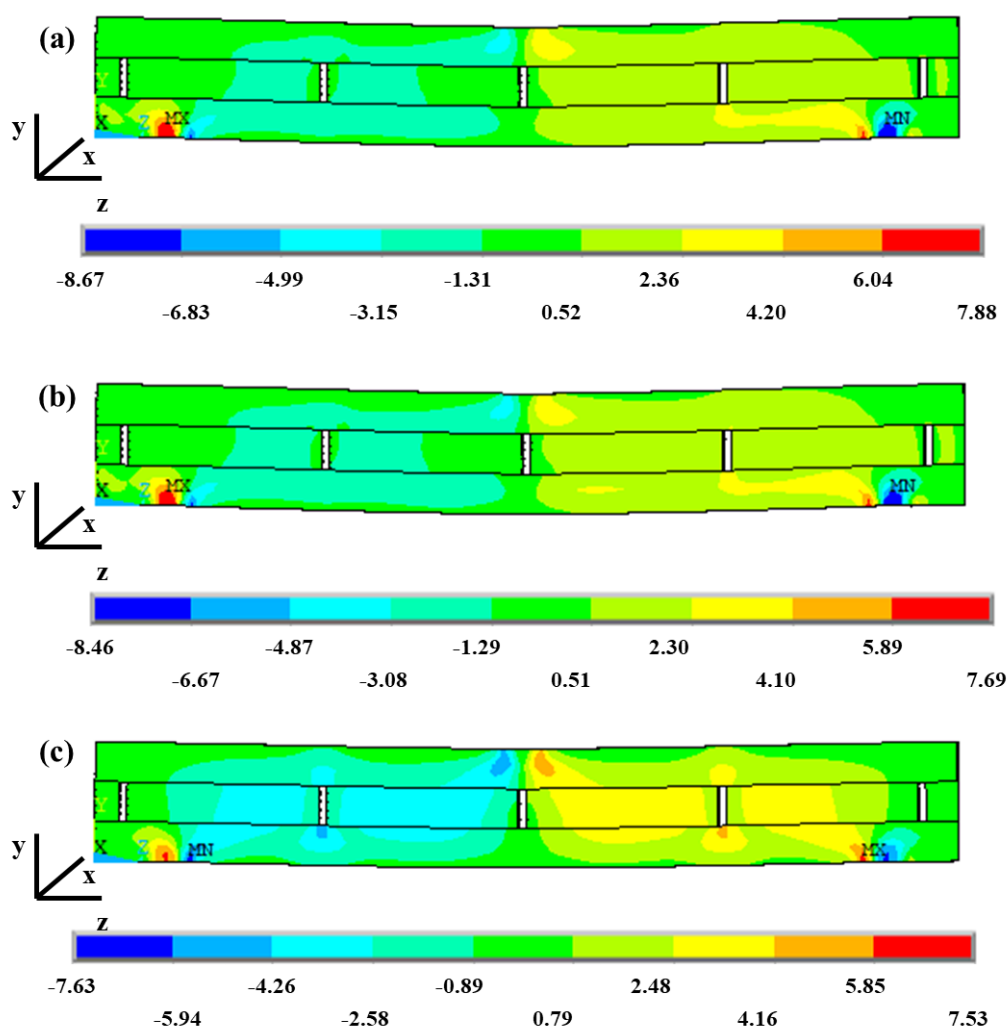
Figura 76 – Distribuição de tensões de von Mises em MPa dos modelos numéricos: (a) Ortotrópico; (b) Com isotropia transversal; (c) Com adoção de G_{vt} experimental.



Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da análise das distribuições de von Mises (FIGURA 76), observou-se que a tensão máxima se concentrou nas lamelas internas localizadas a 1/3 do vão no modelo ortotrópico (FIGURA 76a) e com isotropia transversal (FIGURA 76b), com tensões de 28,70 MPa e 45,15 MPa, respectivamente. Em relação ao modelo numérico com adoção do valor G_{vt} experimental (*rolling shear*), a tensão máxima se concentrou na região de aplicação do carregamento (FIGURA 76c), com valor de tensão de von Mises na camada interna entre 14 MPa e 17 MPa.

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.



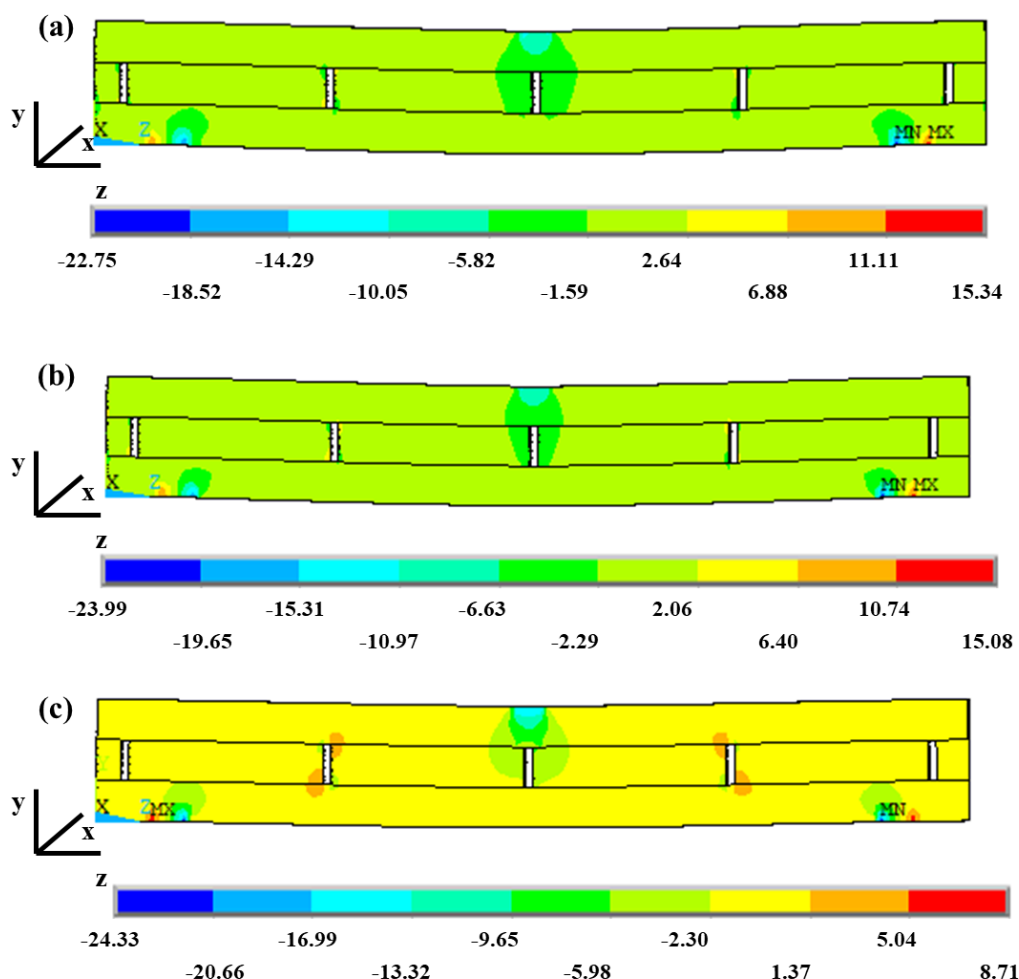
Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de distribuição de tensões de cisalhamento no modelo do corpo de prova de flexão foi semelhante nas três situações analisadas (FIGURA 77). Entretanto, os valores obtidos de tensão de cisalhamento na camada interna diferiu entre eles, sendo de 0,5 MPa a 2,3 MPa para os modelos ortotrópico (FIGURA 77a) e com isotropia transversal (FIGURA 77b) e entre 2,6 MPa e 4,2 MPa para o modelo no qual foi adotado o valor de G_{vt} experimental (FIGURA 77c), sendo este último dentro dos valores obtidos experimentalmente para a resistência ao *rolling shear* f_{vt} .

Em relação à distribuição de tensão principal no eixo y (FIGURA 78), todos os modelos apresentaram tensão de tração normal às fibras nos vértices das lamelas da camada interna. A forma de distribuição destas tensões nos três modelos foram semelhantes com

valores de tensão variando de 1,4 MPa a 6,4 MPa, dentro do intervalo observado experimentalmente para a madeira de *A. fraxinifolius* (cedro indiano).

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.



Fonte: Produção do próprio autor.

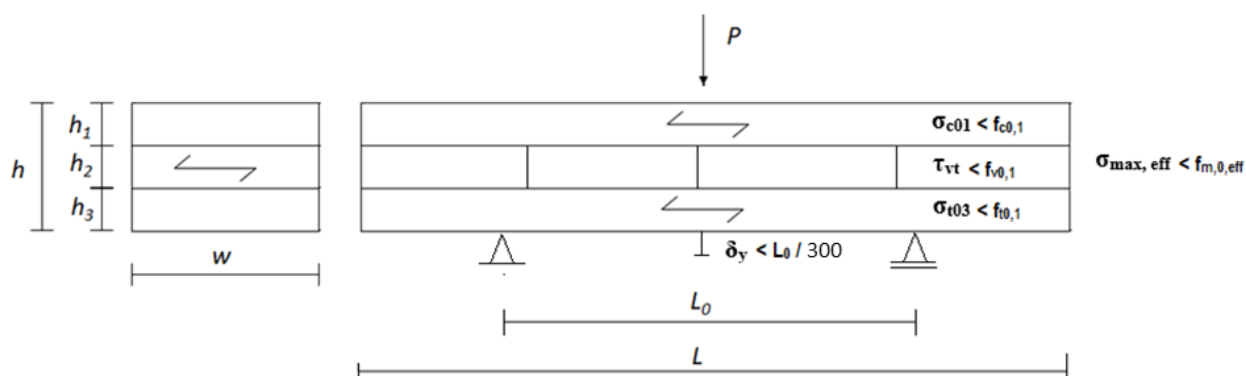
A partir da análise deste estudo numérico complementar, foi observado que, em comparação com a modelagem numérica ortotrópica, o uso de isotropia transversal gerou tensões de von Mises superiores, enquanto no modelo com adoção de G_{vt} experimental (*rolling shear*) a distribuição de tensões foi alterada significativamente, sendo concentrada na região de aplicação do carregamento e com valores inferiores. Em contraste, as tensões de cisalhamento neste modelo foi superior às outras duas situações e mais próximas da resistência ao *rolling shear* determinado experimentalmente no ensaio flexão. As tensões principais no eixo y para os três modelos seguiram o mesmo padrão de distribuição e os valores foram próximos entre si.

Desta forma, é mais interessante o uso do valor experimental G_{vt} na modelagem numérica, por este gerar resultados mais próximos para a resistência ao *rolling shear* do elemento e não alterar significativamente a distribuição de tensão normal às fibras (tensão principal no eixo y) da camada interna. Ressalta-se ainda que a adoção deste valor na modelagem numérica permitiu a melhor convergência do modelo, como pôde ser observado na Figura 75.

5.5 RESULTADOS ANALÍTICOS

Na Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 são apresentados os valores de resistência e deslocamento para a verificação dos ELU (Estados Limites Últimos) e ELS (Estados Limites de Serviço) para um elemento de MLCC (Figura 79), com três camadas (espessura de 25 mm cada camada), com dimensões ($L_0 \times w \times h$) 450 mm x 110 mm x 75 mm, bi apoiado, com carregamento P concentrado no meio do vão e igual ao valor de ruptura obtido experimentalmente. O valor da flecha limite considerada na avaliação dos deslocamentos verticais foi igual à $L/300$.

Figura 79 – Configuração da viga para verificação dos modelos analíticos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo

σ_{t01} = tensão analítica de compressão paralela às fibras na lamela superior da viga;

σ_{t03} = tensão analítica de tração paralela às fibras na lamela inferior da viga;

$\sigma_{max, eff}$ = tensão analítica de flexão da viga;

τ_{vt} = tensão analítica de cisalhamento na LN (lamela central) da viga;

δ_y = flecha analítica para uma carga concentrada no meio do vão;

f_{t01} = resistência experimental de compressão paralela às fibras na lamela superior;

f_{t03} = resistência experimental de tração paralela às fibras na lamela inferior;

$f_{m,0,eff}$ = valor de resistência experimental de flexão da viga reduzido por k_I ;

τ_{vt} = resistência experimental de cisalhamento na LN (lamela central) da viga;

$L/300$ = flecha experimental limite no meio do vão.

Nas referidas tabelas, logo abaixo do valor obtido analiticamente, foi incluída a diferença percentual entre o valor analítico de resistência obtido pelo respectivo modelo (tração, compressão, flexão ou cisalhamento) ou de deslocamento vertical (flecha no meio do vão) e os respectivos valores limite experimentais (resistência e flecha) para cada espécie de madeira analisada na composição dos elementos. Valores percentuais positivos (+) indicaram que o valor analítico foi superior ao valor limite experimental e valores negativos (-) indicaram que os valores analíticos foram inferiores aos valores limites experimentais.

Os resultados analíticos foram avaliados para os três métodos analíticos de cálculo, utilizando-se os valores de G_{vt} e f_{vt} obtidos em cada metodologia de ensaio para cada uma das espécies de madeira.

Tabela 20: Resultados analíticos para espécie de *P. elliottii*.

Método de ensaio	Método de cálculo	ELU				ELS
		σ_{c01} [MPa]	σ_{t03} [MPa]	τ_{vt} [MPa]	$\sigma_{max, eff}$ [MPa]	δy [mm]
Flexão	Gama	39,32	27,86	2,44	-	1,65
		2%	-44%	-29%	-	10%
	K	-	-	-	33,74	2,91
		-	-	-	97%	94%
	Kreuzinger	196,23	139,01	5,16	-	1,52
		409%	178%	50%	-	1%
Cis. Vertical (método 1)	Gama	69,68	49,37	1,88	-	5,03
		81%	-1%	-45%	-	235%
	K	-	-	-	33,74	2,91
		-	-	-	97%	94%
	Kreuzinger	196,23	139,01	5,16	-	1,52
		409%	178%	50%	-	1%
Cis. Vertical (método 2)	Gama	46,87	33,21	2,30	-	2,49
		22%	-34%	-33%	-	66%
	K	-	-	-	33,74	2,91
		-	-	-	97%	94%
	Kreuzinger	196,23	139,01	5,16	-	1,52
		409%	178%	50%	-	1%
Cis. inclinado	Gama	41,95	29,72	2,40	-	1,94
		9%	-41%	-31%	-	30%
	K	-	-	-	33,74	2,91
		-	-	-	97%	94%
	Kreuzinger	196,23	139,01	5,16	-	1,52
		409%	178%	50%	-	1%
Valores limites		38,54	50,05	3,45	17,10	1,50

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 21: Resultados analíticos para espécie de *E. grandis*.

Método de ensaio	Método de cálculo	ELU				ELS
		σ_{c01} [MPa]	σ_{t03} [MPa]	τ_{vt} [MPa]	$\sigma_{max, eff}$ [MPa]	δy [mm]
Flexão	Gama	44,71	59,23	3,03	-	1,36
		17%	19%	-29%	-	-10%
	K	-	-	-	42,32	1,48
		-	-	-	60%	-1%
	Kreuzinger	180,70	239,38	8,79	-	1,21
		372%	381%	106%	-	-19%
Cis. Vertical (método 1)	Gama	75,58	100,12	2,21	-	4,33
		97%	101%	-48%	-	189%
	K	-	-	-	42,32	1,48
		-	-	-	60%	-1%
	Kreuzinger	180,70	239,38	8,79	-	1,21
		372%	381%	106%	-	-19%
Cis. Vertical (método 2)	Gama	51,04	67,61	2,86	-	1,97
		32%	35%	-17%	-	31%
	K	-	-	-	42,32	1,48
		-	-	-	147%	-1%
	Kreuzinger	180,70	239,38	8,79	-	1,21
		369%	378%	155%	-	-19%
Cis. inclinado	Gama	45,58	60,38	3,01	-	1,44
		19%	21%	-29%	-	-4%
	K	-	-	-	42,32	1,48
		-	-	-	60%	-1%
	Kreuzinger	180,70	239,38	8,79	-	1,21
		372%	381%	106%	-	-19%
Valores limites		38,31	49,75	4,26	26,39	1,50

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 22: Resultados analíticos para espécie de *T. ciliata*.

Método de ensaio	Método de cálculo	ELU				ELS
		σ_{c01} [MPa]	σ_{t03} [MPa]	τ_{vt} [MPa]	$\sigma_{max, eff}$ [MPa]	δy [mm]
Flexão	Gama	38,74	33,82	2,47	-	1,61
		11%	-26%	-23%	-	7%
	K	-	-	-	34,24	1,56
		-	-	-	72%	4%
	Kreuzinger	181,40	158,34	5,85	-	1,45
		418%	248%	82%	-	-3%
Cis. Vertical (método 1)	Gama	75,89	66,24	1,70	-	5,88
		117%	46%	-47%	-	292%
	K	-	-	-	34,24	1,56
		-	-	-	72%	4%
	Kreuzinger	181,40	158,34	5,85	-	1,45
		418%	248%	82%	-	-3%
Cis. Vertical (método 2)	Gama	44,15	38,54	2,36	-	2,23
		15%	-23%	-32%	-	49%
	K	-	-	-	34,24	1,56
		-	-	-	100%	4%
	Kreuzinger	181,40	158,34	5,85	-	1,45
		371%	216%	70%	-	-3%
Cis. inclinado	Gama	41,79	36,48	2,40	-	1,96
		19%	-20%	-25%	-	31%
	K	-	-	-	34,24	1,56
		-	-	-	72%	4%
	Kreuzinger	181,40	158,34	5,85	-	1,45
		418%	248%	82%	-	-3%
Valores limites		35,03	45,49	3,21	19,91	1,50

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 23: Resultados analíticos para espécie de *A. fraxinifolius*.

Método de ensaio	Método de cálculo	ELU				ELS
		σ_{c01} [MPa]	σ_{t03} [MPa]	τ_{vt} [MPa]	$\sigma_{max, eff}$ [MPa]	δy [mm]
Flexão	Gama	36,87	63,87	2,74	-	1,68
		14%	52%	-15%	-	12%
	K	-	-	-	37,92	0,93
		-	-	-	10%	-38%
	Kreuzinger	137,57	238,31	8,72	-	1,68
		326%	469%	171%	-	12%
Cis. Vertical (método 1)	Gama	55,46	96,07	2,13	-	4,97
		72%	129%	-34%	-	232%
	K	-	-	-	37,92	0,93
		-	-	-	10%	-38%
	Kreuzinger	137,57	238,31	8,72	-	1,68
		326%	469%	171%	-	12%
Cis. Vertical (método 2)	Gama	42,59	73,78	2,55	-	2,69
		11%	47%	-26%	-	79%
	K	-	-	-	37,92	0,93
		-	-	-	122%	-38%
	Kreuzinger	137,57	238,31	8,72	-	1,68
		257%	376%	153%	-	12%
Cis. inclinado	Gama	37,77	65,44	2,71	-	1,84
		17%	56%	-16%	-	22%
	K	-	-	-	37,92	0,93
		-	-	-	10%	-38%
	Kreuzinger	137,57	238,31	8,72	-	1,68
		326%	469%	171%	-	12%
Valores limites		32,27	41,91	3,21	34,38	1,50

Fonte: Produção do próprio autor.

Apenas no método de cálculo Gama houve diferença entre os resultados de acordo com o valor de G_{vt} e f_{vt} obtido para cada método de ensaio, enquanto o método K e de Kreuzinger não obtiveram respostas significativamente diferentes para os diferentes parâmetros de ensaio obtidos nos ensaios com os corpos de prova. As tensões normais no método Gama foram maiores com os resultados obtidos pelo método de cisalhamento vertical (método 1 e 2), enquanto as tensões de cisalhamento foram inferiores. Além disso, os valores de flecha foram cerca de 180% superiores aos valores experimentais. Provavelmente essa diferença seja atribuída a não consideração do efeito de cisalhamento na flecha final obtida pelos modelos analíticos.

Pereira e Calil Junior (2019) também observaram a influência dos valores de rigidez (G_{vt}) e de resistência (f_{vt}) ao *rolling shear* no método gama, de forma que este método é sensível a variações destas propriedades.

Nos métodos Gama e de Kreuzinger, a falha ocorreu primeiramente por tensão de compressão na lamela superior nas madeiras de *P. elliotii* e *T. ciliata* (cedro australiano) e por tensão de tração na lamela inferior nas madeiras de *E. grandis* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano). Para o método Gama as tensões de cisalhamento τ_{vt} foram inferiores aos valores experimentais, enquanto que para o método de Kreuzinger estes foram superiores. O valor limite de flecha foi atingido para 50% da força última no método gama (exceto para madeira de *E. grandis*), mas foi inferior para o método de Kreuzinger.

No método K as tensões $\sigma_{\max, \text{eff}}$ foram superiores aos valores experimentais para todas as espécies em mais de 60%, com exceção da madeira de *A. fraxinifolius* (cedro indiano), a qual obteve diferença de 10%. Neste método a flecha foi inferior ao limite de $L/300$ para as madeiras de *E. grandis* e *A. fraxinifolius* (cedro indiano) (de 1% a 38% menores), enquanto que para a madeira de *P. elliotii* e *T. ciliata* (cedro australiano) este valor foi maior que o experimental.

O tipo de falha observada experimentalmente e analiticamente por O'Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) também foi por tensão normal, onde os valores obtidos analiticamente foram próximos entre si para viga de três camadas (*P. sitchensis*) com vão de 1440 mm e dimensões de 584 mm de largura e 60 mm de espessura.

O método de cálculo de Kreuzinger, apesar de ser pouco influenciado pelos valores de G_{vt} e f_{vt} , foi o mais conservador, pelas tensões normais atingirem o valor de resistência antes dos outros métodos, como pode ser observado pelo alto valor de diferença percentual (maiores de 320%). Crovella, Smith e Bartczaka (2019) também verificaram que o método de cálculo de Kreuzinger gerou resultados mais conservadores, especialmente para espécies de folhosas em MLCC de três camadas.

Amorim, Mantilla e Carrasco (2018) afirmaram que o método de cálculo de Kreuzinger foi o que apresentou melhor precisão quando comparado com os resultados experimentais de vigas de MLCC fabricadas com madeira de conífera, pelo fato de ser considerado a deformação por cisalhamento do material. Da mesma forma, Sandoli e Calderoni (2020) verificaram que o efeito de *rolling shear* na deflexão total da viga é mais bem representado pelo método de Kreuzinger do que pelo método gama, sendo tal efeito correspondendo a mais de 20% em situações que a razão L/h menores do que 20.

Contudo, considerando as diferenças percentuais dos valores calculados com os valores experimentais, o método Gama pode ser considerado o mais representativo para a avaliação de elementos de MLCC na flexão, desde que sejam utilizados os valores de G_{vt} e f_{vt} obtidos pelos métodos de flexão e/ou cisalhamento inclinado.

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/adesivo. 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 $\Delta\epsilon$ 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 obtém 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 ortorópico 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.; BREDÁ, 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.

JAUK, 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.

STECHER, 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.

APÊNDICE A – Obtenção do G_{vt} pela equação de Timoshenko

$$u = \frac{P \cdot L_0^3}{48 \cdot E \cdot I} + \alpha_s \frac{P \cdot L_0}{4 \cdot G \cdot A} \quad (\text{Equação de Timoshenko})$$

$$A = b \cdot h$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$E_{m,app} = \frac{L^3 \cdot (F_{40\%} - F_{10\%})}{48 \cdot I \cdot (u_{40\%} - u_{10\%})}$$

$$E_{m,app} = \frac{L^3 \cdot (F_{40\%} - F_{10\%})}{48 \cdot I \cdot (u_{40\%} - u_{10\%})} \Rightarrow E_{m,app1} = \frac{L_1^3 \cdot \Delta P_1}{48 \cdot I \cdot \Delta u_1} \Rightarrow \frac{\Delta u_1}{\Delta P_1} = \frac{L_1^3}{48 \cdot I \cdot E_{m,app1}}$$

$$\Delta u_1 = \frac{L_1^3 \cdot \Delta P_1}{48 \cdot I \cdot E} + \alpha_s \frac{\Delta P_1 \cdot L_1}{4 \cdot G \cdot A} = \Delta P_1 \cdot \left(\frac{L_1^3}{48 \cdot I \cdot E} + \alpha_s \frac{L_1}{4 \cdot G \cdot A} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta u_1}{\Delta P_1} = \frac{L_1^3}{48 \cdot I \cdot E} + \alpha_s \frac{L_1}{4 \cdot G \cdot A}$$

$$\therefore \frac{L_1^3}{48 \cdot I \cdot E_{m,app1}} = \frac{L_1^3}{48 \cdot I \cdot E} + \alpha_s \frac{L_1}{4 \cdot G \cdot A} \Rightarrow \frac{L_1^3}{48 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot E_{m,app1}} = \frac{L_1^3}{48 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \cdot E} + \alpha_s \frac{L_1}{4 \cdot G \cdot b \cdot h} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{L_1^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot E_{m,app1}} = \frac{L_1^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot E} + \alpha_s \frac{L_1}{4 \cdot G \cdot b \cdot h} \Rightarrow \frac{L_1}{4 \cdot b \cdot h} \cdot \left(\frac{L_1^2}{h^2 \cdot E_{m,app1}} \right) = \frac{L_1}{4 \cdot b \cdot h} \cdot \left(\frac{L_1^2}{h^2 \cdot E} + \frac{\alpha_s}{G} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{L_1^2}{h^2 \cdot E_{m,app1}} = \frac{L_1^2}{h^2 \cdot E} + \frac{\alpha_s}{G} \Rightarrow \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 \cdot \frac{1}{E_{m,app1}} = \left(\frac{L_1}{h} \right)^2 \cdot \frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{E_{m,app1}} = \frac{\left(\frac{L_1}{h} \right)^2 \cdot \frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G}}{\left(\frac{L_1}{h} \right)^2} \Rightarrow \frac{1}{E_{m,app1}} = \frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \cdot \left(\frac{h}{L_1} \right)^2$$

$$\frac{1}{E_{m,app1}} = \frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \cdot \left(\frac{h}{L_1} \right)^2 \quad \text{para } L_1 \text{ e } \quad \frac{1}{E_{m,app2}} = \frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \cdot \left(\frac{h}{L_2} \right)^2 \quad \text{para } L_2$$

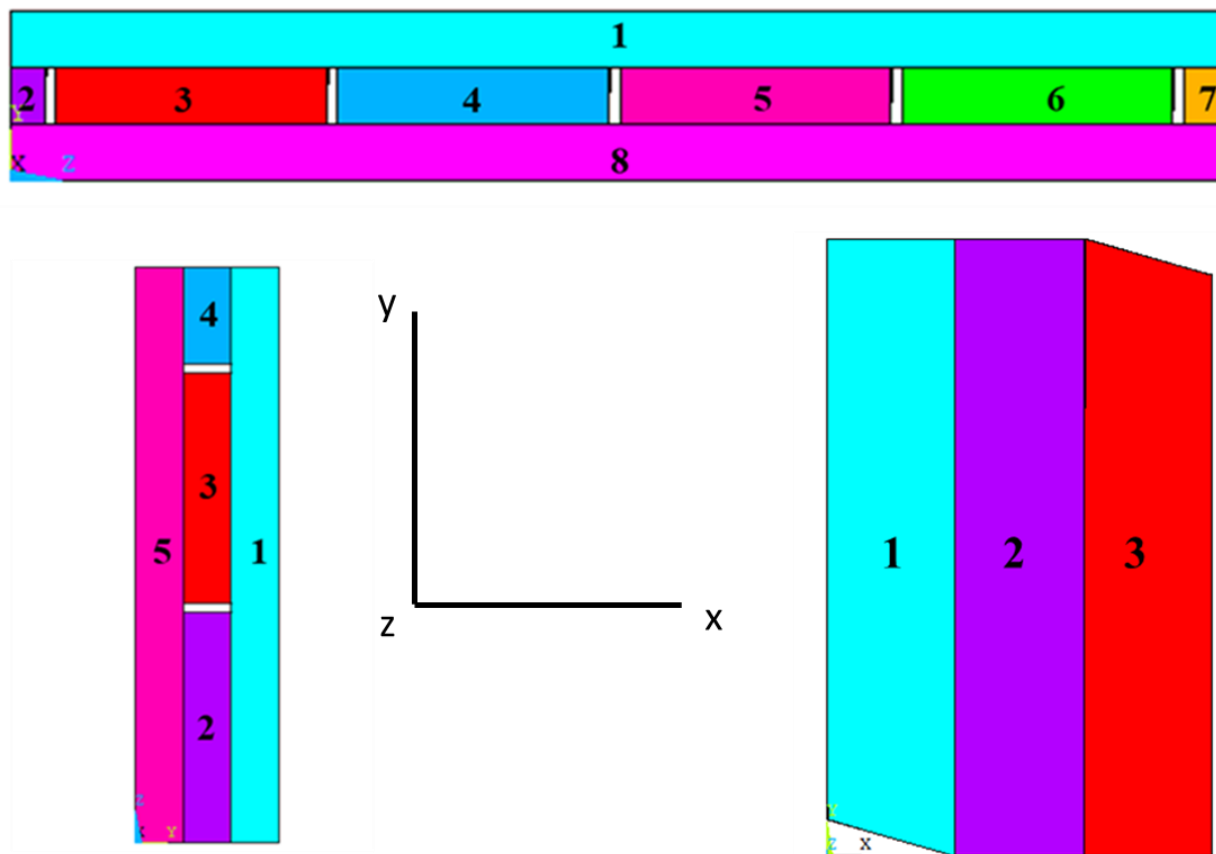
$$\text{Assim: } \frac{1}{E_{m,app2}} - \frac{1}{E_{m,app1}} = \left[\frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \cdot \left(\frac{h}{L_2} \right)^2 \right] - \left[\frac{1}{E} + \frac{\alpha_s}{G} \cdot \left(\frac{h}{L_1} \right)^2 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \left(\frac{1}{E_{m,app}} \right) = \frac{\alpha_s}{G} \cdot \Delta \left(\frac{h}{L} \right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G = \alpha_s \cdot \frac{\Delta \left(\frac{h}{L} \right)^2}{\Delta \left(\frac{1}{E_{m,app}} \right)} \quad (\text{Equação 43})$$

APÊNDICE B – Propriedades adotadas nos modelos numéricos

Figura 80 – Posição das lamelas em cada um dos modelos numéricos.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 24: Propriedades e relações entre propriedades adotadas para os modelos numéricos (Tabelas 25 a 32).

Terminologia	Relações admitidas
Et = módulo de elasticidade na direção t	Et = Er/1,6 = El/20
Er = módulo de elasticidade na direção r	
El = módulo de elasticidade na direção l	Gtr = Gtl/9,4 = Grl/10 = El/160
vtr = coeficiente de Poison no plano tr	
vrl = coeficiente de Poison no plano rl	vtr = 0,23
vtl = coeficiente de Poison no plano tl	
Gtr = módulo de elasticidade transversal no plano tr	vrl = vtl = 0,0013
GrI = módulo de elasticidade transversal no plano rl	
Gtl = módulo de elasticidade transversal no plano tl	Gttl = 0,17652
σ_t = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção t	
σ_r = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção r	Gtrl = Gttl = 176.52
σ_l = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção l	
Ett = módulo tangente (tração e compressão) na direção t	$\sigma_l = f_{c0,m}$
Etr = módulo tangente (tração e compressão) na direção r	
Etl = módulo tangente (tração e compressão) na direção l	$\sigma_t = 1,04 * \sigma_r = 0,19 * \sigma_l$
τ_{tr} = tensão cisalhante de plastificação na direção tr	
τ_{rl} = tensão cisalhante de plastificação na direção rl	$\tau_{tr} = 0,038 * \sigma_l$
τ_{tl} = tensão cisalhante de plastificação na direção tl	
Gtr = módulo tangente de corte no plano tr	$1,13 * \tau_{rl} = \tau_{tl} = 0,38 * \sigma_l$
Gtrl = módulo tangente de corte no plano rl	
Gttl = módulo tangente de corte no plano tl	Et = Er/1,6 = Etl/10 = El/10000

Fonte: Adaptado de Bodig e Jayne (1993), Molina (2008), Wang, Song e Gu (2018) e ABNT NBR 7190-1 (2022).

Tabela 25: Propriedades adotadas para a viga de *P. elliottii* com vão livre de 450 milímetros.

Propriedades	Posição da lamela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ex [MPa]	416,55	4288	4892	4892	5902	4724	5580	295,1
Ey [MPa]	666,48	214,4	244,6	244,6	295,1	236,2	279	472,16
Ez [MPa]	8331	343,04	391,36	391,36	472,16	377,92	446,4	5902
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	52,07	251,92	287,405	287,405	346,742	277,535	327,825	36,89
Gyz [MPa]	520,69	26,8	30,575	30,575	36,8875	29,525	34,875	368,88
Gxz [MPa]	489,45	268	305,75	305,75	368,875	295,25	348,75	346,74
σ_x [MPa]	38,54	54,8	28,71	28,71	31,76	25,02	29,46	31,76
σ_y [MPa]	38,54	10,412	5,4549	5,4549	6,0344	4,7538	5,5974	31,76
σ_z [MPa]	38,54	10,828	5,673	5,673	6,276	4,944	5,821	31,76
Et _x [MPa]	0,833	4,288	4,892	4,892	5,902	4,724	5,580	0,590
Et _y [MPa]	1,333	0,429	0,489	0,489	0,590	0,472	0,558	0,944
Et _z [MPa]	8,331	0,686	0,783	0,783	0,944	0,756	0,893	5,902
τ_{xy} [MPa]	14,645	2,082	1,091	1,091	1,207	0,951	1,119	12,069
τ_{yz} [MPa]	16,549	20,824	10,910	10,910	12,069	9,508	11,195	13,638
τ_{xz} [MPa]	1,465	23,531	12,328	12,328	13,638	10,744	12,650	1,207
Gt _{xy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	0,17652
Gt _{yz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
Gt _{xz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 26: Propriedades adotadas para a viga de *E. grandis* com vão livre de 450 milímetros.

Propriedades	Posição da lamela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ex [MPa]	443	17006	17006	16699	17006	17006	16962	638,7
Ey [MPa]	708,8	850,3	850,3	834,95	850,3	850,3	848,1	1021,92
Ez [MPa]	8860	1360,48	1360,48	1335,92	1360,48	1360,48	1356,96	12774
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	55,375	999,103	999,103	981,066	999,103	999,103	996,518	79,838
Gyz [MPa]	553,750	106,288	106,288	104,369	106,288	106,288	106,013	798,375
Gxz [MPa]	520,525	1062,87	1062,87	1043,68	1062,87	1062,87	1060,12	750,473
σ_x [MPa]	33,815	41,12	41,12	40,4	41,12	41,12	35,7	44,36
σ_y [MPa]	33,815	7,8128	7,8128	7,676	7,8128	7,8128	6,783	44,36
σ_z [MPa]	33,815	8,125	8,125	7,983	8,125	8,125	7,054	44,36
Et _x [MPa]	0,886	17,006	17,006	16,699	17,006	17,006	16,962	1,277
Et _y [MPa]	1,418	1,701	1,701	1,670	1,701	1,701	1,696	2,044
Et _z [MPa]	8,860	2,721	2,721	2,672	2,721	2,721	2,714	12,774
τ_{xy} [MPa]	12,850	1,563	1,563	1,535	1,563	1,563	1,357	16,857
τ_{yz} [MPa]	14,520	15,626	15,626	15,352	15,626	15,626	13,566	19,048
τ_{xz} [MPa]	1,285	17,657	17,657	17,348	17,657	17,657	15,330	1,686
G _{txy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	0,17652
G _{tyz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
G _{txz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 27: Propriedades adotadas para a viga de *T. ciliata* (cedro australiano) com vão livre de 450 milímetros.

Propriedades	Posição da lamela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ex [MPa]	204,85	9481	6787	6436	10574	6331	8256	336,85
Ey [MPa]	327,76	474,05	339,35	321,8	528,7	316,55	412,8	538,96
Ez [MPa]	4097	758,48	542,96	514,88	845,92	506,48	660,48	6737
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	25,61	557,01	398,74	378,12	621,22	371,95	485,04	42,11
Gyz [MPa]	256,06	59,26	42,42	40,23	66,09	39,57	51,60	421,06
Gxz [MPa]	240,70	592,56	424,19	402,25	660,88	395,69	516,00	395,80
σ_x [MPa]	28,14	41,53	36,13	34,41	44,26	35,79	33,41	29,93
σ_y [MPa]	28,14	7,8907	6,8647	6,5379	8,4094	6,8001	6,3479	29,93
σ_z [MPa]	28,14	8,206	7,139	6,799	8,746	7,072	6,602	29,93
Et _x [MPa]	0,410	9,481	6,787	6,436	10,574	6,331	8,256	0,674
Et _y [MPa]	0,656	0,948	0,679	0,644	1,057	0,633	0,826	1,078
Et _z [MPa]	4,097	1,517	1,086	1,030	1,692	1,013	1,321	6,737
τ_{xy} [MPa]	10,693	1,578	1,373	1,308	1,682	1,360	1,270	11,373
τ_{yz} [MPa]	12,083	15,781	13,729	13,076	16,819	13,600	12,696	12,852
τ_{xz} [MPa]	1,069	17,833	15,514	14,776	19,005	15,368	14,346	1,137
Gt _{xy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	0,17652
Gt _{yz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
Gt _{xz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 28: Propriedades adotadas para a viga de *A. fraxinifolius* (cedro indiano) com vão livre de 450 milímetros.

Propriedades	Posição da lamela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ex [MPa]	273,65	14007	6331	6863	7905	3923	4097	474,05
Ey [MPa]	437,84	700,35	316,55	343,15	395,25	196,15	204,85	758,48
Ez [MPa]	5473	1120,56	506,48	549,04	632,4	313,84	327,76	9481
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	34,206	822,911	371,946	403,201	464,419	230,476	240,699	59,256
Gyz [MPa]	342,063	87,544	39,569	42,894	49,406	24,519	25,606	592,563
Gxz [MPa]	321,539	875,438	395,688	428,938	494,063	245,188	256,063	557,009
σ_x [MPa]	32,27	46,77	35,79	35,05	36,98	27,97	28,14	41,53
σ_y [MPa]	32,27	8,8863	6,8001	6,6595	7,0262	5,3143	5,3466	41,53
σ_z [MPa]	32,27	9,242	7,072	6,926	7,307	5,527	5,560	41,53
Et _x [MPa]	0,547	14,007	6,331	6,863	7,905	3,923	4,097	0,948
Et _y [MPa]	0,876	1,401	0,633	0,686	0,791	0,392	0,410	1,517
Et _z [MPa]	5,473	2,241	1,013	1,098	1,265	0,628	0,656	9,481
τ_{xy} [MPa]	12,263	1,777	1,360	1,332	1,405	1,063	1,069	15,781
τ_{yz} [MPa]	13,857	17,773	13,600	13,319	14,052	10,629	10,693	17,833
τ_{xz} [MPa]	1,226	20,083	15,368	15,050	15,879	12,010	12,083	1,578
G _{txy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	0,17652
G _{tyz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
G _{txz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 29: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento vertical de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente.

Propriedades	<i>P. elliotii</i>					<i>E. grandis</i>				
	Posição da lamela					Posição da lamela				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Ex [MPa]	416,55	5473	6284	10038	295,1	443	16699	16699	16699	638,7
Ey [MPa]	666,48	273,65	314,2	501,9	472,16	708,8	834,95	834,95	834,95	1021,92
Ez [MPa]	8331	437,84	502,72	803,04	5902	8860	1335,92	1335,92	1335,92	12774
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,23	0,23	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,013	0,013	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	52,07	321,538	369,185	589,73	36,89	55,38	981,066	981,066	981,066	79,84
Gyz [MPa]	520,69	34,2062	39,275	62,7375	368,88	553,75	104,368	104,368	104,368	798,38
Gxz [MPa]	489,45	342,062	392,75	627,375	346,74	520,53	1043,68	1043,68	1043,68	750,47
σ_x [MPa]	38,54	25,155	27,415	33,02	31,76	33,815	40,4	40,4	40,4	44,36
σ_y [MPa]	38,54	4,77945	5,20885	6,2738	31,76	33,815	7,676	7,676	7,676	44,36
σ_z [MPa]	38,54	4,971	5,417	6,525	31,76	33,815	7,983	7,983	7,983	44,36
Et _x [MPa]	0,833	5,473	6,284	10,038	0,590	0,886	16,699	16,699	16,699	1,277
Et _y [MPa]	1,333	0,547	0,628	1,004	0,944	1,418	1,670	1,670	1,670	2,044
Et _z [MPa]	8,331	0,876	1,005	1,606	5,902	8,860	2,672	2,672	2,672	12,774
τ_{xy} [MPa]	14,645	0,956	1,042	1,255	12,069	12,850	1,535	1,535	1,535	16,857
τ_{yz} [MPa]	16,549	9,559	10,418	12,548	13,638	14,520	15,352	15,352	15,352	19,048
τ_{xz} [MPa]	1,465	10,802	11,772	14,179	1,207	1,285	17,348	17,348	17,348	1,686
Gt _{xy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	0,17652	0,17652	176,52	176,52	176,52	0,17652
Gt _{yz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	176,52	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
Gt _{xz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 30: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento vertical de *T. ciliata* (cedro australiano) e *A. fraxinifolius* (cedo indiano), respectivamente.

Propriedades	<i>T. ciliata</i>					<i>A. fraxinifolius</i>				
	Posição da lamela					Posição da lamela				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Ex [MPa]	204,85	4998	8438	5687	336,85	273,65	9897	6136	8103	474,05
Ey [MPa]	327,76	249,9	421,9	284,35	538,96	437,84	494,85	306,8	405,15	758,48
Ez [MPa]	4097	399,84	675,04	454,96	6737	5473	791,76	490,88	648,24	9481
ν_{xy} [adimensional]	0,23	0,013	0,013	0,013	0,23	0,23	0,013	0,013	0,013	0,23
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,23	0,23	0,23	0,013	0,013	0,23	0,23	0,23	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Gxy [MPa]	25,61	293,632	495,73	334,111	42,11	34,21	581,448	360,49	476,051	59,26
Gyz [MPa]	256,06	31,2375	52,7375	35,5437	421,06	342,06	61,8562	38,35	50,6437	592,56
Gxz [MPa]	240,70	312,375	527,375	355,437	395,80	321,54	618,562	383,5	506,437	557,01
σ_x [MPa]	28,14	20,94	30,9	24,965	29,93	32,27	40,145	32,08	36,975	41,53
σ_y [MPa]	28,14	3,9786	5,871	4,74335	29,93	32,27	7,62755	6,0952	7,02525	41,53
σ_z [MPa]	28,14	4,138	6,106	4,933	29,93	32,27	7,933	6,339	7,306	41,53
Et _x [MPa]	0,410	4,998	8,438	5,687	0,674	0,547	9,897	6,136	8,103	0,948
Et _y [MPa]	0,656	0,500	0,844	0,569	1,078	0,876	0,990	0,614	0,810	1,517
Et _z [MPa]	4,097	0,800	1,350	0,910	6,737	5,473	1,584	0,982	1,296	9,481
τ_{xy} [MPa]	10,693	0,796	1,174	0,949	11,373	12,263	1,526	1,219	1,405	15,781
τ_{yz} [MPa]	12,083	7,957	11,742	9,487	12,852	13,857	15,255	12,190	14,051	17,833
τ_{xz} [MPa]	1,069	8,992	13,268	10,720	1,137	1,226	17,238	13,775	15,877	1,578
Gt _{xy} [MPa]	0,17652	176,52	176,52	176,52	0,17652	0,17652	176,52	176,52	176,52	0,17652
Gt _{yz} [MPa]	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	176,52	176,52	0,17652	0,17652	0,17652	176,52
Gt _{xz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 31: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado de *P. elliotii* e *E. grandis*, respectivamente.

Propriedades	<i>P. elliotii</i>			<i>E. grandis</i>		
	Posição da lamela			Posição da lamela		
	1	2	3	1	2	3
Ex [MPa]	552,16	265,9	874,88	771,44	834,85	1022,08
Ey [MPa]	6902	425,44	10936	9643	1335,76	12776
Ez [MPa]	345,1	5318	546,8	482,15	16697	638,8
ν_{xy} [adimensional]	0,013	0,23	0,013	0,013	0,23	0,013
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,23	0,013	0,23	0,23	0,013	0,23
Gxy [MPa]	405,492	33,24	642,49	566,526	104,36	750,59
Gyz [MPa]	431,375	332,38	683,5	602,687	1043,56	798,5
Gxz [MPa]	43,1375	312,43	68,35	60,2687	980,95	79,85
σ_x [MPa]	31,72	5,4663	41,46	38,31	7,676	44,36
σ_y [MPa]	31,72	5,685	41,46	38,31	7,983	44,36
σ_z [MPa]	31,72	28,77	41,46	38,31	40,4	44,36
Et _x [MPa]	1,104	0,532	1,750	1,543	1,670	2,044
Et _y [MPa]	11,043	0,851	17,498	15,429	2,672	20,442
Et _z [MPa]	0,690	5,318	1,094	0,964	16,697	1,278
τ_{xy} [MPa]	13,621	1,093	17,803	16,450	1,535	19,048
τ_{yz} [MPa]	12,054	12,354	15,755	14,558	17,348	16,857
τ_{xz} [MPa]	1,205	10,933	1,575	1,456	15,352	1,686
Gt _{xy} [MPa]	176,52	0,17652	176,52	176,52	0,17652	176,52
Gt _{yz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52
Gt _{xz} [MPa]	0,17652	176,52	0,17652	0,17652	176,52	0,17652

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 32: Propriedades adotadas para o corpo de prova de cisalhamento inclinado de *T. ciliata* (cedro australiano) e *A. fraxinifolius* (cedo indiano), respectivamente.

Propriedades	<i>T. ciliata</i>			<i>A. fraxinifolius</i>		
	Posição da lamela			Posição da lamela		
	1	2	3	1	2	3
Ex [MPa]	379,68	338,65	660,48	455,2	624,4	845,92
Ey [MPa]	4746	541,84	8256	5690	999,04	10574
Ez [MPa]	237,3	6773	412,8	284,5	12488	528,7
ν_{xy} [adimensional]	0,013	0,23	0,013	0,013	0,23	0,013
ν_{yz} [adimensional]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
ν_{xz} [adimensional]	0,23	0,013	0,23	0,23	0,013	0,23
Gxy [MPa]	278,827	42,33	485,04	334,287	78,05	621,222
Gyz [MPa]	296,625	423,31	516	355,625	780,50	660,875
Gxz [MPa]	29,6625	397,91	51,6	35,5625	733,67	66,0875
σ_x [MPa]	22,47	5,8482	33,41	35,79	6,319	44,26
σ_y [MPa]	22,47	6,082	33,41	35,79	6,0762	44,26
σ_z [MPa]	22,47	30,78	33,41	35,79	31,98	44,26
Et _x [MPa]	0,759	0,677	1,321	0,910	1,249	1,692
Et _y [MPa]	7,594	1,084	13,210	9,104	1,998	16,918
Et _z [MPa]	0,475	6,773	0,826	0,569	12,488	1,057
τ_{xy} [MPa]	9,649	1,170	14,346	15,368	1,215	19,005
τ_{yz} [MPa]	8,539	13,217	12,696	13,600	13,732	16,819
τ_{xz} [MPa]	0,854	11,696	1,270	1,360	12,152	1,682
Gt _{xy} [MPa]	176,52	0,17652	176,52	176,52	0,17652	176,52
Gt _{yz} [MPa]	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52	176,52
Gt _{xz} [MPa]	0,17652	176,52	0,17652	0,17652	176,52	0,17652

Fonte: Produção do próprio autor.

APÊNDICE C – Script de calibração do modelo de viga com vão de 450 mm

/FINISH
/CLEAR

```
! *****
! MODELO 01: VIGA DE CLT – E. grandis viga 1
! *****
! SCRIPT PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRÓPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO DE VIGA COMPLETA COM MODELO ORTOTRÓPICO COM NÃO LINEARIDADE
FÍSICA E GEOMÉTRICA
! Seção transversal: largura = 110 mm, altura = 75 mm e comprimento = 540 mm
! Total de três camadas (Espessura de cada uma das camadas = 25 mm)
! Simulação de ensaio estático da viga com força última aplicada no meio do vão até a convergência
! Carga última em 92 nós centrais
! Direções adotadas para a madeira das camadas externas: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z
(longitudinal)
! Direções adotadas para a madeira da camada interna: direção x (longitudinal); direção y (tangencial) e direção z
(radial)
! *****
! Unidades consideradas no modelo
! *****
! Dimensões em (mm)
! Forças aplicadas em (N)
! *****
! Parâmetros auxiliares:
! *****
! Material 01: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 01 (camada superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 02 (camada interna)
! Material 03: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 03 (camada interna)
! Material 04: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 04 (camada interna)
! Material 05: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 05 (camada interna)
! Material 06: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 06 (camada interna)
! Material 07: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 07 (camada interna)
! Material 08: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 08 (camada inferior)
! *****
! Indicação de diferentes cores para os elementos
! *****
/CONFIG,NRES,10000
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
! *****
! OPÇÕES GERAIS
! *****
ALLSEL,ALL
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
! *****
! Dados de entrada do material para cada uma das lamelas:
! *****
! Lamela 01 (camada superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
/PREP7
```

```

ET,1,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45)
! *****
R,1
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 1:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 443
MPDATA,EY,1,, 708.8
MPDATA,EZ,1,, 8860
MPDATA,PRXY,1,,0.23
MPDATA,PRYZ,1,,0.013
MPDATA,PRXZ,1,,0.013
MPDATA,GXY,1,, 55.375
MPDATA,GYZ,1,,553.750
MPDATA,GXZ,1,, 520.525
! *****
! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 1:
! *****
TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,0
TBMODIF,1,1, 33.815
TBMODIF,1,2, 33.815
TBMODIF,1,3, 33.815

TBMODIF,2,1, 0.8860
TBMODIF,2,2, 1.418
TBMODIF,2,3, 8.860

TBMODIF,3,1, 33.815
TBMODIF,3,2, 33.815
TBMODIF,3,3, 33.815

TBMODIF,4,1, 0.8860
TBMODIF,4,2, 1.418
TBMODIF,4,3, 8.860

TBMODIF,5,1, 12.850
TBMODIF,5,2, 14.520
TBMODIF,5,3, 1.285

TBMODIF,6,1, 0.17652
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****
! Lamela 2
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,2,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)
! *****
R,2
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 2:
! *****

```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,, 17006
MPDATA,EY,2,, 850.3
MPDATA,EZ,2,, 1360.48
MPDATA,PRXY,2,,0.013
MPDATA,PRYZ,2,,0.23
MPDATA,PRXZ,2,,0.013
MPDATA,GXY,2,,999.103
MPDATA,GYZ,2,, 106.288
MPDATA,GXZ,2,, 1062.87
! *****
! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 2:
! *****
TBDE,ANIS,2
TB,ANIS,2,,0
TBMODIF,1,1, 41.12
TBMODIF,1,2, 7.8128
TBMODIF,1,3, 8.125

TBMODIF,2,1, 17.006
TBMODIF,2,2, 1.7006
TBMODIF,2,3, 2.721

TBMODIF,3,1, 41.12
TBMODIF,3,2, 7.8128
TBMODIF,3,3, 8.125

TBMODIF,4,1, 17.006
TBMODIF,4,2, 1.7006
TBMODIF,4,3, 2.721

TBMODIF,5,1, 1.56256
TBMODIF,5,2, 15.6256
TBMODIF,5,3, 17.657

TBMODIF,6,1, 176.52
TBMODIF,6,2, 0.17652
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****
! Lamela 3
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,3,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45)
! *****
R,3
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 3:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,3,, 17006
MPDATA,EY,3,, 850.3
MPDATA,EZ,3,, 1360.48
MPDATA,PRXY,3,,0.013
MPDATA,PRYZ,3,,0.23
MPDATA,PRXZ,3,,0.013

```

```

MPDATA,GXY,3,,999.103
MPDATA,GYZ,3,, 106.288
MPDATA,GXZ,3,, 1062.87
! *****
! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 3:
! *****
TBDE,ANIS,3
TB,ANIS,3,,,0
TBMODIF,1,1, 41.12
TBMODIF,1,2, 7.8128
TBMODIF,1,3, 8.125

TBMODIF,2,1, 17.006
TBMODIF,2,2, 1.7006
TBMODIF,2,3, 2.721

TBMODIF,3,1, 41.12
TBMODIF,3,2, 7.8128
TBMODIF,3,3, 8.125

TBMODIF,4,1, 17.006
TBMODIF,4,2, 1.7006
TBMODIF,4,3, 2.721

TBMODIF,5,1, 1.56256
TBMODIF,5,2, 15.6256
TBMODIF,5,3, 17.657

TBMODIF,6,1, 176.52
TBMODIF,6,2, 0.17652
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****
! Lamela 4
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,4,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 4 para o elemento 4 (solid45)
! *****
R,4
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 4:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,, 16699
MPDATA,EY,4,, 834.95
MPDATA,EZ,4,, 1335.92
MPDATA,PRXY,4,,0.013
MPDATA,PRYZ,4,,0.23
MPDATA,PRXZ,4,,0.013
MPDATA,GXY,4,,981.066
MPDATA,GYZ,4,, 104.369
MPDATA,GXZ,4,, 1043.68
! *****
! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 4:
! *****
TBDE,ANIS,4
TB,ANIS,4,,,0

```

TBMODIF,1,1, 40.4
 TBMODIF,1,2, 7.676
 TBMODIF,1,3, 7.983

TBMODIF,2,1, 16.699
 TBMODIF,2,2, 1.6699
 TBMODIF,2,3, 2.672

TBMODIF,3,1, 40.4
 TBMODIF,3,2, 7.676
 TBMODIF,3,3, 7.983

TBMODIF,4,1, 16.699
 TBMODIF,4,2, 1.6699
 TBMODIF,4,3, 2.672

TBMODIF,5,1, 1.5352
 TBMODIF,5,2, 15.352
 TBMODIF,5,3, 17.348

TBMODIF,6,1, 176.52
 TBMODIF,6,2, 0.17652
 TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 5

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,5,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)

! *****

R,5

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 5:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,5,, 17006

MPDATA,EY,5,, 850.3

MPDATA,EZ,5,, 1360.48

MPDATA,PRXY,5,,0.013

MPDATA,PRYZ,5,,0.23

MPDATA,PRXZ,5,,0.013

MPDATA,GXY,5,,999.103

MPDATA,GYZ,5,, 106.288

MPDATA,GXZ,5,, 1062.87

! *****

! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 5:

! *****

TBDE,ANIS,5

TB,ANIS,5,,0

TBMODIF,1,1, 41.12

TBMODIF,1,2, 7.8128

TBMODIF,1,3, 8.125

TBMODIF,2,1, 17.006

TBMODIF,2,2, 1.7006

TBMODIF,2,3, 2.721

TBMODIF,3,1, 41.12
 TBMODIF,3,2, 7.8128
 TBMODIF,3,3, 8.125

TBMODIF,4,1, 17.006
 TBMODIF,4,2, 1.7006
 TBMODIF,4,3, 2.721

TBMODIF,5,1, 1.56256
 TBMODIF,5,2, 15.6256
 TBMODIF,5,3, 17.657

TBMODIF,6,1, 176.52
 TBMODIF,6,2, 0.17652
 TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 6

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,6,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)

! *****

R,6

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 6:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,6,, 17006

MPDATA,EY,6,, 850.3

MPDATA,EZ,6,, 1360.48

MPDATA,PRXY,6,,0.013

MPDATA,PRYZ,6,,0.23

MPDATA,PRXZ,6,,0.013

MPDATA,GXY,6,,999.103

MPDATA,GYZ,6,, 106.288

MPDATA,GXZ,6,, 1062.87

! *****

! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 6:

! *****

TBDE,ANIS,6

TB,ANIS,6,,0

TBMODIF,1,1, 41.12

TBMODIF,1,2, 7.8128

TBMODIF,1,3, 8.125

TBMODIF,2,1, 17.006

TBMODIF,2,2, 1.7006

TBMODIF,2,3, 2.721

TBMODIF,3,1, 41.12

TBMODIF,3,2, 7.8128

TBMODIF,3,3, 8.125

TBMODIF,4,1, 17.006

TBMODIF,4,2, 1.7006

TBMODIF,4,3, 2.721

TBMODIF,5,1, 1.56256
 TBMODIF,5,2, 15.6256
 TBMODIF,5,3, 17.657

TBMODIF,6,1, 176.52
 TBMODIF,6,2, 0.17652
 TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 7

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,7,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 7 para o elemento 7 (solid45)

! *****

R,7

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 7:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,7,, 16962

MPDATA,EY,7,, 848.1

MPDATA,EZ,7,, 1356.96

MPDATA,PRXY,7,,0.013

MPDATA,PRYZ,7,,0.23

MPDATA,PRXZ,7,,0.013

MPDATA,GXY,7,,996.518

MPDATA,GYZ,7,, 106.013

MPDATA,GXZ,7,, 1060.12

! *****

! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 7:

! *****

TBDE,ANIS,7

TB,ANIS,7,,0

TBMODIF,1,1, 35.7

TBMODIF,1,2, 6.783

TBMODIF,1,3, 7.054

TBMODIF,2,1, 16.962

TBMODIF,2,2, 1.6962

TBMODIF,2,3, 2.714

TBMODIF,3,1, 35.7

TBMODIF,3,2, 6.783

TBMODIF,3,3, 7.054

TBMODIF,4,1, 16.962

TBMODIF,4,2, 1.6962

TBMODIF,4,3, 2.714

TBMODIF,5,1, 1.3566

TBMODIF,5,2, 13.566

TBMODIF,5,3, 15.330

TBMODIF,6,1, 176.52

TBMODIF,6,2, 0.17652

TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

```

! Lamela 08 (inferior)
! *****

! Definição do elemento solid45:
! *****

ET,8,SOLID45
! *****

! Criando a "Real Constant 8 para o elemento 8 (solid45)
! *****

R,8
! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 8:
! *****

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,8,, 638.7
MPDATA,EY,8,, 1021.92
MPDATA,EZ,8,, 12774
MPDATA,PRXY,8,,0.013
MPDATA,PRYZ,8,,0.23
MPDATA,PRXZ,8,,0.013
MPDATA,GXY,8,, 79.838
MPDATA,GYZ,8,, 798.375
MPDATA,GXZ,8,, 750.437
! *****

! Parâmetros plásticos para a madeira da lamela 8:
! *****

TBDE,ANIS,8
TB,ANIS,8,,0
TBMODIF,1,1, 44.36
TBMODIF,1,2, 44.36
TBMODIF,1,3, 44.36

TBMODIF,2,1, 1.2774
TBMODIF,2,2, 2.044
TBMODIF,2,3, 12.774

TBMODIF,3,1, 44.36
TBMODIF,3,2, 44.36
TBMODIF,3,3, 44.36

TBMODIF,4,1, 1.2774
TBMODIF,4,2, 2.044
TBMODIF,4,3, 12.774

TBMODIF,5,1, 16.8568
TBMODIF,5,2, 19.048
TBMODIF,5,3, 1.68568

TBMODIF,6,1, 0.17652
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****

! Construção e discretização da malha de elementos finitos
! *****

! LAMELA 01
! *****

! Criação do bloco 01 - Lamela 01 (superior) - 120 x 25 x 540 mm (50 < y < 75 mm)
! *****

BLOCK,0,110,50,75,0,540,
! *****

```

! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a Lamela 1

! *****

TYPE, 1

MAT, 1

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

! *****

! Dividindo a malha da Lamela 1 e transformando em volume

! *****

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,2

CM, _Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM, _Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1

!*

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,3

CM, _Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM, _Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1

!*

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,11

CM, _Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM, _Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1

!*

/UI,MESH,OFF

CM, _Y,VOLU

VSEL, , , , 1

CM, _Y1,VOLU

CHKMSH,'VOLU'

CMSEL,S,_Y

!*

MSHAPE,0,3d

MSHKEY,1

VMESH, _Y1

MSHKEY,0

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

! *****

! LAMELA 02

! *****

! Criação do bloco 02 - Lamela 02 - 120 x 25 x 15 mm ($25 < y < 50$ mm)

! *****

BLOCK,0,110,25,50,0,15,

! *****

! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a Lamela 02

```

! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 2 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,17
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,15
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, 5, , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,22
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,0
!*
/VIEW,1,, ,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 03
! *****
! Criação do bloco 03 - Lamela 03 - 120 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****

```

```

BLOCK,0,110,25,50,20,140,
! *****
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a Lamela 03
! *****
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 3 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,33
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,30
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, 5 , , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,29
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****

```

```

! LAMELA 04
! *****
! Criação do bloco 04 - Lamela 04 - 120 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,145,265,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a Lamela 04
! *****
TYPE, 4
MAT, 4
REAL, 4
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 4 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,46
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,44
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,5
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,41
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,1
!*
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*

```

```

CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 05
! *****
! Criação do bloco 05 - Lamela 05 - 120 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,270,390,
! *****
! Atribuindo o material 05 ao volume criado para formar a Lamela 05
! *****
TYPE, 5
MAT, 5
REAL, 5
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 5 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,58
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,53
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,54
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,, ,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d

```

```

MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 06
! *****
! Criação do bloco 06 - Lamela 06 - 120 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,395,515,
! *****
! Atribuindo o material 06 ao volume criado para formar a Lamela 06
! *****
TYPE, 6
MAT, 6
REAL, 6
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 6 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,65
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,70
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,66
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 6
CM,_Y1,VOLU

```

```

CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 07
! *****
! Criação do bloco 07 - Lamela 07 - 120 x 25 x 20 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,520,540,
! *****
! Atribuindo o material 07 ao volume criado para formar a Lamela 07
! *****
TYPE, 7
MAT, 7
REAL, 7
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 7 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,81
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,78
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,77
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5,,,,,0
!*
!*****
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1

```

```

/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 7
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 08
! *****
! Criação do bloco 08 - Lamela 08 - 120 x 25 x 680 mm (0 < y < 25 mm)
! *****
BLOCK,0,110,0,25,0,540,
! *****
! Atribuindo o material 08 ao volume criado para formar a Lamela 08
! *****
TYPE, 8
MAT, 8
REAL, 8
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 8 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,94
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,90
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,89
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
!*

```

```

/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 8
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! Definir merge no volume para que as Lamelas tenham seus nós unidos
! *****
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , , low
! *****
! Vinculação dos apoios
! *****
! Seleção dos nós das extremidades (z = 495) - Impedimento das translações nos eixos x, y
! *****
/SOL
/VIEW,1,-1
/ANG,1
/REP,FAST
FLST,2,115,1,ORDE,6
FITEM,2,30367
FITEM,2,-30371
FITEM,2,30564
FITEM,2,-30568
FITEM,2,30701
FITEM,2,-30805
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY, , , ,
! *****
! Seleção dos nós das extremidades (z = 45) - Impedimento das translações nos eixos x, y e z
! *****
FLST,2,115,1,ORDE,6
FITEM,2,30457
FITEM,2,-30461
FITEM,2,30474
FITEM,2,-30478
FITEM,2,32591
FITEM,2,-32695
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY,UZ, , ,
! *****
! Seleção dos nós da face superior e aplicação do carregamento correspondente na direção y
! *****

```

```

! Carregamento nos terços do vão (F = -37457 N/número de nós): Fz = -37457 N/92nós = -407.1413043N/nó
! *****
! Pontos de aplicação das cargas: z = 265 mm e z = 275 mm - faixa 1 (meio da peça)
! *****
! Faixa 1 (265 < z < 275): Fz = - 37457 N/92nós = -407.1413043N/nó
! Sinal negativo indica que a carga está aplicada no sentido contrário ao sentido positivo de y
! *****
FLST,2,92,1,ORDE,46
FITEM,2,2789
FITEM,2,-2792
FITEM,2,2897
FITEM,2,-2900
FITEM,2,3004
FITEM,2,-3007
FITEM,2,3111
FITEM,2,-3114
FITEM,2,3218
FITEM,2,-3221
FITEM,2,3325
FITEM,2,-3328
FITEM,2,3432
FITEM,2,-3435
FITEM,2,3539
FITEM,2,-3542
FITEM,2,3646
FITEM,2,-3649
FITEM,2,3753
FITEM,2,-3756
FITEM,2,3860
FITEM,2,-3863
FITEM,2,3967
FITEM,2,-3970
FITEM,2,4074
FITEM,2,-4077
FITEM,2,4181
FITEM,2,-4184
FITEM,2,4288
FITEM,2,-4291
FITEM,2,4395
FITEM,2,-4398
FITEM,2,4502
FITEM,2,-4505
FITEM,2,4609
FITEM,2,-4612
FITEM,2,4716
FITEM,2,-4719
FITEM,2,4823
FITEM,2,-4826
FITEM,2,4930
FITEM,2,-4933
FITEM,2,5037
FITEM,2,-5040
FITEM,2,5144
FITEM,2,-5147
!*
/GO
E,P51X,FY,- 407.1413043
! *****
! Restrição ao deslocamento lateral dos nós das superfícies laterais da viga
! *****

```

FLST,2,3488,1,ORDE,114
FITEM,2,1
FITEM,2,-7
FITEM,2,29
FITEM,2,-33
FITEM,2,139
FITEM,2,-140
FITEM,2,162
FITEM,2,-167
FITEM,2,189
FITEM,2,-192
FITEM,2,277
FITEM,2,-490
FITEM,2,2738
FITEM,2,-2951
FITEM,2,5199
FITEM,2,-6054
FITEM,2,15044
FITEM,2,-15048
FITEM,2,15071
FITEM,2,-15075
FITEM,2,15181
FITEM,2,-15182
FITEM,2,15205
FITEM,2,-15208
FITEM,2,15231
FITEM,2,-15234
FITEM,2,15319
FITEM,2,-15322
FITEM,2,15411
FITEM,2,-15426
FITEM,2,15596
FITEM,2,-15600
FITEM,2,15623
FITEM,2,-15627
FITEM,2,15733
FITEM,2,-15734
FITEM,2,15757
FITEM,2,-15760
FITEM,2,15783
FITEM,2,-15786
FITEM,2,15871
FITEM,2,-15916
FITEM,2,16929
FITEM,2,-17112
FITEM,2,19046
FITEM,2,-19050
FITEM,2,19073
FITEM,2,-19077
FITEM,2,19183
FITEM,2,-19184
FITEM,2,19207
FITEM,2,-19210
FITEM,2,19233
FITEM,2,-19236
FITEM,2,19321
FITEM,2,-19366
FITEM,2,20379
FITEM,2,-20562
FITEM,2,22496

FITEM,2,-22500
 FITEM,2,22523
 FITEM,2,-22527
 FITEM,2,22633
 FITEM,2,-22634
 FITEM,2,22657
 FITEM,2,-22660
 FITEM,2,22683
 FITEM,2,-22686
 FITEM,2,22771
 FITEM,2,-22816
 FITEM,2,23829
 FITEM,2,-24012
 FITEM,2,25946
 FITEM,2,-25950
 FITEM,2,25973
 FITEM,2,-25977
 FITEM,2,26083
 FITEM,2,-26084
 FITEM,2,26107
 FITEM,2,-26110
 FITEM,2,26133
 FITEM,2,-26136
 FITEM,2,26221
 FITEM,2,-26266
 FITEM,2,27279
 FITEM,2,-27462
 FITEM,2,29396
 FITEM,2,-29400
 FITEM,2,29423
 FITEM,2,-29427
 FITEM,2,29533
 FITEM,2,-29534
 FITEM,2,29557
 FITEM,2,-29560
 FITEM,2,29583
 FITEM,2,-29586
 FITEM,2,29671
 FITEM,2,-29676
 FITEM,2,29809
 FITEM,2,-29832
 FITEM,2,30086
 FITEM,2,-30090
 FITEM,2,30113
 FITEM,2,-30117
 FITEM,2,30223
 FITEM,2,-30224
 FITEM,2,30247
 FITEM,2,-30250
 FITEM,2,30273
 FITEM,2,-30276
 FITEM,2,30361
 FITEM,2,-30574
 FITEM,2,35283
 FITEM,2,-36138

!*

/GO

D,P51X, , , , ,UX, , , , ,

! *****

! Retirar predeterminação de elementos

```

! *****
Pred,off
! *****
! Acoplamento dos nós onde está sendo aplicado o carregamento na direção y
! *****
FLST,4,92,1,ORDE,46
FITEM,4,2789
FITEM,4,-2792
FITEM,4,2897
FITEM,4,-2900
FITEM,4,3004
FITEM,4,-3007
FITEM,4,3111
FITEM,4,-3114
FITEM,4,3218
FITEM,4,-3221
FITEM,4,3325
FITEM,4,-3328
FITEM,4,3432
FITEM,4,-3435
FITEM,4,3539
FITEM,4,-3542
FITEM,4,3646
FITEM,4,-3649
FITEM,4,3753
FITEM,4,-3756
FITEM,4,3860
FITEM,4,-3863
FITEM,4,3967
FITEM,4,-3970
FITEM,4,4074
FITEM,4,-4077
FITEM,4,4181
FITEM,4,-4184
FITEM,4,4288
FITEM,4,-4291
FITEM,4,4395
FITEM,4,-4398
FITEM,4,4502
FITEM,4,-4505
FITEM,4,4609
FITEM,4,-4612
FITEM,4,4716
FITEM,4,-4719
FITEM,4,4823
FITEM,4,-4826
FITEM,4,4930
FITEM,4,-4933
FITEM,4,5037
FITEM,4,-5040
FITEM,4,5144
FITEM,4,-5147
CP,2899,UY,P51X
! *****
! Consideração da não linearidade física do material
! *****
! Aplicação dos valores de carga incremental aplicados no modelo até a ruptura
! *****
! Carga de ruptura aplica no ensaio de flexão: F= 37457 N
! Tamanho do passo de carga F1: F/60 (F=624.28N)

```

```

! Valor mínimo do passo de carga F2: F1/5 (124.86N)
! Valor máximo do passo de carga F3: F1 (F=624.28N)
! *****
/SOL
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM, 624.28, 124.86, 624.28
TIME, 37457
! *****
! Rodar o modelo
! *****
/SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
! *****
! Nó central da lamela 8 (inferior) é o número 30413
! *****

```

APÊNDICE D – Script de calibração do modelo de cisalhamento vertical

```
/FINISH
/CLEAR
```

```
! *****
! MODELO 01: Corpo de prova de cisalhamento vertical A. fraxinifolius 13
! *****
! SCRIPT PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRÓPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO COMPLETA COM MODELO ORTOTRÓPICO COM NÃO LINEARIDADE FÍSICA E
GEOMÉTRICA
! Seção transversal: largura = 110 mm, altura = 75 mm e comprimento = 300 mm
! Total de três camadas (Espessura de cada uma das camadas = 25 mm)
! Simulação de ensaio estático de corpo de prova de cisalhamento direto com força última aplicada no meio do
vão até a convergência
! Direções adotadas para a madeira das camadas externas: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z
(longitudinal)
! Direções adotadas para a madeira da camada interna: direção x (longitudinal); direção y (tangencial) e direção z
(radial)
! *****
! Unidades consideradas no modelo
! *****
! Dimensões em (mm)
! Forças aplicadas em (N)
! *****
! Parâmetros auxiliares:
! *****
! Material 01: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 01 (camada superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 02 (camada interna)
! Material 03: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 03 (camada interna)
! Material 04: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 04 (camada interna)
! Material 05: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 05 (camada inferior)
! *****
! Indicação de diferentes cores para os elementos
! *****
/CONFIG,NRES,10000
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
! *****
! OPÇÕES GERAIS
! *****
ALLSEL,ALL
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT
! *****
! Dados de entrada do material para cada uma das lamelas:
! *****
! Lamela 01 (camada superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
/PREP7
ET,1,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45)
```

```

! *****
R,1
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 1:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 273.65
MPDATA,EY,1,, 437.84
MPDATA,EZ,1,, 5473
MPDATA,PRXY,1,,0.23
MPDATA,PRYZ,1,,0.013
MPDATA,PRXZ,1,,0.013
MPDATA,GXY,1,, 34.21
MPDATA,GYZ,1,, 342.06
MPDATA,GXZ,1,, 321.54
! *****
! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 1:
! *****
TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,0
TBMODIF,1,1, 32.27
TBMODIF,1,2, 32.27
TBMODIF,1,3, 32.27

TBMODIF,2,1, 0.5473
TBMODIF,2,2, 0.876
TBMODIF,2,3, 5.473

TBMODIF,3,1, 32.27
TBMODIF,3,2, 32.27
TBMODIF,3,3, 32.27

TBMODIF,4,1, 0.5473
TBMODIF,4,2, 0.876
TBMODIF,4,3, 5.473

TBMODIF,5,1, 12.2626
TBMODIF,5,2, 13.857
TBMODIF,5,3, 1.22626

TBMODIF,6,1, 0.17652
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****
! Lamela 2
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,2,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)
! *****
R,2
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 2:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,, 9897

```

MPDATA,EY,2,, 494.85
 MPDATA,EZ,2,, 791.76
 MPDATA,PRXY,2,,0.013
 MPDATA,PRYZ,2,,0.23
 MPDATA,PRXZ,2,,0.013
 MPDATA,GXY,2,,581.448
 MPDATA,GYZ,2,, 61.8562
 MPDATA,GXZ,2,, 618.562

! *****

! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 2:

! *****

TBDE,ANIS,2
 TB,ANIS,2,,,0
 TBMODIF,1,1, 40.145
 TBMODIF,1,2, 7.62755
 TBMODIF,1,3, 7.933

TBMODIF,2,1, 9.897
 TBMODIF,2,2, 0.9897
 TBMODIF,2,3, 1.584

TBMODIF,3,1, 40.145
 TBMODIF,3,2, 7.62755
 TBMODIF,3,3, 7.933

TBMODIF,4,1, 9.897
 TBMODIF,4,2, 0.9897
 TBMODIF,4,3, 1.584

TBMODIF,5,1, 1.52551
 TBMODIF,5,2, 15.2551
 TBMODIF,5,3, 17.238

TBMODIF,6,1, 176.52
 TBMODIF,6,2, 0.17652
 TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 3

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,3,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45)

! *****

R,3

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 3:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,EX,3,, 6136
 MPDATA,EY,3,, 306.8
 MPDATA,EZ,3,, 490.88
 MPDATA,PRXY,3,,0.013
 MPDATA,PRYZ,3,,0.23
 MPDATA,PRXZ,3,,0.013
 MPDATA,GXY,3,,360.49
 MPDATA,GYZ,3,, 38.35
 MPDATA,GXZ,3,, 383.5

```

! *****
! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 3:
! *****
TBDE,ANIS,3
TB,ANIS,3,,0
TBMODIF,1,1, 32.08
TBMODIF,1,2, 6.0952
TBMODIF,1,3, 6.339

TBMODIF,2,1, 6.136
TBMODIF,2,2, 0.6136
TBMODIF,2,3, 0.982

TBMODIF,3,1, 32.08
TBMODIF,3,2, 6.0952
TBMODIF,3,3, 6.339

TBMODIF,4,1, 6.136
TBMODIF,4,2, 0.6136
TBMODIF,4,3, 0.982

TBMODIF,5,1, 1.21904
TBMODIF,5,2, 12.1904
TBMODIF,5,3, 13.775

TBMODIF,6,1, 176.52
TBMODIF,6,2, 0.17652
TBMODIF,6,3, 176.52
! *****
! Lamela 4
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,4,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 4 para o elemento 4 (solid45)
! *****
R,4
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 4:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,, 8103
MPDATA,EY,4,, 405.15
MPDATA,EZ,4,, 648.24
MPDATA,PRXY,4,,0.013
MPDATA,PRYZ,4,,0.23
MPDATA,PRXZ,4,,0.013
MPDATA,GXY,4,,476.051
MPDATA,GYZ,4,, 50.6437
MPDATA,GXZ,4,, 506.437
! *****
! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 4:
! *****
TBDE,ANIS,4
TB,ANIS,4,,0
TBMODIF,1,1, 36.975
TBMODIF,1,2, 7.02525
TBMODIF,1,3, 7.306

```

TBMODIF,2,1, 8.103
 TBMODIF,2,2, 0.8103
 TBMODIF,2,3, 1.296

TBMODIF,3,1, 36.975
 TBMODIF,3,2, 7.02525
 TBMODIF,3,3, 7.306

TBMODIF,4,1, 8.103
 TBMODIF,4,2, 0.8103
 TBMODIF,4,3, 1.296

TBMODIF,5,1, 1.40505
 TBMODIF,5,2, 14.0505
 TBMODIF,5,3, 15.877

TBMODIF,6,1, 176.52
 TBMODIF,6,2, 0.17652
 TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 05 (inferior)

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,5,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 5 para o elemento 5 (solid45)

! *****

R,5

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 5:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,5,, 474.05

MPDATA,EY,5,, 758.48

MPDATA,EZ,5,, 9481

MPDATA,PRXY,5,,0.013

MPDATA,PRYZ,5,,0.23

MPDATA,PRXZ,5,,0.013

MPDATA,GXY,5,, 59.26

MPDATA,GYZ,5,, 592.56

MPDATA,GXZ,5,, 557.01

! *****

! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 5:

! *****

TBDE,ANIS,5

TB,ANIS,5,,,0

TBMODIF,1,1, 41.53

TBMODIF,1,2, 41.53

TBMODIF,1,3, 41.53

TBMODIF,2,1, 0.9481

TBMODIF,2,2, 1.517

TBMODIF,2,3, 9.481

TBMODIF,3,1, 41.53

TBMODIF,3,2, 41.53

TBMODIF,3,3, 41.53

```
TBMODIF,4,1, 0.9481
TBMODIF,4,2, 1.517
TBMODIF,4,3, 9.481
```

```
TBMODIF,5,1, 15.7814
TBMODIF,5,2, 17.833
TBMODIF,5,3, 1.57814
```

```
TBMODIF,6,1, 0.17652
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 176.52
```

```
! *****
```

```
! Construção e discretização da malha de elementos finitos
```

```
! *****
```

```
! LAMELA 01
```

```
! *****
```

```
! Criação do bloco 01 - Lamela 01 (superior) - 110 x 25 x 300 mm ( $50 < y < 75$  mm)
```

```
! *****
```

```
BLOCK,0,110,50,75,0,300,
```

```
! *****
```

```
! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a Lamela 1
```

```
! *****
```

```
TYPE, 1
```

```
MAT, 1
```

```
REAL, 1
```

```
ESYS, 0
```

```
SECTNUM,
```

```
! *****
```

```
! Dividindo a malha da Lamela 1 e transformando em volume
```

```
! *****
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
```

```
FITEM,5,2
```

```
CM, _Y,LINE
```

```
LSEL, , , ,P51X
```

```
CM, _Y1,LINE
```

```
CMSEL,,_Y
```

```
!*
```

```
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
```

```
!*
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
```

```
FITEM,5,3
```

```
CM, _Y,LINE
```

```
LSEL, , , ,P51X
```

```
CM, _Y1,LINE
```

```
CMSEL,,_Y
```

```
!*
```

```
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
```

```
!*
```

```
FLST,5,1,4,ORDE,1
```

```
FITEM,5,11
```

```
CM, _Y,LINE
```

```
LSEL, , , ,P51X
```

```
CM, _Y1,LINE
```

```
CMSEL,,_Y
```

```
!*
```

```
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
```

```
!*
```

```
/UI,MESH,OFF
```

```
CM, _Y,VOLU
```

```

VSEL,, , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 02
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamela 02 - 110 x 25 x 10 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,0,120,
! *****
! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a Lamela 02
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECTNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 2 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,17
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,15
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, 5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,22
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , , ,0
!*
/VIEW,1,, ,1
/ANG,1
/REP,FAST

```

```

/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 03
! *****
! Criação do bloco 03 - Lamela 03 - 110 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,125,245,
! *****
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a Lamela 03
! *****
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 3 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,33
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,30
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,29
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5, , , , ,1
!*

```

```

!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 04
! *****
! Criação do bloco 04 - Lamela 04 - 120 x 25 x 120 mm (25 < y < 50 mm)
! *****
BLOCK,0,110,25,50,250,300,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a Lamela 04
! *****
TYPE, 4
MAT, 4
REAL, 4
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 4 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,46
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,44
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, 5, , , , ,5
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,41
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE

```

```

CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 05 (inferior)
! *****
! Criação do bloco 05 - Lamela 05 - 110 x 25 x 300 mm (0 < y < 25 mm)
! *****
BLOCK,0,110,0,25,0,300,
! *****
! Atribuindo o material 05 ao volume criado para formar a Lamela 05
! *****
TYPE, 5
MAT, 5
REAL, 5
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 5 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,52
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,51
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1

```

```

FITEM,5,57
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,5 , , , , ,0
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! Definir merge no volume para que as Lamelas tenham seus nós unidos
! *****
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , , low
! *****
! Vinculação dos apoios
! *****
! Seleção dos nós das base (z = 0) - Impedimento das translações nos eixos x, y e z
! *****
/SOL
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/ANG,1,-30,ZS,1
/REP,FAST
/ANG,1,-30,ZS,1
/REP,FAST
/ANG,1,-30,ZS,1
/REP,FAST
FLST,2,138,1,ORDE,8
FITEM,2,8420
FITEM,2,8447
FITEM,2,8452
FITEM,2,-8472
FITEM,2,16838
FITEM,2,-16842
FITEM,2,16865
FITEM,2,-16974
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY,UZ, , ,

```

```

! *****
! Seleção dos nós da face frontal (y = 75) - Impedimento das translações nos eixos x e y
! *****
FLST,2,1403,1,ORDE,8
FITEM,2,1
FITEM,2,7
FITEM,2,-28
FITEM,2,162
FITEM,2,167
FITEM,2,-188
FITEM,2,1634
FITEM,2,-2990
!*
/GO
D,P51X,,, ,UX,UY,,,
! *****
! Seleção dos nós do topo da lamela e aplicação do carregamento correspondente na direção z
! *****
! Carregamento no corpo de prova (F = -108854 N/número de nós): Fz = -108854 N/138nós = -788.797 N/nó
! *****
! Pontos de aplicação das cargas: y = 50 mm e z = 75 mm
! *****
! Faixa 1 (195 < z < 205): Fz = - 108854 N/138nós = -788.797 N/nó
! Sinal negativo indica que a carga está aplicada no sentido contrário ao sentido positivo de z
! *****
FLST,2,138,1,ORDE,2
FITEM,2,139
FITEM,2,-276
!*
/GO
F,P51X,FZ,- 788.797
! *****
! Retirar predeterminação de elementos
! *****
Pred,off
! *****
! Acoplamento dos nós onde está sendo aplicada a carga
! *****
FLST,4,138,1,ORDE,2
FITEM,4,139
FITEM,4,-276
CP,162,UZ,P51X
! *****
! Consideração da não linearidade física do material
! *****
! Aplicação dos valores de carga incremental aplicados no modelo até a ruptura
! *****
! Carga de ruptura aplica no ensaio de flexão: F= 108854 N
! Tamanho do passo de carga F1: F/60 (F=1814.23 N)
! Valor mínimo do passo de carga F2: F1/5 (362.85 N)
! Valor máximo do passo de carga F3: F1 (F=1814.23 N)
! *****
/SOLU
DELTIM, 1814.23, 362.85, 1814.23
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
TIME, 108854
ANTYPE,0
NLGEOM,1

```

```
! *****
! Rodar o modelo
! *****
/SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
! *****
! Nó a 1/3 da lamela 5 (externa) é o número 1653
! *****
```

APÊNDICE E – Script de calibração do modelo de cisalhamento inclinado

```

/finish
/clear
! *****
! MODELO 01: Corpo de prova de cisalhamento inclinado E. grandis 11
! *****
! SCRIPT PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRÓPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO DE VIGA COMPLETA COM MODELO ORTOTRÓPICO COM NÃO LINEARIDADE
FÍSICA E GEOMÉTRICA
! Seção transversal: largura = 110 mm, altura = 120 mm e espessura = 75 mm
! Total de três camadas (Espessura de cada uma das camadas = 25 mm)
! Simulação de ensaio estático de corpo de prova com força última aplicada até a convergência
! Direções adotadas para a madeira da camada externa: direção x (tangencial); direção y (longitudinal) e direção
z (radial)
! Direções adotadas para a madeira da camada interna: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z
(longitudinal)
! *****
! Unidades consideradas no modelo
! *****
! Dimensões em (mm)
! Forças aplicadas em (N)
! *****
! Parâmetros auxiliares:
! *****
! Material 01: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 01 (camada superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 02 (camada interna)
! Material 05: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamela 03 (camada inferior)
! *****
! Indicação de diferentes cores para os elementos
! *****
/config,nres,10000
/pnum,mat,1
/number,1
/replot
! *****
! OPÇÕES GERAIS
! *****
allsel,all
/pnum,mat,1
/number,1
/replot
! *****
! Dados de entrada do material para cada uma das lamelas:
! *****
! Lamela 01 (camada superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
/prep7
et,1,solid45
! *****
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45)
! *****
r,1
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 1:
! *****
mptemp,,,,,,,,,

```

```

MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,, 771.44
MPDATA,EY,1,, 9643
MPDATA,EZ,1,, 482.15
MPDATA,PRXY,1,,0.013
MPDATA,PRYZ,1,,0.013
MPDATA,PRXZ,1,, 0.23
MPDATA,GXY,1,, 566.526
MPDATA,GYZ,1,, 602.687
MPDATA,GXZ,1,, 60.2687
! *****
! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 1:
! *****
TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,,0
TBMODIF,1,1, 38.31
TBMODIF,1,2, 38.31
TBMODIF,1,3, 38.31

TBMODIF,2,1, 1.543
TBMODIF,2,2, 15.429
TBMODIF,2,3, 0.9643

TBMODIF,3,1, 38.31
TBMODIF,3,2, 38.31
TBMODIF,3,3, 38.31

TBMODIF,4,1, 1.543
TBMODIF,4,2, 15.429
TBMODIF,4,3, 0.9643

TBMODIF,5,1, 16.450
TBMODIF,5,2, 14.5578
TBMODIF,5,3, 1.45578

TBMODIF,6,1, 176.52
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 0.17652
! *****
! Lamela 2
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,2,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)
! *****
R,2
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 2:
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,, 834.85
MPDATA,EY,2,, 1335.76
MPDATA,EZ,2,, 16697
MPDATA,PRXY,2,, 0.23
MPDATA,PRYZ,2,, 0.013
MPDATA,PRXZ,2,,0.013
MPDATA,GXY,2,, 104.36

```

MPDATA,GYZ,2,, 1043.56

MPDATA,GXZ,2,, 980.95

! *****

! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 2:

! *****

TBDE,ANIS,2

TB,ANIS,2,,,0

TBMODIF,1,1, 7.676

TBMODIF,1,2, 7.983

TBMODIF,1,3, 40.40

TBMODIF,2,1, 1.6697

TBMODIF,2,2, 2.672

TBMODIF,2,3, 16.697

TBMODIF,3,1, 7.676

TBMODIF,3,2, 7.983

TBMODIF,3,3, 40.40

TBMODIF,4,1, 1.6697

TBMODIF,4,2, 2.672

TBMODIF,4,3, 16.697

TBMODIF,5,1, 1.5352

TBMODIF,5,2, 17.348

TBMODIF,5,3, 15.352

TBMODIF,6,1, 0.17652

TBMODIF,6,2, 176.52

TBMODIF,6,3, 176.52

! *****

! Lamela 03 (inferior)

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,3,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45)

! *****

R,3

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira da lamela 3:

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,, 1022.08

MPDATA,EY,3,, 12776

MPDATA,EZ,3,, 638.8

MPDATA,PRXY,3,,0.013

MPDATA,PRYZ,3,, 0.013

MPDATA,PRXZ,3,, 0.23

MPDATA,GXY,3,, 750.59

MPDATA,GYZ,3,, 798.5

MPDATA,GXZ,3,, 79.85

! *****

! Parâmetros plásticos para madeira da lamela 3:

! *****

TBDE,ANIS,3

TB,ANIS,3,,,0

TBMODIF,1,1, 44.36

TBMODIF,1,2, 44.36
TBMODIF,1,3, 44.36

TBMODIF,2,1, 2.044
TBMODIF,2,2, 20.442
TBMODIF,2,3, 1.2776

TBMODIF,3,1, 44.36
TBMODIF,3,2, 44.36
TBMODIF,3,3, 44.36

TBMODIF,4,1, 2.044
TBMODIF,4,2, 20.442
TBMODIF,4,3, 1.2776

TBMODIF,5,1, 19.048
TBMODIF,5,2, 16.8568
TBMODIF,5,3, 1.68568

TBMODIF,6,1,176.52
TBMODIF,6,2, 176.52
TBMODIF,6,3, 0.17652

! *****

! Construção e discretização da malha de elementos finitos

! *****

! LAMELA 01

! *****

! Criação do bloco 01 - Lamela 01 (superior) - 25 x 120 x 110 mm ($0 < x < 25$ mm)

! *****

BLOCK,0,25,0,120,0,110,

! *****

! Criação do prisma de base triangular

! *****

RPR4,3,0,-7.848,28.87,14,110

! *****

! Remoção do prisma de base triangular do bloco 1

! *****

VSBV, 1, 2

! *****

! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a Lamela 1

! *****

TYPE, 1

MAT, 1

REAL, 1

ESYS, 0

SECNUM,

! *****

! Dividindo a malha da Lamela 1 e transformando em volume

! *****

FLST,5,2,4,ORDE,2

FITEM,5,7

FITEM,5,24

CM,_Y,LINE

LSEL,,,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1,,,10,,,1

!*

FLST,5,2,4,ORDE,2

```

FITEM,5,6
FITEM,5,25
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,48, , , ,1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,44, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 02
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamela 02 - 25 x 120 x 110 mm (25 < x < 50 mm)
! *****
BLOCK,25,50,0,120,0,110,
! *****
! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a Lamela 02
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 2 e transformando em volume
! *****
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,9
FITEM,5,14
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,10, , , ,1
!*

```

```

FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,6
FITEM,5,13
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,48, , , ,1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,17
FITEM,5,-18
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,44, , , ,1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! LAMELA 03 (inferior)
! *****
! Criação do bloco 03 - Lamela 03 - 25 x 120 x 110 mm (50 < x < 75 mm)
! *****
BLOCK,50,75,0,120,0,110,
! Criação do prisma de base triangular
! *****
RPR4,3,75,127.848,28.87,194,110
! *****
! Remoção do prisma de base triangular do bloco 3
! *****
VSBV, 2, 4
! *****
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a Lamela 03
! *****
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da Lamela 3 e transformando em volume
! *****
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,28

```

```

FITEM,5,46
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,10, , , ,1
!*
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,13
FITEM,5,32
FITEM,5,48
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,48, , , ,1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,34
FITEM,5,50
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,44, , , ,1
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
! *****
! Definir merge no volume para que as Lamelas tenham seus nós unidos
! *****
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , low
! *****
! Vinculação dos apoios
! *****
! Seleção dos nós da base (z = 0) - Impedimento das translações nos eixos x, y e z
! *****
FLST,2,495,1,ORDE,2

```

```

FITEM,2,1
FITEM,2,-495
!*
/GO
D,P51X,, , , ,UX,UY,UZ, , ,
! *****
! Seleção dos nós do topo da lamela e aplicação do carregamento correspondente na direção y e z
! *****
! Carregamento no corpo de prova ( $F = -53788$  N/número de nós):  $F_z = -53788$  N/495nós
! *****
! Pontos de aplicação das cargas:  $x = 50-75$  mm e  $y = 120$  mm
! *****
! Sinal negativo indica que a carga está aplicada no sentido contrário ao sentido positivo de y e x
! *****
FLST,2,495,1,ORDE,8
FITEM,2,24305
FITEM,2,24806
FITEM,2,25807
FITEM,2,-25849
FITEM,2,48512
FITEM,2,-48521
FITEM,2,48566
FITEM,2,-49005
!*
/GO
F,P51X,FY,-10.866
! *****
! Retirar predeterminação de elementos
! *****
Pred,off
! *****
! Acoplamento dos nós onde está sendo aplicada a carga
! *****
FLST,4,495,1,ORDE,8
FITEM,4,24305
FITEM,4,24806
FITEM,4,25807
FITEM,4,-25849
FITEM,4,48512
FITEM,4,-48521
FITEM,4,48566
FITEM,4,-49005
CP,48512,ALL,P51X
! *****
! Consideração da não linearidade física do material
! *****
! Aplicação dos valores de carga incremental aplicados no modelo até a ruptura
! *****
/SOLU
DELTIM, 89.647, 17.929, 89.647
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
TIME, 5378.8
ANTYPE,0
NLGEOM,1
! *****
! Rodar o modelo
! *****
/SOLU
SOLVE

```

SAVE

FINISH

! *****

! Nós nas metades das lamelas externas são: 49110 e 510

! *****