

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

**Estudo da resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal
(*rolling shear*) em elementos de Madeira Lamelada Colada
Cruzada**

Tayla Castilho Criado

Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TAYLA CASTILHO CRIADO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO
TRANSVERSAL (*ROLLING SHEAR*) EM ELEMENTOS DE MADEIRA
LAMELADA COLADA CRUZADA**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

SÃO CARLOS

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C928e Castilho Criado, Tayla
 Estudo da resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal em elementos de Madeira Lamelada Colada Cruzada / Tayla Castilho Criado; orientador Prof. Dr. Antonio Alves Dias. São Carlos, 2023.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

 1. madeira industrializada. 2. madeiras nativas brasileiras. 3. método dos elementos finitos. 4. resistência e elasticidade transversal ao rolling shear. 5. método Gama. 6. método de analogia de cisalhamento. 7. modos de ruptura. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **TAYLA CASTILHO CRIADO**.

Título da tese: "Estudo da resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal (rolling shear) em elementos de Madeira Lamelada Colada Cruzada.".

Data da defesa: 22/09/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado Antonio Alves Dias
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Associado Julio Cesar Molina

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Prof. Dr. Eduardo Chahud

(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

APROVADA

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Prof Associado **Ricardo Carrazedo**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

Dedico esta tese de doutorado a minha avó, Iraídes Pires de Castilho (*in memoriam*), e aos meus pais,
Rosely Aparecida Castilho Criado e Valdomiro Criado Perenha.

AGRADECIMENTOS

Eu sempre acreditei que nesta vida, nada é possível sem ajuda, principalmente um trabalho de doutorado. Dessa forma, venho aqui agradecer a todas as pessoas e instituições que me apoiaram durante a realização deste trabalho.

Inicialmente, gostaria de agradecer à toda equipe do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), especialmente aos professores, Prof. Dr. Antonio Alves Dias e Prof. Dr. Júlio César Molina, por todas as orientações e opiniões dadas durante o desenvolvimento desta pesquisa. Gostaria de agradecer também aos técnicos Jaime Galindo, Silvio Ferro e Paulo Aguiar por todo o empenho e paciência durante a realização dos ensaios experimentais, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), por todo apoio e incentivo para o desenvolvimento da minha vida acadêmica, principalmente ao Prof. Dr. José Antonio Matthiesen, o qual me incentivou bastante para terminar o doutorado e me ensinou a visualizar a linha de chegada e não as dificuldades a serem enfrentadas.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Valdomiro e Rosely, por todo apoio, proteção, incentivo e amor empregados a mim, desde os meus primeiros segundos de vida. Muito obrigada por serem meu porto seguro e por me mostrarem que independentemente da situação, que eu sempre posso voltar para casa. Quero agradecer também as minhas irmãs Tatiany e Taísa por acreditarem em mim e no meu potencial, até mesmo nos momentos que nem eu mesma acreditei.

Não posso me esquecer das minhas amigas, as quais caminham comigo há muitos anos e que irão caminhar ainda por muito tempo ao meu lado. À minha amiga de uma vida, Aline Cardoso, por sempre estar comigo e em todos os momentos, sejam eles fáceis ou não. À Ana Luisa, por ser o amor da tia e apesar de ter tão poucos anos de vida, conseguir entender que a minha ausência em alguns momentos foi necessária. Às minhas amigas de faculdade, Monique Salim e Ana Carolina Onuma, por sempre confiarem sempre em meu potencial, principalmente durante o desenvolvimento do meu doutorado.

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

RESUMO

CRIADO, T. C. **Estudo da resistência e da rigidez ao cisalhamento transversal (*rolling shear*) em elementos Madeira Lamelada Colada Cruzada**. 2023. 301 p. Tese (Doutorado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Nas últimas décadas, os produtos de madeira industrializada vêm ganhando espaço no mercado da construção civil, dentre os quais estão os painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Esses painéis são constituídos de camadas intercruzadas, o que lhes confere boa resistência estrutural e estabilidade dimensional aliados a diversas vantagens quando comparado a estruturas convencionais (concreto, aço e alvenaria). Geralmente, os painéis de MLCC atingem o seu estado limite último devido ao *rolling shear*, que ocorre nas lamelas das camadas transversais. Este trabalho teve como objetivo estudar a resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) de painéis MLCC, confeccionados de espécies de madeira nativas brasileiras, a partir de três diferentes abordagens: experimental, numérica e analítica. Os ensaios experimentais foram realizados em corpos de prova de MLCC de três camadas, fabricados com madeira de Marupá (“*Simarouba amara*”) e Piquiá (“*Caryocar villosum*”), tendo espessura das lamelas de 25 mm e 38 mm. A modelagem numérica foi feita por Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o *software* comercial ABAQUS. A análise analítica foi realizada pela avaliação das respostas dos métodos de Analogia do Cisalhamento e Gama e, a partir da definição de uma expressão analítica para a avaliação da rigidez ao cisalhamento dos elementos. Foi possível concluir que a resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram superiores aos valores adotados globalmente pelos manuais internacionais para madeira conífera, sendo que o método de ensaio mais adequado para a avaliação do efeito *rolling shear* (f_{vt}) foi o de cisalhamento inclinado em corpo de prova. Além disso, constatou-se neste trabalho que o ensaio de flexão não foi adequado para determinar o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Os modelos numéricos desenvolvidos foram capazes de prever o comportamento global a partir da curva tensão x deformação e a localização dos pontos de maior concentração de tensões nos elementos avaliados. A análise analítica indicou que o Método Gama foi mais adequado para o estudo de painéis MLCC na flexão.

Palavras-chave: madeira industrializada, painel de MLCC, madeiras nativas brasileiras, método dos elementos finitos, resistência e elasticidade transversal ao *rolling shear*, Método Gama, Método de Analogia de Cisalhamento, modos de ruptura.

ABSTRACT

CRIADO, T.C. **Study of rolling shear strength and stiffness in cross laminated timber elements.** 2023. 301 p. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

In the last decades, engineered timber products have been gaining popularity in the civil construction market, including cross-laminated timber panels (CLT). These panels are made up layers that are oriented orthogonally to each other, which results in good structural resistance and dimensional stability, combined with several advantages when compared to conventional structures (concrete, steel and masonry). Generally, CLT panels reach their ultimate limit state due to the rolling shear that occurs in the transverse layers. This work aimed to study the strength and stiffness relative to *rolling shear* of composite of MLCC panels made of native Brazilian wood species from three different approaches: experimental, numerical and analytical. The experimental tests considered shear and bending tests on three-layered CLT specimens, which were manufactured with wood of Marupá (“*Simarouba amara*”) and Piquiá (“*Caryocar villosum*”) and with layer thickness of 25 mm and 38 mm. Numerical modelling was carried out using the finite element method, via the commercial software ABAQUS. Analytical approach was performed by shear analogy and Gamma method and by the definition of an analytical expression for the evaluation of the shear stress of the elements. It was possible to conclude that the wood resistance and rigidity to *rolling shear* of the evaluated CLT panels were superior to the values globally adopted by manual for softwoods, and the most adequate test method for the evaluation of rolling shear effect was the inclined shear test, which was closer to the values obtained for the same property in bending tests. In addition, it was found in this study that the bending test was not adequate to determine the rolling shear modulus. The numerical models developed were able to predict the global behaviour through the stress x strain curve and the local one indicating the points of highest stress concentration in the evaluated elements. The analytical approach indicated that the Gamma method was the most suitable method for the study of CLT panels in bending.

Keywords: engineered timber, CLT panel, Brazilian native timbers, finite element method, rolling shear strength and modulus, Gamma method, Shear analogy, failure mode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Distribuição das áreas de florestas nativas	39
Figura 2-Composição das florestas plantadas	40
Figura 3-Coloração do Marupá.....	41
Figura 4-Distribuição Geográfica do Marupá	42
Figura 5-Distribuição Geográfica do Piquiá.....	43
Figura 6-Coloração da madeira Piquiá	43
Figura 7- Pannel composto de madeira com patente no início dos anos 20.....	45
Figura 8-Evolução do número de edificações em MLCC no Brasil ao longo dos anos.....	47
Figura 9-Disposição de camadas simples em painéis de MLCC	48
Figura 10-Disposição de camadas duplas em painéis de MLCC	48
Figura 11-Disposição de camadas transversais a 45° em relação às camadas adjacentes.....	49
Figura 12-Seções transversais de painéis de MLCC	50
Figura 13-Aplicações da MLCC (a) Pannel de Parede e (b) Pannel de Piso	51
Figura 14-Escadas fabricadas com MLCC.....	51
Figura 15-Processo de carbonização da madeira.....	53
Figura 16-Processo de fabricação do MLCC	56
Figura 17-Emendas por <i>finger-joint</i> (a) ao longo da largura e (b) ao longo da espessura das peças unidas.....	57
Figura 18-Direções principais da madeira.....	59
Figura 19- <i>Rolling shear</i> (a) Força na direção tangencial (b) Força cortante na direção radial	59
Figura 20-Modo de ruptura típica por <i>rolling shear</i> (a) Três camadas (b) Cinco camadas.....	60
Figura 21-Relação entre módulo de elasticidade transversal da madeira (G) e o módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}).....	61
Figura 22-Contribuição das parcelas devido à flexão e ao cisalhamento no deslocamento total	63
Figura 23-Esquema ilustrativo para o cálculo das dimensões dos corpos de prova conforme Kumar <i>et al.</i> (2022)	67
Figura 24-Método de ensaio conforme BIS EN 408:2010 e ISO 1390:2013.....	68
Figura 25-Posicionamento das fibras em ensaios de cisalhamento modificado.....	68
Figura 26-Método de Ensaio conforme ASTM D 2718:2000	70
Figura 27-Método de ensaio adotado por Zhou <i>et al.</i> (2014a).....	71

Figura 28-Método de ensaio desenvolvido por Aicher, Christian e Hirsch (2016) em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real.....	72
Figura 29-Método de ensaio realizado por Bahmanzad <i>et al.</i> (2020) em (a) Ensaio real e (b) Esquema do ensaio.....	73
Figura 30-Método de ensaio desenvolvido por Wang <i>et al.</i> (2018a) em (a) Esquema do ensaio e (b) Ensaio real	74
Figura 31-Método de ensaio desenvolvido por Ukyo, Shindo e Miyatake (2019) (a) Esquema de Ensaio (b) Ensaio Real	76
Figura 32-Método de ensaio usado por Wu, Zhong e Ren (2021).....	77
Figura 33-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por WANG <i>et al.</i> (2021) em (a) Esquema do Ensaio e (b) Ensaio Real	78
Figura 34-Ensaio de flexão de três pontos realizados por Wang <i>et al.</i> (2021) em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real	79
Figura 35-Ensaio de cisalhamento conforme ABNT NBR 7190-7:2022.....	81
Figura 36-Métodos de ensaio desenvolvidos por Aicher, Hirsch e Christian (2016a) (a) Proposto pela BIS EN 16351:2015 (B) Ensaio tipo A (c) Ensaio tipo B	83
Figura 37-Dimensões dos corpos de prova em mm e método de ensaio adotado por Li <i>et al.</i> (2021).....	84
Figura 38-Ensaio de flexão adotado por Li <i>et al.</i> (2021).....	85
Figura 39-Método de ensaio usado por Anwar-Us-Saadat <i>et al.</i> (2022)	86
Figura 40-Ensaio de flexão adotado por Anwar-Us-Saadat <i>et al.</i> (2022)	86
Figura 41-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por Li (2017)	89
Figura 42-Ensaio de flexão adotado por Li (2017).....	89
Figura 43-Corpos de prova utilizados por Wang <i>et al.</i> (2017) sendo (a) Homogêneos e (b) Híbridos.....	90
Figura 44-Método adotado para o ensaio de cisalhamento por Wang <i>et al.</i> (2017).....	91
Figura 45-Ensaio de cisalhamento utilizado por Wang <i>et al.</i> (2018a)	92
Figura 46-Ensaio de cisalhamento plano realizado por Li, Dong e Lim (2019) em (a) Lamela de 25 mm em (b) Lamela de 35 mm e (c) Lamela de 45 mm.....	94
Figura 47-Ensaio de flexão adotado por Li, Dong e Lim (2019) em (a) Lamela de 25 mm em (b) Lamela de 35 mm e (c) Lamela de 45 mm.....	94
Figura 48-Ensaio de cisalhamento realizado por Ruan, Xiong E Chen (2019)	96
Figura 49-Ensaio de flexão feito por Ruan, Xiong E Chen (2019).....	97

Figura 50-Ensaio de cisalhamento realizado por Gui <i>et al.</i> (2020) em (a) Esquema de ensaio e (b) Ensaio Real	98
Figura 51-Ensaio de cisalhamento utilizado por Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)	100
Figura 52-Ensaio de cisalhamento realizado por Xu <i>et al.</i> (2021) (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real.....	101
Figura 53-Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento adotadas por Dong <i>et al.</i> (2021)	102
Figura 54-Ensaio de cisalhamento realizado por Zhou <i>et al.</i> (2022).....	103
Figura 55-Ensaio de flexão adotado por Zhou <i>et al.</i> (2022).....	103
Figura 56-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por Sun, He e Li (2022).....	105
Figura 57-Ensaio de cisalhamento elaborado por Nero, Christopher, Ngo (2022) (a) Com peças de madeira (b) Com chapas de aço (c) Medição dos deslocamentos por laser	106
Figura 58-Ensaio de flexão realizado por Nero, Christopher, Ngo (2022)	107
Figura 59-Método adotado para o ensaio de cisalhamento plano em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real	109
Figura 60-Método de Ensaio proposto por BIS EN 16351:2021 e ABNT NBR 7190-7:2022	111
Figura 61-Método de ensaio proposto para verificar o comportamento <i>rolling shear</i>	113
Figura 62-Método de ensaio proposto para o ensaio de flexão	114
Figura 63-Método de ensaio utilizado por Franke (2016).....	115
Figura 64-Método de ensaio adotado por Gu, Pang e Stoner (2016)	116
Figura 65-Ensaio de flexão realizado por Sikora, Mc Polin e Harte (2016)	117
Figura 66-Modo de ruptura dos painéis de MLCC (a)Cinco camadas (b) Três Camadas	118
Figura 67-Modos de ruptura obtidos por Gong <i>et al.</i> (2019) (a)(c)Cruzamento das fibras em 75°(b)Cruzamento das fibras em 45° (d) Cruzamento das fibras entre 5° e 45°	121
Figura 68-Ensaio de flexão adotados por Yang <i>et al.</i> (2019) (a) Quatro pontos-Método A (b) Três pontos-Método B	122
Figura 69-Modos de ruptura obtidos na pesquisa de Mohd Yusof <i>et al.</i> (2019)	123
Figura 70-Método de ensaio adotado por Kaboli <i>et al.</i> (2020)	124
Figura 71-Método de ensaio adotado por Navaratnam <i>et al.</i> (2020).....	125
Figura 72-Método de Ensaio utilizado por Corpataux, Okuda e Kua (2020)	126
Figura 73-Método de ensaio utilizado por Lim, Tripathi e Li (2020)	127
Figura 74-Método de ensaio realizado por Gardner <i>et al.</i> (2020)	129

Figura 75-Método de Ensaio adotado por He <i>et al.</i> (2020) (a)Esquema de Ensaio (b) Ensaio real	130
Figura 76-Tipos de ensaios de flexão realizados por Li <i>et al.</i> (2020b).....	131
Figura 77-Método de Ensaio usado por Hematabadi <i>et al.</i> (2021).....	133
Figura 78-Amostras dispostas horizontalmente.....	134
Figura 79- Amostras dispostas verticalmente.....	134
Figura 80-Método de Ensaio usado por (a) Ensaio Real (b) Esquema de Ensaio.....	136
Figura 81-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões de cisalhamento e (b) Tensões normais do ensaio de flexão obtidas por Li, Dong e Lim (2019).....	140
Figura 82-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões de cisalhamento e (b) Tensões normais do ensaio de cisalhamento obtidas por Li, Dong e Lim (2019).....	141
Figura 83-Tensões de <i>Von Mises</i> em MPa modelo numérico desenvolvido por Navaratnam <i>et al.</i> (2020).....	142
Figura 84-Distribuição das distorções (em mm/mm) por cisalhamento para os painéis de três camadas obtida por Li <i>et al.</i> (2020a).....	143
Figura 85-Modelo numérico desenvolvido por Li <i>et al.</i> (2020b).....	144
Figura 86-Distribuição de tensões em MPa (a) Tensões normais (b) Tensões de cisalhamento obtida por Bahmanzad <i>et al.</i> (2020).....	146
Figura 87-Modelagem dos nós.....	147
Figura 88-Distribuição das tensões de cisalhamento (a) Com nós e (b) Sem nós obtidas por Shahhosseini, Crovella e Smith (2021).....	148
Figura 89-Condições de contorno adotadas por Silva <i>et al.</i> (2023) (a) Ensaio de flexão (b) Ensaio de cisalhamento vertical (c) Ensaio de cisalhamento inclinado.....	150
Figura 90-Exemplo de seção composta.....	152
Figura 91-Seções transversais reais e equivalentes para painéis de MLCC de três e cinco camadas.....	154
Figura 92-Hipóteses Básicas adotadas pela Analogia de Cisalhamento.....	155
Figura 93-Representação das tensões normais e de cisalhamento de acordo com o coeficiente Gama.....	159
Figura 94-Indicação das distâncias de interesse na seção transversal do painel.....	161
Figura 95-Disposição das fibras e dimensões dos corpos de prova.....	170
Figura 96-Nomenclatura dos corpos de prova de caracterização.....	170
Figura 97-Corpo de prova formado apenas com camada transversal.....	173
Figura 98-Exemplo ilustrativo do método de ensaio adotado como referência.....	173

Figura 99-Método adotado para o ensaio em corpos de prova formados apenas por camada transversal.....	174
Figura 100-Peças lineares de madeira produzidas.....	175
Figura 101-Corpo de prova com camada central composta por múltiplas lamelas usados na etapa exploratória (a) Ensaio de cisalhamento reto (b) Ensaio de cisalhamento inclinado....	176
Figura 102-Corpos de prova na fase definitiva (sem chanfro) em (a) Espessura de 75 mm (b) Espessura de 114 mm	177
Figura 103-Corpos de prova na fase definitiva (com chanfro) em (a) Espessura de 75 mm e (b) Espessura de 114 mm	178
Figura 104-Prensagem das peças lineares de madeira.....	179
Figura 105-Aferição da inclinação e alinhamento do corpo de prova.....	180
Figura 106-Locação dos dispositivos de medição de deslocamento	181
Figura 107-Ensaio de cisalhamento inclinado usado na pesquisa.....	182
Figura 108-Diagrama de caixa	183
Figura 109-Dimensões dos painéis de MLCC em cm.....	184
Figura 110-Prensagem dos painéis de MLCC em prensa manual com pressão aferida por torquímetro	185
Figura 111-Dispositivo indicado para o ensaio de flexão.....	186
Figura 112-Posicionamento dos LVDTs na parte central do elemento a ser ensaiado	186
Figura 113-Posicionamento dos LVDTs nos apoios.....	187
Figura 114-Parâmetros de cálculo (a) Seção Longitudinal (b)Seção Transversal e (c) Distribuição do Momento Estático	189
Figura 115-Ensaio para determinação do coeficiente de Poisson no plano radial-tangencial (RT)	194
Figura 116-Condições de contorno para o ensaio de cisalhamento reto	197
Figura 117-Condições de contorno adotada no modelo do ensaio de cisalhamento inclinado	198
Figura 118-Condições de contorno para o ensaio de flexão.....	199
Figura 119-Nomenclatura adotada para os ensaios de cisalhamento	204
Figura 120-Curvas Experimentais-Marupá-Etapa Exploratória-Cisalhamento em lamelas, U=12%.....	206
Figura 121-Modos de ruptura (a) <i>Rolling shear</i> e em (b) Separação das camadas.....	207
Figura 122-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa exploratória-Corpo de prova vertical, U=12%.....	209

Figura 123-Modos de ruptura (Marupá)-Etapa Exploratória-Corpo de prova vertical.....	210
Figura 124-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa definitiva-Corpo de prova vertical, U=12%	212
Figura 125-Modo de ruptura (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto em (a) Ruptura por separação das camadas e em (b) Ruptura por <i>rolling shear</i>	213
Figura 126-Curvas de força x deslocamento relativo (Piquiá)-Etapa definitiva-Corpo de prova vertical, U=12%	214
Figura 127-Modos de ruptura t=25 mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto	215
Figura 128-Modos de ruptura t=38 mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto	216
Figura 129-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa exploratória-Corpo de prova inclinado, U=12%	217
Figura 130-Modos de Ruptura (Marupá)-Etapa exploratória-MLCC inclinado em (a) Ruptura por separação das camadas e (b) Ruptura por <i>rolling shear</i>	218
Figura 131-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, U=12%	219
Figura 132-Modos de ruptura t=25 mm (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado.....	220
Figura 133-Modos de ruptura t=38 mm (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado.....	221
Figura 134-Curvas de força x deslocamento relativo (Piquiá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, U=12%	222
Figura 135-Modos de ruptura t=25 mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado.....	223
Figura 136-Modos de ruptura t=38 mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado.....	224
Figura 137-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 75 mm de espessura	225
Figura 138-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 114 mm de espessura	226
Figura 139-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa obtida no ensaio de cisalhamento inclinado.....	227

Figura 140-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa obtida no ensaio de cisalhamento inclinado	227
Figura 141-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 75 mm de espessura.....	228
Figura 142-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 114 mm de espessura	229
Figura 143-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa obtido no ensaio de cisalhamento reto.....	230
Figura 144-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa obtido no ensaio de cisalhamento inclinado	231
Figura 145-Nomenclatura adotada para os ensaios de flexão	232
Figura 146-Curvas experimentais de força x deslocamento dos ensaios de flexão (Marupá), U=12%.....	234
Figura 147-Curvas experimentais de força x deslocamento dos ensaios de flexão (Piquiá), U=12%.....	234
Figura 148-Vista frontal da ruptura da placa de MLCC de Marupá (com 345 mm de largura)	235
Figura 149-Modo de ruptura da viga de MLCC de Marupá (com 115 mm de largura).....	236
Figura 150-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Marupá)	239
Figura 151-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Piquiá)	240
Figura 152-Curvas experimentais x numéricas calibradas para os corpos de prova de Marupá do ensaio de cisalhamento reto.....	242
Figura 153-Curvas experimentais x numéricas calibradas para os corpos de prova de Piquiá do ensaio de cisalhamento reto.....	242
Figura 154-Distribuição das tensões em MPa. (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	244
Figura 155-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	244
Figura 156-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-P-1-RETO-4.....	245
Figura 157-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-P-1-RETO-5.....	246

Figura 158-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	247
Figura 159-Diagrama de tensões em MPa em (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	248
Figura 160-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-P-1-RETO-4	249
Figura 161-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-P-1-RETO-5	250
Figura 162-Curvas experimentais x numéricas para os corpos de prova de Marupá do ensaio de cisalhamento inclinado.....	251
Figura 163-Curvas experimentais x numéricas para os corpos de prova de Piquiá do ensaio de cisalhamento inclinado.....	252
Figura 164-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-M-4-INCL-3	253
Figura 165-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-M-4-INCL-5	254
Figura 166-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-P-1-INCL-3	255
Figura 167-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-P-1-INCL-5	255
Figura 168-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-M-4-INCL-3	256
Figura 169-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-M-4-INCL-5	256
Figura 170-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-P-1-INCL-3	257
Figura 171-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-P-1-INCL-6	257
Figura 172-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	260
Figura 173-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	261
Figura 174-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-P-2-330-2.....	261

Figura 175-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-P-2-110-3	262
Figura 176-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	263
Figura 177-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	264
Figura 178-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-P-2-330-2.....	266
Figura 179-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-P-2-110-3	267
Figura 180-Comparativo entre rigidezes a flexão em N.mm ²	271
Figura 181-Comparativo entre rigidezes ao cisalhamento em N	272

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Propriedades Mecânicas para o Marupá e Piquiá.....	44
Tabela 2-Propriedades elásticas para madeira da espécie “ <i>Pseudotsuga menziesii</i> ”.....	138
Tabela 3-Propriedades elásticas adotadas para madeira da espécie " <i>Pinus Radiata</i> " adotadas por Navaratnam <i>et al.</i> (2020).....	142
Tabela 4-Propriedades elásticas adotadas para madeira da espécie " <i>Pinus Radiata</i> " adotadas por Li <i>et al.</i> (2020b).....	145
Tabela 5-Fatores de correção de cisalhamento	160
Tabela 6-Quantidade de corpos de prova	171
Tabela 7-Propriedades elásticas utilizadas no modelo numérico dos ensaios de cisalhamento reto.....	195
Tabela 8-Propriedades elásticas utilizadas no modelo numérico dos ensaios de cisalhamento inclinado em corpos de prova com camada transversal formada por múltiplas lamelas.....	195
Tabela 9-Lamelas das camadas dos corpos de prova	196
Tabela 10-Propriedades elásticas em MPa utilizadas no modelo numérico dos ensaios de flexão	197
Tabela 11-Valores médios das propriedades estudadas, U=12%.....	202
Tabela 12-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa (Marupá)-Etapa exploratória-Cisalhamento em lamelas, U=12%	204
Tabela 13-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa (Marupá)-Etapa exploratória-Corpo de prova reto U=12%	208
Tabela 14-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa (Marupá)-Etapa definitiva-Corpo de prova reto, U=12%	210
Tabela 15-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa (Piquiá)-Etapa definitiva-Corpo de prova reto, U=12%.....	213
Tabela 16-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> (G_{vt}) obtidos pelo ensaio com MLCC inclinado em MPa (Exploratória), U=12%	216
Tabela 17-Propriedades <i>rolling shear</i> em MPa (Marupá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, U=12%.....	218
Tabela 18-Resistência e módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> em MPa (Piquiá)-MLCC inclinado, U=12%	221

Tabela 19-Resistência ao <i>rolling shear</i> dos corpos de prova de MLCC em MPa (Marupá), U=12%	232
Tabela 20-Resistência ao <i>rolling shear</i> (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Piquiá), U=12%	233
Tabela 21-Rigidezes líquidas aparentes e locais em N.mm ² e rigidez ao cisalhamento em N dos painéis de MLCC estudados	236
Tabela 22-Módulos de elasticidade transversal da madeira (G) e <i>rolling shear</i> (G_{vt}) em MPa, U=12%	238
Tabela 23-Módulo de elasticidade transversal de entrada em MPa no plano radial tangencial usados na simulação do ensaio de cisalhamento reto	241
Tabela 24-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> , em MPa, experimental x numérico obtidos do modelo numérico do ensaio de cisalhamento reto, U=12%	243
Tabela 25-Comparativo entre os diagramas de tensões normais, <i>rolling shear</i> e máximas em MPa para os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento reto.....	250
Tabela 26-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> , em MPa, experimental x numérico obtidos do modelo numérico do ensaio de cisalhamento inclinado.....	252
Tabela 27-Comparativo entre os diagramas de tensões normais, <i>rolling shear</i> e máximas em MPa para os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento inclinado	258
Tabela 28-Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> em MPa usados na simulação do ensaio de flexão.....	259
Tabela 29-Resistência ao <i>rolling shear</i> em MPa (f_{vt}) experimental x numérica obtidas nos ensaios de flexão	268
Tabela 30-Rigidezes analíticas à flexão em N.mm ² calculadas por Analogia do Cisalhamento	269
Tabela 31-Rigidezes analíticas à flexão em N.mm ² calculadas pelo Método Gama	270
Tabela 32-Rigidezes ao cisalhamento em N	270

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$(EI)_{EF}$	Rigidez efetiva à flexão
$(EI)_{EF}$	Rigidez Efetiva à flexão
$(EI)_{MLCC,ap,liq}$	rigidez efetiva aparente à flexão do MLCC
$(EI)_{MLCC,local,liq}$	rigidez efetiva à flexão do MLCC
$(EQ)_{EF}$	Momento estático efetivo
$(ES)_{MLCC,vt, liq}$	Momento estático levando em conta o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras das camadas longitudinais
$(GA)_{EF}$	Rigidez efetiva ao cisalhamento
$(GA)_{MLCC}$	Rigidez ao cisalhamento do painel de MLCC
$(EI)_{MLCC,total,liq}$	Momento de inércia levando em consideração o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras das camadas longitudinais
ρ_{ap}	Densidade Aparente
a	Distância entre as camadas externas do painel
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	<i>Acoustic emission</i> Emissão Acústica
A_i	Área da camada i
APA	<i>The Engineered Wood Association</i>
AS/NZS	<i>Australian/New Zealand Standard</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
b	Largura do corpo de Prova
b	Largura do corpo de prova
b_{eq}	Largura Equivalente
b_i	Largura da camada i
BIS	<i>British Standards Institution</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
CG	Centro Geométrico
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CW	<i>Compressed Wood</i> Aglomerado de Madeira

DIC	<i>Digital Image Correlation</i> (Correlação de imagens digitais)
E	Módulo de Elasticidade
E_0	Módulo de Elasticidade Longitudinal Paralelo na Flexão Módulo de Elasticidade Longitudinal da camada longitudinal
$E_{0,med}$	Módulo de Elasticidade Longitudinal Paralelo médio na Flexão
E_1	Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção do eixo local um (Longitudinal)
E_2	Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção do eixo local dois (Longitudinal)
E_3	Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção do eixo local três (Longitudinal)
E_{90}	Módulo de Elasticidade Longitudinal Perpendicular
E_{c0}	Módulo de Elasticidade Longitudinal na Compressão Paralela
$E_{c90,med}$	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção perpendicular às fibras da madeira
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
E_i	Módulo de Elasticidade Longitudinal da camada i
E_L	Módulo de Elasticidade Paralelo na direção longitudinal
E_m	Módulo de Elasticidade calculado na área livre de cisalhamento
$E_{m,ap}$	Módulo de elasticidade aparente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EN	<i>European Standard</i>
EPI	Emulsão de isocianato de polímero
E_R	Módulo de elasticidade paralelo na direção radial
E_T	Módulo de elasticidade paralelo na direção tangencial
F_1	Força correspondente a 10% da força última
F_2	Força correspondente a 40% da força última
f_{c0}	Resistência à compressão paralela
$f_{c0,med}$	Resistência média à compressão paralela
f_{c90}	Resistência à compressão perpendicular
f_m	Resistência à flexão
f_{t90}	Resistência à tração perpendicular

$f_{t90,med}$	Resistência média à tração perpendicular
F_u	Força última
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo
$f_{v0,med}$	Resistência média ao cisalhamento paralelo
f_{vt}	Resistência ao cisalhamento transversal <i>rolling shear</i>
$f_{vt,med}$	Resistência média ao cisalhamento transversal <i>rolling shear</i>
G	Módulo de elasticidade transversal da madeira
G_0	Módulo de elasticidade transversal da camada longitudinal
G_{12}	Módulo de elasticidade transversal no plano definido pelos eixos locais 1-2 (longitudinal-radial)
G_{13}	Módulo de elasticidade transversal no plano definido pelos eixos locais 1-3 (longitudinal-tangencial)
G_{23}	Módulo de elasticidade transversal no plano definido pelos eixos locais 2-3 (radial-tangencial)
G_i	Módulo de elasticidade transversal da camada i
GLB	<i>Glued-laminated bamboo</i> Bambu lamelado colado
G_{LR}	Módulo de elasticidade transversal no plano longitudinal-radial
G_{LT}	Módulo de elasticidade transversal no plano longitudinal-tangencial
G_{MLCC}	Módulo de elasticidade transversal de painéis de MLCC
G_{RT}	Módulo de elasticidade transversal no plano radial-tangencial
G_{vt}	Módulo de elasticidade transversal <i>rolling shear</i> Módulo de Elasticidade das camadas transversais
h	Espessura do painel de MLCC
I_i	Momento de Inércia referente a área da camada i
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
FOA	<i>Food and Agriculture Organization of The United Nations</i>
SBF	Serviço Florestal Brasileiro
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
I_z	Momento de inércia ou momento de segunda ordem em relação ao eixo z
k_z	Fator de Correção de cisalhamento
L	Direção Longitudinal
l	Vão entre apoios

L	Direção Longitudinal e Comprimento do corpo de Prova
l_1	Distância entre os pontos de medição dos deslocamentos locais
l_2	Distância entre o ponto de aplicação da força e o apoio
LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
L_{EF}	Vão Efetivo entre os pontos nulos do diagrama de momento fletor
LSL	<i>Laminated strand lumber</i> Painéis de lascas laminado
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i> (Transdutor de deslocamento variável linear)
LVL	<i>Laminated veneer lumber</i> Painéis de lâminas paralelas
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
$M_{s,z}$	Momento estático ou momento de primeira ordem em relação ao eixo Z
MUF	Melanina-Formaldeído
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strand Board</i> Painéis de madeira de lascas orientadas
p	Projeção
P/ Δ	Inclinação da curva de força x deslocamento relativo
PRF	Fenol-resorcinol formaldeído
PSL	<i>Parallel Strand Lumber (PSL)</i> madeira de lascas paralelas
PUR	Poliuretano
q	Carga Uniformemente Distribuída
R	Direção Radial
RP	<i>Reference Point</i> Ponto de referência
S_{23}	Tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial
S_{33}	Tensões normais no plano radial-tangencial
SET	Departamento de Estruturas da EESC
$S_{MÁX}$	Tensão máxima absoluta
SPF	<i>Spruce-Pine-Fir</i>

T	Direção Tangencial
t_0	Espessura da camada longitudinal ou Espessura da chapa de transferência
t_{90}	Espessura da camada transversal
t_{cam}	Espessura das camadas iguais do painel de MLCC
t_i	Espessura da camada i
U	Umidade
u	Deslocamento
USP	Universidade de São Paulo
u_x	Deslocamento da direção do eixo X
u_y	Deslocamento da direção do eixo Y
u_z	Deslocamento da direção do eixo Z
V	Força Cortante
w	Deslocamento Vertical
z_i	Distância entre o centro geométrico de cada camada i e o centro geométrico do painel
γ	Fator Gama
Δ	Deslocamento relativo
$\delta_{global,1}$	Deslocamento vertical global correspondente a F_1
$\delta_{global,2}$	Deslocamento vertical global correspondente a F_2
$\delta_{local,1}$	Deslocamento vertical local correspondente a F_1
$\delta_{local,2}$	Deslocamento vertical local correspondente a F_2
Θ	Inclinação do corpo de prova
κ	Fator de cisalhamento
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano definido pelos eixos locais 1-2 (longitudinal-radial)
ν_{13}	Coefficiente de Poisson no plano definido pelos eixos locais 1-3 (longitudinal-tangencial)
ν_{23}	Coefficiente de Poisson no plano definido pelos eixos locais 2-3 (radial-tangencial)
ν_{LR}	Coefficiente de Poisson no plano longitudinal-radial
ν_{LT}	Coefficiente de Poisson no plano longitudinal-tangencial
ν_{RT}	Coefficiente de Poisson no plano radial-tangencial
τ	Tensão de Cisalhamento

τ_{MLCC}

Tensões máximas de cisalhamento no painel de MLCC

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	OBJETIVOS	35
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	35
1.3	COMPOSIÇÃO DA TESE	36
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	MADEIRAS NATIVAS	39
2.2	BREVE HISTÓRICO SOBRE MLCC	44
2.3	MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)	47
2.3.1	Vantagens da MLCC.....	52
2.4	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA MLCC.....	55
2.5	CISALHAMENTO TRANSVERSAL (<i>ROLLING SHEAR</i>)	58
2.6	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ <i>ROLLING SHEAR</i>	65
2.6.1	Caracterização mecânica de corpos de prova formados apenas por camadas transversais.....	66
2.6.2	Caracterização mecânica de corpos de prova de MLCC	80
2.6.2.1	Ensaio de cisalhamento	80
2.6.2.2	Ensaio de Flexão	110
2.7	MODELAGEM NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE MLCC	138
2.8	MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO PARA MLCC	151
2.8.1	Teoria de Vigas Compostas.....	153
2.8.2	Analogia de Cisalhamento	155
2.8.3	Método Gama	157
2.8.4	Teoria de Vigas de <i>Timoshenko</i>	159
2.8.5	Método K	160
2.9	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	166
3	MATERIAIS E MÉTODOS	169
3.1	CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA.....	169
3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO.....	171
3.2.1	Corpos de prova formados apenas por camada transversal	172
3.2.2	Corpos de prova de MLCC.....	175

3.3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FLEXÃO.....	183
3.3.1	Dedução de equação para painéis de MLCC com três camadas	188
3.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	193
3.5	VERIFICAÇÃO ANALÍTICA DOS MODELOS DE CÁLCULO	199
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	201
4.1	CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA	201
4.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO	203
4.2.1	Corpos de prova composto apenas por camada transversal	203
4.2.2	Corpos de prova de MLCC	208
4.3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FLEXÃO.....	232
4.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS	241
4.4.1	Ensaio de cisalhamento.....	241
4.4.2	Ensaio de flexão.....	259
4.5	VERIFICAÇÃO ANALÍTICA DOS MODELOS DE CÁLCULO	269
5	CONCLUSÕES.....	273
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	279

1 INTRODUÇÃO

O painel de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), conforme definido por Zhang *et al.* (2023), é um produto de madeira industrializada que pode substituir os materiais de construção convencionais, como por exemplo, o aço, o concreto e a alvenaria. Trata-se de um produto pré-fabricado feito de camadas de lamelas cruzadas, geralmente a 90 graus, as quais são coladas por adesivos estruturais nas faces em contato entre as camadas e/ou lateralmente entre as lamelas da mesma camada. Para algumas configurações especiais, o ângulo de cruzamento entre as camadas pode ser diferente de 90°. Geralmente, os painéis são formados de camadas ímpares, de três, cinco e sete, ou até mais para casos especiais, cuja largura pode variar de 60 centímetros a três metros, o comprimento pode chegar a 18 metros e a espessura até 508 mm (WANG *et al.*, 2021).

Atualmente, a produção de MLCC tem aumentado significativamente, principalmente no Brasil, o que pode ser justificado pelas vantagens que esse produto apresenta, como por exemplo, o baixo impacto ambiental, a alta relação entre resistência /seu peso próprio, a rapidez da construção e suas características estéticas. Estudos mostram que estruturas de MLCC possuem menos da metade da quantidade de carbono empregado para a sua fabricação quando comparadas às estruturas de concreto armado, além do que, elas podem ser recicladas ou reutilizadas. Devido ao fato do processo construtivo de estruturas em MLCC ser mais simples do que outros tipos de soluções estruturas de madeira, como o *wood frame*, que envolve um número maior de elementos na sua construção, ocorre a redução de até 30% do tempo de construção. Ao comparar edificação construída em MLCC e concreto, nota-se que em média, um pavimento de MLCC demora de quatro a sete dias para ser construído enquanto edificações convencionais de concreto demoram de 21 a 30 dias. Além das vantagens relacionadas ao custo e sustentabilidade, tem-se que a MLCC possui bom desempenho estrutural, permite projetos com maior flexibilidade, bom desempenho térmico e acústico e boa resistência às ações sísmicas (YOUNIS *et al.*, 2022).

De acordo com Rahman *et al.* (2020), devido à ortogonalidade das camadas, os painéis podem resistir a esforços de flexão em ambas as direções, ao contrário de outros elementos estruturais de madeira que geralmente resistem a carregamentos em apenas uma das direções, como por exemplo, a Madeira Lamelada Colada (MLC). Em algumas aplicações, como por exemplo, em placas de pisos com vãos pequenos, o desempenho estrutural dos painéis é

determinado pela resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), que juntamente com a tração normal às fibras, promovem a ruptura dos painéis (GRANDVUINET; MUSZYNSKI, 2019).

Vale mencionar que a madeira é um material adotado como ortotrópico caracterizado por três direções principais: longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T). O *rolling shear* ocorre no plano radial-tangencial (RT), perpendicular à direção longitudinal e a ruptura acontece por meio do rolamento das fibras, conforme citado por Shahnewaz *et al.* (2023). Os fatores que influenciam nas propriedades *rolling shear* da MLCC são o tipo de material da camada (madeira coníferas, folhosas), características macroscópicas da madeira (orientação dos anéis de crescimento, processo de fabricação e características geométricas) (WANG *et al.*, 2021).

Atualmente, os painéis de MLCC têm sido bastante estudados quanto ao efeito *rolling shear* em relação às propriedades de resistência (f_{vt}) e de rigidez (G_{vt}), de painéis mistos e utilização de novos materiais. No entanto, há poucas informações na literatura e pesquisas relacionadas ao emprego de madeiras nativas para fabricação de painéis de MLCC e às propriedades de rigidez e resistência desses elementos, principalmente quanto ao *rolling shear*. Dessa forma, neste trabalho buscou-se avaliar as propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), uma vez essas são as principais propriedades influenciadores na resistência última e rigidez dos painéis de MLCC.

A ABNT NBR 7190-7:2022 traz recomendações de ensaio para essa finalidade. No entanto, tais métodos foram baseados em normas internacionais, como a BIS EN 16351:2021, sendo necessários estudos para a avaliação da resistência (f_{vt}) e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) para painéis de MLCC confeccionados com madeiras nativas brasileiras. Além disso, observa-se que ainda não existe uma pesquisa específica no país que tenha estudado os métodos de ensaios propostos pela norma brasileira atual e analisado a viabilidade de aplicação de tais recomendações para painéis de MLCC fabricados com madeiras nativas brasileiras. Assim, nesta pesquisa pretendeu-se contribuir, principalmente, para o maior conhecimento das propriedades *rolling shear* de madeiras nativas e determinou-se o método de ensaio mais adequado para o estudo dessas propriedades em painéis de MLCC fabricados com essas madeiras. Essa é a principal inovação trazida por este trabalho, visto que os estudos os painéis de MLCC comercializadas atualmente no Brasil são confeccionados com madeiras de florestas plantadas e de espécies aclimatadas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho consistiu em estudar a resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) para duas espécies de madeiras nativas no Brasil, e a influência desses parâmetros no comportamento de painéis de MLCC quando submetidos à flexão.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliação experimental das propriedades associadas ao *rolling shear* em corpos de prova formados apenas pela camada transversal e em elementos de MLCC quando submetidos a ensaios de flexão e de cisalhamento;
- Estudo numérico para avaliação das distribuições das tensões e interpretação dos modos de ruptura nos elementos ensaiados experimentalmente;
- Avaliação teórica dos métodos analíticos disponíveis na literatura e determinação do método mais adequado para estimar as rigidezes efetivas a flexão e ao cisalhamento de painéis de MLCC;
- Determinação do método de ensaio de cisalhamento mais adequado para o estudo das propriedades *rolling shear* das madeiras nativas brasileiras estudadas.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Atualmente, não existem muitos trabalhos referentes ao uso de madeiras nativas brasileiras para a fabricação dos painéis de MLCC. O presente trabalho poderá contribuir para o melhor entendimento da resistência (f_{vt}) e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) desses painéis, assim como aumentar as possibilidades de emprego de matéria-prima para a fabricação de painéis de MLCC. Atualmente, no Brasil, existem apenas duas empresas produtoras de MLCC: a CROSSLAM, localizada em Suzano – SP, a qual utiliza como matéria-prima madeira da espécie “*Pinus taeda*”, ou em alguns casos específicos, o “*Eucalyptus grandis*” e a URBEM, localizada em Curitiba-PR, que utiliza madeiras de *Pinus* com classe C24, as quais são retiradas de floresta plantadas. O Brasil é o segundo país com maior área em florestas nativas, sendo que já foram registradas mais de 7.000 espécies apenas na região da

floresta amazônica. Com o manejo florestal adequado, as florestas nativas podem ser tornar uma fonte renovável de matéria prima para a indústria madeireira, sendo que as madeiras provenientes de espécies folhosas possuem menor quantidade de defeitos naturais e propriedades mecânicas superiores às coníferas, que atualmente são a principal fonte de matéria prima para fabricação de painéis de MLCC, conforme comentado anteriormente. Desse modo, seria possível aproveitar os recursos naturais disponíveis e ainda proporcionar para a indústria a possibilidade de fabricação de novos tipos de painéis de MLCC, como por exemplo, painéis homogêneos e mistos com propriedades mecânicas superiores aos dos comercializados atualmente.

Além disso, não existe um método de ensaio normatizado aceito globalmente para a determinação da resistência (f_{vt}) e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), sendo que atualmente são adotadas as mesmas diretrizes utilizadas em países da Europa e nos Estados Unidos e Canadá, que possuem clima temperado. Conseqüentemente, as espécies e as características das madeiras disponíveis desses países são diferentes das madeiras brasileiras, que se desenvolve em clima tropical. Dessa forma, deseja-se avaliar os métodos de ensaios disponíveis para a determinação dessas propriedades e definir qual o método de ensaio mais adequado. Assim sendo, pretende-se aumentar a fonte de consulta disponível e determinar parâmetros de referência para a determinação da resistência (f_{vt}) e do módulo de elasticidade transversal ao *rolling shear* (G_{vt}) de painéis de MLCC fabricados com madeira nativa, uma vez que a bibliografia nacional sobre este assunto se encontra em fase de desenvolvimento.

1.3 COMPOSIÇÃO DA TESE

A presente pesquisa foi organizada em seções referentes à introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões e conclusões. Cada uma dessas seções foram subdivididas e contém os seguintes conteúdos:

A seção um apresenta a proposta do trabalho, os objetivos gerais e específicos e a justificativa. A seção dois contém uma revisão bibliográfica abordando os temas de interesse ao trabalho, tais como características das madeiras utilizadas, Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), processo de fabricação, efeito *rolling shear*, caracterização estrutural de elementos de MLCC quanto a resistência (f_{vt}) e rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), modelagem numérica computacional e modelos analíticos. Na seção três são descritas as metodologias e os materiais

utilizados para caracterização prévia das madeiras usadas no trabalho, para os ensaios experimentais de cisalhamento dos corpos de prova e de flexão dos painéis, para a modelagem numérica computacional e para a análise analítica. Na seção quatro são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios experimentais de cisalhamento e flexão, assim como os resultados numéricos e analíticos. Por último, na seção cinco são apresentadas as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento da pesquisa.

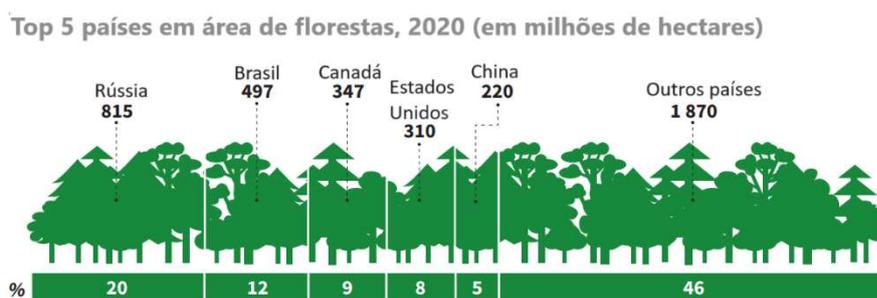
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada nesta seção é referente aos conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, é realizada uma breve revisão bibliográfica a respeito das madeiras nativas e das espécies escolhidas para realização da pesquisa. Posteriormente, é apresentado um breve histórico a respeito da origem da Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), as fontes de consulta disponíveis e as principais barreiras enfrentadas para sua implantação no Brasil. Então, é explicado o processo de fabricação de MLCC, pontuando alguns fatores que podem influenciar nas propriedades *rolling shear*. Em seguida, são explicados os conceitos relacionados ao *rolling shear*, os fatores influenciadores e a sua importância em painéis de MLCC. Após isso, são citados os métodos experimentais encontrados para a avaliação das propriedades de rigidez (G_{vt}) e resistência *rolling shear* (f_{vt}), os parâmetros utilizados nas modelagens numéricas em elementos finitos e os métodos analíticos de cálculo utilizados para estimar a rigidez à flexão e ao cisalhamento. Por último, são listadas as conclusões obtidas durante a revisão bibliográfica.

2.1 MADEIRAS NATIVAS

O planeta Terra ainda possui pelo menos 11 milhões de hectares de florestas nativas em que não há indícios de ocupação humana ou impactos significativos no seu ecossistema, conforme citado em FOA (2020). Ocorre que quase metade dessa área (41%) está concentrada principalmente em três países: Rússia, Brasil e Canadá, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1-Distribuição das áreas de florestas nativas



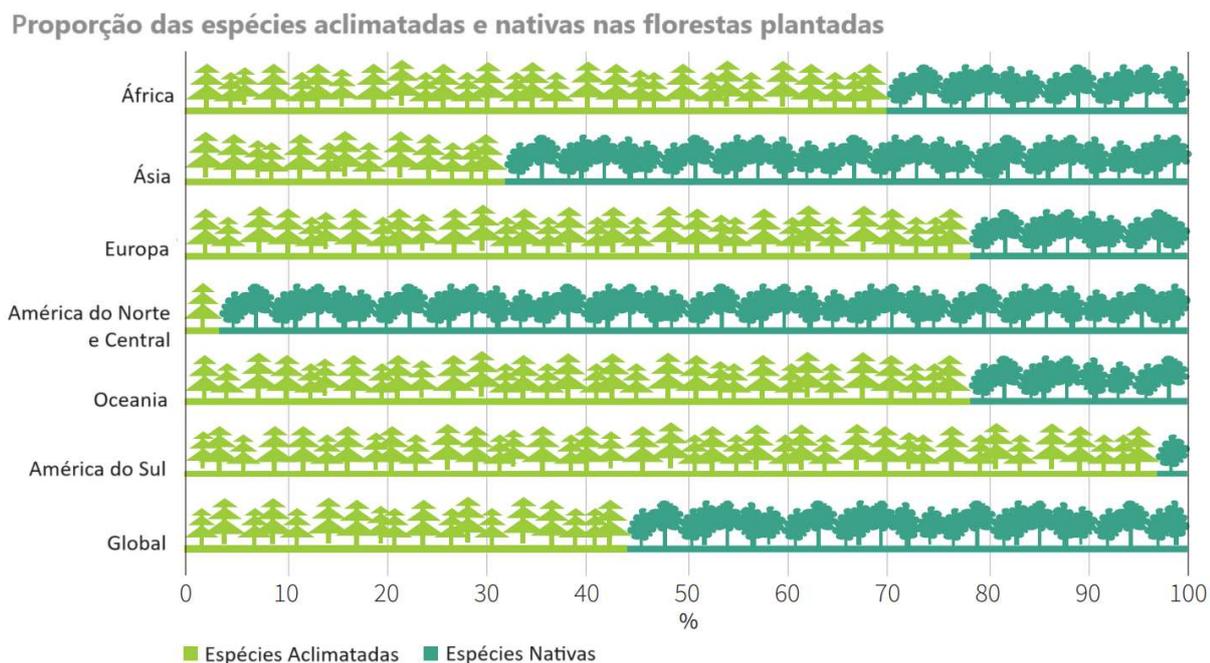
Fonte: Adaptado de FOA(2020)

Quanto a área de florestas brasileiras, ela corresponde a 59% do território nacional e é constituída por florestas nativas e florestas plantadas, sendo que em 2018, estimava-se que 97,6% da área total correspondia a florestas nativas e 1,97% a florestas plantadas (SBF, 2019).

De acordo com FOA (2005), estima-se que existam 7.880 espécies florestais arbóreas nativas na América do Sul, sendo que existem cerca de 11.210 espécies arbóreas somente na Amazônia, conforme citado por Hubbell *et al.* (2008).

Em relação as florestas plantadas, elas são constituídas basicamente por espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, que representam aproximadamente 96% da área de florestas plantadas e não são espécies de madeiras nativas brasileiras. Conforme citado por FOA(2020), globalmente, tem-se que 44% das florestas plantadas são compostas por espécies aclimatadas sendo que ocorre bastante diferença em relação ao continente americano, uma vez que na América do Sul, menos de 10% das espécies que formam as florestas plantadas são de espécies nativas, conforme ilustrado na Figura 2, enquanto na América do Norte e na Central mais de 90% das florestas são formadas por espécies nativas.

Figura 2-Composição das florestas plantadas

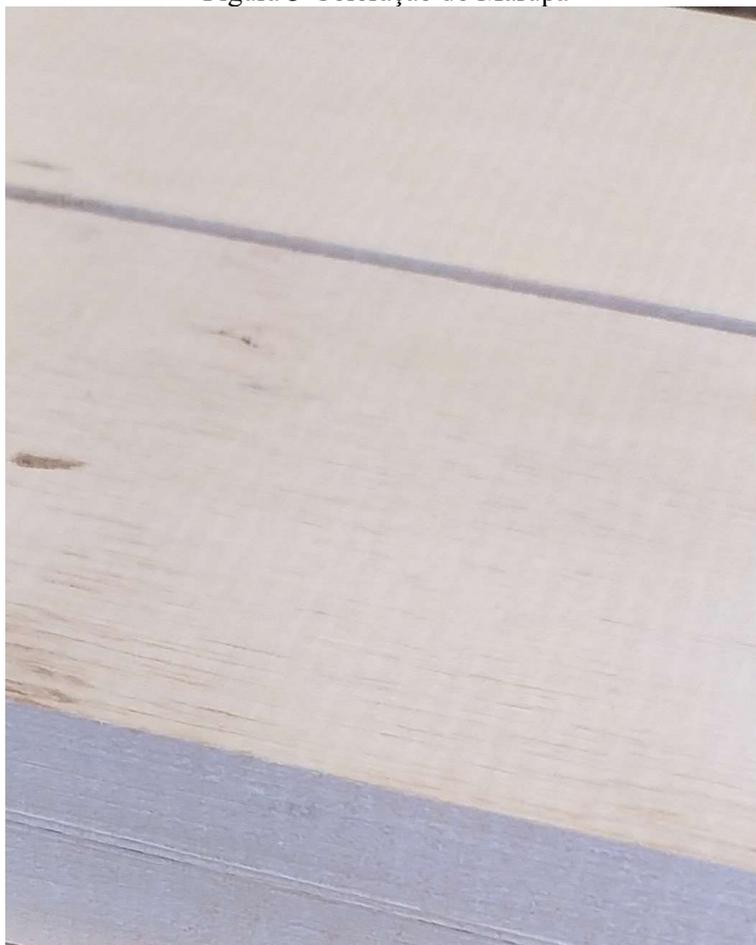


Fonte: Adaptado de FOA(2020)

Para a fabricação dos painéis de MLCC foram utilizadas duas espécies de madeira nativas, o Marupá e o Piquiá. De acordo com o IPT (2023), o Marupá é o nome popular de uma espécie de madeira cujo nome científico é “*Simarouba amara Aubl.*”, popularmente conhecida

como caixeta, caxeta, marupaíba etc. As árvores dessas espécies são de copa frondosa, de até 25 m de altura e 80 cm de diâmetro, cujo tronco é reto e cilíndrico, fornecendo toras comerciais com comprimento entre 5 m e 22 m (REMADE, 2023). A sua coloração é esbranquiçada e levemente amarela, conforme Figura 3, e sua ocorrência natural acontece em todas as regiões do país, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3-Coloração do Marupá



Fonte: A Autora

Figura 4-Distribuição Geográfica do Marupá



Fonte: Flora e Funga do Brasil (2023)

De acordo com a Embrapa (2008), pode ser considerada como madeira leve, com densidade entre 352 kg/m^3 e 550 kg/m^3 , para umidade entre 12% e 15%. Ela é utilizada para diversas finalidades, como por exemplo, para fabricação de pasta para papel e celulose, energia, madeira serrada e roliça e para fins medicinais. Além disso, não apresenta problemas de beneficiamento ou de colagem, proporcionando-se um bom acabamento (REMADE, 2023).

O Piquiá, cujo nome científico é "*Caryocar villosum*", também é popularmente conhecido por pequi, pequi-roxo, pequiá, piqui, piqui-rosa, piquiá-bravo, piquiá-verdadeiro (IPT, 2023). Possui ocorrências confirmadas nas regiões Norte (Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima), Nordeste (Maranhão) e Centro Oeste (Mato Grosso), conforme ilustrado na Figura 5 (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023).

Ele pode ser utilizado em construções externas, como por exemplo, dormentes, postes e estacas (REMADE, 2023). As propriedades mecânicas para ambas as espécies são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1-Propriedades Mecânicas para o Marupá e Piquiá

Propriedades Mecânicas (MPa)	Marupá	Piquiá
Resistência à flexão (f_m)	64,0 ⁽¹⁾	145,7 ⁽³⁾
Módulo de Elasticidade na Flexão (E_0)	7.257 ⁽¹⁾	14.111 ⁽²⁾
Módulo de Elasticidade na Compressão Paralela (E_{c0})	-	18.407 ⁽²⁾
Resistência à compressão paralela (f_{c0})	33,0 ⁽¹⁾	86,5 ⁽³⁾
Resistência à compressão perpendicular (f_{c90})	4,4 ⁽¹⁾	-
Resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0})	7,0 ⁽¹⁾	12,9 ⁽²⁾
Resistência à tração perpendicular (f_{t90})	3,6 ⁽²⁾	10,1 ⁽²⁾

⁽¹⁾Umidade de 12%, ⁽²⁾Madeira verde, ⁽³⁾Umidade de 15%.

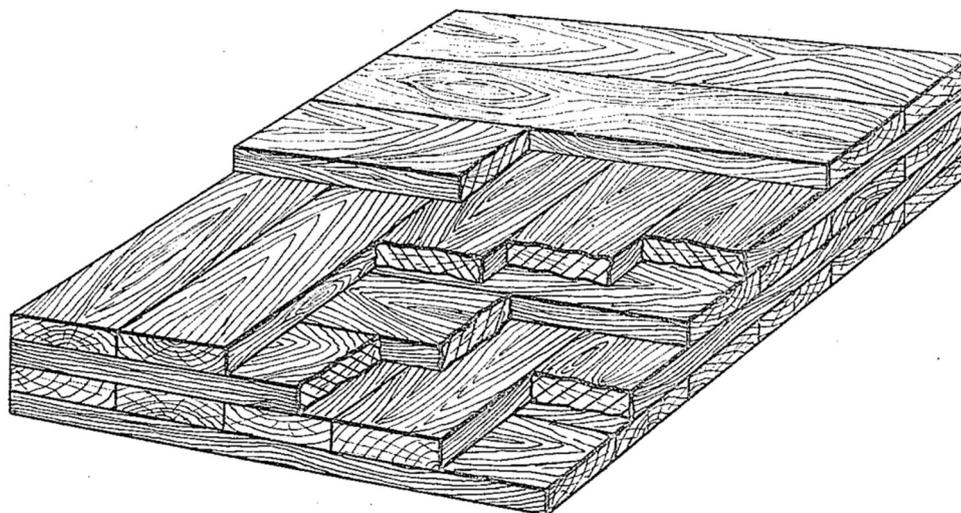
Fonte: IPT (2023)

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, constatou-se que é possível a utilização de espécies nativas sendo elas originadas de florestas nativas ou plantadas, uma vez que existe volume suficiente de matéria-prima em florestas nativas, Desde que seja realizado o manejo florestal adequado, é possível concorrer com as espécies utilizadas atualmente para fabricação de painéis de MLCC no Brasil, as quais em sua maior parte, são espécies de madeira coníferas, as quais possuem maior número de defeitos natura, ou aclimatadas, que são espécies originadas em outros países e se adaptaram ao clima brasileiro, evidenciando-se que não são utilizadas adequadas as madeiras nativas disponíveis no país.

2.2 BREVE HISTÓRICO SOBRE MLCC

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) teve a sua primeira patente registrada no ano 1923, nos Estados Unidos. No entanto, naquela época ainda não era nomeada dessa forma, sendo descrito como um painel composto de madeira, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Painel composto de madeira com patente no início dos anos 20



Fonte: Walsh e Watts (1923)

No início dos anos 90, ela foi introduzida no mercado, na Áustria e na Alemanha, e tem ganhado popularidade em aplicações residenciais e não residenciais na Europa como também no Brasil. A experiência europeia mostrou que construções com MLCC são interessantes, principalmente para edificações de média e grande altura, devido à facilidade de içamento durante a construção e o alto nível de pré-fabricação que permitem a finalização de projetos rapidamente. Essas vantagens ficam evidentes especialmente para construções de média altura, como por exemplo, prédios de cinco a oito pavimentos. Além disso, por ser um produto fabricado com madeira, possui bom desempenho térmico e acústico, além de bom comportamento perante a situações de incêndio (MOHAMMAD *et al.*, 2012).

As características da MLCC, suas grandes dimensões, a facilidade de transporte e aplicação, permitiram que o produto conquistasse um mercado que, por 100 anos, foi dominado pelos materiais de construção de origem mineral (BRANDNER *et al.*, 2016).

De acordo com Gagnon *et al.* (2013), a construção com MLCC cresceu significativamente no começo dos anos 2000, parcialmente impulsionada pela necessidade de construções sustentáveis, mas também devido à melhor eficácia, certificação dos produtos e o aumento da propaganda e dos meios de divulgação. No entanto, a concepção do produto foi desenvolvida nos anos 70 e 80, sendo que a primeira aprovação técnica ocorreu em 1998.

Na última década, a capacidade produtiva de painéis de MLCC tem aumentado com uma taxa de crescimento de 15 a 20% ao ano, mesmo durante a baixa do setor de construção civil. Esse desenvolvimento ocorreu principalmente na Áustria e na Alemanha, com a produção global de aproximadamente 500 mil m³ em 2012, sendo que 95% desse volume foi produzido

na Europa, tendo a Áustria como responsável de 2/3 desse percentual. Em 2014, a produção global aumentou para 625 mil m³ (BRANDNER *et al.*, 2016).

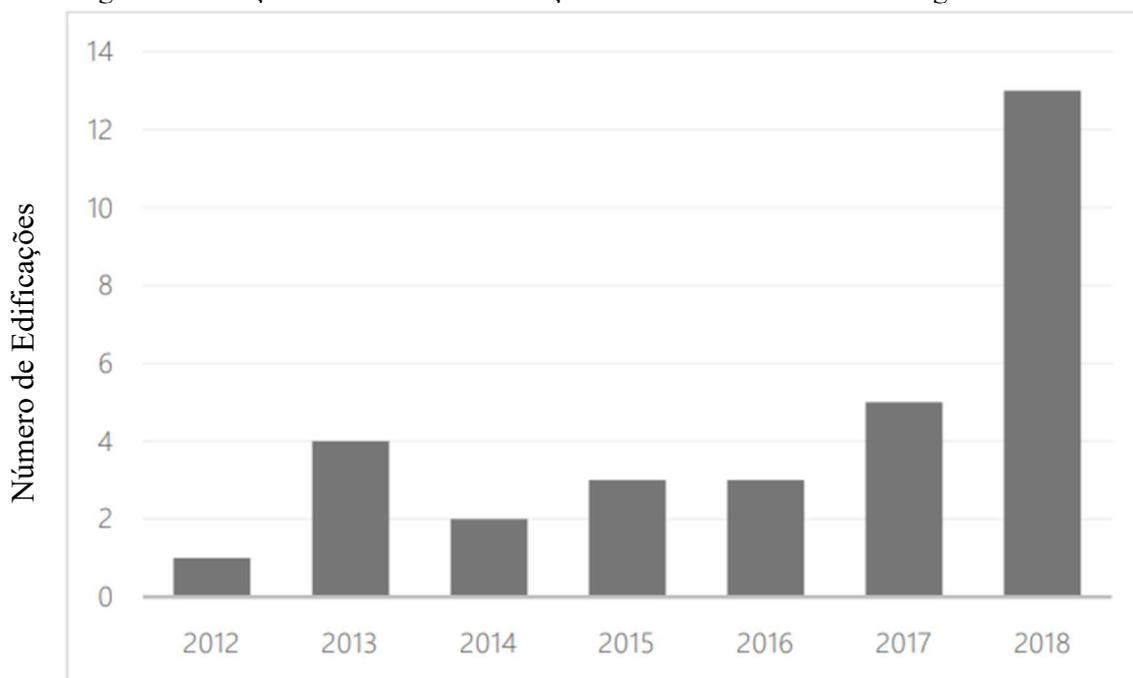
Em 2015, de acordo com Penfield *et al.* (2022), a produção global foi de 1 milhão de metros cúbicos, sendo que 90% dos produtos de MLCC foram fabricados na Europa. Para 2025, a produção é projetada para atingir 3 milhões de metros cúbicos. Conforme Brandner *et al.* (2016), desde 2010, o foco tem sido principalmente a expansão e a normalização desse produto, sendo que as primeiras atividades para a normatização da MLCC começaram na Europa, em 2008.

A normatização é uma barreira para o desenvolvimento da aplicação da MLCC, sendo que vários países têm adotado diferentes documentos normativos, e em alguns casos, normas estrangeiras são usadas como base para o desenvolvimento de normas locais vigentes. Em alguns países da América do Norte, como o Estados Unidos e o Canadá, ocorre que as informações disponíveis de MLCC são apresentadas apenas em manuais ou normas de produto. O primeiro manual referente à MLCC foi publicado pela *FPInnovations*, primeiramente em versão canadense, em 2011, e posteriormente em versão estadunidense, em 2014. Tais manuais foram bastante úteis não apenas para a América do Norte como também para outros países, uma vez que, conforme citado anteriormente, há apenas uma norma de fabricação para painéis de MLCC, que foi publicada em 2012. Na Europa, a norma mais utilizada para fins estruturais é a CEN EN 1995:2004, que está sendo atualizada e com previsão de publicação para 2025, versão esta que terá um capítulo referente à MLCC. No entanto, foi publicada a BIS EN 16351:2021, a qual é utilizada por vários continentes e foi traduzida em três línguas diferentes. Na América do Sul, ocorre que a maioria dos países usam as normas e manuais importados da América do Norte e da Europa. No entanto, adaptações são necessárias uma vez que a América do Sul tem a maior quantidade de espécies de madeira folhosa (KURZINSKI; CROVELLA; KREMER, 2022).

No Brasil, após 25 anos, em 2022 foi publicada a versão atualizada da ABNT NBR 7190, a qual incluiu alguns capítulos referentes a produtos de madeira industrializada, sendo que o capítulo sete é referente aos métodos de ensaio para MLCC. Outra barreira enfrentada para o uso de MLCC no Brasil, é o pequeno número de fornecedores, uma vez que existem apenas duas empresas que comercializam o produto no país. Apesar das dificuldades enfrentadas para a implementação no Brasil, o número de edificações em MLCC ainda que pequeno, tem aumentado ao longo dos últimos anos, como pode ser visto na Figura 8. Neste caso, as edificações estão localizadas principalmente no estado de São Paulo, as quais se

destinam principalmente para uso residencial. É importante salientar que a MLCC não foi utilizada estruturalmente em todos os casos (OLIVEIRA, 2018).

Figura 8-Evolução do número de edificações em MLCC no Brasil ao longo dos anos



Fonte: Oliveira (2018)

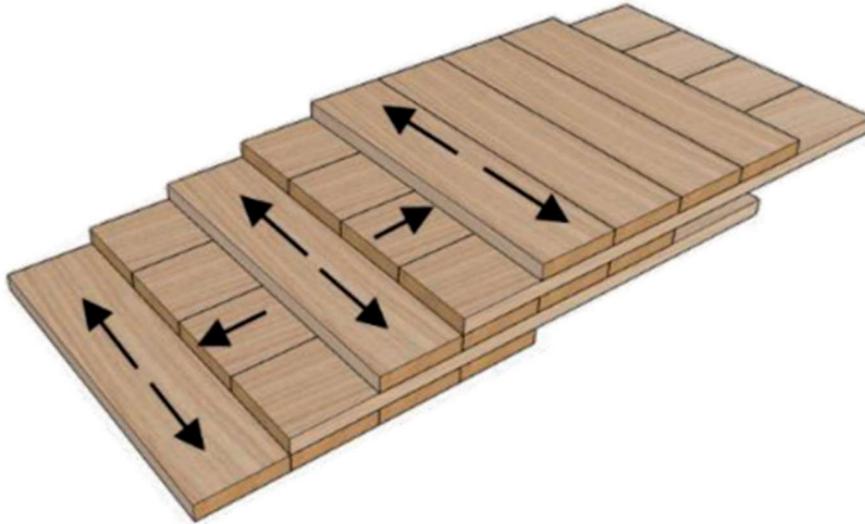
No Brasil, as estruturas em MLCC são muito utilizadas, quando comparadas com o volume de painel produzido, apesar de ainda não existir uma norma brasileira específica para parâmetros de dimensionamento e projeto. Dessa forma, são utilizados os manuais técnicos disponíveis de outros países, como por exemplo, dos Estados Unidos e do Canadá. Porém, vale mencionar que as espécies de madeiras brasileiras incluem as folhosas além das coníferas. Além disso, não há um documento global normativo que estabeleça as diretrizes técnicas para fabricação, para os métodos de ensaios e, principalmente, para as propriedades de rigidez (G_{vt}) e resistência *rolling shear* (f_{vt}), parâmetros de projeto e execução de estruturas em MLCC.

2.3 MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA (MLCC)

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), de acordo com Divekar (2016), também conhecida como madeira pré-moldada, é um produto pré-fabricado de madeira industrializada, que formada pela união de pelo menos três camadas de lamelas de madeira serrada ou de outro

compósito de madeira, em que as camadas consecutivas são orientadas de maneira cruzada e coladas por adesivos estruturais, na formação de um painel rígido, conforme ilustrada na Figura 9.

Figura 9-Disposição de camadas simples em painéis de MLCC



Fonte: Wang e Yin (2021)

Em casos especiais, camadas vizinhas podem ser coladas na mesma direção, formando uma camada dupla, a fim de se obter propriedades estruturais específicas. Por exemplo, as camadas externas posicionadas na mesma direção em painéis de MLCC de cinco camadas, como ilustrado na Figura 10 (WANG; YIN, 2021).

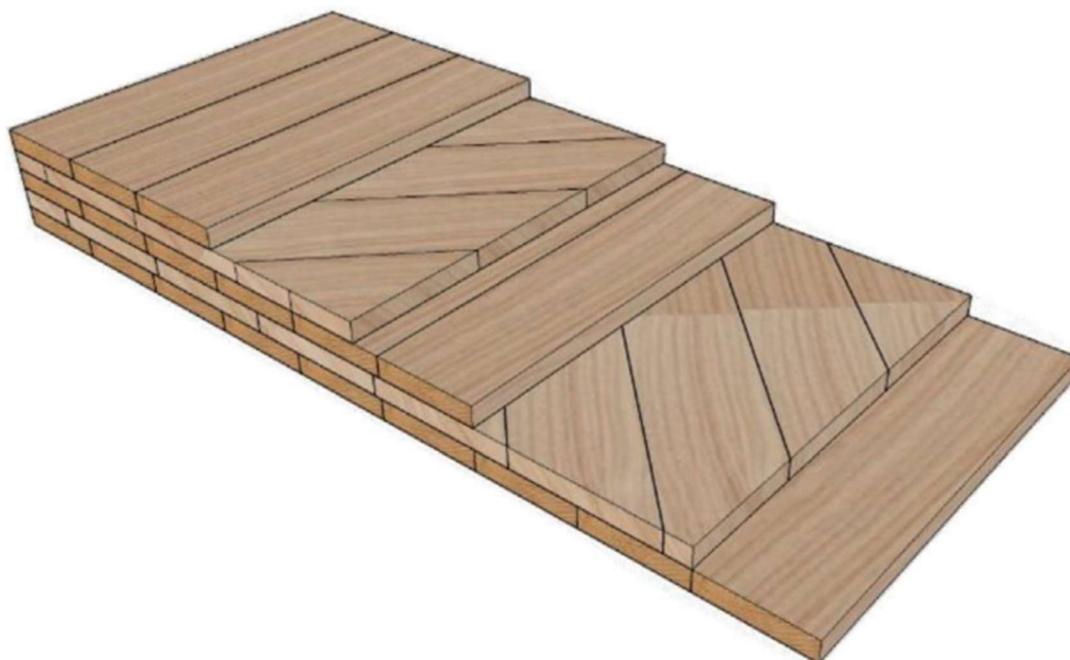
Figura 10-Disposição de camadas duplas em painéis de MLCC



Fonte: Wang e Yin (2021)

De acordo com Wang e Yin (2021), as camadas transversais podem ser dispostas em 45° em relação às camadas adjacentes, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11-Disposição de camadas transversais a 45° em relação às camadas adjacentes

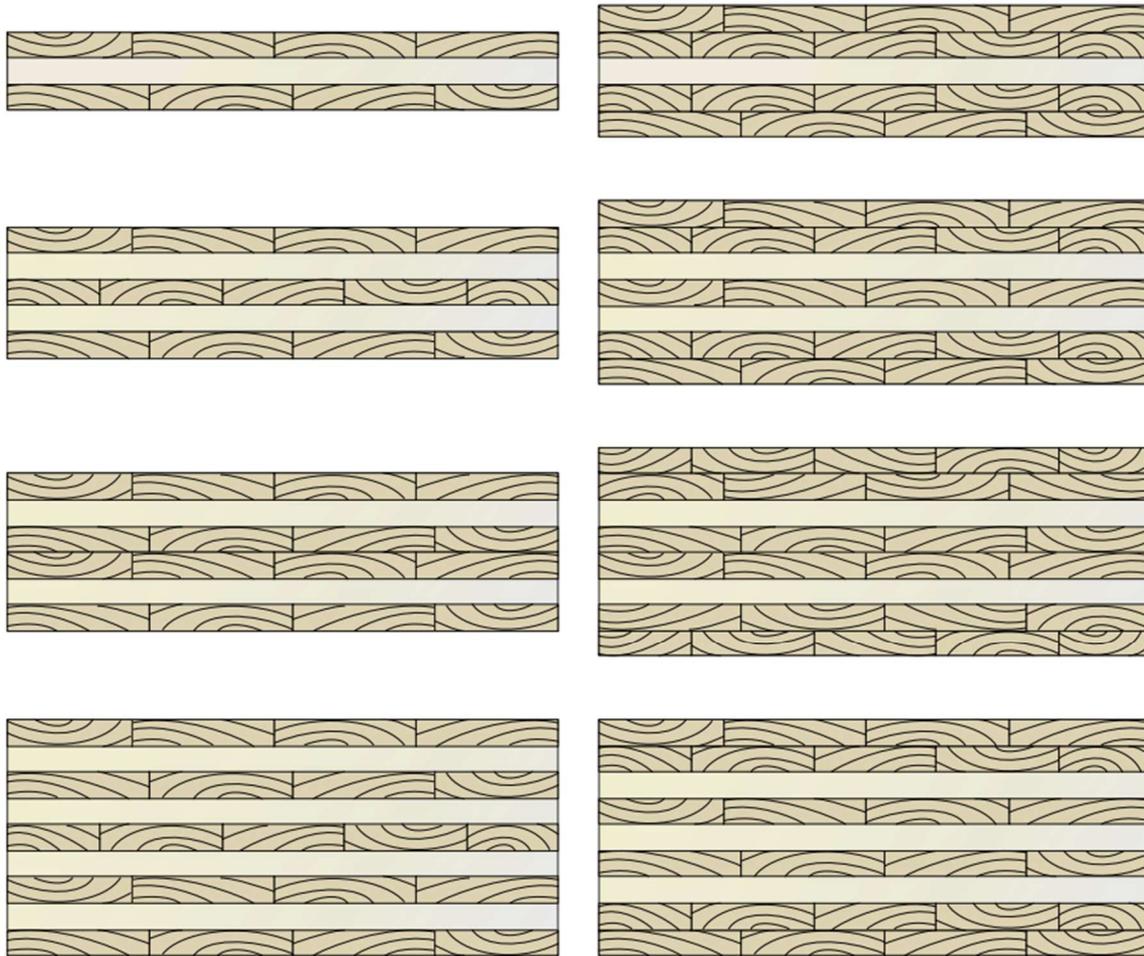


Fonte: Wang e Yin (2021)

A ideia dos painéis de MLCC não é exatamente nova, uma vez que a sua estrutura é semelhante à de outros produtos previamente conhecidos, como por exemplo, a madeira compensada (*plywood*). No entanto, os painéis de MLCC possuem dimensões maiores tanto no comprimento, quanto na largura e na espessura, o que permite o seu içamento e diferentes aplicações não apenas como elementos estruturais lineares, mas também como elementos bidimensionais (BRANDNER *et al.*, 2016).

Eles são fabricados com número ímpar de camadas, geralmente de três a sete, sendo que em alguns casos, podem ser fabricados com mais camadas. A ligação entre os elementos pode ser feita por colagem, pregos ou cavilhas. Caso seja colada, ela pode ser feita entre as camadas, incluindo a possibilidade de colagem lateral entre as lamelas de uma mesma camada. Os diferentes tipos de seções transversais que podem ser utilizados são ilustrados na Figura 12 (GAGNON *et al.*, 2013).

Figura 12-Seções transversais de painéis de MLCC



Fonte: Gagnon *et al.* (2013)

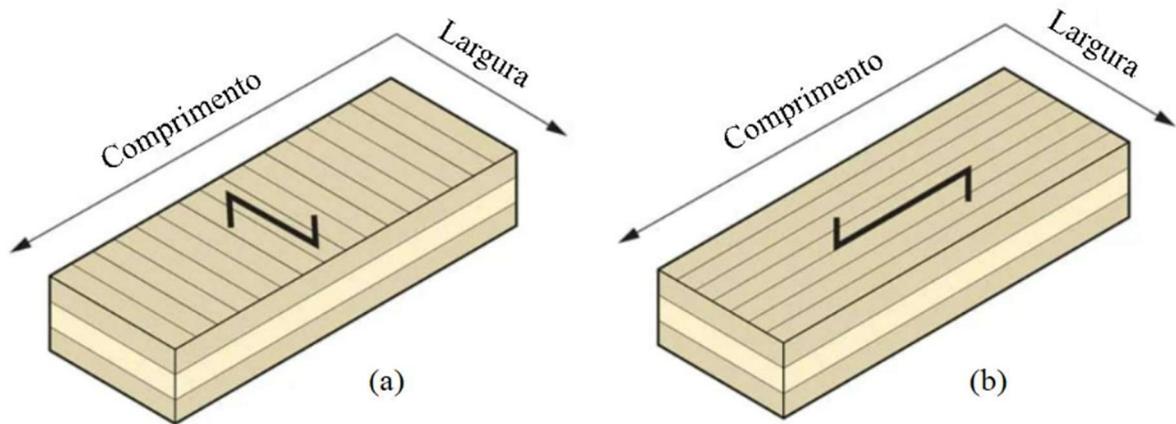
A madeira utilizada para a produção da MLCC não precisa necessariamente ser de classes altas de resistência. Dessa forma, os painéis podem oferecer oportunidades de uso para madeiras com classes inferiores como as coníferas, de madeira folhosas, árvores com menores diâmetros e partes de troncos restaurados de doenças (PENFIELD *et al.*, 2022).

As lamelas de madeira que formam as camadas podem ter espessuras de 16 mm a 51 mm e largura de 60 a 240 mm. As dimensões dos painéis de MLCC podem variar de acordo com o fabricante. No entanto, são encontradas larguras de 60 cm a três metros, enquanto o comprimento pode chegar até 18 metros, uma vez que as peças podem ser emendadas ao longo do comprimento por “*finger joints*”, e espessuras de até 508 mm (GAGNON *et al.*, 2013).

Os elementos de MLCC podem ser utilizados, para fins estruturais, como painéis de parede (vigas-paredes) e painéis de piso, sendo que o que diferencia um painel em relação ao outro é a orientação das camadas externas. Para os empregados como painéis de parede, as camadas externas são orientadas verticalmente, na direção da gravidade, enquanto para pisos,

as camadas externas são dispostas paralelas ao maior vão, conforme ilustrado na Figura 13. Outras aplicações possíveis, são como tabuleiros de pontes ou aplicações temporárias como, por exemplo, apoio para guindastes em solos moles ou em vias temporárias (DIVEKAR, 2016).

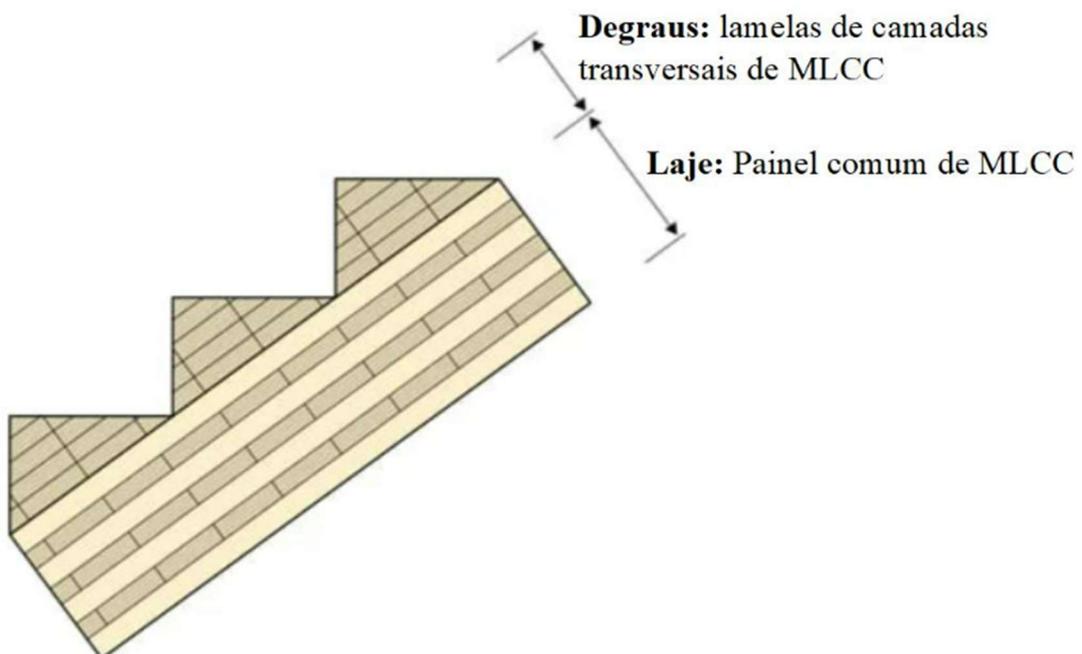
Figura 13-Aplicações da MLCC (a) Painel de Parede e (b) Painel de Piso



Fonte: Adaptado de Stora Enso (2021)

Além das aplicações citadas anteriormente, também é possível o uso da MLCC para painéis de pisos inclinados em escadas, em que são utilizados painéis de MLCC comuns para o painel da escada enquanto para os degraus são utilizadas lamelas que não possuem função estrutural, sendo estas apenas de enchimento, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14-Escadas fabricadas com MLCC



Fonte: Adaptado de Stora Enso (2021)

Conforme citado no *handbook* da Swedish Wood (2019), as modernas técnicas de fabricação aliadas às boas propriedades de resistência da MLCC, tornam esse material com qualidades únicas, as quais são citadas e organizadas a seguir:

- Peso próprio menor;
- Flexibilização dos projetos;
- Alta relação resistência/peso;
- Alta precisão e boa estabilidade dimensional;
- Bom comportamento estrutural em situações de incêndio e sismos;
- Bom comportamento térmico;
- Boa resistência à ambientes agressivos quimicamente;
- Possibilidade de utilização de superfícies curvas.

2.3.1 Vantagens da MLCC

A MLCC é em torno de quatro vezes mais leve que o concreto, permitindo a construção de edificações com fundações mais simples. No processo de montagem, utilizam-se equipamentos de içamento com menor capacidade, reduzindo-se custos, conforme constatado por Divekar (2016). Desse modo, a MLCC se torna adequada para construções pré-moldadas localizadas em solos de baixa capacidade resistente e para reformas e ampliações de construções, o que é de particular interesse para regiões urbanas com alto nível de ocupação (BRANDNER *et al.*, 2016).

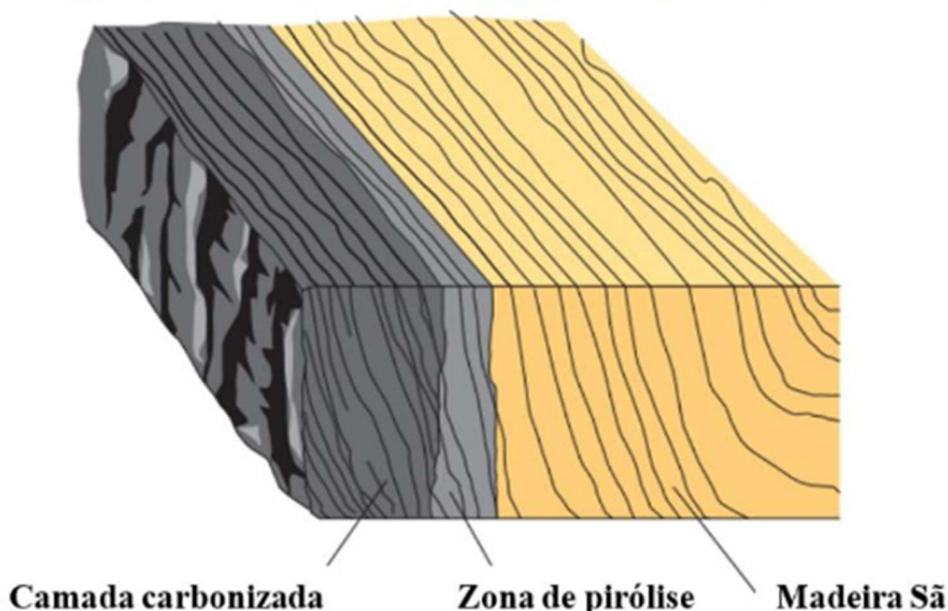
As edificações leves reduzem os riscos de colapso total da edificação e, assim sendo, a MLCC é indicada para as regiões propícias a abalos sísmicos, uma vez que se trata de um produto pouco denso, flexível, resistente a sismos, e possui alta rigidez e boa capacidade resistente à flexão e a carregamentos laterais. Mesmo que ocorra o colapso parcial ou total da edificação, a manutenção ou reconstrução de estruturas feitas com MLCC é fácil e rápida (ALEMDAĞ; TANDOĞAN; ARTUN, 2021).

Conforme citado por Divekar (2016), os projetos feitos com MLCC possuem um grau de flexibilização maior, uma vez que caso seja necessária alguma alteração no projeto é relativamente fácil aumentar a espessura dos painéis, para atingir vãos maiores, utilizando-se poucos elementos de suporte interiores. Além disso, os fabricantes usam equipamentos como o CNC (Comando Numérico Computadorizado), que é um robô para cortar os painéis e realizar

as aberturas nas exatas dimensões especificadas com alta precisão, na ordem de milímetros e, caso sejam necessárias modificações na obra, estas podem ser feitas com a utilização de ferramentas simples.

A seção transversal espessa da MLCC possibilita boa resistência ao fogo, uma vez que os painéis são carbonizados vagarosamente. A camada carbonizada protege a madeira de futuras degradações, diminuindo a velocidade de queima da madeira, conforme ilustrado na Figura 15. Adicionalmente, os painéis de MLCC podem ser montados espaçadamente, reduzindo-se a possibilidade de espalhamento das chamas (DIVEKAR, 2016).

Figura 15-Processo de carbonização da madeira



Fonte: Adaptado do *handbook* da Swedish Wood (2019)

A taxa de carbonização da madeira é entre 0,9 e 1,0 mm/por minuto, conforme ABNT NBR 7190-1:2022, para painéis com densidade superior a 450 kg/m³ e espessura superior a 20 mm. De acordo com Alemdağ, Tandoğan e Artun (2021), os painéis de MLCC podem resistir ao fogo em até 120 minutos, dependendo de sua composição, sem sacrificar o sistema estrutural da edificação.

Em situações de abalos sísmicos, além das questões citadas anteriormente, tem-se que painéis de MLCC possuem alta rigidez e estabilidade dimensional, melhorando-se a estabilidade estrutural quanto às ações laterais. No Japão, por exemplo, foram testados protótipos de prédios de sete pavimentos a terremotos com magnitude de 7,2 pontos, os quais resistiram a 14 abalos sísmicos consecutivos sem colapsar. Além do fato de que os painéis de MLCC apresentaram comportamento dúctil e melhor dissipação de energia.

Quanto ao desempenho térmico, devido ao fato de serem painéis maciços, a possibilidade de circulação de ar por eles é bem baixa e, com isso, tem-se que a temperatura de edificações construídas com MLCC pode ser mantida com apenas um terço da energia requerida por edificações feitas com outros materiais (DIVEKAR, 2016).

Além das qualidades comentadas anteriormente, outras características que agregam valor à MLCC são o fato de ser um produto pré-fabricado, o seu desempenho acústico e as questões ambientais envolvidas.

A pré-fabricação dos elementos reduz as imprecisões de projeto, conforme comentado por Alemdağ, Tandoğan e Artun (2021). Além do mais, ocorre a redução do tempo de construção, a diminuição dos custos e a alteração da logística da obra, possibilitando que as aberturas de portas, janelas, escadas e *shafts* possam ser feitas previamente, assim como os isolamentos e acabamento, diminuindo a demanda de mão de obra dentro do canteiro de obras (DIVEKAR, 2016).

Somado a isso disso, conforme descrito por Brandner *et al.* (2016), os elementos estruturais, por exemplo os painéis de parede, podem ser divididos de acordo com os níveis da construção, de insolação, de instalação e de revestimento. Assim sendo, os painéis podem ser fabricados em etapas e o canteiro de obras pode ser mais organizado, com mais de uma frente de serviços trabalhando nas fachadas das edificações.

Em relação aos aspectos ambientais, a MLCC é a mais competitiva em relação aos outros materiais de fontes não-renováveis. Devido ao fato de ser produzida com madeira, seu consumo energético e suas características térmicas são melhores, em proporção, que o concreto, por exemplo. As edificações construídas com madeira emitem menos carbono durante o seu ciclo de vida do que as construídas em concreto, aço ou alvenaria (ALEMDAĞ; TANDOĞAN; ARTUN, 2021). Ao realizar a substituição de um metro cúbico de concreto por MLCC, resulta-se em uma redução do dióxido de carbono em aproximadamente 1,1 tonelada. Além disso, em estudos realizados anteriormente, ao se comparar edificações de sete pavimentos construídas apenas com concreto ou com MLCC, constatou-se que a emissão de dióxido de carbono foi reduzida em 40% para a estrutura de madeira (PENFIELD *et al.*, 2022).

Outra vantagem da MLCC é que gera menor volume de resíduos nos canteiros de obras, uma vez que os painéis são fabricados para usos específicos. Além disso, eles podem ser reutilizados em degraus de escadas, em elementos arquitetônicos ou até mesmo como biocombustível, resultando em desperdício menor.

As edificações com MLCC possuem melhor desempenho acústico, já que o uso de paredes maciças promovem o controle do som e, o uso de isolamento e outros tipos de

membranas entre os pisos e as paredes impedem a entrada de ar e aumentam o isolamento acústico (DIVEKAR, 2016).

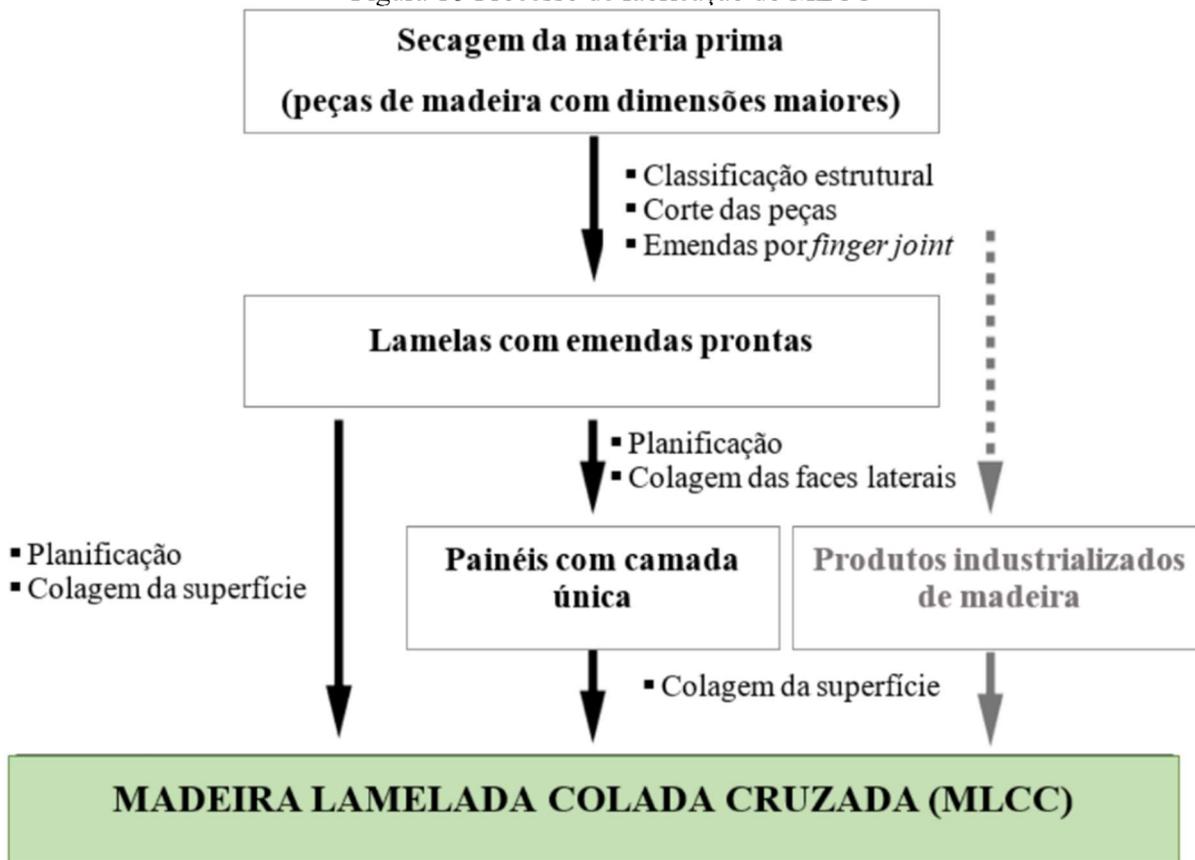
O custo é uma barreira que dificulta sua aplicabilidade, sendo que regularmente é considerada como um material mais caro do que os outros materiais de construção, sendo que, os custos iniciais podem ser 20% maiores quando comparados com construções de aço e concreto. No entanto, o custo da MLCC em relação ao concreto e alvenaria é praticamente o mesmo, indicando que ele pode não ser uma desvantagem em relação ao seu uso, como citado por Penfield *et al.* (2022). Em outros trabalhos, é informado que o custo total dessas edificações é menor do que 0,9 a 1,3% com relação aos custos das estruturas convencionais de concreto armado, uma vez que durante o processo de instalação, as construções com MLCC reduzem o custo e o tempo quando comparada às estruturas de concreto (ALEMDAĞ; TANDOĞAN; ARTUN, 2021).

Devido às diversas vantagens apresentadas pela MLCC e o crescimento do seu uso ao longo dos anos, pode-se considerá-la um produto de madeira industrializada bastante interessante para a indústria da construção civil. Dessa forma, é importante conhecer a fundo as propriedades mecânicas do produto, uma vez que ela pode ser utilizado para fins estruturais.

2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA MLCC

O processo de fabricação pode ser dividido em cinco etapas, conforme Brandner *et al.* (2016). A primeira etapa é referente à caracterização da matéria-prima e processo de classificação; na segunda etapa é feita a união das lamelas por emendas; na terceira etapa é feita a colagem das peças e a montagem dos painéis; a quarta etapa consiste na finalização dos painéis de MLCC e a quinta etapa refere-se ao corte e conexão dos painéis. O processo de fabricação dos painéis é esquematizado na Figura 16.

Figura 16-Processo de fabricação do MLCC



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

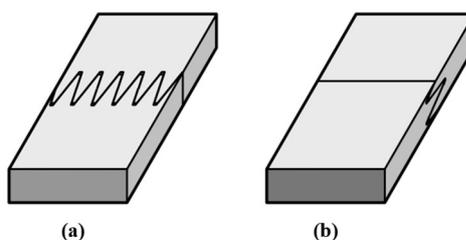
Anteriormente ao processo de caracterização e classificação, conforme Kurzinski, Crovella e Kremer (2022), tem-se que as peças de madeira são preparadas por meio da serragem. Geralmente com espessuras de 12 a 45 mm, conforme BIS EN 16351:2021, ou então conforme espessuras usadas na Europa Central, que são de 20, 30 e 40 mm. Para a produção dos painéis de MLCC, podem ser utilizados outros materiais além da madeira, como por exemplo, produtos laminados de madeira, e painéis de madeira com lascas orientadas (BRANDNER *et al.*, 2016).

Então é feita a secagem da matéria-prima até o teor de umidade de $12\% \pm 3\%$ para prevenir variações dimensionais e fissuração da superfície, lembrando que a madeira pode ser adquirida seca ou pode ser necessária uma secagem complementar na fábrica (PEREIRA, 2014).

A classificação das peças de madeira, quanto às resistências e rigidezes especificadas em projeto, pode ser feita visualmente e mecanicamente, sendo que as classes de resistência que são comumente utilizadas são a C24, conforme CEN EN 338:2009, para painéis homogêneos e painéis híbridos. Utiliza-se a C24 nas camadas longitudinais e C16/C18 nas camadas transversais, como descrito por Brandner *et al.* (2016). De acordo com Pereira (2014),

durante a classificação visual, é necessário o descarte de peças que possuem defeitos acima dos permitidos como nós, bolsas de resinas, fendas, rachas, encanoamentos, encurvamentos. Deve-se ainda classificar a densidade pela quantidade de anéis por polegada na seção transversal da peça, conforme ABNT NBR 7190-2:2022. Para a obtenção dos comprimentos especificados, são feitas emendas do tipo “*finger joint*”. Em painéis de MLCC, geralmente são usados os mesmos tipos de emendas que são aplicadas na Madeira Lamelada Colada (MLC), os quais possuem comprimentos de 15 ou 20 mm, ou para casos especiais, comprimento de 45 mm. A posição das emendas pode ser ao longo da largura das peças ou ao longo da espessura da peça, como ilustrado na Figura 17. A vantagem do segundo caso, em relação ao primeiro, é que as emendas não ficam visíveis na superfície dos painéis do MLCC.

Figura 17-Emendas por *finger-joint* (a) ao longo da largura e (b) ao longo da espessura das peças unidas



Fonte: Adaptado de Brandner (2013)

Após isso, as peças são aplainadas em duas ou quatro faces para garantir as dimensões corretas e a colagem adequada, a qual pode ser realizada nas faces de contato entre as camadas e/ou nas faces laterais entre as lamelas. A colagem das lamelas pode ser feita de duas formas, sendo possível fazer a colagem de todas as lamelas ao mesmo tempo, ou realizar a colagem das lamelas de uma mesma camada, e após isso, fazer a colagem das camadas. A primeira opção é mais empregada, enquanto a segunda opção é usada para diminuir o espaçamento lateral entre as lamelas, promovendo maior estanqueidade da estrutura, e por questões estéticas, quando os painéis de MLCC ficarão visíveis durante o uso da edificação. No entanto, painéis fabricados dessa forma podem fissurar devido a retração e inchamento das peças que geram tensões internas adicionais. A fim de se evitar a fissuração, esse método é aplicado apenas para camadas transversais (BRANDNER *et al.*, 2016).

Conforme citado por Yeh, Kretschmann e Wang (2013), existem vários adesivos estruturais que são usados na fabricação de painéis de MLCC, como por exemplo, fenol-resorcinol formaldeído (PRF), emulsão de isocianato de polímero (EPI), melamina formaldeído e poliuretano (PUR). Os adesivos estruturais utilizados pelos fabricantes devem seguir os

documentos normativos, sendo respeitados alguns parâmetros, tais como pressão de colagem, quantidade de adesivo aplicada e umidade das peças que serão coladas (BRANDNER *et al.*, 2016).

Uma vez coladas, o conjunto é prensado usando prensa hidráulica (mais comum) ou prensas a vácuo ou ar comprimido, dependendo da espessura do painel e do adesivo utilizado. O processo de montagem pode demorar de 15 a 60 minutos dependendo dos equipamentos e adesivos utilizados. Então, os painéis unidos são planificados ou lixados para se obter uma superfície lisa no final do processo. Os painéis são cortados no tamanho definido em projeto e são feitas as aberturas para portas, janelas, conexões e dutos usando fresas que permitem alta precisão. Para o controle de qualidade, a compatibilização com as características do produto prescritas em norma é checada na indústria, como por exemplo, resistência à flexão, cisalhamento e delaminação (PEREIRA, 2014).

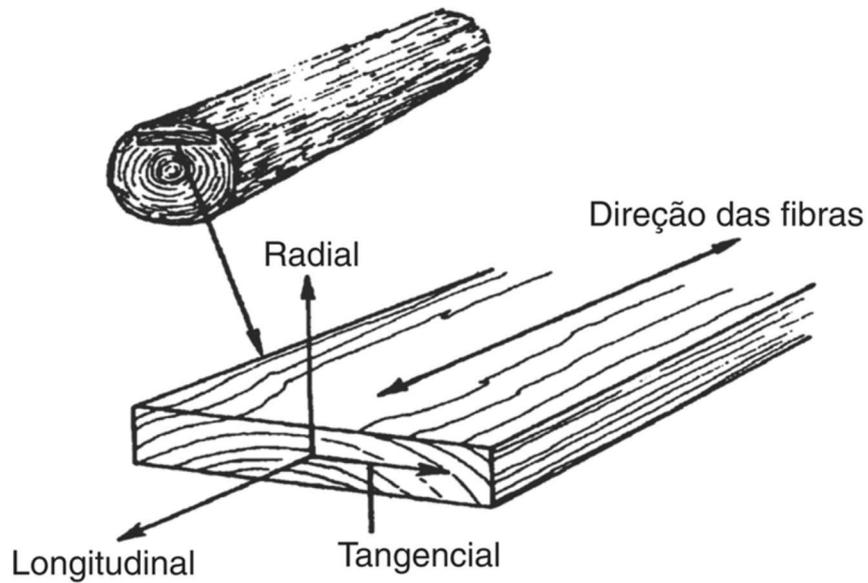
Nesta etapa, dependendo do uso dos painéis, podem ser colocadas camadas adicionais não estruturais, como painéis de madeira de lascas orientadas (OSB), painéis acústicos, placas de gesso acartonado ou até mesmo painéis de madeira maciça (BRANDNER *et al.*, 2016).

O segredo para uma produção bem-sucedida é baseado na qualidade da madeira e no controle dos parâmetros que impactam a qualidade de aplicação do adesivo. O controle de qualidade adequado assegura que o produto se enquadre nas aplicações para o qual foi destinado (GAGNON *et al.*, 2013).

2.5 CISALHAMENTO TRANSVERSAL (*ROLLING SHEAR*)

A madeira é um material com tendência anisotrópica composto por fibras alinhadas longitudinalmente, mas por simplificação é admitida ter um comportamento ortotrópico. Apesar da curvatura dos anéis de crescimento considera-se três direções principais ortogonais entre si: a direção paralela às fibras ou traqueídes (no caso do gênero *Pinus*), comumente denominada direção Longitudinal (L); a direção tangencial aos anéis de crescimento, denominada direção Tangencial (T); e a direção perpendicular aos anéis de crescimento, denominada direção Radial (R). As direções principais e os planos definidos por elas são ilustradas na Figura 18.

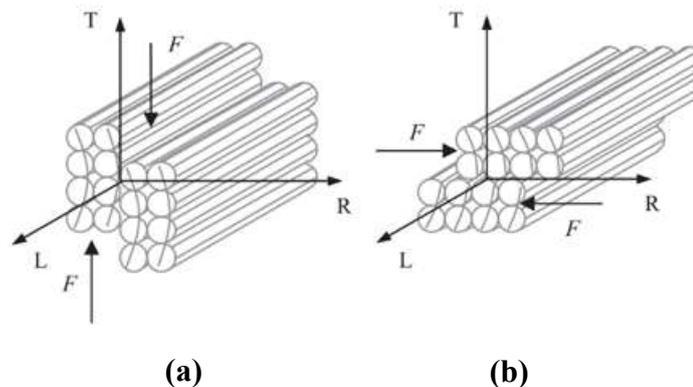
Figura 18-Direções principais da madeira



Fonte: Calil Junior *et al.* (2019)

Do ponto de vista da aplicação prática em estruturas de madeira, geralmente as direções Radial (R) e Tangencial (T), apesar de apresentarem propriedades diferentes entre si, são denominadas indistintamente e unicamente como direção perpendicular às fibras. Em painéis de MLCC, nas camadas transversais em painéis fletidos unidirecionalmente, ocorrem tensões cisalhantes, para o qual a madeira possui menor resistência e é denominado *rolling shear*. Esse efeito promove o rolamento entre as fibras sem que ocorra a sua ruptura, e ocorre no plano radial-tangencial (RT) devido a forças de cisalhamento na direção tangencial (T) ou na direção radial (R), como ilustrado nas Figura 12a e Figura 12b, ou em planos intermediários originados da rotação do eixo longitudinal (L) (EHRHART; BRANDNER, 2018).

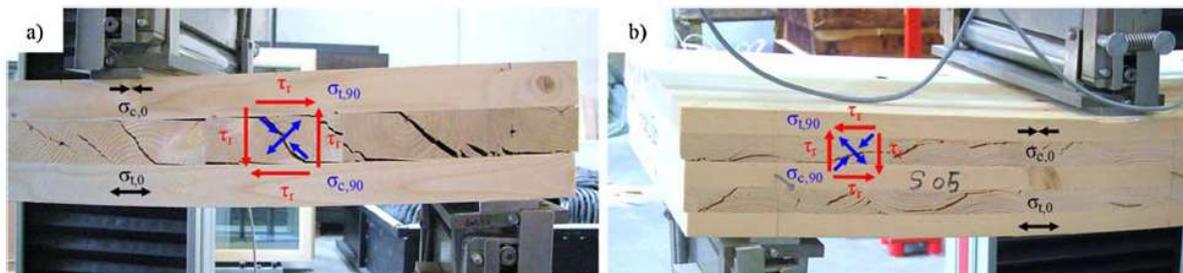
Figura 19-Rolling shear (a) Força na direção tangencial (b) Força cortante na direção radial



Fonte: Adaptado de Ehrhart e Brandner (2018)

O modo de ruptura por *rolling shear* se caracteriza pela formação e propagação de fissuras, ao longo da linha de contorno dos anéis de crescimento, no plano radial-tangencial (RT), resultando-se em baixa resistência à flexão e ao cisalhamento (WANG; YIN, 2021). Os modos de ruptura de painéis de MLCC, para três e cinco camadas, são ilustrados nas Figura 20a e Figura 20b, respectivamente. Pode ser observado que a ruptura ocorre em plano intermediário, devido às tensões de tração normal às fibras, que é a direção mais frágil da madeira.

Figura 20-Modo de ruptura típica por *rolling shear* (a) Três camadas (b) Cinco camadas



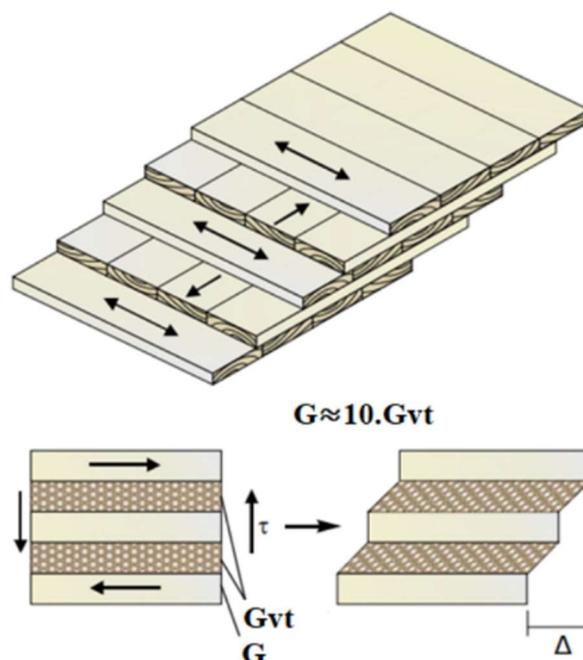
Fonte: Ehrhart e Brandner (2018)

As zonas críticas de *rolling shear* ocorrem, geralmente, próximas a pilares em sistemas de piso de MLCC e quando ocorrem esforços de cisalhamento altos na flexão de painéis de pisos com vãos pequenos. Durante a construção, elas podem ocorrer próximas aos pontos de ancoragem dos painéis durante o processo de içamento (KUMAR *et al.*, 2022).

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) tem sido considerada como fator crítico em projetos de painéis de MLCC, afetando o desempenho do produto em sistemas de pisos e paredes. Semelhantemente à madeira compensada, a laminação cruzada afeta o comportamento à flexão por causa do material e de sua tendência ortotrópica, e para painéis de MLCC, que possuem espessuras superiores às da madeira compensada, o efeito do cisalhamento é amplificado na flexão (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013).

Os valores de referência para as propriedades de rigidez (G_{vt}) e resistência (f_{vt}) são indicados por normas e manuais. O módulo de elasticidade transversal da madeira (G) pode ser definido nos planos longitudinal-radial (LR) e no longitudinal-tangencial (LT) entre 1/12 e 1/20 do módulo de elasticidade longitudinal obtido por ensaio de compressão paralela às fibras (E_{c0}), sendo que para madeiras coníferas e madeiras nativas é indicada a relação 1/16, de acordo com ANSI/APA PRG 320:2018 e ABNT NBR 7190-1:2022, respectivamente. O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) é definido no plano transversal associada às direções radial-tangencial (RT) da madeira, cujo valor pode ser adotado igual a 1/10 do G , conforme ilustrado na Figura 21 (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013).

Figura 21-Relação entre módulo de elasticidade transversal da madeira (G) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt})



Fonte: Ross, Gagnon e Keith (2013)

De acordo com Kumar *et al.* (2022), o valor verdadeiro do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) é bastante difícil de se determinar devido aos deslocamentos ocasionados serem muito pequenos, o que resulta em uma suscetibilidade a erros experimentais grandes. Na Europa, ele é admitido igual a 50 MPa, sendo que geralmente varia de 40 MPa a 80 MPa, o qual é adotado também por Crosslam (2016), Swedish Wood (2019) e Wallner-Novak, Koppelhuber e Pock (2014).

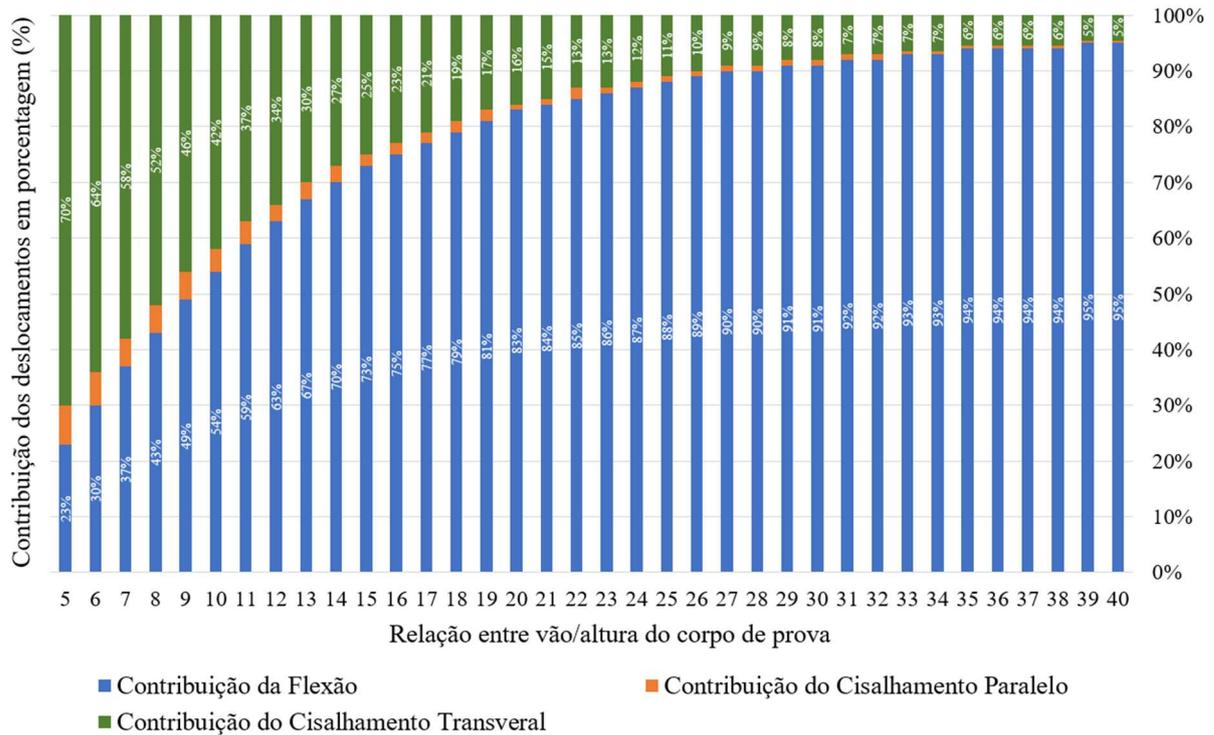
A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) para madeiras do tipo conífera varia entre 18% e 28% da resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}), conforme indicado por Kretschmann (2010). Em CEN EN 1995:2004, ela é indicada como 1/12 da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}). De acordo com BIS EN 16351:2021, a resistência última de painéis de MLCC ao *rolling shear* pode ser adotada igual a 1,40 MPa, para o caso de painéis com resistência à flexão com pelo menos 16 MPa, com as lamelas coladas lateralmente e relação largura/espessura da lamela maior que 4,0. Para os casos em que os painéis não possuem as lamelas das camadas laterais coladas lateralmente e com espessura das camadas de pelo menos 47 mm, é indicado o valor de 0,7 MPa. Por outro lado, na ANSI/APA PRG 320:2018, a resistência característica ao *rolling shear* (f_{vt}) varia de acordo com a classe da madeira, entre 1,3 MPa e 1,9 MPa. Wallner-Novak, Koppelhuber e Pock (2014) indicam o valor de 0,7 MPa para esta propriedade. O *handbook* da Swedish Wood (2019) também cita o valor de 0,7 MPa para painéis de MLCC fabricados sem

colagem lateral entre lamelas ou 1,1 MPa para painéis de MLCC fabricados com colagem lateral entre lamelas ou com espessura da lamela de 45 mm e com relação entre largura-espessura (parâmetro de lamelação γ) superior a 4, para ambos os casos. Além disso, Schickhofer, Brandner e Bauer (2016) indicaram para a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) o valor de 1,40 MPa, para parâmetros de lamelação (γ) superior a 4,0 e 0,8 MPa para os inferiores a 4,0. Para o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) indicam o valor de 100 MPa e 65 MPa, para os parâmetros de lamelação superiores e inferiores a 4,0, respectivamente. Entretanto, as propriedades *rolling shear* indicadas pelas normas e manuais foram consideradas conservadoras por Aicher e Dill-Langer (2000); Mc Polin e Harte (2016); O’ceallaigh; Sikora e Harte (2018) e Gardner *et al.* (2020).

A contribuição da distorção por cisalhamento no deslocamento vertical, de painéis de MLCC submetidos à flexão, pode ser maior do que para os outros produtos de madeira industrializada, uma vez que o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) das camadas transversais é menor. A parcela do deslocamento vertical, ocasionada pelo cisalhamento do painel de MLCC, depende do tipo de força aplicada, da relação entre vão/altura do painel e das condições de contorno, sendo que, para o caso de uma placa de piso bi apoiada submetida à força uniformemente distribuída, com relação vão/altura de 30, a contribuição do cisalhamento será em torno de 11%, enquanto para relação entre vão/altura de 20, a contribuição é de aproximadamente 22% (ROSS; GAGNON; KEITH, 2013).

Cherry *et al.* (2019) analisaram a influência da parcela de deslocamento devido ao cisalhamento, por meio da Analogia de Cisalhamento, de painéis de MLCC de cinco camadas, com lamelas de espessura de 30 mm, módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras na flexão (E_0) de 11.000 MPa, $G=E_0/16$ e $G_{vt}=E_0/160$, para um painel bi apoiado com força uniformemente distribuída de 5 kN/m. A porcentagem de contribuição de flexão, cisalhamento paralelo e transversal (*rolling shear*) no deslocamento vertical para várias relações de vão/espessura são apresentadas na Figura 22. Com isso, constataram que para relações entre o vão/altura maiores, que a ruptura ocorre principalmente por flexão. No entanto, apesar de a contribuição do cisalhamento ser menor, tem-se que 90% dela ocorre devido à contribuição do *rolling shear*.

Figura 22-Contribuição das parcelas devido à flexão e ao cisalhamento no deslocamento total



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

Adicionalmente, observou-se que aproximadamente 70% do deslocamento vertical do painel ocorre devido ao *rolling shear* para relação entre vão/altura de 5, sendo que sua contribuição é predominante até a relação de 8, e que para todos os painéis, a contribuição da parcela devido ao *rolling shear* no deslocamento vertical diminui com o aumento da relação vão-espessura (KUMAR *et al.*, 2022).

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) depende de vários fatores como o material utilizado e a densidade das lamelas na camada transversal, umidade, padrões de serração (orientação dos anéis de crescimento), parâmetro de lamelação, conforme citado por Ross, Gagnon e Keith (2013), e pelos parâmetros de fabricação da peça, como comentado por Wang e Yin (2021).

Os materiais utilizados como lamelas das camadas transversais são principalmente madeiras do gênero coníferas. No entanto, devido à baixa resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), esta tem sido substituída por madeiras folhosas ou por painéis de madeira industrializada, as quais possuem melhores propriedades e são o foco principal de pesquisas relacionadas a MLCC (WANG; YIN, 2021).

A densidade é um dos parâmetros mais adotado para indicar as propriedades elásticas e de resistência da madeira. No entanto, em relação às propriedades *rolling shear*, apresenta variação de comportamento de uma espécie para outra, sendo que, para madeiras coníferas, não

existe uma correlação significativa entre a densidade e as propriedades *rolling shear*, enquanto para madeiras folhosas, acontece o contrário (KUMAR *et al.*, 2022).

Como comentado por Wang e Yin (2021), os padrões de orientação dos anéis de crescimento é considerado um fator importante em relação ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), uma vez que sua inclinação o afeta significativamente. Wang *et al.* (2018a) concluíram que a presença de medula impacta negativamente a resistência (f_{vt}) e que a orientação dos anéis e a distância em relação à medula, em conjunto, também influenciaram as propriedades *rolling shear*, uma vez que estas foram maiores quanto maior a distância em relação à medula. Aicher e S. Dill-Langer (2000) estudaram várias orientações diferentes dos anéis de crescimento por meio de modelos numéricos. O valor máximo do módulo de elasticidade transversal foi obtido para a inclinação dos anéis igual a 45° , o qual foi aproximadamente quatro vezes maior do que os anéis a 0° e 90° , evidenciando-se a alta correlação entre o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e o padrão dos anéis de crescimento. Tais resultados foram confirmados por outros estudos, como por exemplo Aicher; Christian e Hirsch (2016b); Ehrhart e Brandner (2018) e Ukyo; Shindo e Miyatake (2019).

De acordo com Kumar *et al.* (2022), a presença de nós nas lamelas das camadas transversais de painéis de MLCC melhoraram as propriedades *rolling shear*. Shahhosseini, Crovella e Smith (2021) estudaram corpos de prova de painéis com e sem nós nas camadas transversais e constataram que ocorreu uma melhoria tanto para resistência (f_{vt}) quanto para o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Cao *et al.* (2019) analisaram experimentalmente e numericamente a influência dos nós rígidos e nós soltos na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e concluíram que para ambos os tipos, o valor foi superior para aqueles que não tinham nós. Grandvuinet e Muszyński (2019) estudaram o efeito da presença de nós nas camadas transversais de painéis de MLCC, de três camadas, por meio de ensaios de flexão de três pontos. Os exemplares com a presença de nós foram comparados com exemplares sem defeitos. Assim, concluíram que a presença dos nós não possuía efeito significativo quanto às propriedades de resistência e rigidez do painel.

Como comentado por Wang e Yin (2021), as características geométricas dos painéis de MLCC, no geral, são estudadas quanto à relação ao parâmetro de lamelação (γ). De acordo com ANSI/APA PRG 320:2018, caso as lamelas das camadas transversais dos painéis de MLCC não sejam coladas lateralmente, o parâmetro de lamelação (γ) deve ser no mínimo de 3,5, sendo que o valor mínimo de 4,0 é sugerido a fim de garantir boa superfície de contato durante a prensagem e resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) adequada (GRANDMONT *et al.*, 2019).

Para painéis de MLCC que não possuem colagem lateral entre as lamelas da camada transversal tem-se proporção linear entre o parâmetro de lamelação (γ) e as propriedades *rolling shear*. Para os casos com parâmetros maiores tem-se que a resistência última e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) do painel são maiores também, conforme atestado por Ehrhart e Brandner (2018); Li, Dong e Lim (2019); Sun, He e Li (2022) e Ukyo, Shindo e Miyatake (2019).

Os parâmetros utilizados no processo de fabricação influenciam diretamente nas propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC, como, por exemplo, a pressão de colagem, o espaçamento e a colagem lateral entre as lamelas das camadas transversais, como citado por Wang e Yin (2021). Yawalata e Lam (2011) avaliaram o impacto da pressão de prensagem na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC de três e cinco camadas, fabricados com pressões de 0,1 MPa e 0,4 MPa. Os resultados mostraram que, para todos os casos, a máxima resistência correspondeu aos que foram fabricados com pressão maior. Quanto ao espaçamento lateral, Gardner *et al.* (2020) constataram o aumento do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em relação ao aumento do tamanho da lacuna, para espaços entre 89 mm e 178 mm sendo que, após isso, ocorreu uma queda brusca na propriedade de rigidez, enquanto para a resistência (f_{vt}), quanto maior o tamanho do espaçamento lateral, menor foi resistência ao *rolling shear*, o que também foi constatado por Wang *et al.* (2018a).

Os valores das propriedades relacionadas ao *rolling shear* podem ser obtidos por meio de ensaios experimentais. Para a obtenção de resultados coerentes, o método de ensaio escolhido deve submeter os elementos de madeira a solicitações similares às que ocorrerão ao longo da vida útil das estruturas (EHRHART; BRANDNER, 2018).

2.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ *ROLLING SHEAR*

Esta subseção é referente aos métodos de ensaio presentes na literatura para o estudo das propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez (G_{vt}). Primeiramente, são comentados os métodos de ensaio desenvolvidos para o estudo das propriedades *rolling shear* em corpos de prova constituídos apenas por camada transversal, os quais foram denominados de cisalhamento modificado e em alguns casos, associados a ensaios de flexão. Após isso, são abordados os métodos de ensaio para caracterização estrutural de corpos de prova de MLCC, os quais foram

divididos em ensaios de cisalhamento e de flexão. Por sua vez, os ensaios de cisalhamento foram subdivididos em função do posicionamento dos corpos de prova, em ensaios com o elemento alinhado com a vertical ou inclinado.

2.6.1 Caracterização mecânica de corpos de prova formados apenas por camadas transversais

Esses ensaios foram nomeados como modificado uma vez que foram baseados em métodos de ensaios indicados o estudo do cisalhamento paralelo ou *rolling shear* aplicado em painéis estruturais formados por lâminas como por exemplo, madeira compensada. No entanto, foram feitas alterações nas dimensões e posicionamento dos corpos de prova, como também na orientação das fibras. As BIS EN 408:2010 e ISO 13910:2013 definem o método de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) e o módulo de elasticidade transversal da madeira (G), enquanto a ASTM D 2718:2000 define o método de ensaio *rolling shear* para painéis formados por lâminas.

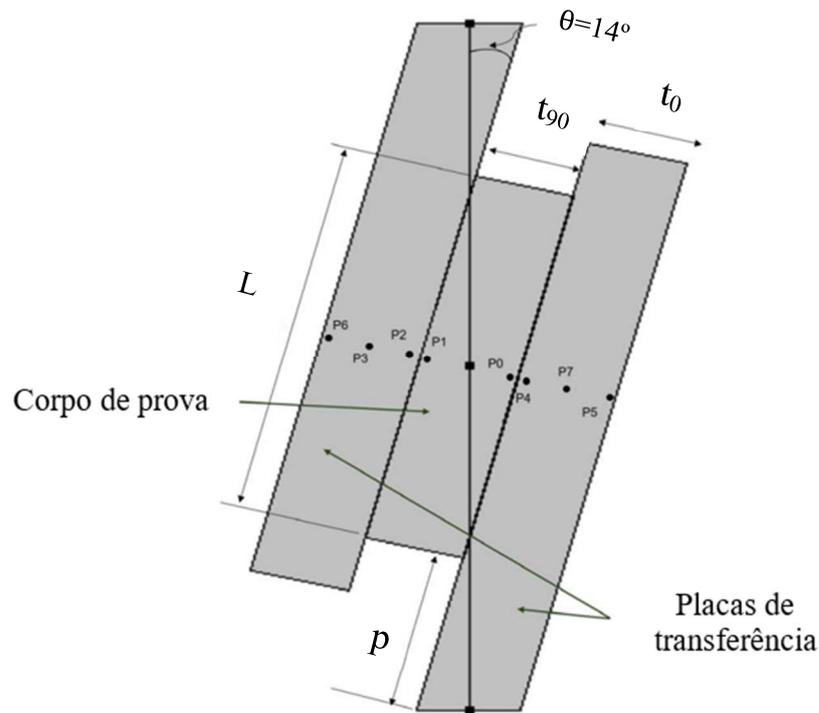
De acordo com Ehrhart e Brandner (2018), esse método de ensaio pode ser considerado como apropriado para o estudo das propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC, apesar da pequena influência das tensões normais na ruptura dos corpos de prova. Além disso, pode ser usado como base para o desenvolvimento de outros métodos, uma vez que possui execução simples, aplicação ampla e versatilidade.

De acordo com Kumar *et al.* (2022), é importante garantir que a linha imaginária entre os pontos de aplicação do par de forças de compressão passe pelo centro geométrico (CG) do corpo de prova e que ele seja aplicado verticalmente. Assim, devem ser evitadas excentricidades de tal modo que o momento gerado seja transferido para a base de apoio e sem o surgimento de forças resultantes horizontais. A inclinação do corpo de prova em relação à vertical também influencia nos resultados dos ensaios sendo que as inclinações sugeridas variam de 3° a 25° (LI *et al.*, 2022a).

As dimensões dos corpos de prova devem ser calculadas em função da inclinação e das espessuras das lamelas e das chapas de transferência. A projeção (p) pode ser calculada conforme Equação (1), em que t_{90} é a espessura da lamela central, t_0 é a espessura da chapa de transferência, L é comprimento do corpo de prova e θ é a inclinação como ilustrado na Figura 23 (KUMAR *et al.*, 2022).

$$p = \frac{t_{90} + t_0 - L \cdot \operatorname{tg} \theta + t_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \theta}{2 \cdot \operatorname{tg} \theta} \quad (1)$$

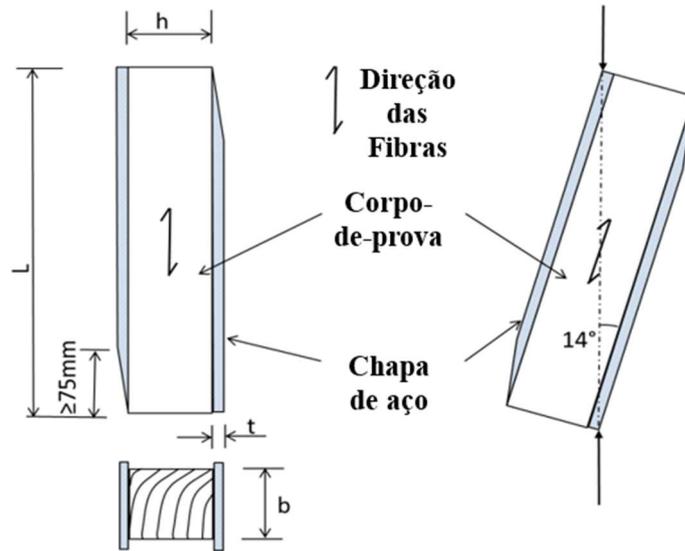
Figura 23-Esquema ilustrativo para o cálculo das dimensões dos corpos de prova conforme Kumar *et al.* (2022)



Fonte: Adaptado de Kumar *et al.* (2022)

No método de ensaio proposto pela BIS EN 408:2010 e ISO 13910:2013, os corpos de prova são posicionados inclinados em 14° em relação à vertical de tal forma que as forças de compressão estejam alinhadas verticalmente e a transferência é feita por meio de chapas de aço de aproximadamente 1 mm, que são coladas lateralmente, conforme Figura 24. As dimensões dos elementos devem ser $h = 55 \pm 1$ mm x $b = 32 \pm 1$ mm x $L = 300 \pm 2$ mm (espessura x largura x comprimento).

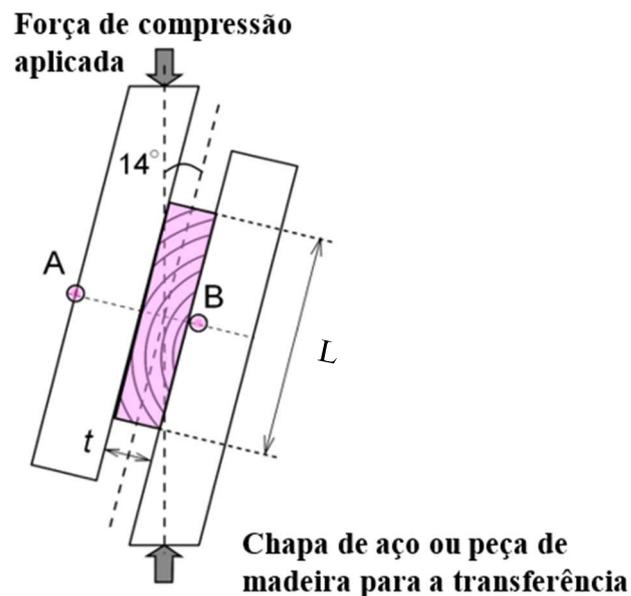
Figura 24-Método de ensaio conforme BIS EN 408:2010 e ISO 1390:2013



Fonte: Adaptado de ISO 13910:2013

Para o estudo das propriedades *rolling shear*, a configuração do ensaio é alterada por meio do posicionamento das fibras, as quais são colocadas perpendicularmente aos esforços de compressão, conforme Figura 25. Desse modo, ocorrerá na região central do corpo de prova tensões de cisalhamento que irão promover o rolamento das fibras em relação umas às outras, ou seja, *rolling shear*. Além do mais, a transferência dos esforços pode ser realizada por meio de chapas de aço ou por cobre juntas de madeiras do tipo folhosas, sendo a ligação colada ou parafusada.

Figura 25-Posicionamento das fibras em ensaios de cisalhamento modificado



Fonte: Adaptado de Ukyo, Shindo e Miyatake (2019)

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), por meio das Equações (2) e (3) (WANG *et al.*, 2018a).

$$f_{vt} = \frac{F_u \cdot \cos \theta}{L \cdot b} \quad (2)$$

$$G_{vt} = \frac{t_{90}}{L \cdot b} \frac{P}{\Delta} \cos \theta \quad (3)$$

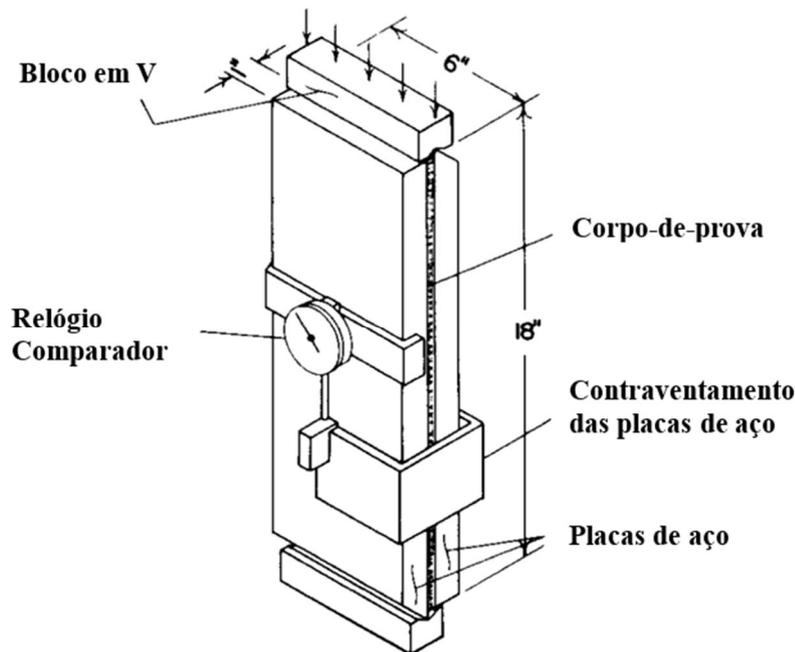
Em que F_u é a força última, t_{90} é a espessura da camada central do corpo de prova, L e b são a largura e o comprimento do corpo de prova e P/Δ = inclinação da curva força x deslocamento no intervalo de 10% e 40% da força última e θ é a inclinação entre as fibras da madeira e a vertical.

De acordo com Ehrhart e Brandner (2018), as propriedades *rolling shear* podem ser determinadas na madeira para fins estruturais, mesmo que os corpos de prova sejam pequenos na dimensão longitudinal, assim como podem ser estudados os fatores que influenciam na resistência última de painéis de MLCC, tais como, os parâmetros de lamelação (γ), as espécies das madeiras e inclinação das fibras da madeira.

Quanto à norma ASTM D 2718:2000, são propostos dois métodos de ensaio: A e B. O método A é um ensaio de cisalhamento plano em que os esforços são transmitidos por meio de duas chapas pontiagudas de metal coladas nas superfícies paralelas dos corpos de prova. O método B é um ensaio de flexão de cinco pontos (LI, 2017).

No método A não é definida uma espessura específica para o corpo de prova sendo citado apenas que o elemento deve ter a espessura do painel. Quanto às outras dimensões, sugere-se que o corpo de prova tenha comprimento de 18" (45 cm) e largura de 6" (15 cm). No entanto, podem ser utilizadas peças menores desde que o comprimento seja maior que 12 vezes a sua espessura e a sua largura seja maior que quatro vezes a sua espessura. O método do ensaio e as dimensões dos corpos de prova são apresentados na Figura 26.

Figura 26-Método de Ensaio conforme ASTM D 2718:2000



Fonte: Adaptado de ASTM D 2718:2002

Os métodos originais foram utilizados com referência para o desenvolvimento de novos métodos de ensaio para a avaliação das propriedades *rolling shear*. Dessa forma, foram feitas variações quanto à inclinação do corpo de prova, quanto ao material utilizado para a transferência dos esforços, podendo ser utilizado tanto chapas de aço como também peças de madeiras folhosas densas, assim como, a ligação entre o corpo de prova e o material de transferência, podendo ser ligação colada ou parafusada.

O método de ensaio de cisalhamento utilizando chapas de aço foi empregado para diversas finalidades, como por exemplo, para o estudo das propriedades *rolling shear* (resistência e módulo de elasticidade transversal) e para a verificação a influência dos padrões dos anéis de crescimento, da geometria da lamela da camada transversal e da disposição das fibras das lamelas entre camadas vizinhas nessas propriedades. Assim sendo, Zhou *et al.* (2014a) realizaram um trabalho baseando-se na ASTM D 2718:2002, com o objetivo de determinar as propriedades *rolling shear* dos corpos de prova. Os esforços foram transmitidos para o corpo de prova por meio de uma chapa de alumínio colada e a aferição do deslocamento relativo entre as chapas foi feito por transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs), conforme Figura 27.

Figura 27-Método de ensaio adotado por Zhou *et al.* (2014a)

(a) Vista Frontal

(b) Vista Lateral

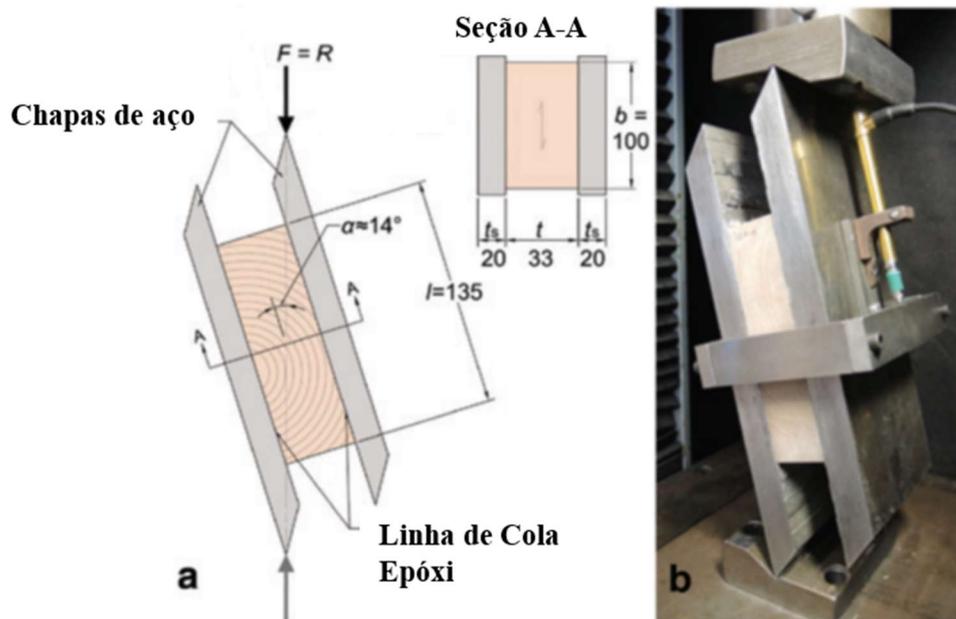
Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2014a)

Os elementos eram de madeira da espécie “*Picea Mariana*”, com seção transversal de 38 mm x 89 mm (espessura x largura). Quanto aos resultados, os valores médios dos valores experimentais foram de 1,09 MPa e 136 MPa para a resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), respectivamente.

No mesmo ano, Zhou *et al.* (2014b) realizaram outro estudo com o objetivo de analisar o impacto da orientação dos anéis de crescimento. Para isso, foram realizados ensaios de cisalhamento, utilizando um método semelhante ao estudo anterior, em amostras com três padrões diferentes de orientação dos anéis. Os resultados experimentais mostraram que a orientação dos anéis impacta significante no módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), mas, no entanto, não possui o mesmo efeito quanto à resistência. Dessa forma, sugeriram que fossem utilizadas lamelas com porção maior dos anéis de crescimento dispostos a 45° para aumentar o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Os resultados experimentais tiveram valores máximos para resistência (f_{vt}) e módulo (G_{vt}) de 2,13 MPa e 89 MPa, respectivamente.

Com o mesmo objetivo do trabalho anterior, Aicher, Christian e Hirsch (2016b) realizaram ensaios experimentais em corpos de prova de madeira da espécie “*Fagus sylvatica*”, utilizando-se quatro diferentes padrões dos anéis de crescimento para as amostras. As amostras foram fabricadas mais largas do que o estipulado pela BIS EN 408:2010, com dimensões de 100 x 135 x 33 mm (comprimento x largura x espessura) e chapas de aço mais espessas (espessura de 20 mm) conforme Figura 28a, e coladas com adesivo epóxi. A medição dos deslocamentos relativos foi feita por LVDTs, conforme Figura 28b.

Figura 28-Método de ensaio desenvolvido por Aicher, Christian e Hirsch (2016) em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real



Dimensões em milímetros (mm)

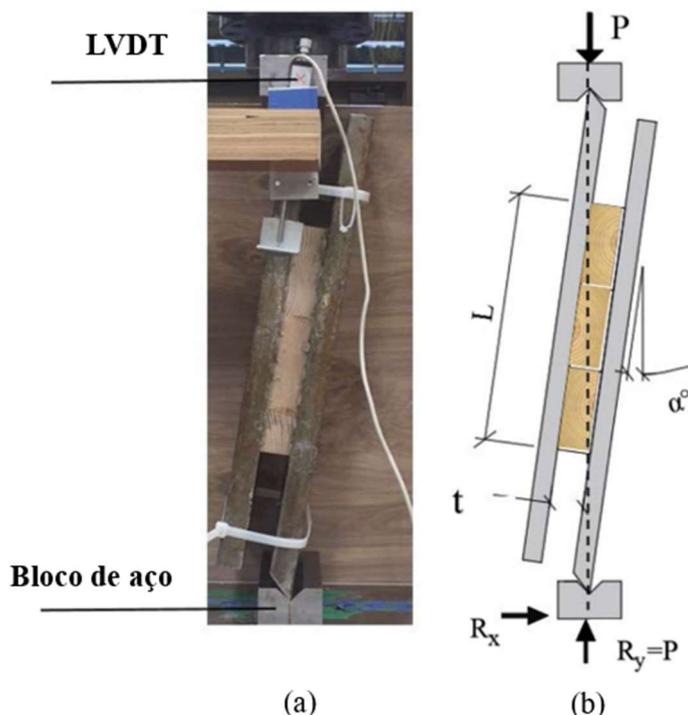
Fonte: Adaptado de Aicher, Christian e Hirsch (2016b)

A resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram de 4,5 MPa e 370 MPa, respectivamente. As amostras com diferentes direções dos anéis de crescimento apresentaram variação para o módulo de elasticidade transversal em torno de 30% e redução de resistência em para aquelas que continham tecido medular.

Bahmanzad *et al.* (2020) estudaram como a variação da orientação das fibras entre camadas adjacentes afeta as propriedades de cisalhamento da madeira. Para isso, os corpos de prova foram fabricados com a orientação das fibras entre camadas iguais a 0°, 30°, 45°, 60° e 90°. As dimensões finais dos elementos foram 33 mm x 119 mm x 237 mm (espessura x largura x comprimento). A Figura 29 ilustra o método de ensaio, o qual foi baseado na ASTM D

2718:2002. No entanto, a inclinação entre a direção de aplicação da força de compressão e a linha de cola foi adotada igual a 8° .

Figura 29-Método de ensaio realizado por Bahmanzad *et al.* (2020) em (a) Ensaio real e (b) Esquema do ensaio



Fonte: Adaptado de Bahmanzad *et al.* (2020)

Em relação aos resultados experimentais, a resistência (f_{vt}) ao cisalhamento das amostras com as camadas transversais com as fibras inclinadas em 30° e 45° em relação às camadas adjacentes foram 98% e 59% maiores do que aqueles com camadas transversais posicionadas a 90° em relação às camadas adjacentes, indicando que o comportamento quanto ao cisalhamento pode ser melhorado de acordo com a inclinação das fibras das lamelas transversais. Além de que, quanto ao módulo de elasticidade (G_{vt}), houve um aumento progressivo dos valores quando a inclinação das fibras diminuiu em relação à vertical.

De acordo com Nero, Christopher e Ngo (2022), os métodos de ensaio que utilizam a chapa de aço colada apresentam algumas desvantagens como maior tempo de preparação, por causa do tempo de cura do adesivo, assim como a limitação do número de exemplares devido à necessidade de fabricação dos pares das chapas de aço e o uso de maior estrutura de fabricação dos exemplares, como uso de prensa e local para estocagem. Assim, foram feitas algumas modificações, como por exemplo, utilizar peças de madeira folhosas coladas lateralmente aos corpos de prova a fim de realizar a transferência dos esforços por ligação colada. Tal método

foi utilizado para avaliar a influência nas propriedades *rolling shear* quanto à geometria dos anéis de crescimento, a presença de nós e tecido medular, além da geometria das lamelas internas transversais (parâmetro de lamelação).

Wang *et al.* (2018b) avaliaram a influência da orientação dos anéis de crescimento, distância em relação à medula e a presença de medula em painéis feitos de madeira da espécie “*Populus deltoides*”. Os corpos de prova foram divididos em sete grupos de acordo com cada objetivo de estudo do trabalho. Os grupos A, B e C foram cortados de um único tronco com a mesma distância em relação à medula e usados para avaliar os efeitos da orientação dos anéis. Com a finalidade de investigar o efeito da distância em relação à medula, os grupos D, E e F foram feitos com o mesmo padrão dos anéis de crescimento e, no entanto, com diferentes distâncias em relação à medula. Para o estudo do impacto da presença da medula, o grupo G foi feito com peças que continham o tecido medular. No total, foram feitos dez elementos para cada grupo, totalizando 70 amostras. Nos ensaios experimentais foram utilizados elementos com dimensões de 20 mm x 90 mm x 89 mm (espessura x largura x comprimento) e o método de ensaio foi baseado na BIS EN 408:2010, em que foram utilizados dois LVDTs em ambos os lados da peça para medir o deslocamento relativo entre as camadas externas, como ilustrado na Figura 30.

Figura 30-Método de ensaio desenvolvido por Wang *et al.* (2018a) em (a) Esquema do ensaio e (b) Ensaio real



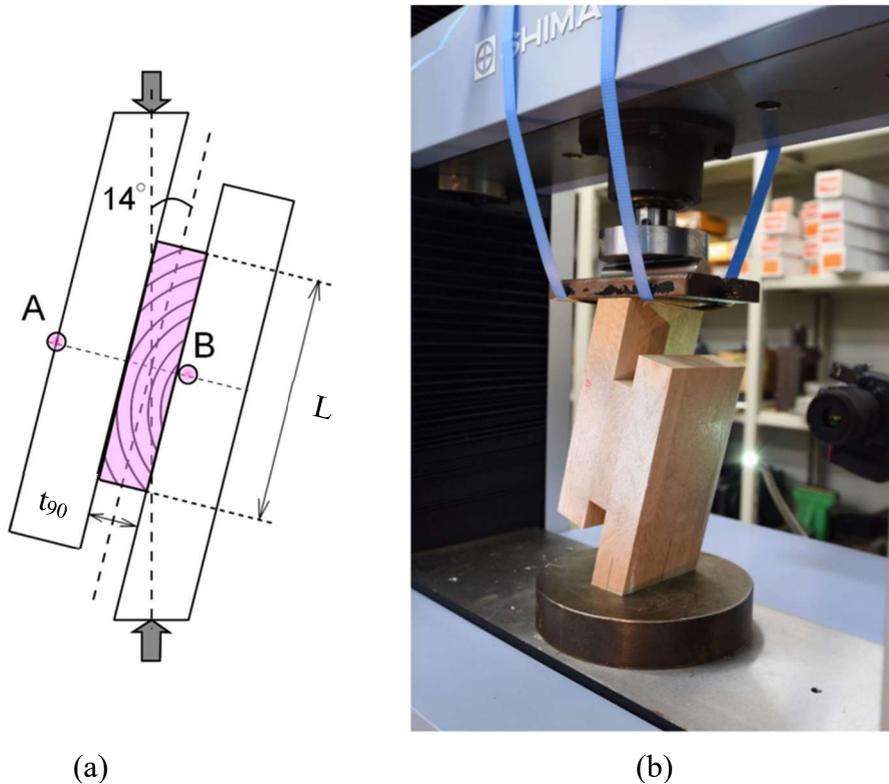
Fonte: Wang *et al.* (2018b)

Após a realização dos ensaios, concluiu-se que a presença de tecido medular influenciou significativamente, uma vez que os corpos de prova do grupo G tiveram o menor valor quanto à resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Comparando-se os valores médios do Grupo G com os Grupos D, E e F, ocorreu que os do do grupo G foram aproximadamente 60% menores do que os valores dos outros três. Esse comportamento já era esperado, uma vez que o tecido medular possui baixa densidade e pode estar fissurado. Quanto ao impacto da distância em relação à medula, observou-se que as propriedades *rolling shear* melhoram com o aumento da distância em relação à medula, as amostras do Grupo F tiveram resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) 2% e 16%, 3,2% e 8,6% maiores do que o grupo E e o grupo D, respectivamente. De acordo com os autores, isso ocorre porque os grupos D e E são mais próximos à medula e possuem densidade menor e parede celular mais fina.

A influência da orientação dos anéis de crescimento foi estudada por meio de comparação dos grupos A, B e C. Se constatou que a influência de acordo com o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) e a resistência *ao rolling shear* (f_{vt}) foi diferente, uma vez que os Grupos B e C tiveram o maior e menor módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) enquanto o Grupo C e o grupo A tiveram a maior e a menor resistência (f_{vt}) *ao rolling shear*. Os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) foram de 177 MPa com variação entre 78 e 330 MPa e a resistência (f_{vt}) média foi de 3,06 MPa, com variação entre 1,06 MPa e 4,08 MPa. Tais valores foram entre 1,6 e 2,5 vezes maiores do que os valores obtidos na literatura para as espécies do grupo “*spruce-pine-fir*” (SPF) (WANG *et al.*, 2018b).

Ukyo, Shindo e Miyatake (2019) avaliaram o impacto da configuração dos anéis de crescimento e do parâmetro de lamelação. Para isso, foram fabricados corpos de prova de lamelas de três diferentes larguras (62 mm, 88 mm e 112 mm), espessura constante de 24 mm e comprimento constante de 100 mm. Os exemplares foram submetidos a ensaios experimentais de cisalhamento no plano, similar ao proposto pela BIS EN 408:2010. No entanto, as chapas de aço foram substituídas por peças de madeira folhosa planificadas com espessura de 24 mm, para melhorar a colagem, e com extremidades cortadas de tal forma que a inclinação entre as fibras e a vertical fosse de 14°, conforme Figura 31, e a medição do deslocamento relativo entre os pontos A e B foi feita por meio de correlação de imagens digitais (DIC).

Figura 31-Método de ensaio desenvolvido por Ukyo, Shindo e Miyatake (2019) (a) Esquema de Ensaio (b) Ensaio Real

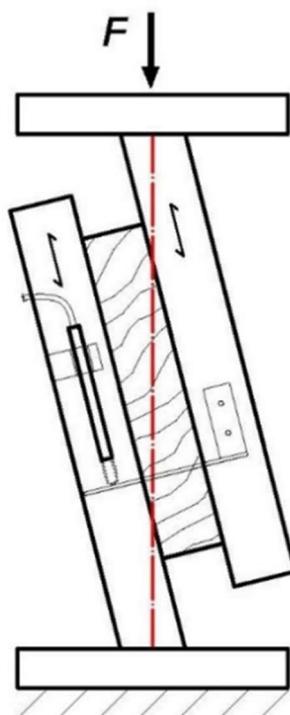


Fonte: Ukyo, Shindo e Miyatake (2019)

Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram de 72, 91 e 109 MPa e as resistências médias (f_{vt}) foram de 1,54; 1,83 e 2,02 MPa para os exemplares com larguras de 62, 88 e 112 mm, respectivamente. Dessa forma, quanto ao parâmetro de lamelação, as propriedades *rolling shear* foram maiores de acordo com o seu aumento. Quanto ao padrão dos anéis de crescimento, constataram que as propriedades *rolling shear* diminuíram com o aumento da distância da lamela à medula do tronco da árvore (UKYO; SHINDO; MIYATAKE, 2019).

Wu, Zhong e Ren (2021) estudaram o impacto da inclinação das fibras e os parâmetros de lamelação (γ) em peças de madeira da espécie “*spruce-pine-fir*”, por meio de ensaios experimentais. Então, foram fabricadas amostras com diferentes padrões de anéis, variando-se a inclinação dos anéis entre 0° e 90° e três diferentes parâmetros de lamelação (2,54; 4 e 5,26). O método de ensaio escolhido foi baseado na BIS EN 408:2010, no entanto, foi adotada uma inclinação de 17° , entre a vertical e o corpo de prova. Para a medição do deslocamento relativo entre as duas camadas externas, foram instalados LVDTs nas lamelas externas, utilizando-se fixadores especiais, conforme Figura 32.

Figura 32-Método de ensaio usado por Wu, Zhong e Ren (2021)



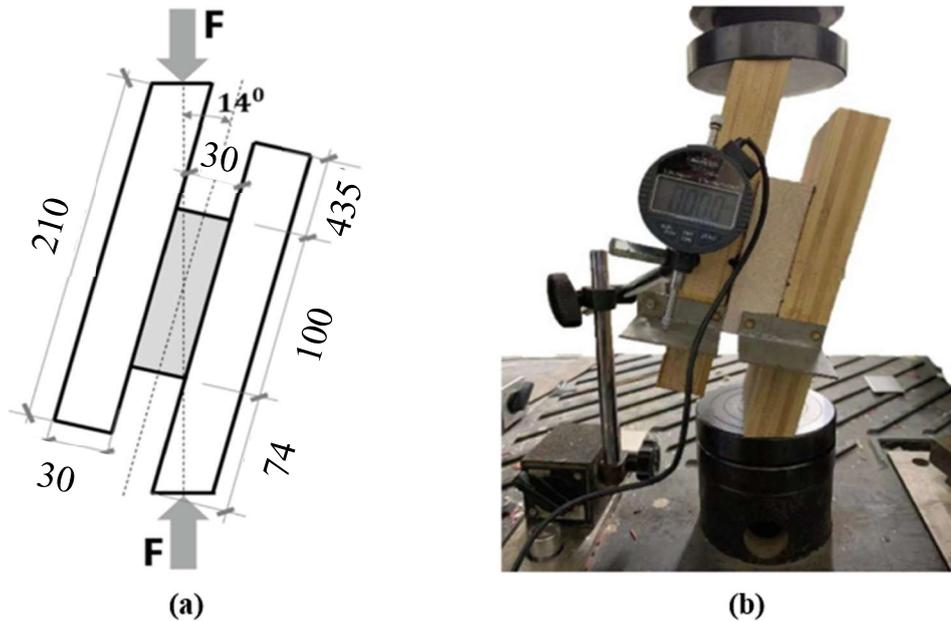
Fonte: Wu, Zhong e Ren (2021)

Os resultados experimentais apresentaram valor médio do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) de todos os corpos de prova igual a 93,9 MPa e da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) igual a 1,52 MPa. Os módulos de elasticidade transversal obtidos pelos corpos de prova com inclinação dos anéis igual a 0° e 90° foram os mesmos e máximos. Dessa forma, concluíram que o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) depende da inclinação das fibras e dos parâmetros de lamelação (γ) e que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) aumentou de acordo com o parâmetro de lamelação (γ), uma vez que quanto mais larga a lamela, menor a concentração de tensões (WU; ZHONG; REN, 2021).

Wang *et al.* (2021) estudaram as propriedades *rolling shear* de painéis mistos feitos com madeira e bambu, por meio de dois métodos de ensaio: cisalhamento e flexão com pequenos vãos. Para a realização dos ensaios experimentais, foram fabricadas amostras com espessura da lamela transversal de 30 mm e largura de 100 mm, resultando-se no parâmetro de lamelação (γ) de 3,33. Para a fabricação dos painéis de MLCC, utilizaram adesivo à base de fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), com gramatura de 200 g/m², os quais foram prensados de forma fria em uma máquina com pressão de 0,2 MPa por mais de quatro horas. Utilizaram ensaio de cisalhamento semelhante ao citado na BIS EN 408:2010 e ISO 13910:2013, sendo que a transferência dos esforços foi feita por meio de peças de painéis feitos com bambu e a lamela interna foi feita com madeira da espécie “*Ochroma pyramidale*”. As extremidades das peças

externas foram cortadas de tal modo que o ângulo entre a vertical e a amostra foi de 14° , conforme ilustrado na Figura 33a, e os deslocamentos relativos foram medidos por relógios comparadores fixados em base magnética, conforme Figura 33b, e por meio de correlação de imagens digitais (DIC).

Figura 33-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por WANG *et al.* (2021) em (a) Esquema do Ensaio e (b) Ensaio Real

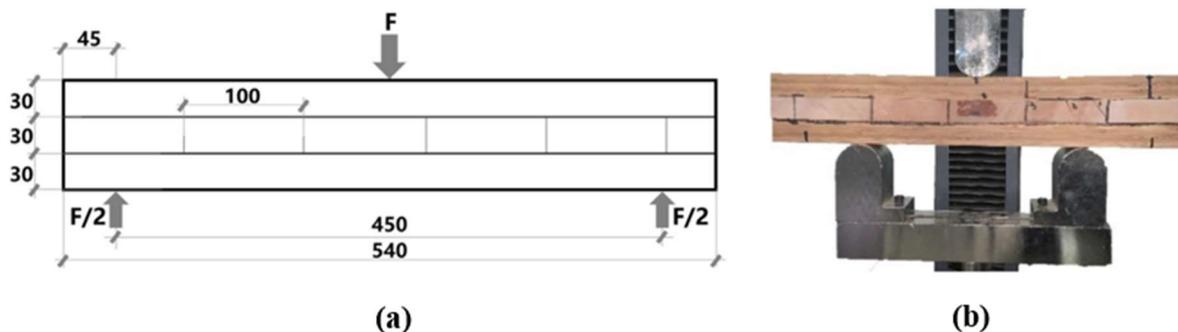


Unidades em milímetros (mm)

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

Wang *et al.* (2021) também realizaram ensaios de flexão de três pontos, de acordo com ASTM D 2344:2016, em cinco corpos de prova de MLCC, cujas dimensões da seção transversal do painel foram de 50 mm x 90 mm (largura x espessura). A proporção entre vão/altura entre apoios foi igual a cinco. As outras dimensões e o método de ensaio de flexão adotado são ilustrados na Figura 34.

Figura 34-Ensaio de flexão de três pontos realizados por Wang *et al.* (2021) em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real



Unidades em milímetros (mm)

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

De acordo com Wang *et al.* (2021), os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* da lamela interna obtidos no ensaio de cisalhamento com medição dos deslocamentos por relógios comparadores e por correlação de imagens digitais foram relativamente próximos devido ao módulo de elasticidade das fibras do bambu na direção longitudinal ser bem maior do que os da madeira no plano longitudinal-radial (LR). O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi de 43 MPa e 48 MPa para os ensaios de cisalhamento com medição dos deslocamentos por relógios comparadores e por correlação de imagens digitais, respectivamente. A resistência média (f_{vt}) obtida por ensaio de cisalhamento foi de 0,96 MPa e pelo ensaio de flexão em pequenos vãos de 2,50 MPa.

De acordo com a revisão bibliográfica, notou-se que foram utilizados vários parâmetros diferentes quanto ao processo de fabricação do corpo de prova e ao método de ensaio empregado. Para a fabricação das amostras foram usadas principalmente madeiras de espécies coníferas com densidade entre 149 e 685 kg/m³, dimensões e tipos de adesivos variados com tensão de prensagem entre 0,6 e 1,0 MPa e gramatura entre 150 e 319 g/m². Os ensaios experimentais apresentados utilizaram três diferentes métodos de medição de deslocamento (relógios comparadores, LVDTs e correlação de imagens digitais), inclinação do corpo de prova variando entre 8° e 17°, sendo que a maioria dos trabalhos mantiveram a inclinação de 14°, e a ligação entre as peças de transferência dos esforços e os corpos de prova foi colada. As resistências médias (f_{vt}) obtidas variaram entre 0,96 e 6,60 MPa, enquanto os módulos de elasticidade transversal médios *rolling shear* (G_{vt}) oscilaram entre 43 e 398 MPa.

2.6.2 Caracterização mecânica de corpos de prova de MLCC

Os métodos de ensaio para a caracterização da MLCC são aqueles que utilizam a peça em tamanho real como também corpos de prova retirados dessas peças e que sejam representativos do sistema real, os quais podem ser divididos em ensaios de flexão e ensaios de cisalhamento. Os ensaios de cisalhamento ainda podem ser subdivididos quanto a posição do elemento em relação à vertical, sendo que foram encontrados estudos que utilizaram os elementos dispostos verticalmente e inclinadamente.

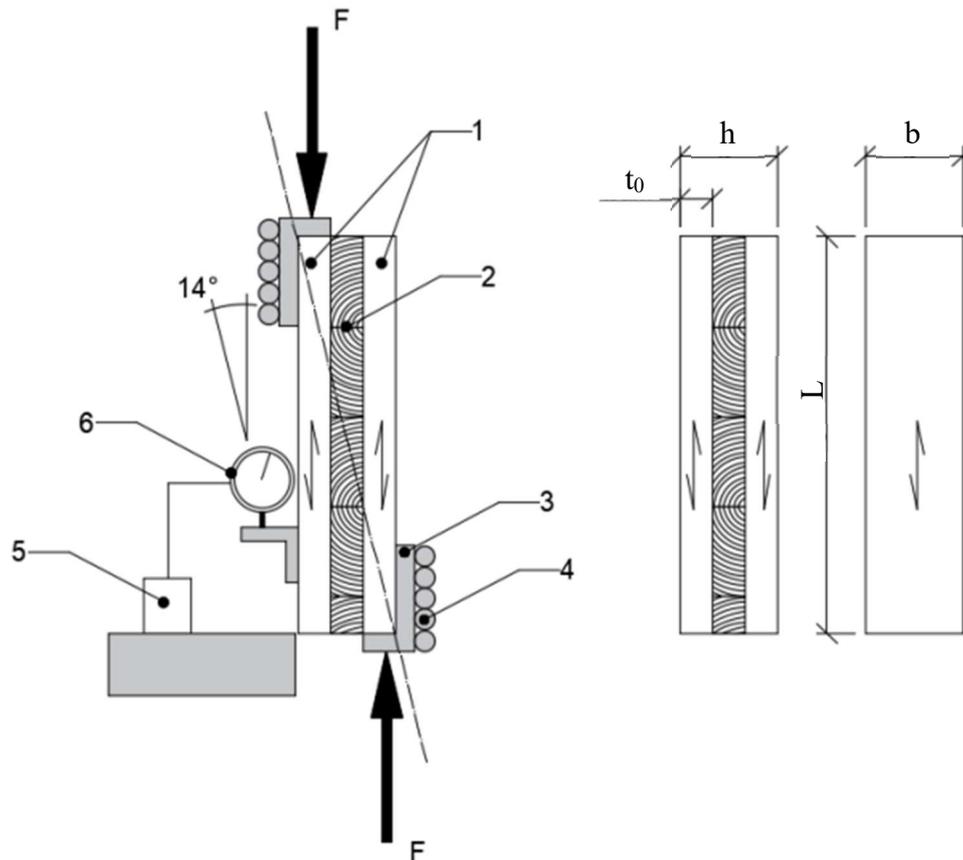
2.6.2.1 Ensaios de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento são aqueles realizados em corpos de prova retirados de painéis de MLCC com carregamento paralelo ao plano do elemento. Estes ensaios são baseados na BIS EN 16351:2021, que serviu como referência para ABNT NBR 7190-7:2022, e BIS EN 408:2010. O método de ensaio é capaz de reproduzir o mesmo estado de tensões que ocorre nas lamelas transversais quando o painel de MLCC é submetido à flexão. Outra vantagem, é que pode ser utilizado para estudar a influência de diversos parâmetros, como por exemplo, da espécie de madeira, da geometria da lamela, da orientação dos anéis de crescimento e do ângulo de inclinação. No entanto, devido à excentricidade horizontal entre os pontos de aplicação das forças, ocorre o surgimento de um momento, o qual é contrabalanceado por forças horizontais em ambos os lados dos corpos de prova, resultando em tensões normais perpendiculares às fibras do elemento ensaiado, o que pode ser considerado como uma deficiência desse método. Além de que, embora esta configuração de ensaio seja bastante parecida com a proposta por BIS EN 408:2010, tem-se que sua execução é mais difícil, exigindo maiores esforços na preparação do ensaio (EHRHART; BRANDNER, 2018).

De acordo com ABNT NBR 7190-7:2022, o método de ensaio de cisalhamento, o qual é indicado como alternativo, consiste em aplicar forças de compressão em corpos de prova posicionados verticalmente, conforme Figura 35, de modo que a inclinação entre a direção paralela às fibras e a vertical seja igual a 14° . Assim, é necessária atenção especial ao comprimento do elemento, que deve ser calculado de acordo com a espessura (h), a fim de se

garantir a correta inclinação, sendo que a largura das amostras (b) deve ser de pelo menos 100 mm (BIS EN 16351:2021).

Figura 35-Ensaio de cisalhamento conforme ABNT NBR 7190-7:2022



Legenda:

- 1 - Camadas longitudinais
- 2 - Camadas transversais
- 3 - Chapas de aço para transmissão dos esforços
- 4 - Suporte livre de atrito
- 5 - Base magnética
- 6 - Relógio comparador ou LVDT

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-7:2022

O módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) e resistência (f_{vt}) ao *rolling shear* devem ser calculados de acordo com as Equações (4) e (5), conforme ABNT NBR 7190-7:2022.

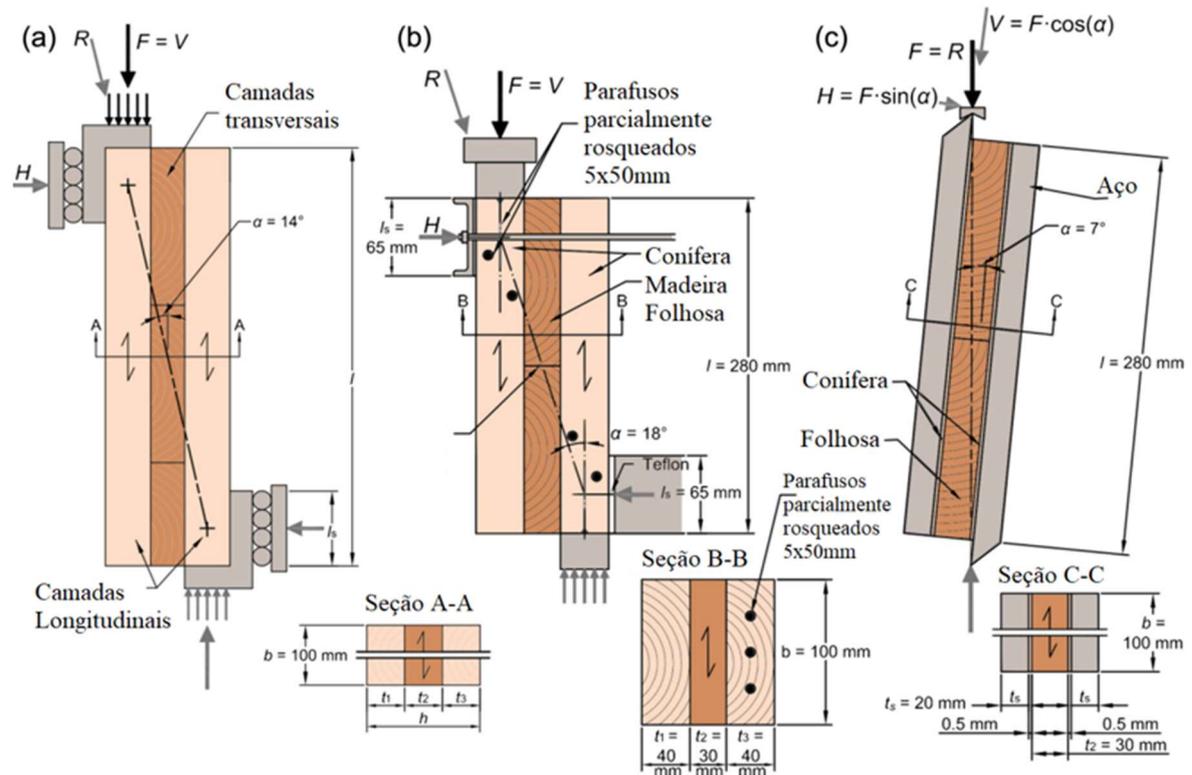
$$f_{vt} = \frac{F_u}{L \cdot b} \quad (4)$$

$$G_{vt} = \frac{t_{90} P}{L \cdot b \Delta} \quad (5)$$

Em que F_u é a força última, t_{90} é a espessura da camada central do corpo de prova, L e b são comprimento e a largura do corpo de prova e P/Δ = inclinação da curva força x deslocamento no intervalo de 10% e 40% da força última.

Aicher, Hirsch e Christian (2016a) estudaram painéis híbridos compostos por três camadas, em que as externas foram feitas de madeira da espécie “*Picea abies*” e a camada interna feita de “*Fagus sylvatica*”. As propriedades *rolling shear* foram determinadas por meio de ensaios de cisalhamento, que foram realizados de acordo com a BIS EN 16351:2015. No entanto, os ensaios de cisalhamento sofreram algumas modificações e foram divididos em tipo A e B. No ensaio tipo A, foi feita a redução do comprimento do corpo de prova e a colocação de parafusos paralelos às fibras das camadas externas a fim de se evitar ruptura dúctil por compressão. Adicionalmente, foram colocados dois parafusos perpendiculares para prevenir a separação das lamelas devido aos parafusos longitudinais, funcionando como um contraventamento. O ângulo entre a linha imaginária que uniu os pontos de aplicação das forças e a vertical foi de 18°, conforme Figura 36b. No ensaio tipo B, foi mantido o comprimento do corpo de prova do Ensaio A. No entanto, a inclinação foi de 7° e as camadas externas foram lixadas de tal forma que restasse apenas uma fina camada de um a dois milímetros, conforme Figura 36c. Em ambos os casos, a força de compressão foi aplicada nas chapas coladas nas lamelas externas aos elementos e a transferência dos esforços para a peça interna ocorreu pela linha de cola.

Figura 36-Métodos de ensaio desenvolvidos por Aicher, Hirsch e Christian (2016a) (a) Proposto pela BIS EN 16351:2015 (B) Ensaio tipo A (c) Ensaio tipo B



Fonte: Adaptado de Aicher, Hirsch e Christian (2016a)

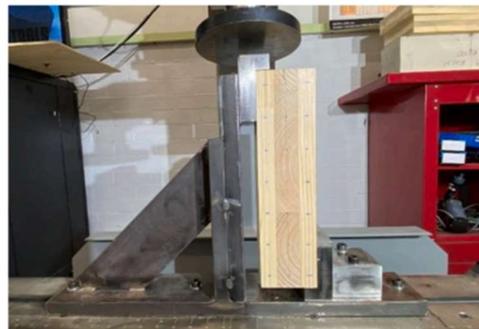
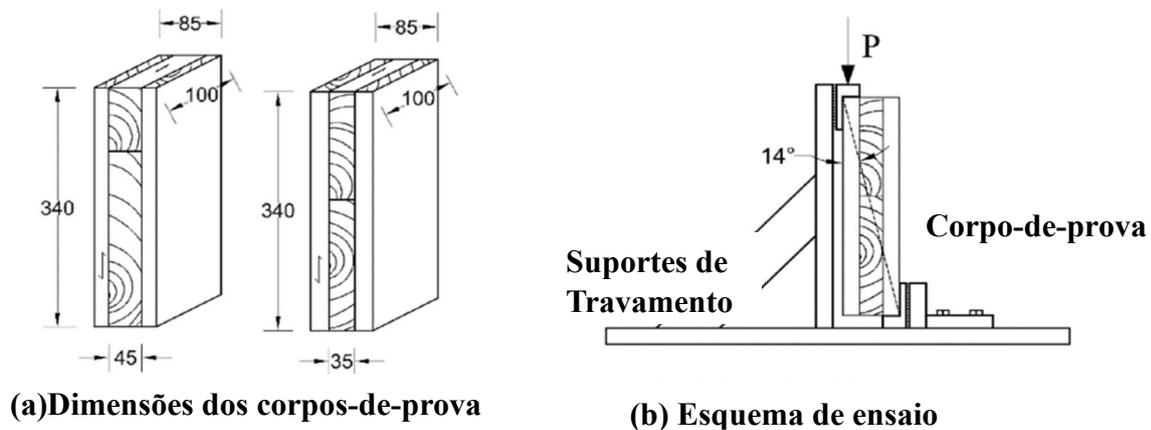
Os valores médios da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) medidos por meio dos ensaios de flexão e ensaio tipo A foram bem próximos e iguais a 3,30 MPa. Em comparação ao ensaio B, os resultados foram aproximadamente de 30 a 50% maiores devido ao fato da penetração do adesivo e a camada externa mais fina prevenir a ruptura por cisalhamento na interface das camadas. Por fim, concluiu-se que ambos os métodos de ensaio foram adequados para o estudo das propriedades *rolling shear*, sendo que os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento foram de 10% a 20% maiores do que os resultados dos de flexão. Constatou-se também que os painéis híbridos de madeiras coníferas e folhosas são bastante interessantes, mesmo quando a peça lateral de madeira folhosa é de baixa densidade. Tal composição acarreta um leve aumento no custo de produção dos painéis. No entanto, esse custo é compensado pela maior resistência mecânica (AICHER; HIRSCH; CHRISTIAN, 2016a).

Li *et al.* (2021) também utilizaram esse método de ensaio, juntamente com ensaios de flexão, para estudar as propriedades *rolling shear* de painéis feitos com “*Pinus Radiata*” Australiano, em painéis de três camadas, com duas espessuras diferentes de lamela (35 e 45 mm), ambos de acordo com BIS EN 16351:2018.

Os ensaios experimentais de cisalhamento utilizaram 12 corpos de prova retirados de painéis com dimensões de 340 mm x 85 mm x 100 mm (comprimento x espessura x largura), conforme Figura 37a. Todos os elementos utilizados no trabalho foram retirados do mesmo lote, dos quais, para o ensaio de cisalhamento, seis foram retirados do painel de MLCC com 105 mm de espessura e outros seis foram retirados do painel com 135 mm de espessura. Quanto ao método do ensaio, as amostras foram colocadas em suportes de travamento em L, como ilustrado na Figura 37b.

Figura 37-Dimensões dos corpos de prova em mm e método de ensaio adotado por Li *et al.* (2021)

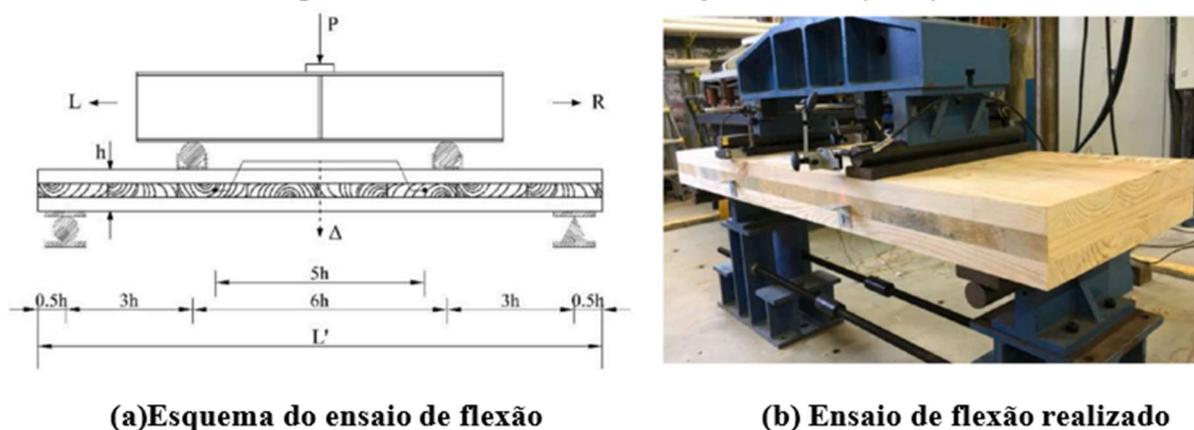
Unidades em milímetros



(c) Ensaio real

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2021)

Os ensaios de flexão de quatro pontos foram feitos em seis painéis, sendo três exemplares de cada espessura (105 mm e 135 mm), com largura de 600 mm e comprimentos de 1400 mm e 1800 mm, respectivamente. O método de ensaio e os pontos de posicionamento dos transdutores são ilustrados na Figura 38.

Figura 38-Ensaio de flexão adotado por Li *et al.* (2021)

(a) Esquema do ensaio de flexão

(b) Ensaio de flexão realizado

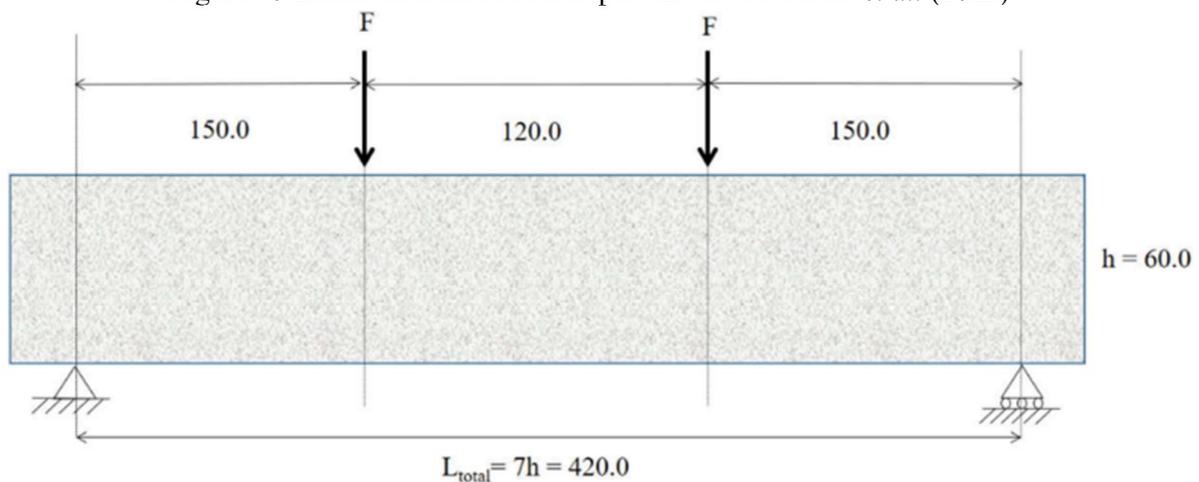
Fonte: Li *et al.* (2021)

Quanto aos resultados obtidos, a resistência (f_{vt}) característica ao *rolling shear*, nos ensaios de flexão, foi de 2,03 e 1,99 MPa para os painéis de 105 mm e 135 mm de espessura, respectivamente, mostrando-se uma tendência em que os painéis com menor espessura tiveram resistência maior. Nos ensaios de cisalhamento plano, semelhantemente aos ensaios de flexão, os painéis de menor espessura tiveram maior resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), sendo que, para painéis com 105 mm de espessura, a característica foi de 2,37 MPa e para os painéis com 135 mm de espessura, a foi de 1,80 MPa. Dessa forma, concluíram que o ensaio de flexão pode superestimar a resistência (f_{vt}) e que o ensaio de cisalhamento foi mais adequado para a determinação dessa propriedade, mas no entanto, a sua execução foi mais difícil (LI *et al.*, 2021).

Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022) estudaram várias propriedades mecânicas de painéis de MLCC com três camadas fabricados com madeira da espécie “*Picea abies*”, dentre elas as propriedades *rolling shear*, as quais foram analisadas por meio de ensaios experimentais de cisalhamento plano e flexão conforme BIS EN 16351:2018. No ensaio de cisalhamento, foram utilizados oito corpos de prova com dimensões de 240 mm x 100 mm x 60 mm (comprimento x largura x espessura). Para a realização dos ensaios, as amostras foram posicionadas em suportes com chapas de Teflon e as forças aplicadas com o deslocamento vertical controlado em uma taxa de 0,48 mm/min. O método de ensaio é ilustrado na Figura 39.

Figura 39-Método de ensaio usado por Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022)Fonte: Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022)

No ensaio de flexão de quatro pontos, foram utilizados corpos de prova de 525 mm x 200 mm x 60 mm (comprimento, largura, altura), e durante a realização do ensaio foi mantida a distância entre os apoios igual sete vezes a altura do elemento, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40-Ensaio de flexão adotado por Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022)Fonte: Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022)

A resistência proveniente do ensaio de flexão (f_{vt}) foi bem maior do que a obtida pelo ensaio de cisalhamento plano, que foi de 1,29 MPa, a qual foi 48,19% menor do que a calculada pelo Método Gama e 55,97% menor do que a obtida pela Analogia de Cisalhamento. Dessa forma, concluíram que ambos os ensaios podem ser utilizados para determinar a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis, mas, no entanto, os ensaios de flexão podem gerar valores errôneos, principalmente nos casos em que o corpo de prova possui um modo de ruptura diferente do que a ruptura por *rolling shear*, como por exemplo, por separação das camadas na linha de cola ou por tração. Assim sendo, concluíram que o método de ensaio de cisalhamento e de flexão produziram valores confiáveis de resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}).

Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022) e Li *et al.* (2021) concluíram também que ensaios de flexão superestimaram os valores, sendo que o ensaio de cisalhamento foi mais adequado. No entanto, Aicher, Hirsch e Christian (2016a) obtiveram resultados e conclusões diferentes, uma vez que o ensaio de cisalhamento foi o que resultou em maiores valores de resistência (f_{vt}).

De acordo com os estudos apresentados para os ensaios de cisalhamento reto, observou-se que foram usadas madeiras coníferas com densidades próximas à 500 kg/m³, amostras com dimensões variadas e que os resultados obtidos de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variaram entre 1,80 MPa e 3,30 MPa, sendo que esse método de ensaio não foi usado para determinação módulo de elasticidade transversal *rolling shear*.

O ensaio de cisalhamento em painéis de MLCC também pode ser realizado com o corpo de prova inclinado em relação à vertical. Esse método de ensaio não possui norma específica, sendo que os autores que o utilizaram adotaram uma combinação das normas europeias BIS EN 408:2010 e BIS EN 16351:2018, ou da neozelandesa AS NZS 2269.1:2012, como referência.

De acordo com Nero, Christopher e Ngo (2022), esse método de ensaio é mais simples e rápido de ser realizado, uma vez que para a preparação dos corpos de prova não há o tempo de cura do adesivo, sendo necessário apenas uma serra. No entanto, caso sejam usadas chapas de aço, eles são mais demorados, uma vez que é preciso esperar o tempo de cura do adesivo. Os ensaios de cisalhamento apresentam como vantagem a questão de que as amostras são menores, tornando a realização do ensaio mais rápida e prática. Apesar de que, ele se torna mais caro quando é preciso que os elementos sejam fabricados, ao invés de serem retirados de painéis de MLCC.

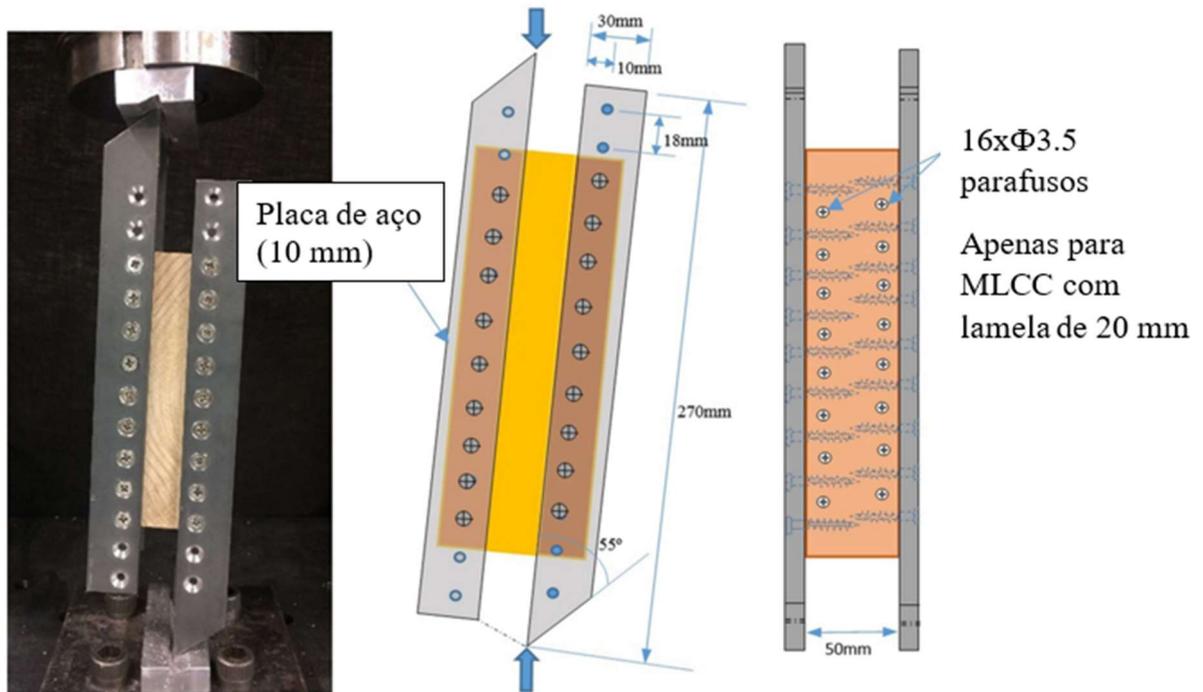
Ele foi utilizado em pesquisas com diferentes finalidades, como por exemplo, para avaliar a influência nas propriedades *rolling shear* de acordo com a geometria dos anéis de crescimento, a geometria das lamelas internas transversais (parâmetro de lamelação), a

influência da colagem e do espaçamento lateral entre as lamelas da camada transversal. Ainda, também foi utilizado para avaliar as propriedades *rolling shear* de espécies de madeira e de novos materiais como camadas transversais em painéis e foram feitos alguns trabalhos relacionados ao entendimento do modo de ruptura por *rolling shear*. Em alguns casos, tal método de ensaio foi associado a outros ensaios, como por exemplo, com os ensaios de flexão de três e a quatro pontos.

Li (2017) realizou um estudo experimental das propriedades *rolling shear* de painéis feito de “*Pinus Radiata*” neozelandês, por meio de ensaios de flexão de três pontos e ensaios de cisalhamento. Para a execução dos ensaios, os corpos de prova foram retirados de painéis de MLCC, os quais tinham lamelas de 35 mm e 20 mm de espessura, com o objetivo de se avaliar a influência da espessura das lamelas na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}). Sendo que lamelas das camadas externas do painel eram de madeira com classificação SG8 ($E_0 = 8.000$ MPa) e as internas com classificação SG6 ($E_0 = 6.000$ MPa). As amostras, para o ensaio de cisalhamento com espessura da lamela de 20 mm, tiveram dimensões de 165 mm x 50 mm x 60 mm (comprimento x largura x espessura) e com espessura da lamela de 35 mm, com dimensões de 165 mm x 50 mm x 105 mm (comprimento x largura x espessura). Em relação ao ensaio de flexão, as peças com espessura da lamela de 20 mm tinham dimensões de 420 mm x 50 mm x 60 mm (comprimento x largura x altura) e com espessura da lamela de 35 mm, com dimensões de 735 mm x 50 mm x 150 mm (comprimento x largura x altura). Para cada um dos ensaios, foram retirados dez elementos de cada painel, totalizando 30 exemplares.

Esses ensaios de cisalhamento foram feitos de acordo com AS NZS 2269.1:2012 mediante algumas adaptações, como por exemplo, a espessura da placa de aço foi aumentada e a transferência dos esforços da placa para a madeira foi feita por conexões parafusadas. Devido à relativa esbeltez da lamela de 20 mm, foi adicionada uma linha de parafusos de aço na face das camadas, entre os parafusos, perpendicularmente às fibras para eliminar fissuras causadas próximas às ligações parafusadas submetidas a altas tensões de cisalhamento, como ilustrado na Figura 41.

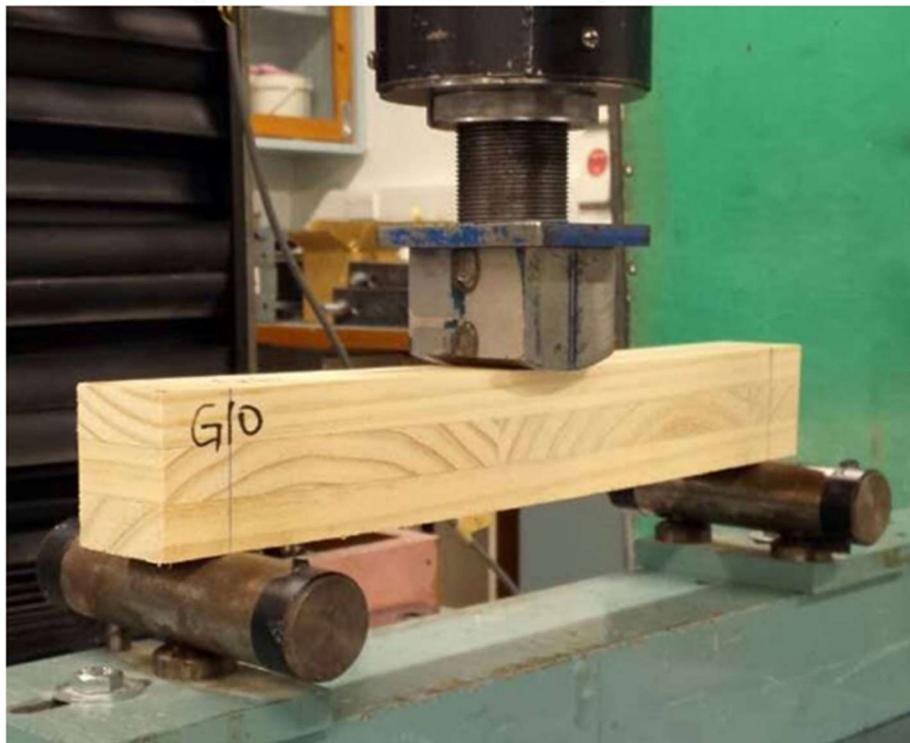
Figura 41-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por Li (2017)



Fonte: Adaptado de Li (2017)

Os ensaios de flexão realizados por Li (2017) foram feitos a três pontos e com um vão entre apoios igual a 6 vezes a altura do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42-Ensaio de flexão adotado por Li (2017)

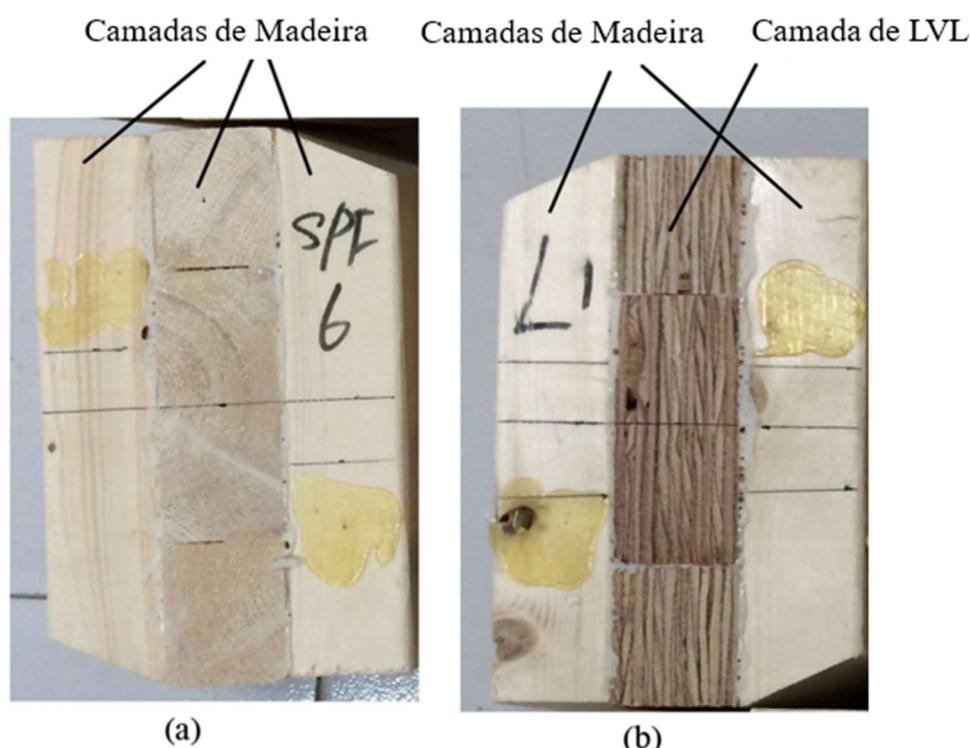


Fonte: Li (2017)

Constatou-se que ambos os ensaios forneceram valores coerentes para a resistência (f_{vt}) e que a espessura das lamelas a afetou significativamente, sendo que os valores obtidos nos ensaios de flexão e os nos ensaios de cisalhamento foram de 1,97 MPa e 1,99 MPa, para os painéis com lamelas de 35 mm, de 2,45 MPa e 2,33 MPa para os com lamelas de 20 mm. Dessa forma, concluiu-se que a espessura da lamela e a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foram inversamente proporcionais (LI, 2017).

Wang *et al.* (2017) estudaram as propriedades *rolling shear* de painéis feitos apenas com madeira canadense do tipo “*spruce-pine fir*” e híbridos fabricados com a camada transversal formada por lamelas de painéis de madeira de lâminas paralelas (LVL) feitos a partir da espécie “*Pseudotsuga menziesii*” por meio de ensaios de cisalhamento. Para isso, os corpos de prova foram divididos em dois grupos: homogêneos e híbridos. Para cada grupo, foram fabricados dez amostras, sendo que a camada transversal de ambos os grupos era formada por peças de dimensões de 38 mm x 89 mm, e no caso dos híbridos, as lamelas transversais foram feitas de LVL orientado perpendicularmente às fibras das camadas externas. Os elementos que formaram cada grupo são ilustrados na Figura 43.

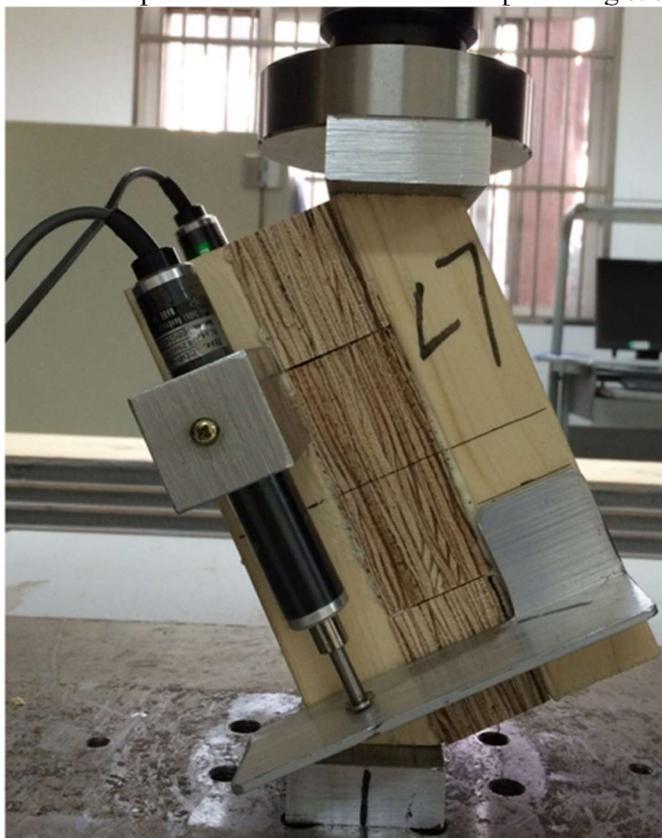
Figura 43-Corpos de prova utilizados por Wang *et al.* (2017) sendo (a) Homogêneos e (b) Híbridos



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2017)

Os ensaios foram realizados de acordo com a configuração mostrada na Figura 44, em que a inclinação utilizada no ensaio, para cada grupo, foi calculada de acordo com a largura e comprimento dos corpos de prova, resultando-se na inclinação de 25°.

Figura 44-Método adotado para o ensaio de cisalhamento por Wang *et al.* (2017)



Fonte: Wang *et al.* (2017)

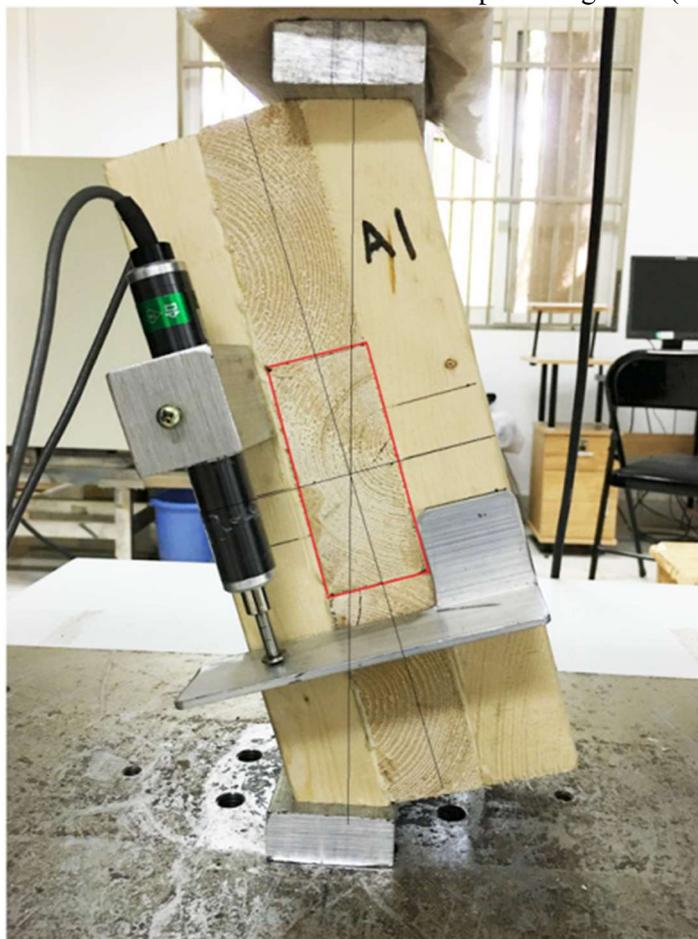
De acordo com os resultados experimentais, os corpos de prova homogêneos apresentaram maiores valores para o módulo de elasticidade transversal ($G_{vt}= 84,92$ MPa) e resistência ao *rolling shear* ($f_{vt}= 1,41$ MPa), enquanto os híbridos tiveram módulo de elasticidade transversal ($G_{vt}= 47,88$ MPa) e resistência ao *rolling shear* ($f_{vt}= 1,07$ MPa) 77,36% e 31,78% menores do que o de referência. Além disso, foi avaliado o modo de ruptura visualmente e microscopicamente, sendo que elementos híbridos romperam ao longo da direção da linha de cola e os homogêneos romperam de três modos: por *rolling shear* ao longo dos anéis de crescimento, por cisalhamento ao longo dos raios da madeira e por cisalhamento na direção da linha de cola.

Wang *et al.* (2018a) estudaram a influência da colagem lateral e do tamanho do espaçamento lateral nas propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC com três camadas. Os corpos de prova foram divididos em cinco grupos, sendo dez exemplares para cada grupo, e

nomeados de acordo com a colagem e o tamanho do vazio lateral entre lamelas, sendo que, aqueles que não tinham colagem entre as lamelas transversais e os que tinham foram chamados de Grupo A e Grupo B e os que tinham espaçamento entre lamelas de dois, quatro e seis milímetros foram chamados de grupo C, D e E, respectivamente. A madeira utilizada foi “*spruce-pine-fir*” com densidade média de 470 kg/m^3 . A prensagem foi feita sob tensão de 1 MPa, com tempo de prensagem de três horas, e a colagem, com uma gramatura do adesivo de 180 g/cm^2 .

O ensaio de cisalhamento foi baseado em estudos anteriores, em que para se garantir o alinhamento das forças aplicadas a inclinação variação de acordo com o grupo de amostras entre $16,6^\circ$ (Grupo A) e $15,8^\circ$ (Grupo E), por meio do corte das extremidades externas dos corpos de prova. O deslocamento relativo entre as camadas externas foi por meio de LVDTs de 25 mm posicionados em ambos os lados do corpo de prova, conforme Figura 45. A espessura das camadas foi de 38 mm e comprimento total do corpo de prova variou entre 267 e 279 mm, respectivamente.

Figura 45-Ensaio de cisalhamento utilizado por Wang *et al.* (2018a)



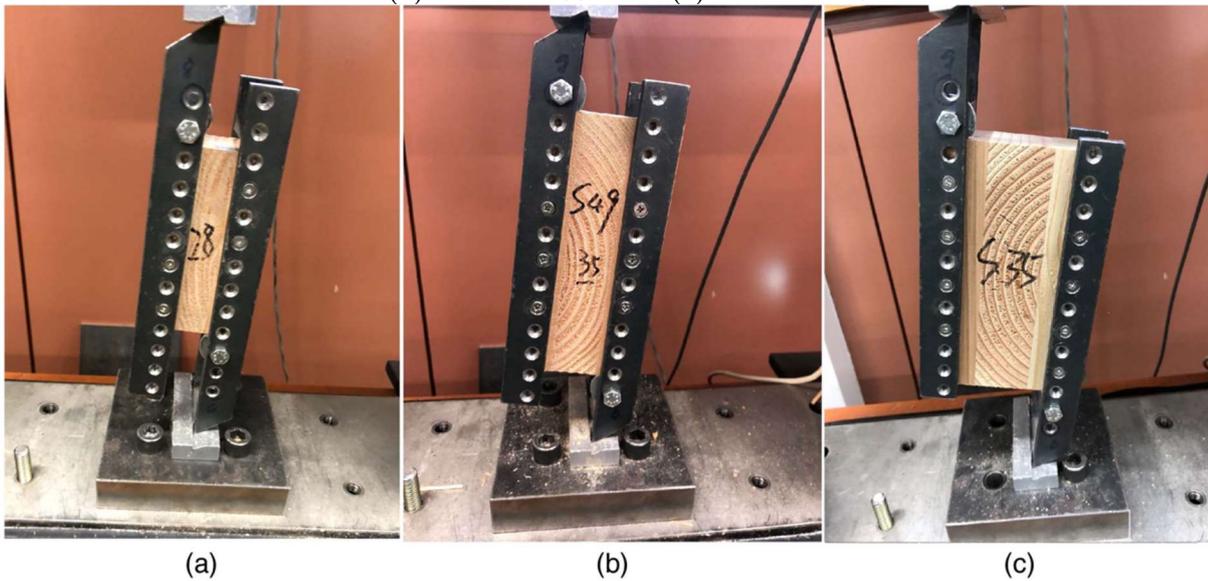
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2018a)

Com isso, concluíram que a colagem lateral e os espaçamentos entre as lamelas influenciam a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), uma vez que ao analisar os valores por grupo, notou-se que os painéis do Grupo A apresentaram valor maior do que o Grupo B. A resistência (f_{vt}) diminuiu com o aumento do espaçamento entre as lamelas transversais, o que pode ter ocorrido devido à concentração de tensões, assim como a redistribuição das tensões de cisalhamento entre os espaçamentos. Os valores médios de resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram de 1,32 e 111 MPa, respectivamente. Quanto ao módulo, concluíram que não houve nenhum impacto já que ele foi medido em regime elástico e assim, foi submetido a baixas tensões. Em relação ao modo de ruptura, ocorreram três tipos: ruptura por *rolling shear*, por tração perpendicular às fibras na região da medula e aos anéis de crescimento.

Li, Dong e Lim (2019) analisaram a influência dos parâmetros de lamelação (γ) nas propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC, sem as bordas laterais coladas, por meio de ensaios experimentais de cisalhamento e de flexão e por análise numérica em corpos de prova com duas espécies de madeira (“*Pinus Radiata*” e “*Pseudotsuga menziesii*”), três espessuras de lamelas (20,35 e 45 mm) e vários parâmetros de lamelação (entre 4,1 e 9,8), valores sempre maiores que 4.

Os ensaios de cisalhamento plano basearam-se na AS NZS 22691.1:2021, a qual é utilizada para estudar o cisalhamento em madeira compensada. No entanto, foram realizadas algumas modificações, uma vez que incluíram duas chapas de aço no topo e base do corpo de prova, no local de aplicação das forças de compressão e reforçaram as lamelas externas por meio de uma linha de parafusos ao longo da direção perpendicular às fibras para evitar a fissuração das faces das lamelas, conforme Figura 46. A inclinação do corpo de prova variou de acordo com sua espessura entre 4° a 14°.

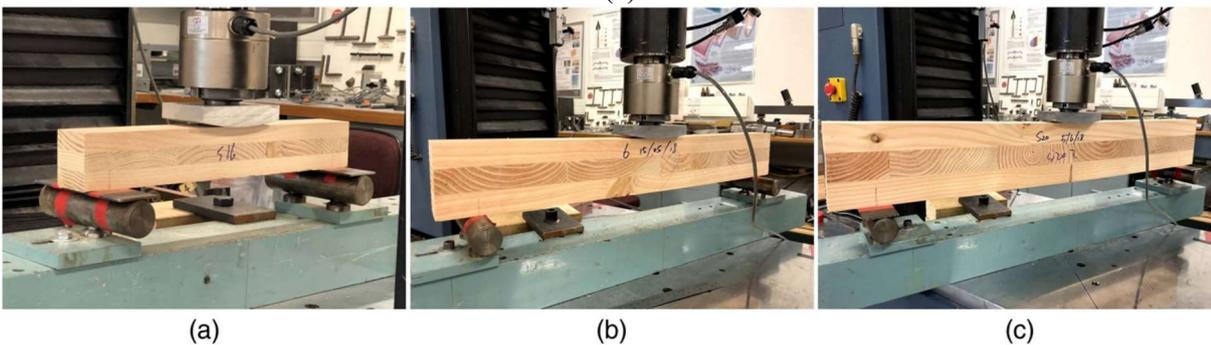
Figura 46-Ensaio de cisalhamento plano realizado por Li, Dong e Lim (2019) em (a) Lamela de 25 mm em (b) Lamela de 35 mm e (c) Lamela de 45 mm



Fonte: Li, Dong e Lim (2019)

Os ensaios de flexão foram realizados a três pontos, de acordo com ASTM D 2718:2018, que indica a distância entre os pontos de apoio igual a seis vezes a altura do corpo de prova e aplicação da força no ponto central do vão, conforme Figura 47.

Figura 47-Ensaio de flexão adotado por Li, Dong e Lim (2019) em (a) Lamela de 25 mm em (b) Lamela de 35 mm e (c) Lamela de 45 mm



Fonte: Li, Dong e Lim (2019)

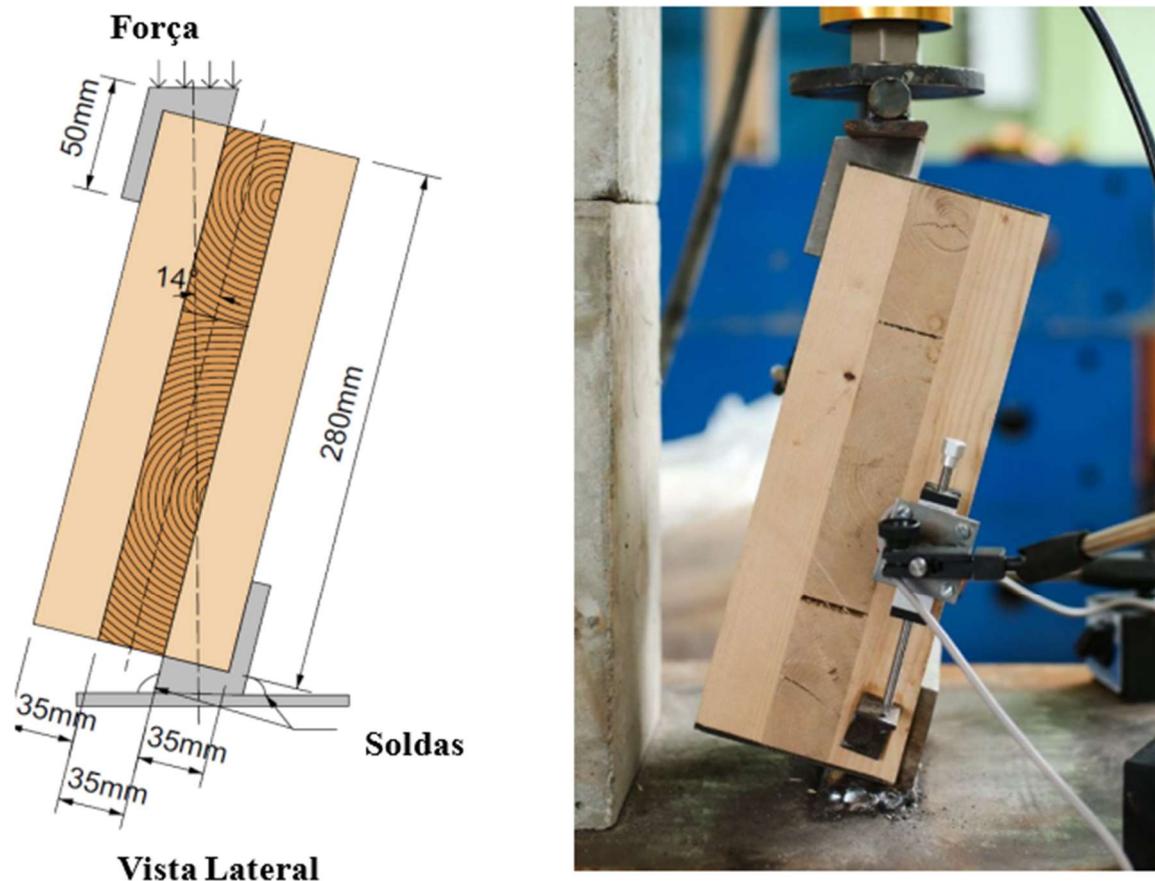
Quanto aos resultados, a resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) foi de 1,83 MPa e 2,01 MPa, para as espécies “*Pseudotsuga menziesii*” e “*Pinus Radiata*”, respectivamente, em relação à média dos dois ensaios. Quanto ao método de ensaio, os de flexão apresentaram valores de resistência 2% menores para “*Pseudotsuga menziesii*” ($f_{vt}=1,82$ MPa) e valores 2% maiores para “*Pinus Radiata*” ($f_{vt}=2,03$ MPa), quando comparados com os ensaios de cisalhamento. Dessa forma, concluíram que o parâmetro de lamelação (γ) teve grande impacto na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), uma vez que relações maiores dos parâmetros de lamelação

(γ) resultaram em valores superiores. Ambos os ensaios apresentaram a relação forte entre os parâmetros de lamelação (γ) e a resistência (f_{vt}), para relações são maiores que 4. Além disso, produziram resultados semelhantes, apesar das condições de contorno e métodos de ensaio diferentes. Também foram feitos modelos numéricos elástico-linear com o objetivo de analisar a influência dos métodos de ensaios. Os resultados numéricos indicaram que ambos os métodos de ensaio foram apropriados para simular tensões *rolling shear* na lamela transversal dos corpos de prova e que as tensões normais foram desprezíveis.

Ruan, Xiong e Chen (2019) estudaram as propriedades relacionadas ao *rolling shear* de painéis de MLCC feitos de “*Tsuga canadensis*”, com densidade de 500-600 kg/m³, as quais foram estudadas por ensaios de cisalhamento e de flexão. Para a realização dos ensaios, os painéis de três camadas foram fabricados a partir de peças de madeira com 35 mm de espessura, que foram coladas e prensadas sob uma pressão de 9 N/mm² durante 45 minutos, com dimensões de 5400 mm x 140 mm x 105 mm (comprimento x largura x espessura). Posteriormente, os corpos de prova foram retirados desses painéis com as dimensões adequadas para cada tipo de ensaio.

O ensaio de cisalhamento foi realizado de acordo com BIS EN 16351:2015 e o corpo de prova foi posicionado com inclinação de 14°. No total, foram ensaiados 12 corpos de prova, com dimensões de 280 mm x 100 mm x 105 mm (comprimento x largura x espessura). Para a realização dos ensaios, foram fabricadas duas cunhas de aço que foram posicionadas na base e no topo do corpo de prova com o objetivo de ajustar a inclinação em 14°, transferindo a força de compressão e contendo o deslocamento lateral e vertical da peça. A medição dos deslocamentos inclinados foi feita LVDTs, posicionados em ambas as faces do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 48.

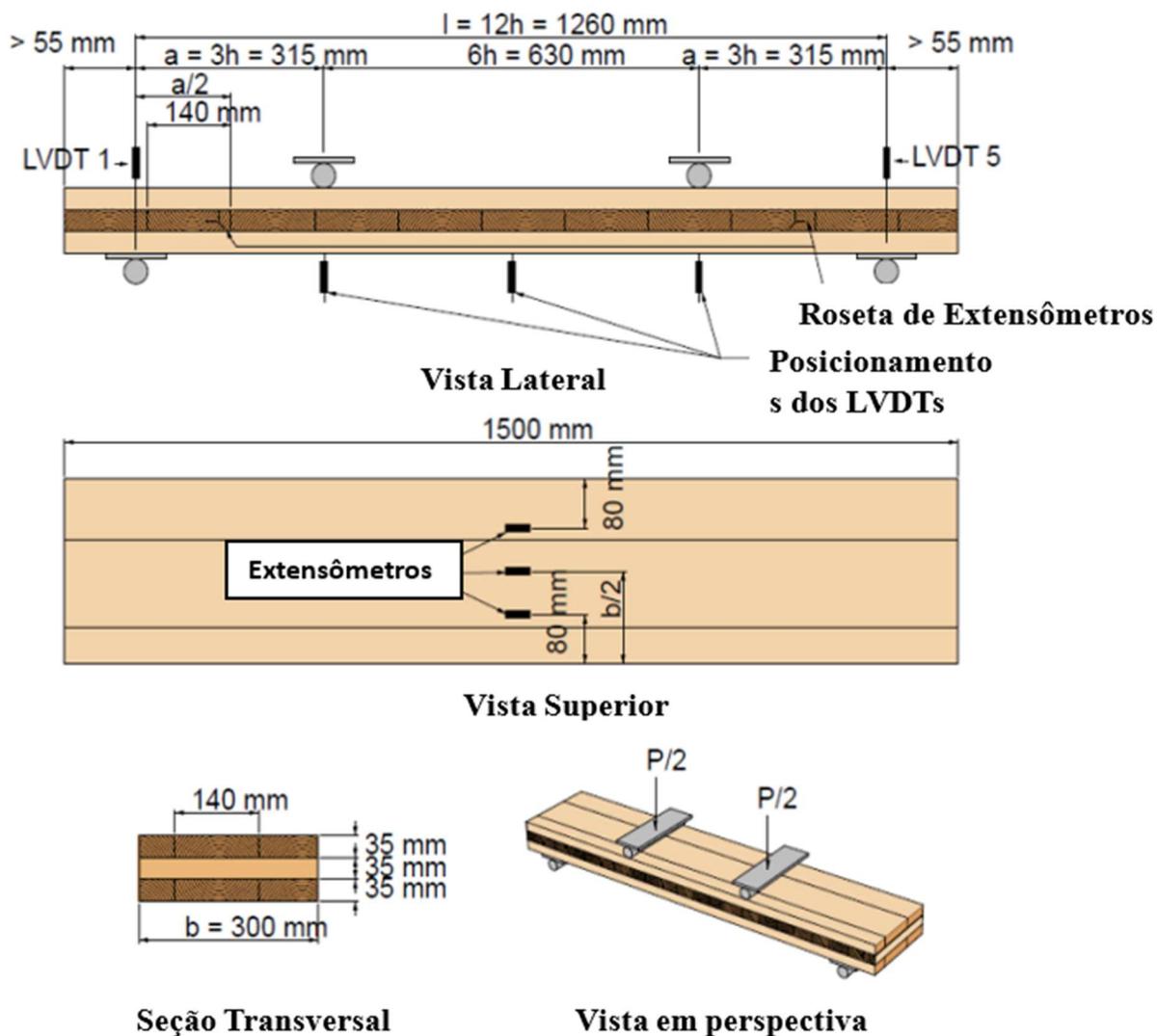
Figura 48-Ensaio de cisalhamento realizado por Ruan, Xiong E Chen (2019)



Fonte: Adaptado de Ruan, Xiong E Chen (2019)

Os ensaios de flexão foram feitos de acordo com BIS EN 408:2010 e BIS EN 16351:2015. A largura e a altura dos corpos de prova foram de 300 mm e 105 mm, respectivamente, os quais foram divididos em três grupos (L1, L2 e L3) de acordo com o vão entre os apoios que ficaram iguais a 12, 18 e 24 vezes a altura do elemento, como ilustrado na Figura 49.

Figura 49-Ensaio de flexão feito por Ruan, Xiong E Chen (2019)



Fonte: Adaptado de Ruan, Xiong E Chen (2019)

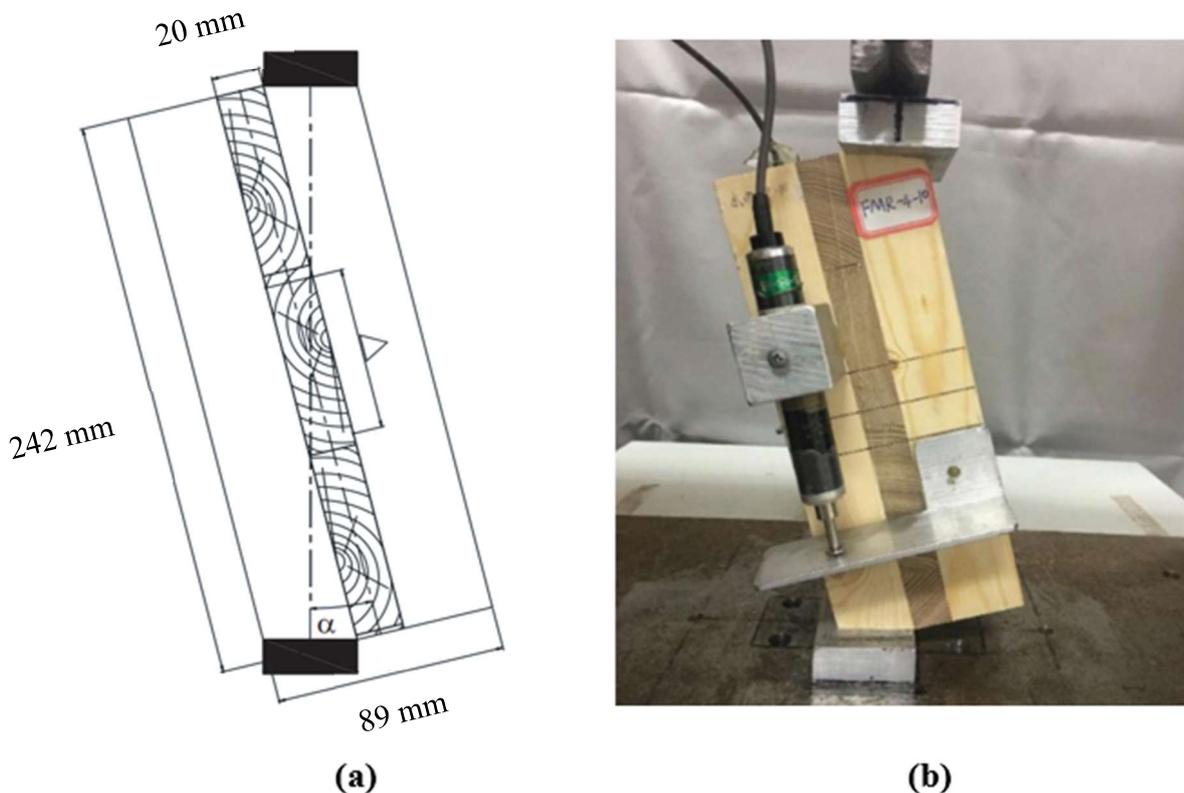
Os valores médios de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), obtidos nos ensaios de cisalhamento e de flexão, foram de 1,28 MPa e 1,57 MPa, respectivamente. Quanto ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), os valores dos ensaios de flexão foram quatro vezes maiores do que os de cisalhamento, 234 MPa e 53,13 MPa, respectivamente, os quais foram determinados pela relação entre a tensão de cisalhamento e a distorção obtida pelos extensômetros. Dessa forma, concluíram que ambos os métodos de ensaio foram adequados para determinar as propriedades *rolling shear*, sendo que, o ensaio de cisalhamento foi mais econômico do que o de flexão para essa finalidade.

Gui *et al.* (2020) avaliaram a influência dos parâmetros de lamelação (γ) nas propriedades *rolling shear* de painéis de três camadas, que foram divididos em quatro grupos de corpos de prova, variando-se a espécie da camada transversal e os parâmetros de lamelação

(γ). Os grupos A, B, C foram referentes às amostras feitas com a camada interna de Eucalipto de crescimento rápido da espécie “*Eucalyptus urophylla* S. T. Blak” com parâmetros de lamelação (γ) de dois, quatro e seis respectivamente, com densidade da madeira igual a 590 kg/m³. O grupo D corresponde aos elementos com camada interna de “*spruce-pine-fir*”, parâmetro de lamelação igual a quatro e com densidade média madeira de 450 kg/m³. Quanto à camada externa, todas as peças foram fabricadas com madeira do tipo “*spruce-pine-fir*”.

Em relação ao processo de fabricação, as peças de madeira foram cortadas nas dimensões adequadas e foram coladas com adesivo estrutural poliuretano (PUR) mono componente com gramatura de 250 g/cm² e submetidas à tensão vertical de 1 MPa. Os corpos de prova foram serrados nas extremidades das camadas externas de tal modo que os exemplares tivessem dimensões de 242 mm x 89 mm (comprimento x espessura), espessura da lamela de 20 mm (t_{90}) e inclinação de 14°, conforme Figura 50.

Figura 50-Ensaio de cisalhamento realizado por Gui *et al.* (2020) em (a) Esquema de ensaio e (b) Ensaio Real



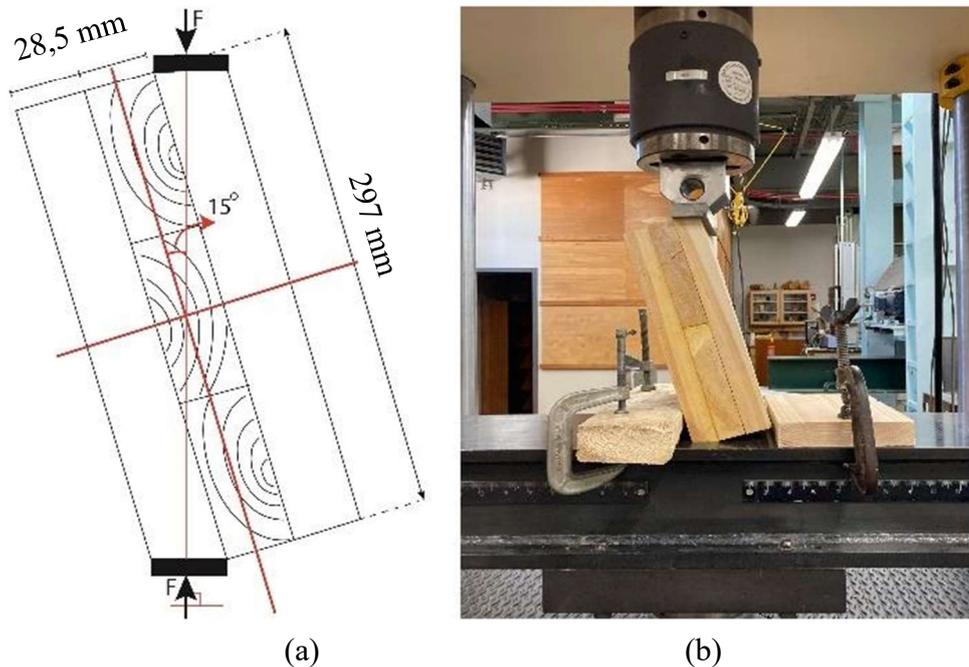
Fonte: Gui *et al.* (2020)

Além dos LVDTs, também foi adotado o método de correlação por imagem digital (DIC) para visualizar a distribuição das deformações na superfície do corpo de prova ao longo do ensaio e na ruptura. Para isso, duas câmeras foram posicionadas em frente e

perpendicularmente ao eixo óptico da superfície dos corpos de prova e as fotos foram tiradas a cada 0,5 s. Após a finalização do ensaio, as fotos foram processadas por programa de análise (VID-3D 2010) e, então, foi gerada a distribuição dos deslocamentos por toda a superfície do corpo de prova. Os autores concluíram que os valores de resistência característica ao *rolling shear* (f_{vt}) e módulo de cisalhamento transversal médio para os corpos de prova feitos com camada transversal de Eucalipto foram de 2,67 MPa e 429 MPa. Ao se variar os parâmetros de lamelação (γ), observou-se relação linear entre eles e as propriedades *rolling shear*, uma vez que os valores médios de resistência (f_{vt}) e módulo de cisalhamento transversal (G_{vt}) foram de 3,46 MPa e 375 MPa, 3,52 MPa e 418 MPa e 3,65 MPa e 495 MPa para os parâmetros de lamelação (γ) igual a dois, quatro e seis, respectivamente. Além disso, constataram que o Eucalipto possuiu potencial de aplicação em camadas transversais de painéis, uma vez que quando comparados aos fabricados com madeira “*spruce-pine-fir*”, o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e a resistência (f_{vt}) foram 260,3% e 88,2% maiores. Tais valores foram aproximadamente de três a oito vezes maiores do que os normatizados para madeira conífera.

Shahhosseini, Crovella e Smith (2021) analisaram o efeito da presença e do tamanho de nós nas propriedades *rolling shear* por meio de ensaios experimentais e modelagem numérica. Para esse fim, foram feitos ensaios de cisalhamento em 33 corpos de prova, com três camadas, que foram divididos em dois grupos: com (20) e sem a presença de nós (13) na lamela transversal do painel. As amostras tinham dimensões de 85,5 mm x 140 mm x 297 mm (espessura x largura x comprimento) e foram fabricados com madeira da espécie “*Pinus strobus*”. No processo de fabricação das peças de MLCC, as camadas foram coladas sob a tensão de prensagem de 0,7 MPa, durante pelo menos oito horas. O método de ensaio foi de acordo com a BIS EN 16351:2015, conforme Figura 51, e inclinação calculada de acordo com a espessura e comprimento do corpo de prova que para este caso foi de 15°.

Figura 51-Ensaio de cisalhamento utilizado por Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)



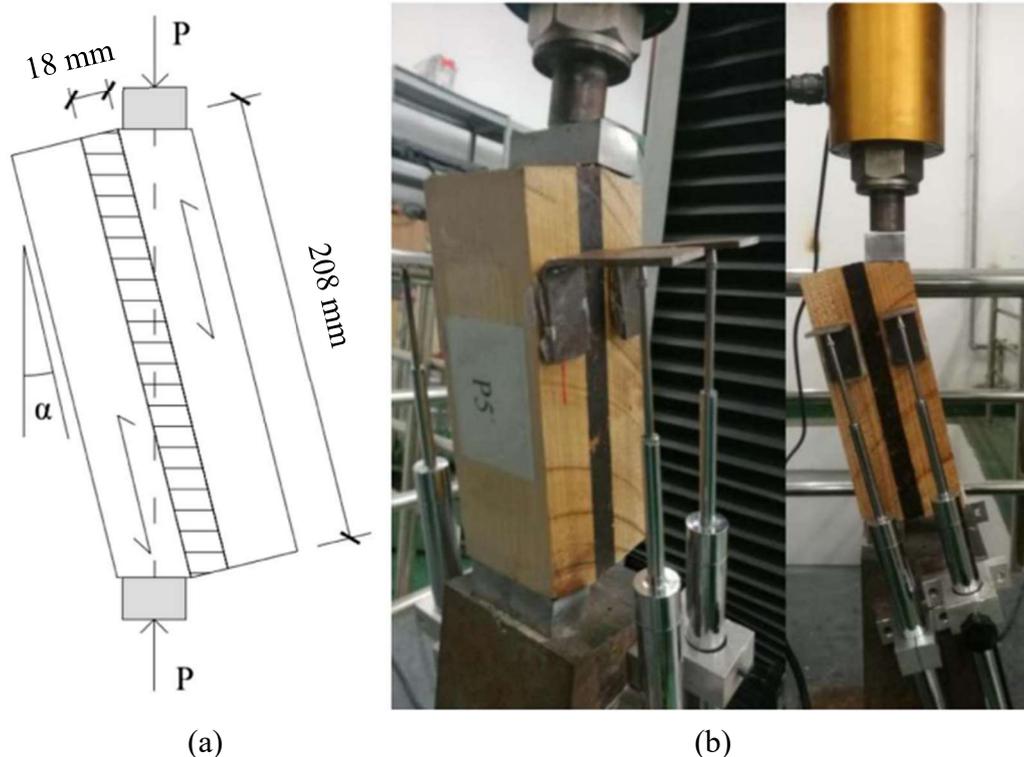
Fonte: Adaptado de Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)

Os corpos de prova fabricados com camadas sem nós nas camadas transversais tiveram resistência ($f_{vt}=7,35$ MPa) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* ($G_{vt} = 170$ MPa) que foram 24% e 34% menores do que os fabricados com camadas transversais com presença de nós ($f_{vt}=9,30$ MPa e $G_{vt}=240$ MPa), respectivamente. Assim, concluíram que a presença de nós melhorou ambas as propriedades *rolling shear*, e que a utilização de madeira de média densidade com nós em lamelas transversais do MLCC pode reduzir os custos de produção do painel.

Xu *et al.* (2021) estudaram sete configurações de painéis híbridos, de três camadas, para analisar as propriedades *rolling shear*, com o objetivo de desenvolver uma base dados para painéis híbridos feitos com lamelas internas com diferentes tipos de madeiras. Para isso, fabricaram painéis com camadas longitudinais de madeira “*spruce-pine-fir*” e camadas transversais com diferentes materiais: madeira “*Betula albo-sinensis*”, aglomerado de madeira (CW), madeira de lâminas paralelas (LVL), madeira laminada (*plywood*), madeira de lascas orientadas (OSB), madeira de lascas paralelas (PSL) e bambu lamelado colado (GLB). Apesar dos materiais serem feitos de lâminas e pedaços de madeira, foi mantido o cruzamento perpendicular entre as fibras das camadas externas e internas. No total, foram feitos oito grupos com oito corpos de prova para cada grupo. Durante o processo de fabricação, as peças de madeira foram coladas por adesivo mono componente poliuretano (PUR) e submetidas à tensão de prensagem de 1 MPa por 200 minutos. As dimensões das peças foram de 82 mm x 66 mm x

208 mm (espessura x largura x comprimento) e a espessura da camada interna foi de 18 mm, conforme Figura 52a. As propriedades *rolling shear* foram avaliadas por meio de ensaios experimentais de cisalhamento. O método de ensaio adotado é ilustrado na Figura 52b. A inclinação adotada foi 14° , o deslocamento relativo entre as camadas externas foi medido por meio de dois LVDTs em cada lado do corpo de prova e a força foi aplicada a uma taxa de 0,5 mm/min.

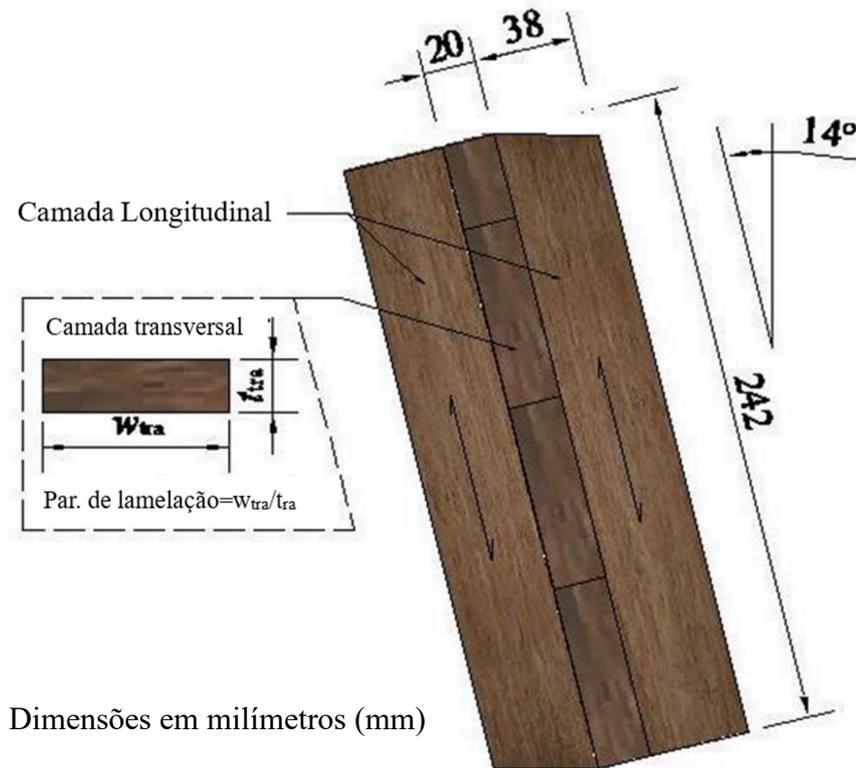
Figura 52-Ensaio de cisalhamento realizado por Xu *et al.* (2021) (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real



Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2021)

De acordo com os resultados, as propriedades *rolling shear* da madeira “*spruce-pine-fir*” são bem maiores do que os painéis feitos com madeira de lascas paralelas (PSL) e madeira de lâminas paralelas (LVL), as quais foram similares às propriedades dos painéis fabricados com madeiras de bétula. Quanto ao processo de fabricação desses corpos de prova, as peças de madeira foram cortadas e lixadas nas dimensões especificadas e foram coladas por adesivo resorcinol-fenol-formaldeído (PRF) com uma gramatura de 250 g/m^2 e submetidos a uma pressão vertical de 1 MPa por sete horas, de acordo com o manual técnico da cola. Foram preparados 15 corpos de prova, para cada grupo, totalizando-se 60 exemplares para o ensaio de cisalhamento, de acordo com o ilustrado na Figura 53.

Figura 53-Dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento adotadas por Dong *et al.* (2021)



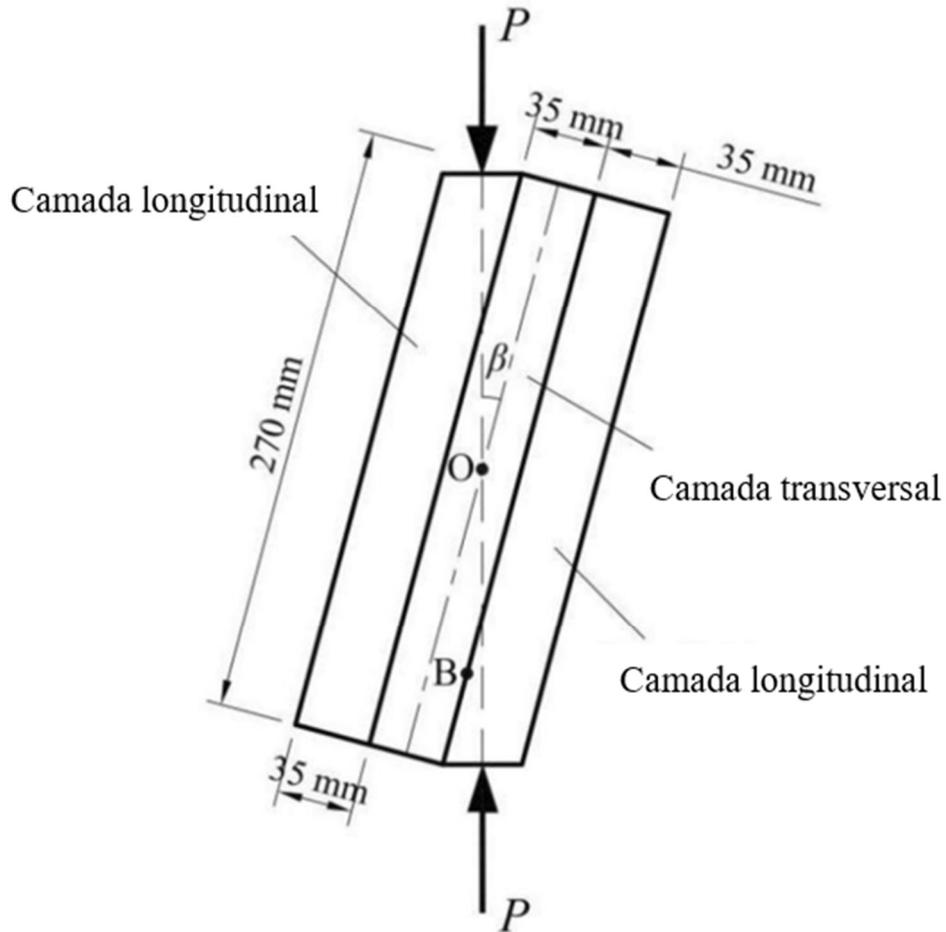
Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2021)

Quanto ao modo de ruptura, apresentaram ruptura por *rolling shear*, uma vez que fissuras inclinadas foram formadas nas lamelas internas e a ruptura foi frágil.

Zhou *et al.* (2022) estudaram a ruptura de painéis de MLCC por meio de análise de tensões e modo de ruptura de corpos de prova submetidos a ensaios de cisalhamento e de flexão. Os painéis, dos quais foram retiradas as amostras, foram fabricados com madeira da espécie “*Tsuga canadensis*”, os quais tinham lamelas coladas por adesivo estrutural mono componente de poliuretano (PUR) com gramatura de 180 g/m². Os elementos utilizados nos ensaios de flexão foram divididos em grupo A e grupo B. Os do grupo A tinham dimensões de 105 mm x 305 mm x 735 mm (altura x largura x comprimento), e os do grupo B tinham dimensões de 105 mm x 210 mm x 735 mm (altura x largura x comprimento). Em ambos os casos, a relação entre vão e altura foi igual a seis. A largura das lamelas foi de 140 mm e a densidade média das peças era de 435 kg/m³ para umidade de 12% e foram utilizadas larguras diferentes a fim de avaliar a influência da largura na resistência ao cisalhamento (f_{vt}). Os elementos Grupo C tinham dimensões de 105 mm x 135 mm x 270 mm (espessura x largura x comprimento), sendo que a largura das lamelas era de 140 mm e a densidade média das peças de 431 kg/m³ para umidade de 14%. Os métodos de ensaio de cisalhamento e de flexão são ilustrados na Figura 54 e Figura

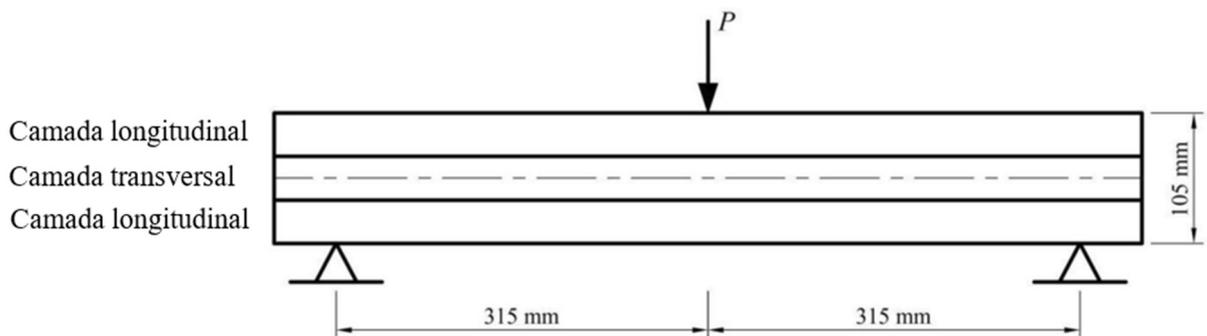
55, respectivamente, os quais foram escolhidos devido ao fato de não haver a necessidade de colar placas de aço nos corpos de prova, e foram baseados em BIS EN 408:2010, ASTM D 2718:2011 e ASTM D 198:2015.

Figura 54-Ensaio de cisalhamento realizado por Zhou *et al.* (2022)



Fonte: Zhou *et al.* (2022)

Figura 55-Ensaio de flexão adotado por Zhou *et al.* (2022)

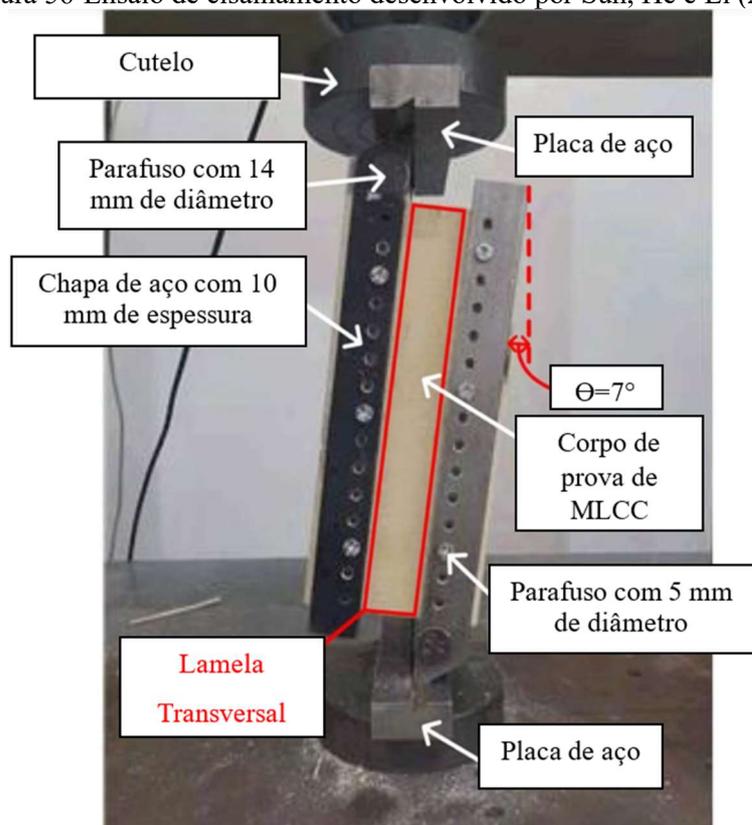


Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2022)

A forma de ruptura verificada nessa pesquisa foi dividida em dois grupos: ao longo dos anéis de crescimento e ao longo da direção tangencial ao anel de crescimento. As resistências ao cisalhamento obtidas pelos ensaios de flexão (f_{vt}), grupo A ($f_{vt}=1,32$ MPa) e grupo B ($f_{vt}=1,33$ MPa), foram basicamente as mesmas, com uma diferença de 0,8%, e com isso, os autores concluíram que a diferença entre larguras nos ensaios de flexão não afetou a resistência ao cisalhamento (f_{vt}). Além disso, os resultados foram coerentes com os dos ensaios de cisalhamento, uma vez que a resistência (G_{vt}) para o Grupo C foi de 1,25 MPa, apresentando uma diferença de 5,7%. Dessa forma, concluíram que a resistência ao cisalhamento (f_{vt}) medida por meio dos ensaios de flexão e de cisalhamento foram coerentes e que os resultados apresentados pelo segundo método foram mais dispersos. Os autores consideraram que o estado de tensões nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento como cisalhamento puro e que os ensaios de flexão foram mais adequados do que os de cisalhamento. O estudo revelou que o mecanismo de ruptura ocorreu pela combinação das tensões normais e de cisalhamento (incluindo suas direções) com a inclinação da fissura e apresentou dois modos de ruptura: por cisalhamento e por tração (ZHOU *et al.*, 2022).

Sun, He e Li (2022) realizaram um trabalho em que analisaram a influência dos parâmetros de lamelação (γ) na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}). Tais parâmetros variaram de 2,54 a 9,40 e estudados por meio de ensaios de cisalhamento. Os corpos de prova foram fabricados a partir de painéis, que foram feitos com madeira da espécie “*spruce-pine-fir*”, com densidade média de 484 kg/m³ e umidade de 10,1%. No total foram fabricadas oito peças, sendo um painel para cada tipo de parâmetro de lamelação estudado, e para cada painel, 28 amostras, totalizando-se 224 exemplares. Em relação às dimensões, os elementos tiveram comprimento de 89 mm, 140 mm, 184 mm e 235 mm e espessuras da lamela de 25 mm e 35 mm, enquanto a largura foi constante e igual a 95 mm. O ensaio de cisalhamento foi baseado em BIS EN 408:2010, contudo, foram realizadas modificações quanto à inclinação do corpo de prova que foi adotada igual 7°, além disso, foram utilizados aparatos adicionais de ensaio, conforme proposto por Li *et al.* (2017), como ilustrado na Figura 56.

Figura 56-Ensaio de cisalhamento desenvolvido por Sun, He e Li (2022)



Fonte: Adaptado de Sun, He e Li (2022)

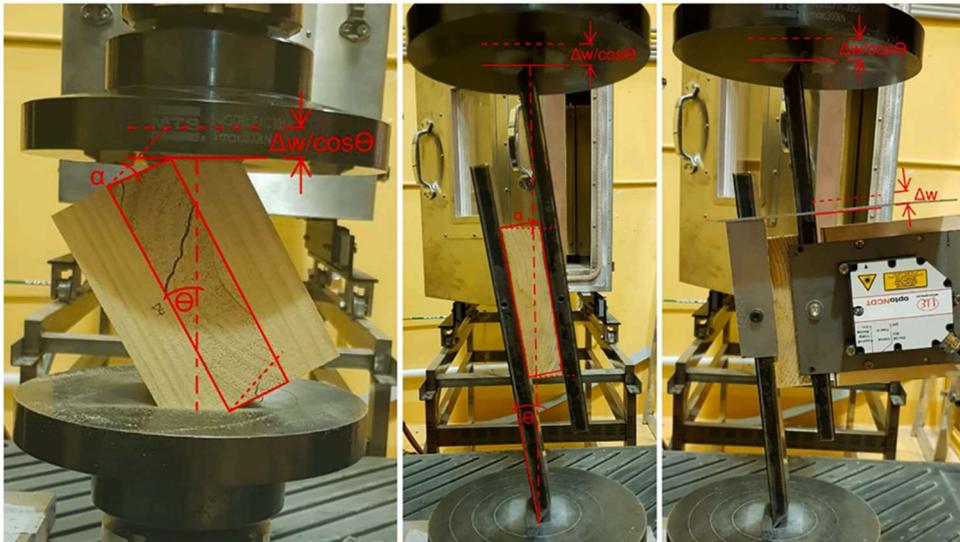
Também foram feitos ensaios de cisalhamento em corpos de prova isentos de defeitos, e esses resultados foram utilizados para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) da madeira estudada. Assim, foram calculados coeficientes de correlação entre a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) das lamelas externas dos painéis, para cada parâmetro de lamelação (γ) estudado, que foram chamados de fator modificador.

A resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) para corpos de prova com parâmetros de lamelação próximos a quatro, com lamelas de 25 e 35 mm, foram de 1,68 MPa e 1,12 MPa. Após a análise de todos os parâmetros, concluíram que ocorre uma relação linear entre o parâmetro de lamelação (γ) e a capacidade resistente ao *rolling shear* (f_{vt}) e que a largura da lamela pode afetar no modo de ruptura, uma vez que para as lamelas mais largas, a ruptura ocorreu por meio de duas fissuras inclinadas localizados no meio da seção transversal da lamela, enquanto para as menores, formou-se apenas uma fissura. Além disso, a largura da lamela também influenciou na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), apresentando valores maiores para painéis com camadas mais largas. No entanto, quanto à espessura, ocorreu o inverso, já que painéis com lamelas mais grossas, tiveram resistência menor (f_{vt}) devido ao efeito de tamanho.

Nero, Christopher, Ngo (2022) avaliaram o efeito da densidade, dos parâmetros de lamelação (γ), a orientação dos anéis de crescimento, direção de aplicação das forças de compressão e método de ensaio nas propriedades *rolling shear*. Para isso, fizeram ensaios de flexão de quatro pontos e ensaios de cisalhamento, com transferência dos esforços por meio de chapas de aço e peças de madeira, utilizando-se três espécies diferentes de madeira (“*Eucalyptus Nitens*”, “*Pinus Radiata*” e “*Picea abies*”), três parâmetros de lamelação (dois, quatro e seis) e duas direções de aplicação das forças em relação às fibras (paralela ou perpendicular).

O método de ensaio de cisalhamento resultou da união dos procedimentos sugeridos por BIS EN 408:2010, BIS EN 16351:2018 e ASTM D 198:2018, alterando-se a direção das fibras da madeira. Para a medição do deslocamento relativo entre as chapas de aço, foram fixados laser nos pontos médios do corpo de prova, ilustrados na Figura 57c. A correlação por imagem digital (DIC) também foi usada para medir os deslocamentos, em que as camadas externas das peças foram utilizadas para a transferência dos esforços, conforme Figura 57a.

Figura 57-Ensaio de cisalhamento elaborado por Nero, Christopher, Ngo (2022) (a) Com peças de madeira (b) Com chapas de aço (c) Medição dos deslocamentos por laser



Fonte: Nero, Christopher, Ngo (2022)

O ensaio de flexão de quatro pontos foi baseado em BIS EN 16351:2018, conforme Figura 58, em que a força foi aplicada apenas em corpos de prova de “*Pinus Radiata*”.

Figura 58-Ensaio de flexão realizado por Nero, Christopher, Ngo (2022)



Fonte: Nero, Christopher, Ngo (2022)

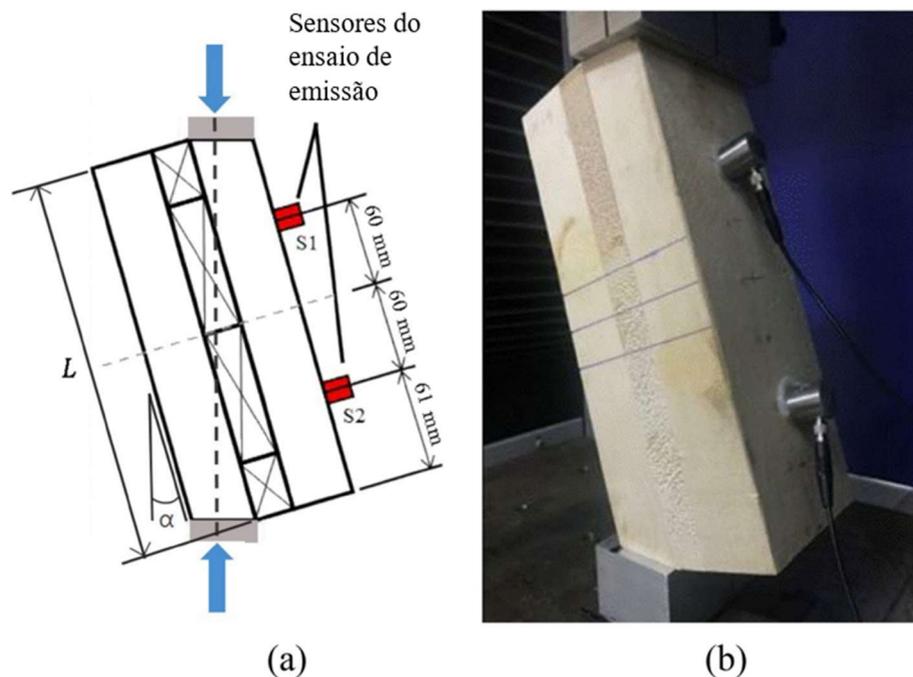
Nero, Christopher, Ngo (2022) concluíram que o parâmetro de lamelação (γ) e a orientação dos anéis de crescimento interferiu tanto na resistência (f_{vt}) quanto no módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e que, para a mesma espécie de madeira, os valores foram diretamente proporcionais. Além disso, observaram que a direção de aplicação da força em relação aos anéis de crescimento possui influência na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), já que para as amostras retiradas de uma mesma peça de madeira, com a mesma distribuição de anéis e mesmo parâmetro de lamelação, testados com a força aplicada paralelamente aos anéis de crescimento, resultaram em valores até 50% maiores do que aqueles testados com a força perpendicularmente. A direção de aplicação da força também alterou o modo de ruptura da peça, com fissuração ao longo ou perpendicularmente aos anéis, o que foi justificado devido ao fato de a estrutura celular da madeira ser diferente na direção radial (R) e tangencial (T). Quanto aos métodos, os ensaios de cisalhamento que utilizaram chapas de aço para a transferência dos esforços apresentaram módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) 42% maior do que os que utilizaram peças de madeira. Apesar disso, os valores medidos pelos três métodos de ensaios foram coerentes, o que indica que todas elas são aplicáveis para determinar as propriedades *rolling shear*.

Wang *et al.* (2022) monitoraram o processo de ruptura por *rolling shear*, durante ensaios de cisalhamento, utilizando tecnologia de emissão acústica (AE) associada à correlação de imagens digitais. Conforme citado pelos autores, o número de estudos utilizando emissão acústica (AE) tem aumentado com o objetivo de avaliar danos internos ao material e defeitos,

sendo que, ao ocorrer a ruptura interna ou deformação tem-se uma alteração pontual na onda emitida pelo aparelho. Ela foi adotada com a finalidade de melhorar a qualidade do trabalho e o DIC foi utilizado para caracterizar a distribuição das deformações por cisalhamento e prever onde ocorreu a fissuração inicial de acordo com a área de concentração das deformações. Para o estudo, foram fabricados três tipos de painéis de três camadas, sendo que para as camadas externas foi utilizada madeira do tipo “*spruce-pine-fir*” e, para a camada interna, a espécie utilizada foi variada, usando-se três espécies diferentes de madeira: “*spruce-pine-fir*” (Grupo SSS), “*Pseudotsuga Menziesii*” (Grupo SHS) e “*Pinus sylvestris var. mongolica*” (Grupo SZS), as quais foram de origem canadense, americana e chinesa, com densidades médias de 450 kg/m³, 550 kg/m³ e 480 kg/m³, respectivamente. O processo de fabricação foi feito por meio da serragem das peças nos tamanhos adequados, as quais foram coladas com adesivo poliuretano (PUR) mono componente com gramatura de 180 g/m². Numa próxima etapa, os painéis foram prensados por três horas sob pressão de 1 MPa e então armazenados por três semanas, antes da execução dos ensaios.

Para cada grupo, cinco corpos de prova foram preparados, individualmente, com dimensões de lamela externa 38 mm x 89 mm x 242 mm (espessura x largura x comprimento) e lamelas internas de 20 mm x 80 mm x 89 mm (espessura x largura x comprimento), as quais resultaram em elementos de 96 mm x 89 mm x 242 mm (espessura x largura x comprimento). Os ensaios de cisalhamento plano foram feitos de acordo com BIS EN 408:2010, conforme ilustrado na Figura 59, e a força foi aplicada em uma única etapa, com uma taxa de 3 mm/min. Durante os ensaios de cisalhamento, os ensaios de emissão acústica (AE) e correlação por imagens digitais (DIC) ocorreram simultaneamente. No DIC as fotos eram tiradas a cada 0,5 s e após os ensaios, foram analisadas em programa de correlação de imagens (VIC-3D 2010) a fim de se obter o campo de deformações na superfície do corpo-de-prova.

Figura 59-Método adotado para o ensaio de cisalhamento plano em (a) Esquema de Ensaio e (b) Ensaio Real



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2022)

Wang *et al.* (2022) observaram que os painéis do grupo SHS tiveram a maior resistência média ($f_{vt}=2,20$ MPa), a qual foi 3,3% e 30,2% maior do que as dos grupos SSS ($f_{vt}=2,13$ MPa) e SZS ($f_{vt}=1,69$ MPa), respectivamente. Os autores concluíram também que a tecnologia de emissão acústica (AE) associada a correlação por imagens digitais (DIC) pode medir diretamente o campo de deformação na face do corpo de prova e dessa forma, prever o modo de ruptura deles.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, para a realização dos ensaios de cisalhamento inclinado foram usadas espécies com densidades entre 446 e 600 kg/m³, amostras com dimensões variadas e os esforços foram transmitidos para a lamela central do corpo de prova por meio de ligações coladas e parafusadas. Esse método foi utilizado para medir ambas as propriedades *rolling shear* sendo que a resistência (f_{vt}) variou de 1,07 MPa a 3,54 MPa e o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) de 48 MPa a 429 MPa. Para alguns casos, também foram realizados ensaios de flexão cujos resultados, no geral, foram maiores do que aqueles obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Em relação ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), observou-se que ele se altera de um método de ensaio para outro, uma vez que os valores medidos nos ensaios de flexão foram bem maiores do que os medidos pelos ensaios de cisalhamento. Ao se comparar os resultados obtidos pelos ensaios de cisalhamento com peças de madeira e chapas de aço,

observou-se o aumento significativo no módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos por meio dos ensaios de chapa de aço. Em relação à resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), notou-se que os ensaios feitos com chapas de aço geraram valores menores do que as obtidas naqueles que utilizaram elementos de madeira para a transferência dos esforços.

2.6.2.2 Ensaios de Flexão

Os métodos de ensaio de flexão podem ser divididos em ensaios de flexão de três e a quatro pontos, os quais foram baseados em BIS EN 16351:2015, BIS EN 16351:2018, ABNT NBR 7190-7:2022, BIS EN 408:2010, ASTM D 198:2015, ASTM D 4761:2019 e ANSI/APA PRG 320:2012, e que serão brevemente descritos abaixo, usando-se a versão vigente da norma em questão.

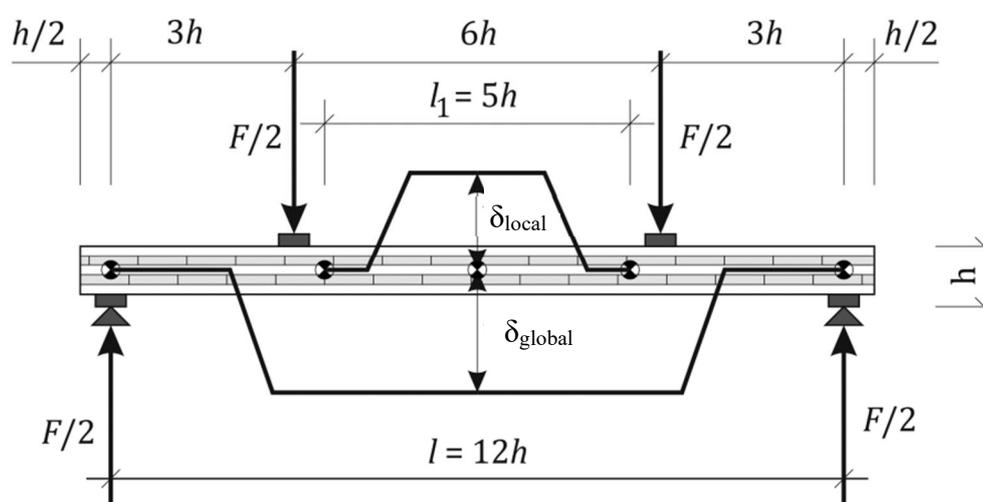
A principal diferença entre os ensaios de flexão de três e quatro pontos são os diagramas de momento fletor e cortante que variam de acordo com os pontos de aplicação das forças. Devido às características dos diagramas, a configuração de ensaio de flexão de quatro pontos é mais indicada para o estudo das propriedades relacionadas ao cisalhamento, uma vez que permite que maiores forças de cisalhamento sejam impostas sem que ocorram momentos fletores altos, fazendo com que a ruptura ocorra por *rolling shear* ao invés de outras formas (NERO, CHRISTOPHER e NGO, 2022).

De acordo com Li *et al.* (2022a), existem duas vantagens para esse método: primeiramente os corpos de prova são baratos e fáceis de fabricar, e em segundo lugar, são capazes de reproduzir o estado de tensões ao qual está submetida a camada transversal de painéis de MLCC submetidos à flexão. Além de que, os painéis de MLCC podem vir prontos dos fabricantes, sendo necessária apenas uma serra para a retirada das amostras. Dentre as desvantagens, citam-se o tamanho e o peso dos elementos, o que pode aumentar o tempo para a realização do ensaio (NERO, CHRISTOPHER e NGO, 2022).

Conforme Kumar *et al.* (2022), outro ponto negativo seria a presença de compressão adicional aplicada à camada transversal do painel de MLCC, o que pode resultar em uma previsão exagerada das propriedades. Normalmente, apenas a resistência ao cisalhamento (f_{vt}) pode ser obtida por esse método, sendo que as distorções devido ao cisalhamento e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) não podem ser obtidas diretamente com esse método de ensaio (LI *et al.*, 2022a).

A BIS EN 16351:2021 e a ABNT NBR 7190-7:2022 sugerem o ensaio de flexão de quatro pontos para a determinação da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e rigidez ao cisalhamento de painéis $(GA)_{MLCC}$. Nesse caso, tem-se que o vão entre os apoios deve ser igual a 12 vezes a altura do elemento ($12h$), a distância entre os pontos de aplicação das forças igual a seis vezes ($6h$) e a distância entre os apoios e o ponto de aplicação das forças igual a três vezes ($3h$). Os deslocamentos verticais devem ser medidos em três pontos, sendo um ponto localizado no meio do vão e os outros dois pontos centralizados em relação ao vão e distantes de cinco vezes a altura ($5h$) entre si, conforme Figura 60.

Figura 60-Método de Ensaio proposto por BIS EN 16351:2021 e ABNT NBR 7190-7:2022



Legenda

h – Altura do corpo-de-prova

l – Vão entre apoios

l_1 – Distância entre os pontos de medição do deslocamento local (igual a $5h$)

l_2 – Distância entre o apoio e o ponto de aplicação da força

δ_{local} – Deslocamento local medido na região com esforço cortante nulo

δ_{global} – Deslocamento global medido ao longo de todo o vão entre apoios

Fonte: Adaptado de BIS EN 16351:2021

Para determinação da rigidez ao cisalhamento do painel $(GA)_{MLCC}$ é necessário o cálculo da rigidez local à flexão do painel $(EI_{MLCC,local,liq})$ dada pela Equação (6), e da rigidez aparente à flexão do painel $(EI_{MLCC,ap,liq})$ dada pela Equação (7) (ABNT NBR 7190-7:2022).

$$(EI)_{MLCC,local,liq} = \frac{l_2 \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot (\delta_{local,2} - \delta_{local,1})} \quad (6)$$

$$(EI)_{MLCC,app,liq} = \frac{3 \cdot l_2 \cdot l^2 - 4 \cdot l_2^3}{48} \cdot \frac{(F_2 - F_1)}{(\delta_{global,2} - \delta_{global,1})} \quad (7)$$

Em que, F_2 é igual a 40% da força última, F_1 é igual a 10% da força última, $\delta_{local,2}$ e $\delta_{local,1}$ são os deslocamentos verticais locais e $\delta_{global,2}$ e $\delta_{global,1}$ são os deslocamentos verticais globais, ambos correspondentes a F_2 e F_1 , respectivamente. O l_2 é a distância entre o ponto de aplicação da força e o apoio, l_1 é a distância entre os pontos de medição dos deslocamentos locais e l é a distância entre os apoios. A rigidez ao cisalhamento do painel $(GA)_{MLCC}$ é dada pela Equação (8) (ABNT NBR 7190-7:2022).

$$(GA)_{MLCC} = \frac{24 \cdot (EI)_{MLCC,local,liq} \cdot (EI)_{MLCC,app,liq}}{(3 \cdot l^2 - 4 \cdot l_2^2) \cdot ((EI)_{MLCC,local,liq} - (EI)_{MLCC,app,liq})} \quad (8)$$

A rigidez ao cisalhamento dos painéis de MLCC de cinco camadas pode ser calculada em função do módulo de elasticidade transversal da madeira (G) e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), conforme Equação (9) (BIS EN 16351:2021).

$$(GA)_{MLCC} = \kappa \cdot \sum_{i=1}^n (G_i \cdot A_i) = \kappa \cdot b \cdot t_i \cdot (3 \cdot G + 2 \cdot G_{vt}) \quad (9)$$

Sendo que κ é o fator de cisalhamento e adotado igual a 0,25 para painéis de três, cinco e sete camadas, o G_i é o módulo de elasticidade transversal da camada i , A_i é a área da seção transversal da camada i , b é a largura do painel e t_i é a espessura da camada i . É importante salientar que a ABNT NBR 7190-7:2022 apresenta a equação apenas para os painéis de cinco camadas cujas espessuras sejam iguais. Assim sendo, notou-se durante a realização desse trabalho, a necessidade de realizar a equação para os painéis de três camadas, o qual é objeto de estudo.

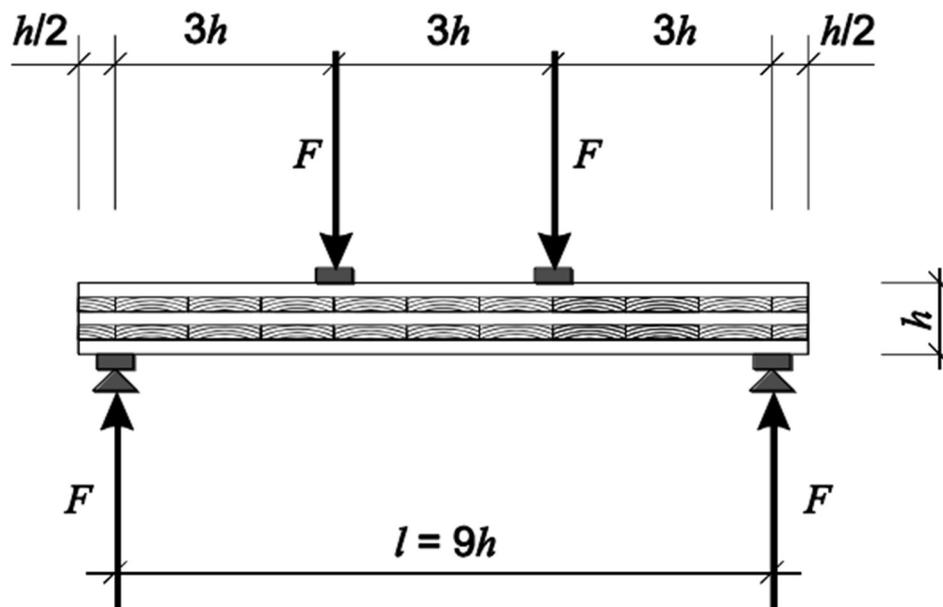
A resistência do painel ao *rolling shear* (f_{vt}) depende da força última e das propriedades geométricas da seção transversal, e pode ser calculada pela Equação (10) (ABNT NBR 7190-7:2022).

$$f_{vt} = \frac{F_u}{2} \frac{(ES)_{MLCC,vt,liq}}{b \cdot (EI)_{MLCC,total,liq}} \quad (10)$$

Em que F_u é igual à força de ruptura, $(ES)_{MLCC,vt,liq}$ é o momento estático e $(EI)_{MLCC,total,liq}$ é o momento de inércia considerando-se o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras das camadas longitudinais (E_0), em ambos os casos.

A ABNT NBR 7190-7:2022 sugere outro método de ensaio para determinação apenas da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}). Este consiste em um ensaio de flexão, a quatro pontos, com distância entre apoios igual a nove vezes a altura do painel ($9h$), distância entre os pontos de carregamento e distância entre o ponto de aplicação da força e apoio iguais a três vezes a altura ($3h$), conforme Figura 61, sendo que para esse caso, a medição dos deslocamentos verticais não é necessária.

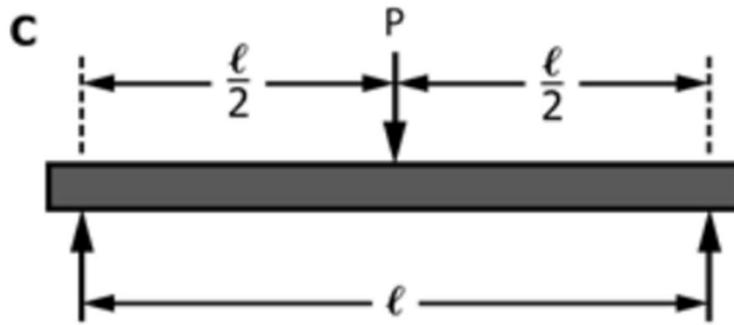
Figura 61-Método de ensaio proposto para verificar o comportamento *rolling shear*



Fonte: ABNT NBR 7190-7:2022

A ASTM D 198:2022 não especifica métodos de ensaio para propriedades *rolling shear*, mas, no entanto, o ensaio de flexão de três pontos tem sido bastante utilizado para determinar o módulo de elasticidade transversal de painéis de MLCC (G_{MLCC}). Ele é nomeado dessa forma pois o corpo de prova é bi apoiado e uma força pontual é aplicada no meio do vão entre os apoios, conforme Figura 62.

Figura 62-Método de ensaio proposto para o ensaio de flexão



Fonte: ASTM D 198:2022

O cálculo do módulo de elasticidade transversal do painel (G_{MLCC}) é feito pela plotagem do módulo de elasticidade longitudinal aparente ($E_{m,ap}$), que considera a influência das deformações por cisalhamento pela relação entre vão e altura (l/h) para cada um dos vãos testados. Considerando-se que o material seja isotrópico, e que o deslocamento vertical no meio do vão seja igual ao deslocamento máximo de uma viga bi apoiada com carregamento pontual no meio do vão e que a seção da peça seja retangular, tem-se que o módulo de elasticidade transversal do painel (G_{MLCC}) pode ser calculado pela Equação (11).

$$\frac{1}{E_{m,ap}} = \frac{1}{E_m} + \frac{1}{K G_{MLCC}} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (11)$$

Em que E_m é o módulo de elasticidade calculado na área livre de cisalhamento, K é o coeficiente de cisalhamento de acordo com a denominação da ASTM D 198 ($K=0,84$ para seções retangulares), $E_{m,ap}$ é o módulo de elasticidade aparente, G_{MLCC} é o módulo de elasticidade transversal do painel, l é o vão entre apoios e h é a altura da peça. As tensões máximas de cisalhamento podem ser calculadas pela Equação (12) (ASTM D 198: 2022).

$$\tau_{MLCC} = \frac{3 \cdot F_u}{4 \cdot b \cdot h} \quad (12)$$

Em que F_u é a força última do ensaio, b e h são a largura e a altura dos corpos de prova, respectivamente.

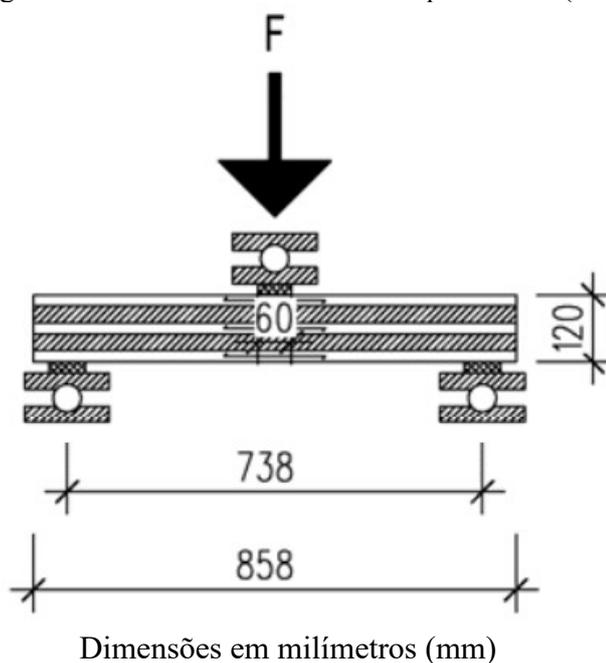
O método de ensaio proposto pela ANSI APA PRG 320:2022 é baseado nos ensaios de flexão de três pontos propostos pelas normas ASTM D 198:2022 e ASTM D 4761:2019. A norma recomenda o uso de alguns parâmetros não considerados nas normas de origem, como

por exemplo, a largura mínima do corpo de prova igual a 305 mm e o vão entre apoios igual a cinco e seis vezes a altura do corpo de prova.

Os ensaios de flexão em painéis de MLCC podem ser utilizados para o estudo das propriedades *rolling shear*, principalmente quanto à resistência (f_{vt}), para diversas finalidades, como por exemplo, o estudo de novos materiais ou espécies de madeira que podem ser utilizados para a fabricação dos painéis, a influência da espessura e do número de camadas e a influência do ângulo de cruzamento das fibras entre camadas.

Franke (2016) realizou um trabalho com objetivo de melhorar os materiais usados para fabricação de painéis de MLCC. Para isso, estudou a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC, feitos de madeira do gênero *Fagus*, por meio de ensaios experimentais de flexão de três pontos, de acordo com BIS EN 16351:2013. Os corpos de prova tiveram dimensões de 120 mm x 120 mm x 858 mm (altura x largura x comprimento) e vão entre os apoios de 738 mm, conforme ilustrado na Figura 63.

Figura 63-Método de ensaio utilizado por Franke (2016)



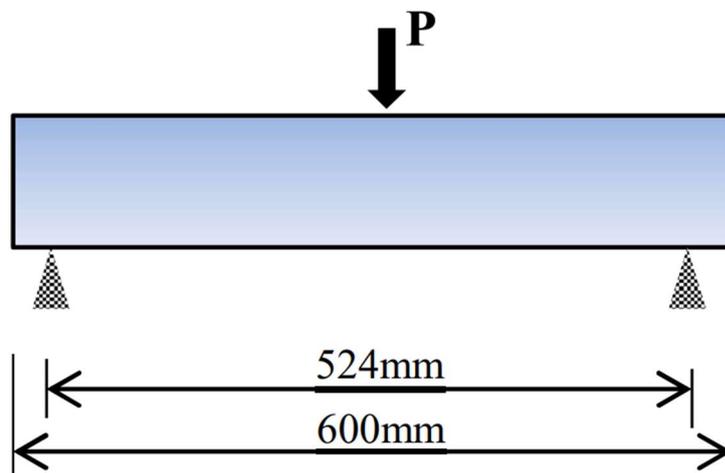
Fonte: Adaptado de Franke (2016)

Além da resistência (f_{vt}), foi estudada a influência da espessura das camadas utilizando-se espessuras de 2,4 mm, 10 mm, 20 mm e 33 mm. Dessa forma, concluíram que a variação da espessura da lamela influencia tanto na resistência (f_{vt}) quanto no modo de ruptura, uma vez que ela aumenta em função da espessura da camada. Além disso, os painéis de MLCC estudados tiveram melhor desempenho estrutural do que os fabricados com coníferas, sendo que a

resistência característica (f_{vt}) ao *rolling shear* foi de 3,8 MPa a qual foi duas vezes maior quando comparada à de madeira conífera.

Gu, Pang e Stoner (2016) estudaram as propriedades de flexão e *rolling shear* de painéis de MLCC de três camadas, fabricados com madeira de pinheiro do sul, em que a classificação estrutural era diferente, sendo que as peças com classificação mais alta foram usadas na camada transversal. Foram fabricados dois lotes de painéis, um em escala real e o outro em escala reduzida e utilizados quatro tipos de adesivos estruturais (melanina-formaldeído, fenol-formaldeído, poliuretano e emulsão polimérica isocianato). Para os ensaios *rolling shear*, foram propostas duas configurações para os corpos de prova: com as lamelas externas dispostas paralelamente ao vão de flexão (direção de maior resistência) e perpendicularmente ao vão (direção de menor resistência). Para o primeiro caso, foram fabricadas 34 amostras, sendo que dez foram colados com adesivo poliuretano (PUR) e oito exemplares para cada um dos três tipos de adesivos restantes. Para o segundo caso, foram fabricados 26 elementos, sendo excluídos aqueles colados com adesivo à base de emulsão polimérica isocianato (EPI). As dimensões das peças foram iguais para ambos os casos, sendo iguais a 600 mm x 305 mm x 105 mm (comprimento x largura x altura). O método de ensaio escolhido foi flexão de três pontos, de acordo com ASTM D 4761:2019, o qual é ilustrado na Figura 64.

Figura 64-Método de ensaio adotado por Gu, Pang e Stoner (2016)



Fonte: Gu, Pang e Stoner (2016)

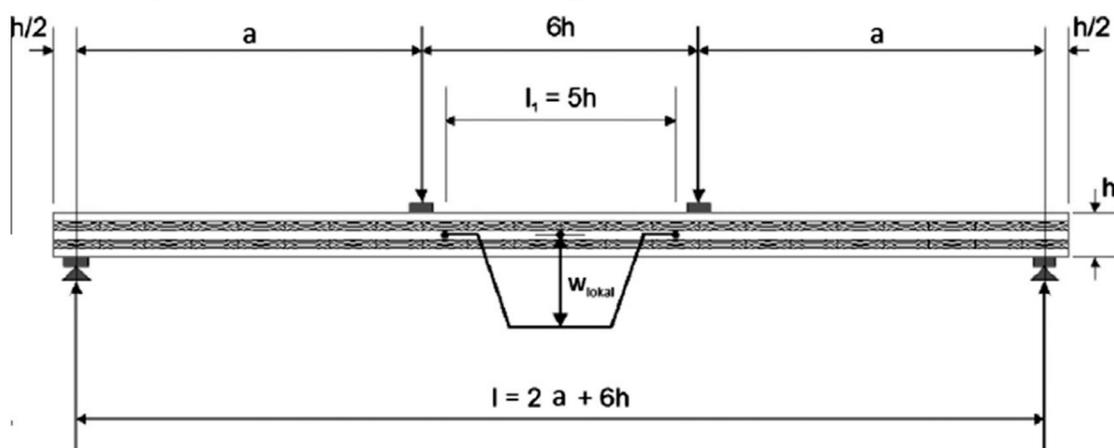
Os modos de ruptura foram diferentes de acordo com a direção de maior ou menor resistência, sendo que a por *rolling shear* aconteceu apenas na primeira situação.

Após a análise dos resultados, os autores concluíram que todos os adesivos utilizados são adequados para a fabricação de painéis de MLCC sendo que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) não foi alterada significativamente de acordo com os resultados nos ensaios experimentais

em relação aos adesivos utilizados. Os corpos de prova colados com adesivo à base de emulsão polimérica isocianato (EPI) foram os que tiveram menor resistência (f_{vt}), uma vez que se romperam prematuramente por separação das camadas na linha de cola. Os valores característicos obtidos pelos ensaios experimentais, de acordo com o adesivo empregado na fabricação das peças, foram de 1,39 MPa; 1,68 MPa, 1,31 MPa e 1,37 MPa para os adesivos à base de melanina-formaldeído (MUF), fenol-formaldeído (PRF), emulsão polimérica isocianato (EPI) e poliuretano (PUR). Dessa forma, concluíram que o uso de adesivo à base de emulsão polimérica isocianato (EPI) pode reduzir a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), uma vez que tiveram ruptura prévia por separação das camadas na linha de cola.

Sikora, Mc Polin e Harte (2016) analisaram a influência da espessura e do número de camadas na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC feitos de madeira da espécie “*Picea sitchensis*” variando-se o número de camadas (três e cinco) e a sua espessura (20 mm, 24 mm e 40 mm). Para isso, foram definidas quatro configurações de painéis e para cada uma delas fabricados três corpos de prova. Antes da fabricação dos painéis, as peças de madeira foram classificadas quanto ao módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0), cujo valor médio foi de 8.160 MPa, e quanto à densidade que variou entre 437 e 348 kg/m³. Após isso, elas foram coladas com adesivo estrutural poliuretano (PUR) mono componente, com gramatura de 160 g/m² e então, prensadas sob pressão de 0,6 MPa durante 120 minutos. As dimensões elementos variaram de 60 a 120 mm para a altura, 270 mm a 576 mm para a largura e 720 mm a 1200 mm. O ensaio experimental de flexão foi de acordo com a BIS EN 16351:2013, sendo que foram medidos apenas os deslocamentos locais por dois LVDTs, os quais foram posicionados no meio do vão e em ambos os lados do corpo de prova, conforme Figura 65, em que a é igual a três vezes a altura do corpo de prova ($a=3h$).

Figura 65-Ensaio de flexão realizado por Sikora, Mc Polin e Harte (2016)



Fonte: Sikora, Mc Polin e Harte (2016)

As resistências médias ao *rolling shear* (f_{vt}) foram de 2 MPa, 1,7 MPa e 1 MPa, para painéis de três camadas com espessura de 20 mm, 24 mm e 40 mm, respectivamente, e para os painéis de cinco camadas com espessura de 20 mm foi de 1,2 MPa. Dessa forma, concluíram que os resultados experimentais apresentaram uma tendência generalizada, em que ambas as propriedades (resistência a flexão e ao *rolling shear*) diminuem com o aumento da espessura do painel de MLCC.

O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018) fizeram outra pesquisa, semelhante ao estudo anterior, alterando-se a classe de resistência da madeira utilizada e as dimensões dos corpos de prova. Para esse caso, foram escolhidas apenas duas espessuras de camadas (20 mm e 40 mm), madeira da espécie “*Picea sitchensis*” e as peças foram fabricadas com três camadas, as quais tiveram alturas finais de 60 mm e 100 mm, e de cinco camadas, com 120 mm de altura, largura constante de 584 mm e comprimento variável. Antes da colagem, as lamelas foram classificadas para se determinar o módulo de elasticidade paralelo às fibras por meio de ensaio de vibração, resultando-se em valor médio de 8.098 MPa. Para cada configuração de ensaio foram feitos oito amostras totalizando-se 48. A metodologia utilizada foi a mesma empregada por Sikora, Mc Polin e Harte (2016). Quanto aos modos de rupturas apresentados, a maioria dos elementos teve ruptura típica por *rolling shear*, conforme ilustrado na Figura 66. No entanto, apenas no painel de cinco camadas, a ruptura ocorreu por separação das camadas na linha de cola antes da ruptura por cisalhamento.

Figura 66-Modo de ruptura dos painéis de MLCC (a) Cinco camadas (b) Três Camadas



Fonte: O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018)

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), para painéis de três camadas, foram próximos a 2,20 MPa, para aqueles com camadas de 20 mm de espessura, e em torno de 1,40 MPa, para aqueles com espessura de camada de 40 mm. Os painéis de cinco camadas tiveram valores menores

quando comparados aos de três camadas e 60 mm de espessura o qual foi em torno de 1,40 MPa. Assim, confirmaram a tendência de que, tanto para os valores característicos quanto para os valores médios, quanto menor a espessura do painel, maior a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}).

Niederwestberg *et al.* (2018a) estudaram as propriedades de cisalhamento de elementos lamelados de madeira híbridos e homogêneos lamelados de madeira (MLC e MLCC), por meio de sua resistência última à flexão, formados por três e cinco camadas e diferentes tipos de materiais. Para os painéis de três camadas foram utilizados três materiais diferentes: madeira, painéis de lascas laminado (LSL) e painéis de lascas orientadas (OSB), com densidades de 449 kg/m³, 733 kg/m³ e 715 kg/m³, respectivamente. Para os painéis com cinco camadas foram utilizados dois materiais: madeira e painéis de lascas laminado (LSL), os quais passaram por caracterização prévia das propriedades de tração, cisalhamento e de flexão, para a avaliação do módulo de elasticidade paralelo às fibras e o módulo de ruptura. As peças foram coladas com adesivo poliuretano (PUR) mono componente com gramatura de 220 g/m², o qual foi aplicado em uma das faces das peças e submetidas à tensão de prensagem de 1,38 MPa por duas horas.

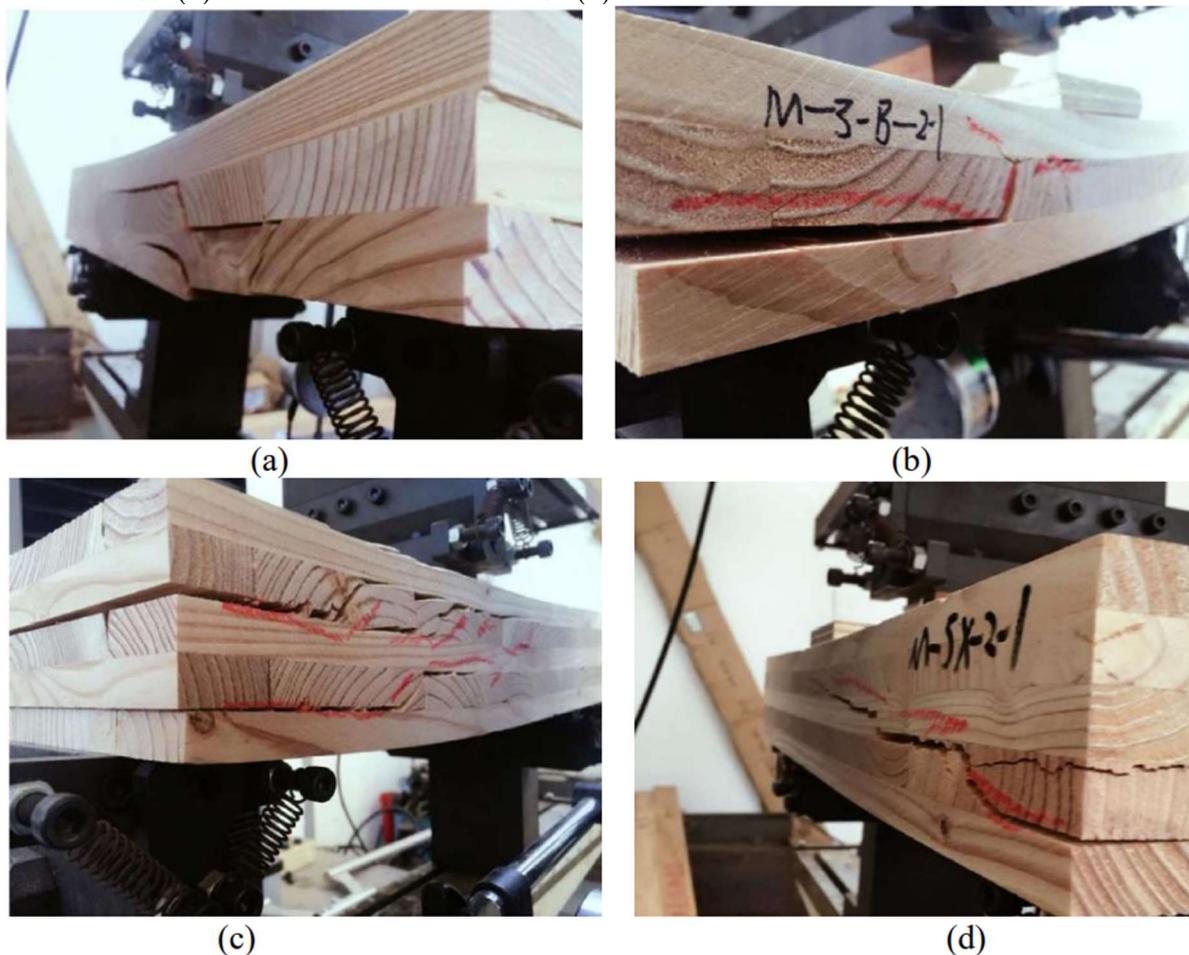
Para cada configuração de corpo de prova (três ou cinco camadas), foram feitas sete configurações de painéis, variando-se a direção das fibras das camadas em relação ao vão de flexão (perpendicular ou paralela ao vão) e a disposição dos materiais utilizados em cada camada (painéis homogêneos ou painéis mistos obtidos pela alternância dos materiais das camadas externas e interna). As dimensões finais dos painéis foram de 2440 mm x 1220 mm x 114 mm (comprimento x largura x espessura) e 2743 mm x 1219 mm x 184 mm (comprimento x largura x espessura) para as peças de três e cinco camadas, respectivamente, dos quais foram retiradas as amostras, sendo quatro por painel, caso de três camadas, com 686 mm x 197 mm (comprimento x largura) e dois por painel com 1120 mm x 195 mm (comprimento x largura), para o caso de cinco camadas.

O método de ensaio escolhido foi flexão de três pontos, de acordo com ASTM D 198:2014 com relação entre vão e altura do corpo de prova igual a cinco e 5,5 para as amostras com três e cinco camadas, respectivamente. No total, foram ensaiados 84 e 40 elementos para cada grupo, três e cinco camadas, respectivamente, os quais tiveram diferentes modos de ruptura (separação das camadas na linha de cola e *rolling shear*). Em ambos os casos, ela ocorreu por *rolling shear* em painéis com camadas transversais de madeira e por separação das camadas na linha de cola entre duas camadas com materiais diferentes. A resistência última dos painéis de três camadas variou de 2,91 MPa a 4,60 MPa, e para cinco camadas variou de 1,2 MPa a 3,6 MPa, sendo que as dos painéis híbridos foram 43% maiores do que os não-híbridos,

para três camadas, e 143% maior para cinco camadas. Assim, os autores constataram que o material estrutural composto de madeira, quando usado nas camadas transversais, pode aumentar significativamente a resistência última de painéis lamelados de madeira.

Gong *et al.* (2019) estudaram o impacto do número, da espessura e da orientação das camadas de painéis de MLCC feitos com madeira da espécie “*Larix kaempferi*”. Para isso, foram produzidas quatro diferentes configurações, em que foram fabricados elementos de três camadas, variou-se as espessuras (45 mm e 75 mm) e manteve-se o cruzamento ortogonal das fibras entre camadas (90°), no caso dos de cinco camadas, manteve-se as espessuras em 75 mm e variou-se o cruzamento das fibras entre camadas vizinhas (90° e 45°). As peças de madeira tinham densidade média de 597 kg/m³, a umidade média de 12%, as quais foram divididas em três classes de resistência (baixa, média e alta), de acordo com o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0). Então, as peças foram coladas com adesivo mono componente poliuretano (PUR) com gramatura de 200 g/m² e prensadas sob tensão de 1,2 MPa. Os painéis foram montados com as camadas longitudinais feitas com peças de madeira com módulo de elasticidade na flexão entre 12.000 e 16.000 MPa e as camadas transversais com peças de madeira com módulo de 8.000 a 12.000 MPa. Para o ensaio de *rolling shear* foram retirados desses painéis, 36 corpos de prova com dimensões de 510 mm x 305 mm x 75 mm e 12 com 510 mm x 305 mm x 45 mm (comprimento x largura x espessura da lamela). O método de ensaio foi realizado de acordo com ASTM D 198:2002. Eles tiveram ruptura típica por *rolling shear* e por separação das camadas ao longo da linha de cola, conforme Figura 67, sendo o que o modo predominante foi por cisalhamento.

Figura 67-Modos de ruptura obtidos por Gong *et al.* (2019) (a)(c)Cruzamento das fibras em 75°(b)Cruzamento das fibras em 45° (d) Cruzamento das fibras entre 5° e 45°

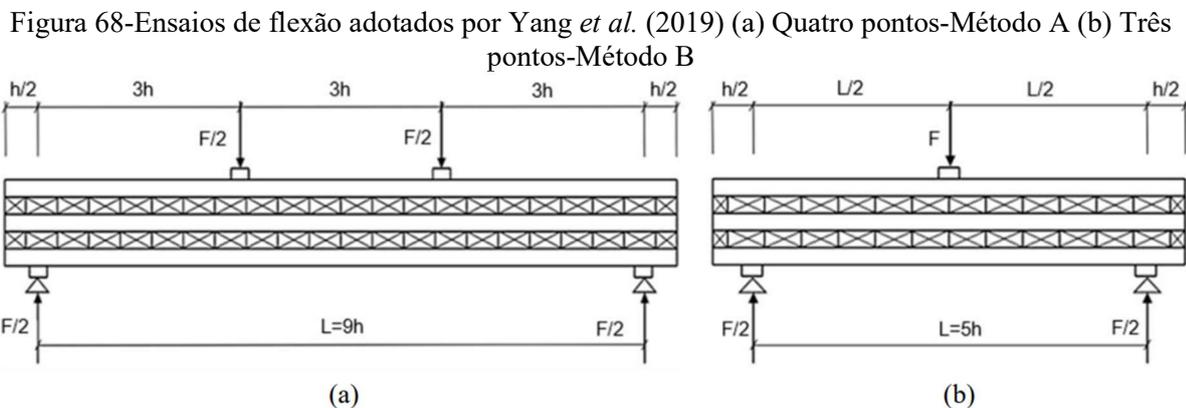


Fonte: Gong *et al.* (2019)

Os módulos de elasticidade transversal (G_{vt}) variaram de 137 a 172 MPa e as resistências (f_{vt}) de 2,33 MPa a 3,37 MPa, sendo que diminuíram 4,07% e 35,62%, respectivamente, quando o número de camadas aumentou de três para cinco, para a mesma espessura de camada. Tal fato foi explicado devido aos defeitos macroscópicos da madeira aumentarem de acordo com a espessura do painel e o número de camadas. A resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) dos painéis com cruzamento em 45° foram 46,64% e 24,94% maiores, respectivamente, do que as peças fabricadas com o mesmo número de camadas e com inclinação de 90°. Portanto, concluíram que as propriedades *rolling shear* diminuíram de acordo com o número de camadas e que elas podem ser melhoradas pela alteração da inclinação entre as fibras das camadas longitudinais e transversais.

Yang *et al.* (2019) estudaram efeito da quantidade de camadas (três e cinco) e dos métodos de ensaio de flexão (três ou quatro pontos) nas propriedades de cisalhamento de painéis fabricados com peças de madeira da espécie “*spruce-pine-fir*”, com densidade de 410 kg/m³ e

umidade de 14% e seção transversal de 38 mm x 89 mm (espessura x largura), sem a colagem das faces laterais das lamelas, com adesivo estrutural com gramatura de 180 g/m² e prensados por 1,5 hora a 1 MPa. Os corpos de prova foram retirados desses painéis com largura de 356 mm, altura de acordo com o número de camadas (114 mm e 190 mm) e comprimentos variáveis, os quais foram divididos em quatro grupos (3A, 5A, 3B e 5B) sendo que os números indicam a quantidade de camadas e a letra qual método de ensaio utilizado, a letra A para flexão de quatro pontos e a B para três pontos. Os ensaios de flexão de quatro pontos foram realizados de acordo com a BIS EN 16351:2015, conforme Figura 68a, enquanto os ensaios de flexão de três pontos foram realizados de acordo com ASTM D198:2015, conforme Figura 68b.



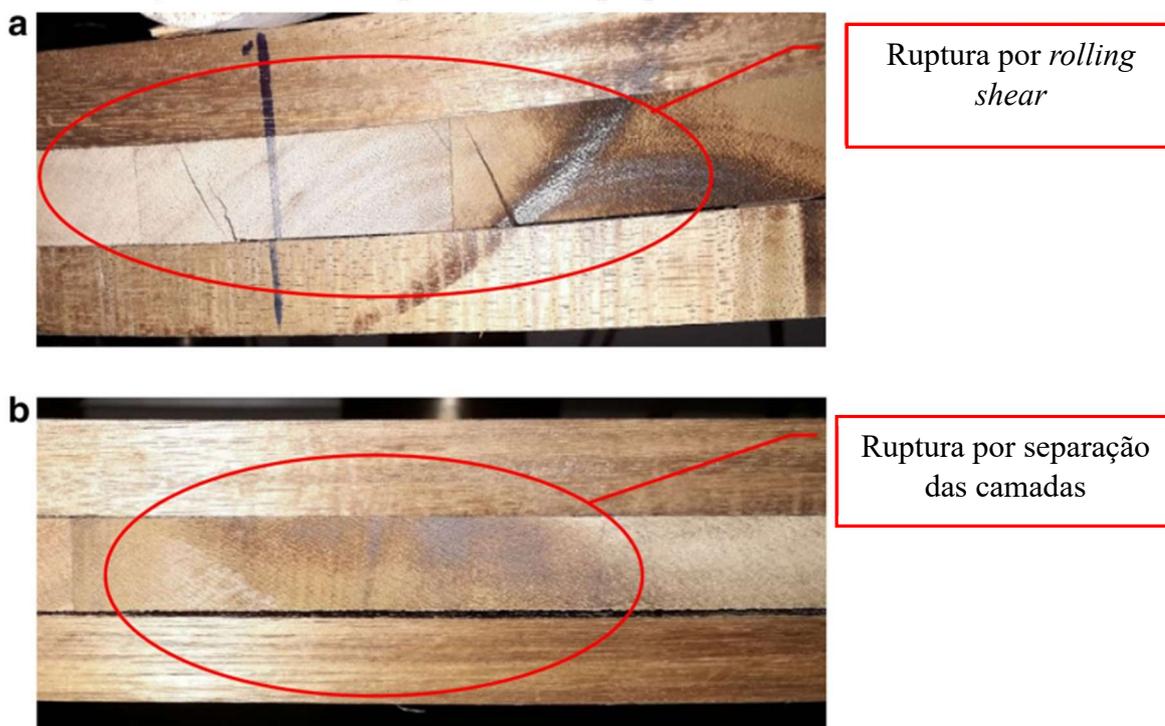
Fonte: Yang *et al.* (2019)

A resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) variou de acordo com o método de ensaio, para os de três pontos (1,36 MPa) apresentaram valor maior do que os de quatro pontos (1,15 MPa). Ainda se notou que a resistência (f_{vt}) foram inversamente proporcionais ao número de camadas do painel, já que as dos grupos 3A e 3B foram 32% e 53% maiores do que os grupos 5A e 5B. Quanto ao modo de ruptura, ocorreu principalmente por *rolling shear*, por tração da camada inferior e na linha de cola entre as camadas, sendo que a possibilidade de ocorrência por *rolling shear* aumentou de acordo com o número de camadas. Dessa forma, concluíram que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) varia tanto quanto ao método do ensaio adotado, como também quanto ao número de camadas (YANG *et al.*, 2019).

Mohd Yusof *et al.* (2019) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de painéis, formados por três camadas, fabricados com madeira da espécie “*Acacia mangium*” e utilizando-se dois tipos de adesivo estrutural, à base de fenol resorcinol-formaldeído (PRF) e à base de poliuretano (PUR). As propriedades mecânicas estudadas foram resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), rigidez e resistência à flexão e módulo de elasticidade transversal do

painel (G_{MLCC}). As peças de madeira que foram utilizadas eram provenientes da Malásia e tinham densidade de 673 kg/m^3 e umidade de $12 \pm 3\%$. Para a realização dos ensaios, foram fabricados 20 painéis (dez para cada tipo de adesivo) com dimensões de $1000 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 54,5 \text{ mm}$ (comprimento \times largura \times altura), formados por peças de madeiras coladas lateralmente e verticalmente alternando-se o adesivo, os quais tinham gramatura de 250 g/m^2 , e foram prensados sob pressão de $1,5 \text{ MPa}$ por uma hora e meia. De cada painel, foram retiradas amostras de $470 \text{ mm} \times 70,5 \text{ mm} \times 54,5 \text{ mm}$ (comprimento \times largura \times altura). O módulo de elasticidade transversal (G_{MLCC}) foi determinado por ensaio experimental de flexão de três pontos com vão entre apoios igual a cinco vezes a altura do corpo de prova, segundo BIS EN 408:2010 e BIS EN 16351:2011. O seu cálculo foi feito pelo rearranjo dos termos da Equação (11), o qual foi igual a $116,5 \text{ MPa}$, para as amostras coladas com adesivo PRF, cujo valor foi 20% maior do que aquelas coladas com adesivo PUR, que tiveram um módulo de elasticidade transversal do painel (G_{MLCC}) igual a 92 MPa . Ocorreram dois modos de ruptura, sendo por separação das camadas na linha de cola e por *rolling shear*, conforme Figura 69.

Figura 69-Modos de ruptura obtidos na pesquisa de Mohd Yusof *et al.* (2019)



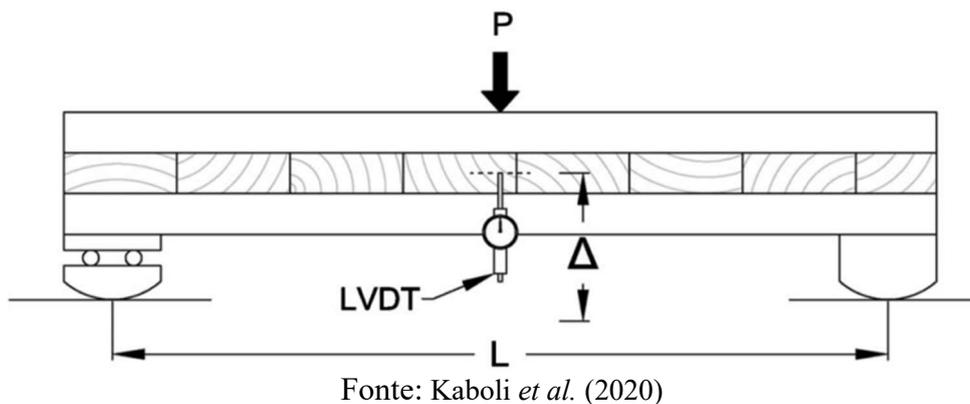
Fonte: Adaptado de Mohd Yusof *et al.* (2019)

Dessa forma, concluíram que a espécie escolhida e o processo de fabricação adequado podem aumentar a disponibilidade de matéria-prima disponível para fabricação de painéis, já

que os que foram estudados possuíam boas propriedades físicas e mecânicas, incluindo-se aqueles colados com adesivo PUR.

Kaboli *et al.* (2020) avaliaram a possibilidade de uso de madeiras das espécies “*Tsuga canadensis*” e “*Pinus strobus*”, provenientes do nordeste dos Estados Unidos, para a fabricação de painéis de MLCC, por meio de sua caracterização quanto à rigidez à flexão e rigidez ao cisalhamento. Os painéis de MLCC foram montados, colados e prensados sendo aplicada uma pressão de 0,69 MPa por seis horas. No total, foram fabricados dezessete painéis, sendo que 13 tinham as lamelas externas paralelas ao vão de flexão (sete painéis de madeira da espécie “*Tsuga canadensis*” e seis para a espécie “*Pinus strobus*”) e quatro painéis com as lamelas externas perpendiculares ao vão de flexão (dois painéis por espécie). Os painéis ficaram com dimensões finais de 99 mm x 305 mm x 3.048 mm (espessura x largura x comprimento), dos quais foram retirados os corpos de prova para o ensaio de flexão com vãos menores, com comprimento de 0,686 m. A rigidez ao cisalhamento do painel de MLCC foi obtida por meio de ensaio de flexão de três pontos, de acordo com ASTM D 198:2013, apenas em peças com camadas externas dispostas ao longo do vão de flexão. Os deslocamentos dos foram medidos por dois LVDTs posicionados no meio do vão e em ambos os lados da peça, conforme ilustrado na Figura 70.

Figura 70-Método de ensaio adotado por Kaboli *et al.* (2020)



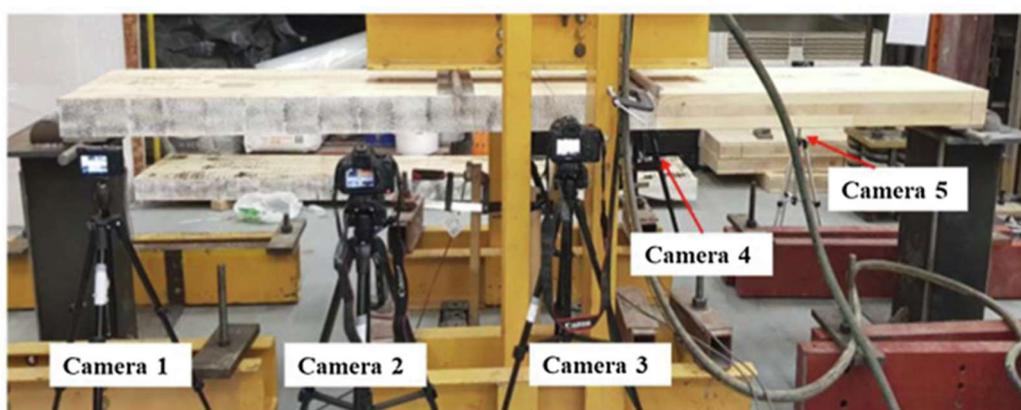
Todos os corpos de prova tiveram ruptura por *rolling shear* e a rigidez ao cisalhamento para espécie “*Pinus strobus*” foi maior do que aquele feitos com “*Tsuga canadensis*”, as quais foram de $23,6 \times 10^6$ e $19,5 \times 10^6$ N/m, respectivamente. Assim, os autores concluíram que ambas as espécies de madeira podem ser adotadas para a fabricação de painéis de MLCC, desde que atendam os parâmetros mínimos exigidos pela ANSI/APA PRG 320:2013.

Navaratnam *et al.* (2020) avaliaram o impacto da variação de espessura dos painéis nas propriedades de cisalhamento de painéis feitos de “*Pinus Radiata*” australiano com três e cinco camadas e espessuras de 105 mm e 145 mm, respectivamente. A espessura das lamelas variou

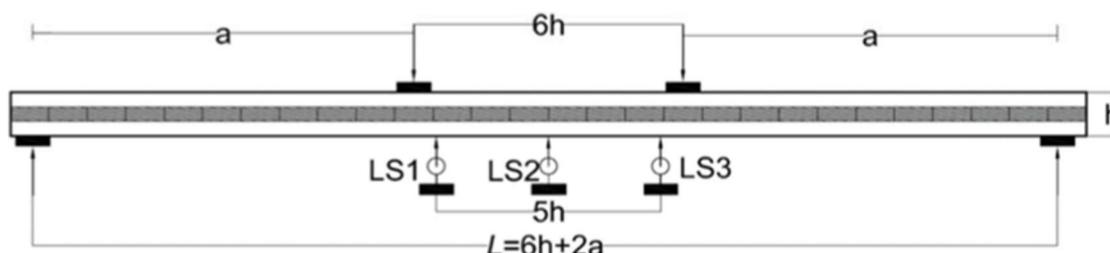
de acordo com o número de camadas. Para os de três camadas, todas as lamelas tiveram espessura de 35 mm, para os de cinco camadas, as lamelas longitudinais tiveram espessura de 35 mm e as transversais de 20 mm. Os corpos de prova foram retirados desses painéis, com largura de 520 mm, comprimento variável e espessura igual à dos painéis de MLCC. Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com BIS EN 16351:2015. Os deslocamentos foram medidos por transdutores a *laser* e por correlação de imagens digitais, conforme Figura 71, em que os transdutores foram posicionados em uma lateral do corpo de prova e as câmeras na outra lateral. As resistências ao *rolling shear* (f_{vt}) foram comparadas a outros estudos e constaram que os valores obtidos foram coerentes e observaram uma tendência de aumento em função da espessura do MLCC (NAVARATNAM *et al.*, 2020).

Figura 71-Método de ensaio adotado por Navaratnam *et al.* (2020)

(a) Posicionamento das câmeras



(b) Posicionamento dos transdutores

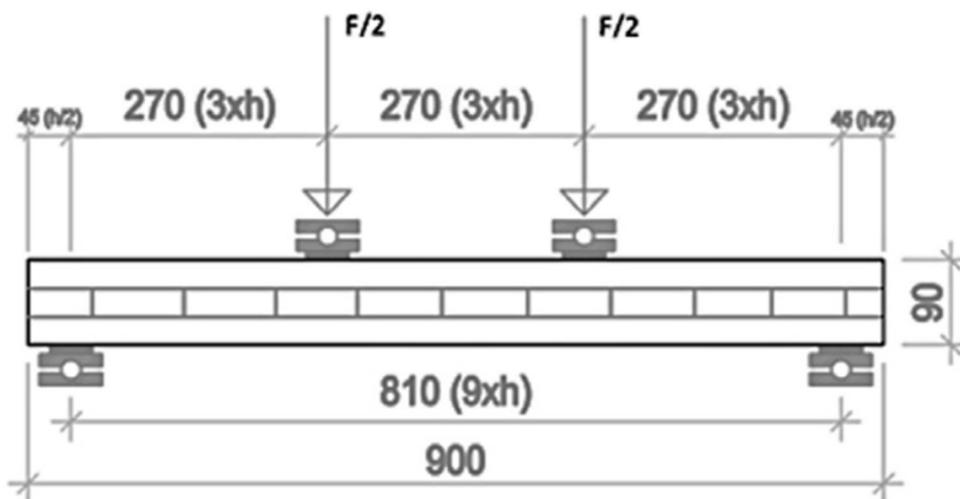


Fonte: Navaratnam *et al.* (2020)

Corpataux, Okuda e Kua (2020) estudaram cinco espécies tropicais de crescimento rápido (“*Alocasia macrophyllus*”, “*Falcataria moluccana*”, “*Acacia mangium* x *Acacia auriculiformis*” e “*Picea abies*”), provenientes da Indonésia e Letônia, com o objetivo de analisar a viabilidade de seu uso para fabricação de MLCC. Os painéis fabricados foram de três camadas de 30 mm com cinco configurações diferentes, de acordo com as espécies escolhidas.

Assim, foram fabricados painéis com apenas uma espécie (“*Picea Abies*”, “*Alocasia macrophyllus*” ou “*Falcataria moluccana*”) e painéis mistos com camadas externas (“*Acacia mangium*” x “*Acacia auriculiformis*”) com espécies diferentes das camadas internas (“*Falcataria moluccana*” e “*Alocasia macrophyllus*”). Os painéis de MLCC foram colados lateralmente e entre as camadas, por adesivo estrutural poliuretano (PUR) com gramatura de 170 g/m² e então, prensados a frio sob tensão de 0,3 MPa por três horas. No total, foram produzidos cinco tipos de corpos de prova com dimensões finais de 900 mm x 450 mm x 90 mm (comprimento x largura x espessura), dos quais foram retiradas quatro amostras por tipo. Estes foram utilizados para determinar a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), por meio de ensaios experimentais de flexão de quatro pontos, de acordo com BIS EN 16351:2015, em que os autores utilizaram o vão entre apoios igual a nove vezes a espessura do painel, conforme Figura 72.

Figura 72-Método de Ensaio utilizado por Corpataux, Okuda e Kua (2020)



Dimensões em milímetros (mm)

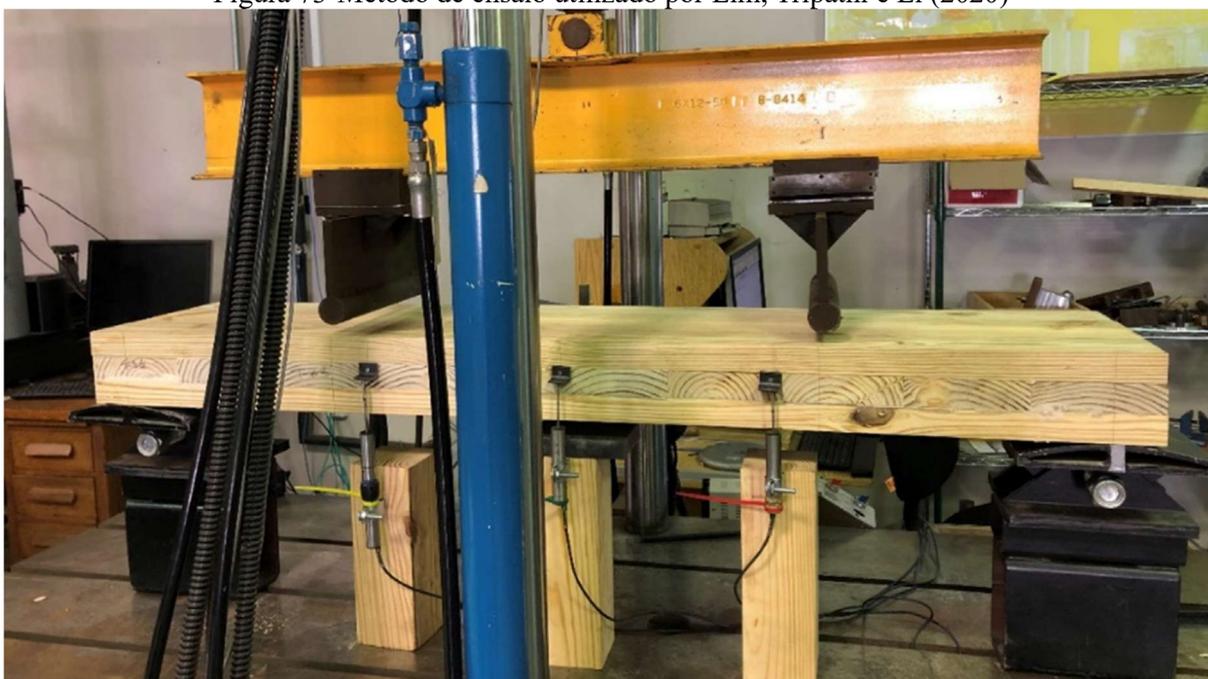
Fonte: Corpataux, Okuda e Kua (2020)

Todas as peças apresentaram ruptura típica por *rolling shear*. A maior resistência (f_{vt}) foi de 2,78 MPa, em painéis mistos fabricados com “*Acacia mangium* x *Acacia auriculiformis*” nas lamelas externas e “*Alocasia macrophyllus*” na camada interna, e a menor de 1,88 MPa em painéis fabricados apenas com “*Picea Abies*”. Dessa forma, atestaram que as espécies podem ser indicadas para fabricação de painéis de MLCC.

Lim, Tripathi e Li (2020) estudaram a influência de tratamentos preservativos nas propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC de três camadas, produzidos de madeira de

pinho amarelo americano a partir de peças não tratadas e tratadas. Antes da fabricação dos painéis, o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras e o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) foram medidos por ensaios não-destrutivos. Os valores médios para essas propriedades de madeira não tratada foram 11,08 GPa e 231,42 MPa, respectivamente, enquanto para tratada foram de 9,60 GPa e 236 MPa, respectivamente. Para a realização dos ensaios, 13 painéis de cada tipo (madeira tratada e não-tratada) foram fabricados com dimensões finais de 1370 mm x 305 mm x 105 mm (comprimento x largura x altura) sendo que as lamelas tiveram dimensões finais de 35 mm x 137 mm (espessura x largura). Cada corpo de prova foi formado por seis lamelas na camada longitudinal e dez lamelas na camada transversal, sendo que as camadas foram compostas por peças com módulos de elasticidade longitudinal aparente próximos para evitar variações significativas nas propriedades mecânicas entre elas. No processo de fabricação, as peças foram serradas nas dimensões especificadas e coladas por uma primeira camada de solução diluída com gramatura de 20 g/m² e por adesivo estrutural mono componente poliuretano (PUR) com gramatura de 150 g/m². Após a colagem, elas foram pensadas sob tensão de 0,69 MPa por duas horas e então armazenadas por pelo menos uma semana antes da realização dos ensaios experimentais. O método de ensaio adotado na pesquisa foi o de flexão de quatro pontos, de acordo com BIS EN 16351:2015, e para medir o deslocamento global e local, foram empregados LVDTs posicionados no centro do vão e no vão de zona livre de cisalhamento, conforme Figura 73.

Figura 73-Método de ensaio utilizado por Lim, Tripathi e Li (2020)



Fonte: Lim, Tripathi e Li (2020)

Foi verificado que o tratamento preservativo aumentou a rigidez ao cisalhamento do painel (G_{MLCC}) de $11,94 \cdot 10^6$ N/m para $12,24 \cdot 10^6$ N/m e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) de 132 MPa para 147 MPa. No entanto, houve a diminuição da resistência média *rolling shear* (f_{vt}) de 2,16 MPa para 1,87 MPa. Dessa forma, concluíram que o tratamento preservativo na madeira provocou alterações nas propriedades estudadas, porém não foram alterações significativas.

Gardner *et al.* (2020) estudaram a influência dos vazios laterais entre as lamelas de camadas transversais na resistência *rolling shear* (f_{vt}) de painéis com cinco camadas e fabricados com madeira do tipo “*spruce-pine-fir*”. Antes da fabricação dos painéis, as peças de madeira foram caracterizadas quanto ao módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras na flexão (E_0), o qual teve valor de 11,72 GPa. Durante o processo de produção, as lamelas foram cortadas com seção de 180 mm x 35 mm, e então coladas e submetidas à tensão de prensagem de 0,86 MPa por três horas. Os painéis foram divididos em quatro grupos, de acordo com o espaçamento lateral, os quais foram de 0 mm, 6 mm, 89 mm e 178 mm. Para cada grupo foram fabricados dois painéis com 2,45 m de comprimento por 1,22 m de largura, e foram nomeados de L0 (sem espaçamento lateral), L6 (espaçamento lateral de 6 mm), L89 (espaçamento lateral de 89 mm) e L178 (espaçamento lateral de 178 mm). De tais painéis, foram retirados oito amostras com dimensões de 1194 mm x 292 mm x 175 mm (comprimento x largura x altura), sendo 16 corpos de prova para cada grupo e 64 no total.

O método de ensaio adotado foi a flexão de três pontos, a qual teve o seu procedimento baseado na ASTM D198:2015, com vão entre apoios de pelo seis vezes a altura do elemento, resultando na distância de 1041 mm. Quatro amostras foram selecionadas de cada configuração para realizar a mediação da distorção por meio de correlação de imagens digitais utilizando o programa GOM Metrology, conforme Figura 74.

Figura 74-Método de ensaio realizado por Gardner *et al.* (2020)

Fonte: Adaptado de Gardner *et al.* (2020)

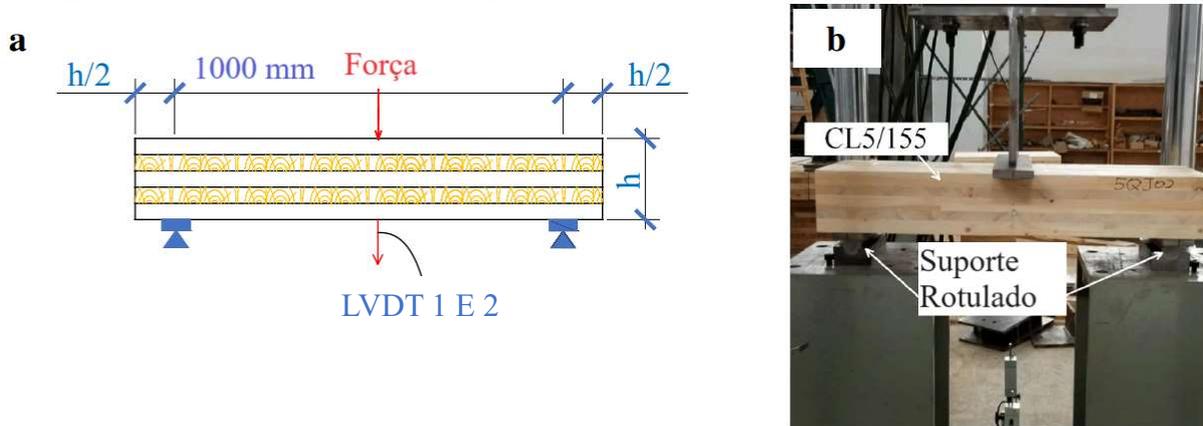
De acordo com os resultados, os corpos de prova L6 mm tiveram uma redução de 13% na resistência (f_{vt}) ao cisalhamento em relação a L0. Quando comparados aos de referência (L0), os valores de L89 diminuíram em 32% e os dos L178 em 44%, o que sugere que esses espaçamentos introduziram tensões maiores e, conseqüentemente, reduziram a capacidade última do painel de MLCC.

He *et al.* (2020) avaliaram a influência da espessura dos painéis nas propriedades de flexão, cisalhamento e compressão de painéis de MLCC, fabricados com madeira da espécie “*Picea mariana*”, com o objetivo de aumentar a quantidade de espécies de madeira disponíveis para fabricação dos painéis. Para essa finalidade, foram avaliados painéis de três e cinco camadas, com madeira com classificação estrutural n° 2, os quais foram fabricados de acordo com ANSI/ PRG 320:2018. Para ambos os casos, os painéis tinham 310 mm de largura, e os de cinco camadas foram fabricados com camadas longitudinais com lamelas de 140 mm x 35 mm (largura x espessura) e camadas transversais com lamelas de 140 mm x 25 mm, resultando em peças com espessura final de 155 mm e densidade igual a 490 kg/m³. Os painéis de três camadas tinham as camadas longitudinais e transversal formadas por peças de 140 mm x 35 mm (largura x espessura) resultando em painel com 105 mm de espessura e densidade igual a 486 kg/m³. As peças de madeira foram coladas com adesivo poliuretano (PUR), incluindo a colagem lateral das lamelas, e a prensagem foi feita a frio. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão, no total de dez para cada configuração, foram retirados desses painéis com comprimento de 680 mm, para o de três camadas, e comprimento de 1000 mm para o de cinco camadas.

A determinação da resistência ao cisalhamento (f_{vt}) foi feita por meio de ensaios de flexão de três pontos com vão entre apoios de 5,5 vezes a altura do elemento (5,5h), conforme

ANSI/APA PRG 320:2018. O deslocamento vertical do meio do vão foi medido por LVDTs posicionados em ambos os lados do corpo de prova, conforme Figura 75.

Figura 75-Método de Ensaio adotado por He *et al.* (2020) (a)Esquema de Ensaio (b) Ensaio real



Fonte: Adaptado de He *et al.* (2020)

Os corpos de prova tiveram ruptura por *rolling shear*, em ambas as configurações, sendo que ela também ocorreu por separação das camadas na linha de cola, no entanto, para esse caso os resultados foram descartados. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), para os painéis de três camadas, foi de 1,74 (7,5%) MPa enquanto para o de cinco, foi de 1,80 (6,5%) MPa. Dessa forma, os resultados mostraram que com aumento da altura do painel, para mesma relação de vão/espessura, houve um pequeno aumento na resistência característica ao cisalhamento, o que pode ter ocorrido devido ao fato dela ser determinada principalmente pela resistência ao cisalhamento das lamelas da camada transversal do painel. Mesmo assim, os painéis tiveram propriedades de flexão e cisalhamento adequadas de acordo com ANSI/APA PRG 320:2018. Dessa forma, concluiu-se que a espécie e a configuração de painel estudados podem ser utilizadas.

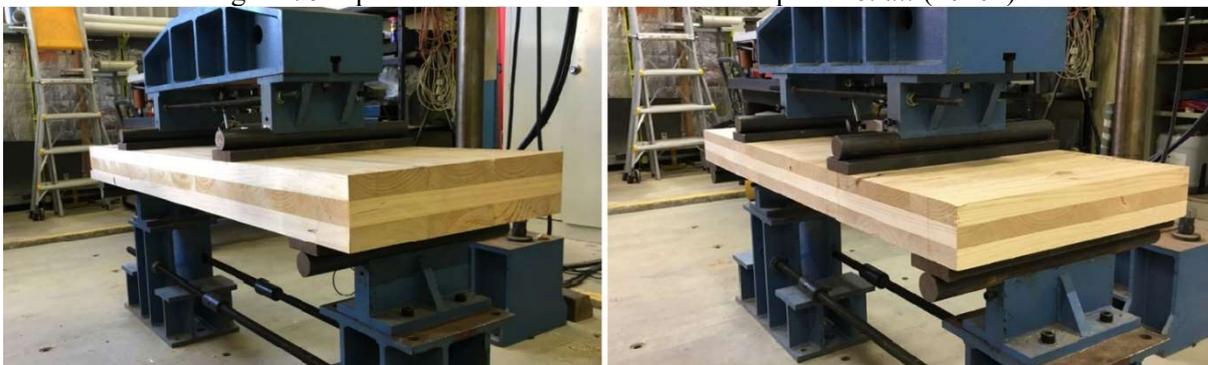
Li *et al.* (2020a) estudaram a viabilidade do uso de painéis de madeira de lascas orientadas para construção (OSB), cuja resistência é maior do que o painel de madeira de lascas orientadas simples, na fabricação de painéis híbridos de MLCC. Para a caracterização do OSB foram feitos ensaios de compressão axial e de flexão de três pontos. Os ensaios de compressão axial foram adotados para a obtenção do módulo de elasticidade e os coeficientes de Poisson, enquanto os de flexão, para a obtenção do módulo de elasticidade aparente, o módulo de elasticidade transversal do painel (G_{MLCC}) e a resistência ao cisalhamento.

Para avaliar a resistência ao cisalhamento de painéis de três e cinco camadas, foram realizados ensaios de flexão de acordo com ASTM D 198:2009, em que os corpos de prova que foram divididos em seis grupos, variando-se os materiais usados nas camadas (madeira ou

OSB), a configuração das lamelas nos painéis (lamelas paralelas ou perpendiculares ao vão) e a quantidade de camadas de OSB e madeira SPF. De acordo com os resultados experimentais, concluíram que as propriedades mecânicas na direção perpendicular às fibras do OSB foram significativamente maiores do que as da madeira, indicando que esse material foi adequado para o uso em camadas transversais de painéis de MLCC. Ainda, constatou-se que os elementos híbridos tiveram maior resistência ao cisalhamento do que os homogêneos para o mesmo número de camadas. A diferença entre as duas direções dos painéis híbridos diminuiu de acordo com o aumento do número de camadas do painel. Posteriormente, foram desenvolvidos modelos numéricos que confirmaram comportamento ao cisalhamento dos painéis híbridos dos ensaios experimentais.

Li *et al.* (2020b) desenvolveram um trabalho para a análise das propriedades de cisalhamento, por meio de ensaios de flexão, em painéis de MLCC com três camadas feitos de “*Pinus Radiata*” australiano, dispostos de duas formas diferentes em relação ao vão, com as camadas externas do painel ao longo do vão (direção principal) e com as externas do painel perpendicular ao vão (direção secundária), conforme ilustrado na Figura 76.

Figura 76-Tipos de ensaios de flexão realizados por Li *et al.* (2020b)



(a) Direção principal

(b) Direção secundária

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2020b)

As resistências ao *rolling shear* (f_{vt}) para os exemplares submetidos aos ensaios de flexão na direção principal foram 2,82 MPa e 2,73 MPa para os painéis de três e cinco camadas, respectivamente, mostrando-se valores ligeiramente maior para painéis mais estreitos. Para os painéis testados à flexão na direção secundária o valor médio foi de 0,84 MPa e 0,70 MPa para os painéis de três e cinco camadas, respectivamente. Dessa forma, concluiu-se que a direção em que o painel está sendo flexionado possuiu grande influência nas propriedades de cisalhamento do painel de MLCC, já que quando a flexão ocorreu na direção principal a resistência é 3,6 vezes maior do que na direção secundária. Os modos de ruptura também foram

diferentes quanto à direção em que o painel foi fletido, sendo ela ocorreu por *rolling shear* apenas quando o painel foi ensaiado na sua direção principal.

Hematabadi *et al.* (2020) avaliaram a influência da variação da relação vão/altura do painel, nas propriedades de flexão (o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade aparente, rigidez efetiva à flexão e ao cisalhamento e as tensões máximas de cisalhamento) de painéis de MLCC fabricados com madeira da espécie “*Populus Alba*”, que tinham as camadas externas com lamelas dispostas paralelamente ao vão (direção de maior resistência) e perpendiculares ao vão (direção de menor resistência). No total foram fabricados 20 painéis (dez para cada tipo) os quais foram formados por lamelas coladas lateralmente utilizando-se adesivo poliuretano (PUR), gramatura de 400 g/m², a fim de se fabricar as camadas dos painéis separadamente. Após isso, estas foram coladas e orientadas em relação ao vão de 0°/90°/0° para o primeiro caso, e 90°/0°/90° para a segunda situação. A prensagem foi realizada em duas etapas sendo que, primeiramente, os painéis foram pré-prensados lateralmente a uma pressão de 0,5 MPa, e em ambos os lados, por 60 minutos e, então, prensados verticalmente por prensa hidráulica a 0,75 MPa por 240 minutos. As dimensões finais dos painéis foram de 1600 mm x 1000 mm x 60 mm, os quais foram cortados em corpos de prova de 150 mm e 300 mm de largura e divididos em grupos de acordo com a razão entre o vão/espessura e a direção das camadas externas. Para realização da pesquisa, ensaios experimentais de flexão de três pontos foram realizados, de acordo com a APA PRG-320:2012. Foram testadas cinco diferentes relações de vão/espessura (seis, dez, 15, 20 e 25), sendo utilizados 12 amostras (seis para cada direção) com taxa de carregamento da máquina entre 1 e 5 mm/min. Todos as peças vieram a ruptura em menos de 20 minutos e a medição do deslocamento vertical foi feita por LVDTs. Após análise dos resultados, concluíram que as tensões máximas de cisalhamento diminuiram de acordo com o aumento da razão vão/espessura, em ambos os casos.

Hematabadi *et al.* (2021) fizeram outra pesquisa com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural de painéis híbridos de três camadas fabricados com as lamelas externas de madeira da espécie “*Populus alba*”, com densidade de 380 kg/m³ e internas da espécie “*Fagus orientalism*”, com densidade de 680 kg/m³. Estes foram estudados na direção de maior e menor resistência com várias razões de vão/altura, por meio de ensaios experimentais e métodos teóricos, os quais foram comparados com painéis fabricados apenas com madeira da espécie “*Populus alba*”, do estudo de Hematabadi *et al.* (2020). O ensaio de flexão realizado para as amostras na direção de maior resistência é ilustrado na Figura 77.

Figura 77-Método de Ensaio usado por Hematabadi *et al.* (2021)

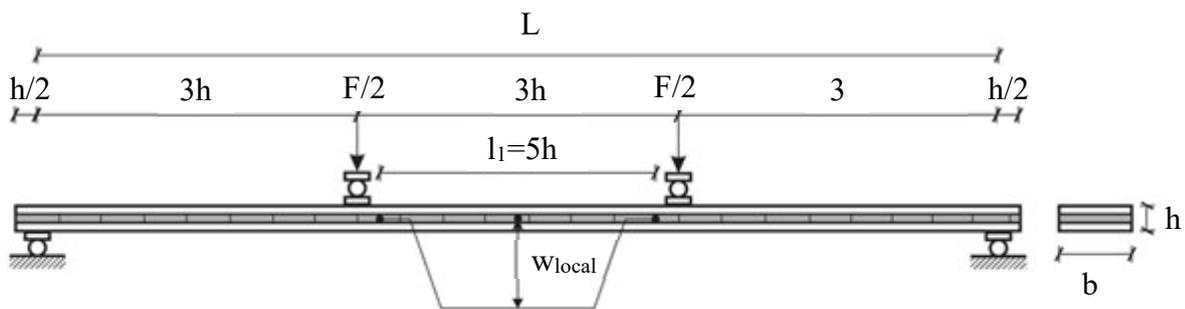
Fonte: Hematabadi *et al.* (2021)

O processo de fabricação, o método do ensaio, os vão escolhidos, as dimensões e configurações dos corpos de prova utilizados foram os mesmos adotados por Hematabadi *et al.* (2020). O modo de ruptura predominante nos ensaios, na direção de maior resistência, foi por *rolling shear* e separação das camadas na linha de cola, enquanto na outra direção, foi por tração. Ainda, similarmente aos estudos prévios, os resultados indicaram que as tensões de cisalhamento máximas possuíam relação direta com a razão vão/altura, uma vez que com sua diminuição de seis para 25, a resistência diminuiu em torno de 160,3%, na direção de maior resistência e 140% na direção de menor. Os valores para ambas as orientações e para todas as razões de vão/espessura foram maiores para os painéis híbridos, apontando que o uso de outra madeira para a camada transversal, com maior densidade, impactou positivamente.

Sciomenta *et al.* (2021) estudaram a possibilidade de uso de duas espécies de madeira para fabricação de painéis de MLCC, por meio da caracterização mecânica de painéis homogêneos e híbridos em relação às propriedades de flexão (módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras, rigidez e resistência) e de cisalhamento (resistência). Os painéis foram fabricados com três camadas com madeira conífera da espécie “*Pinus nigra subsp. Laricio*” e madeira folhosa da espécie “*Fagus sylvatica L.*”, ambas originadas do sul da Itália. As peças de madeira adotadas na fabricação passaram por caracterização estrutural prévia as quais foram classificadas como C20 e D40. Antes da colagem, elas foram planificadas e serradas com espessura de 18 mm e 54 mm de largura. A colagem foi realizada por dois diferentes tipos de adesivo, sem aplicação nas faces laterais das peças, com gramatura de 190

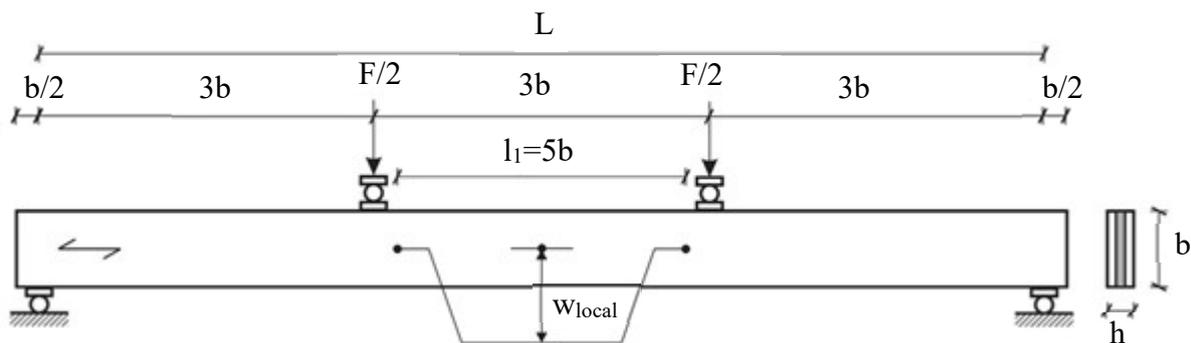
g/m^2 e 150 g/m^2 , respectivamente, para os adesivos a base de melanina (MUF) e poliuretano (PUR). Após isso, foram prensadas a frio por três horas, sob pressão de $1,4 \text{ MPa}$ durante as duas primeiras horas. No total, 11 painéis foram produzidos os quais foram cortados a fim de se obter um total de 102 amostras com diferentes configurações de camadas e tipos de adesivo. Oito configurações foram fabricadas, variando-se o posicionamento dos elementos na horizontal e na vertical. Além disso, variou-se também o tipo de adesivo utilizado, à base de melanina (MUF) ou à base de poliuretano (PUR), e o tipo de painel, homogêneo ou híbrido. As dimensões das peças foram de acordo de $600 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 54 \text{ mm}$ (comprimento \times largura \times altura). O método de ensaio escolhido em função da disposição dos elementos podem ser vistos na Figura 78 e Figura 79, para aqueles posicionados na horizontal e na vertical, respectivamente.

Figura 78-Amostras dispostas horizontalmente



Fonte: Adaptado de Sciomenta (2021)

Figura 79- Amostras dispostas verticalmente



Fonte: Adaptado de Sciomenta (2021)

Os ensaios experimentais de flexão de quatro pontos foram feitos conforme BIS EN 16351:2018, em que o vão entre os apoios foi menor e igual 9 vezes a altura da peça. Os deslocamentos verticais foram obtidos por LVTDs posicionados no meio do vão e em ambos os lados do corpo de prova.

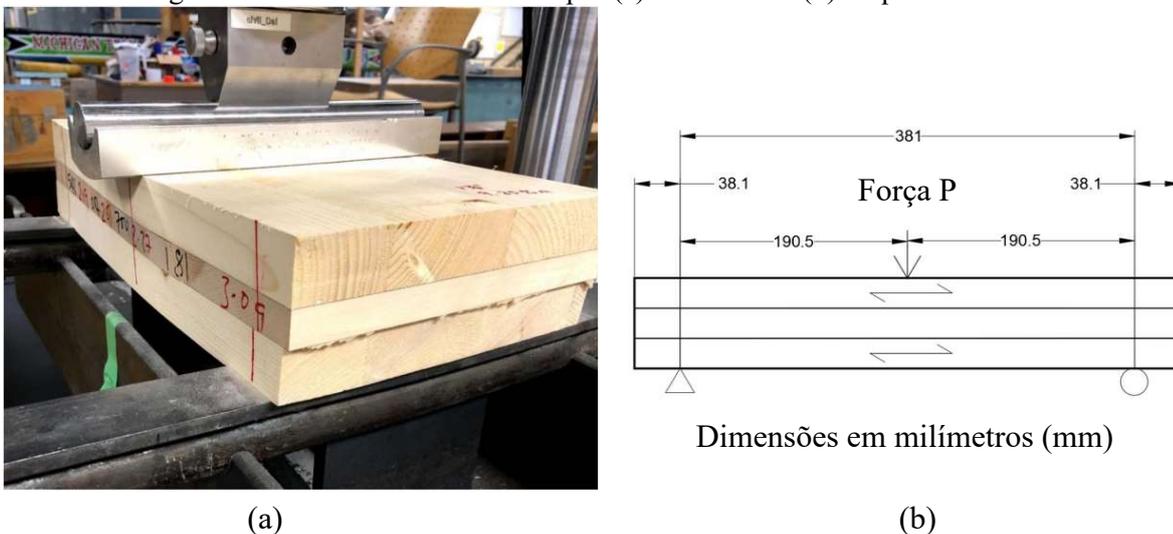
A resistência ao cisalhamento dos painéis homogêneos e ensaiados na horizontal foram de 4,24 MPa e 5,11 MPa para os fabricados com madeira da espécie “*Fagus sylvatica* L.” e colados com adesivo à base de melanina (MUF) e poliuretano (PUR), respectivamente. Para os painéis fabricados com madeira da espécie “*Pinus nigra subsp. Laricio*” colados com adesivo à base de poliuretano (PUR), as resistências ao cisalhamento foram de 3,50 MPa e 2,47 MPa, respectivamente, enquanto para os híbridos, foi de 3,81 MPa. No caso em que o ensaio foi realizado o elemento na vertical, a resistência ao cisalhamento (f_{vt}) foi de 6,15 MPa e 5,79 MPa para os painéis homogêneos fabricados com madeira da espécie “*Fagus sylvatica* L.”, colados com adesivo à base de melanina (MUF) e larguras diferentes de 1440 mm e 2400 mm, respectivamente. Para os híbridos, a resistência ao cisalhamento (f_{vt}) foi de 5,92 MPa e 4,95 MPa, para aqueles com 144 mm e 240 mm. Os dados coletados revelaram um bom comportamento dos painéis homogêneos de madeira folhosa e dos painéis mistos. Assim, estes podem representar uma boa oportunidade para o emprego das espécies de materiais locais na fabricação de painéis.

Ettelaei, Taoum e Nolan (2021) analisaram a influência da espécie, da densidade e da classe estrutural das camadas longitudinais nas propriedades *rolling shear* de painéis de três camadas feitos com madeira das espécies “*Eucalyptus Globulus*” e “*Eucalyptus Nitens*”. Os elementos foram formados por peças coladas por adesivo poliuretano (PUR), sendo que primeiramente elas foram coladas lateralmente com gramatura de 250 g/m² e prensadas sob pressão de 0,6 MPa. Então, as camadas formadas foram planificadas, com espessura final de 34 mm e coladas verticalmente utilizando-se a mesma gramatura e pressão de 1 MPa. Os corpos de prova ficaram com dimensões nominais de 102 mm x 260 mm x 3000 mm (espessura x largura x comprimento). Para cada espécie foram fabricados seis painéis (três para cada espécie) e de cada peça foram retiradas três amostras com dimensões de 102 mm x 60 mm x 816 mm (altura x largura x comprimento).

Os ensaios de flexão de três pontos foram realizados de acordo com ANSI/APA PRG 320:2012. Os resultados mostraram, quanto às propriedades *rolling shear*, que não houve diferença significativa quanto às espécies estudadas. Os valores de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), para as peças de madeira com densidade alta das espécies “*Eucalyptus Nitens*” e “*Eucalyptus Globulus*” foram de 2 MPa e 2,2 MPa, respectivamente, e de 1,8 e 2,1 MPa para baixa densidade, os quais foram bem maiores que os recomendados na literatura. Ainda, atestou-se que o módulo de elasticidade longitudinal, das camadas externas do painel, influenciou na sua rigidez.

Ma *et al.* (2021) avaliaram as propriedades mecânicas de flexão e cisalhamento, de painéis híbridos feitos com madeiras das espécies “*Acer saccharum*” e “*Picea glauca*”, por meio da variação das espécies utilizadas nas camadas longitudinais e transversais e o tipo de adesivo. Antes da fabricação dos painéis, o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras das lamelas foi medido por meio de ensaio de vibração transversal não-destrutivo e obteve-se os valores de 14.230 MPa e 9.225 MPa para as espécies “*Acer saccharum*” e “*Picea glauca*”, respectivamente. No total, foram fabricados nove painéis, com três tipos de configurações de camadas e dois tipos de adesivos, dos quais foram retirados dois corpos de prova de cada painel, com dimensões de 254 mm de largura e 457 mm de comprimento. As alturas foram de 82,55 mm e 96,52 mm para a configuração com lamelas longitudinais de “*Picea glauca*” e transversais de “*Acer saccharum*” e para a configuração com lamelas longitudinais de “*Acer saccharum*” e transversais de “*Picea glauca*”, respectivamente. O método de ensaio escolhido foi de flexão de três pontos para pequenos vãos de acordo com ASTM D198:2015, conforme Figura 80.

Figura 80-Método de Ensaio usado por (a) Ensaio Real (b) Esquema de Ensaio



Fonte: Adaptado de Ma *et al.* (2021)

Os corpos de prova fabricados com adesivo de melanina (MUF) tiveram módulo de elasticidade transversal do painel (G_{MLCC}) e resistência ao cisalhamento melhor do que aqueles fabricados com adesivo de resorcinol. Além do mais, os painéis fabricados com camadas externas de “*Picea glauca*” e internas de “*Acer saccharum*” tiveram resistência maior do que os fabricados com camadas longitudinais de “*Acer saccharum*” e transversais de “*Picea glauca*”, o que indica que a camada transversal pode melhorar efetivamente a resistência ao cisalhamento.

Srivaro *et al.* (2022) estudaram a viabilidade de aplicação de novas espécies de madeira para a fabricação de MLCC de três camadas, com diferentes densidades, que são comuns na Tailândia e em países tropicais, por meio da classificação de suas propriedades físicas e mecânicas (densidade e resistência à compressão, flexão, *rolling shear*). As espécies escolhidas foram “*Hevea brasiliensis*”, com densidade média de $706 \pm 34 \text{ kg/m}^3$ e nomeada de MRB, e a “*Cocos nucifera L.*”, com densidades médias de $713 \pm 44 \text{ kg/m}^3$ e $870 \pm 61 \text{ kg/m}^3$, as quais foram nomeadas de MCC e HCC, respectivamente. Os tipos de madeira foram previamente caracterizados, conforme ASTM D 143:2022, quanto ao módulo de ruptura, módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras obtido na flexão (E_0) e resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}). De acordo com os resultados obtidos nos ensaios prévios, foram feitas seis configurações de painéis que foram compostas duas configurações homogêneas e quatro híbridas.

Os painéis foram fabricados com peças isentas de defeitos, sem nós e presença de medula, as quais foram serradas nas dimensões de 75 mm x 15 mm x 300 mm (largura x espessura x comprimento), sendo que no total foram produzidos 18 painéis de MLCC (três painéis para cada tipo), com dimensões finais de 300 mm x 300 mm x 45 mm (comprimento x largura x espessura). O processo de fabricação foi dividido em duas etapas, primeiramente, quatro lamelas, com mesma espécie e densidade próximas foram coladas lateralmente com adesivo à base de acetato de polivinil com gramatura de 100 g/m^2 , formando painéis únicos, os quais ficaram com dimensões de 300 mm x 300 mm x 15 mm (comprimento x largura x espessura) e foram prensados lateralmente por 20 min. Após isso, esses tiveram as superfícies de base e topo lixadas, a fim de remover excessos de colas e prepará-las para a colagem vertical; na segunda etapa, a cola foi aplicada em ambas as faces das peças à taxa de 300 g/m^2 e prensadas sob tensão de 2,45 MPa por 120 minutos.

O ensaio experimental escolhido para a definição da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi flexão de três pontos (com vão reduzido). A partir dos resultados, concluíram que as peças com madeira da espécie “*Hevea brasiliensis*” foram significativamente mais resistentes que as da espécie “*Cocos nucifera L.*” o que é uma alternativa interessante para fabricação de lamelas da camada transversal. As propriedades mecânicas da madeira “*Cocos nucifera L.*”, no que se refere à resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foram melhores ou similares as madeiras coníferas, assim, a mistura de espécies de diferentes densidades pode melhorar as propriedades mecânicas dos painéis e reduzir o custo do material sem comprometer a seu desempenho estrutural.

Quanto aos estudos comentados anteriormente, observa-se que foram usadas madeiras coníferas e folhosas com densidades entre 410 e 870 kg/m^3 e amostras com dimensões variadas.

O vão entre os apoios variou entre cinco e 12 vezes a altura do corpo de prova. Esse método de ensaio foi usado apenas para determinação da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) que variou entre 1 MPa e aproximadamente 10 MPa. Além disso, pode-se comentar que o ensaio de flexão para o estudo das propriedades *rolling shear*, fornece resultados satisfatórios. Porém, quando foram comparados os resultados dos ensaios de cisalhamento, constataram que estes podem resultar em resultados maiores, conforme citado por Anwar-Us-Saadat *et al.* (2022) e Li *et al.* (2021).

2.7 MODELAGEM NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE MLCC

A modelagem numérica foi utilizada por vários autores para estimar o comportamento estrutural dos painéis de MLCC submetidos a ensaios de cisalhamento e de flexão. Ainda, a partir dos resultados numéricos foi possível analisar a distribuição das tensões normais e de cisalhamento ao longo das camadas transversais dos corpos de prova.

Li, Dong e Lim (2019) analisaram a influência da geometria das lamelas e dos métodos dos ensaios na resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC. Para isso, estudaram diferentes métodos de ensaio, cisalhamento e flexão, e diferentes condições de contorno, por meio de um modelo numérico elástico-linear desenvolvido no *software* comercial ABAQUS. Foram simulados seis corpos de prova diferentes, variando-se o método de ensaio e a espessura da camada (20 mm, 35 mm e 45 mm), utilizando-se elementos sólidos e tridimensionais com oito nós (C3D8R) e malhas com tamanhos de quatro e cinco milímetros. Devido aos diferentes parâmetros dos anéis de crescimento, foi admitida isotropia transversal para o material, adotando-se a média entre as propriedades das direções radial (R) e tangencial (T). A ligação entre as superfícies de contato das camadas foi assumida como rígida e o contato entre as faces laterais das lamelas foi desprezado. As propriedades elásticas adotadas no modelo, para a espécie “*Pseudotsuga menziesii*”, são apresentadas na Tabela 2.

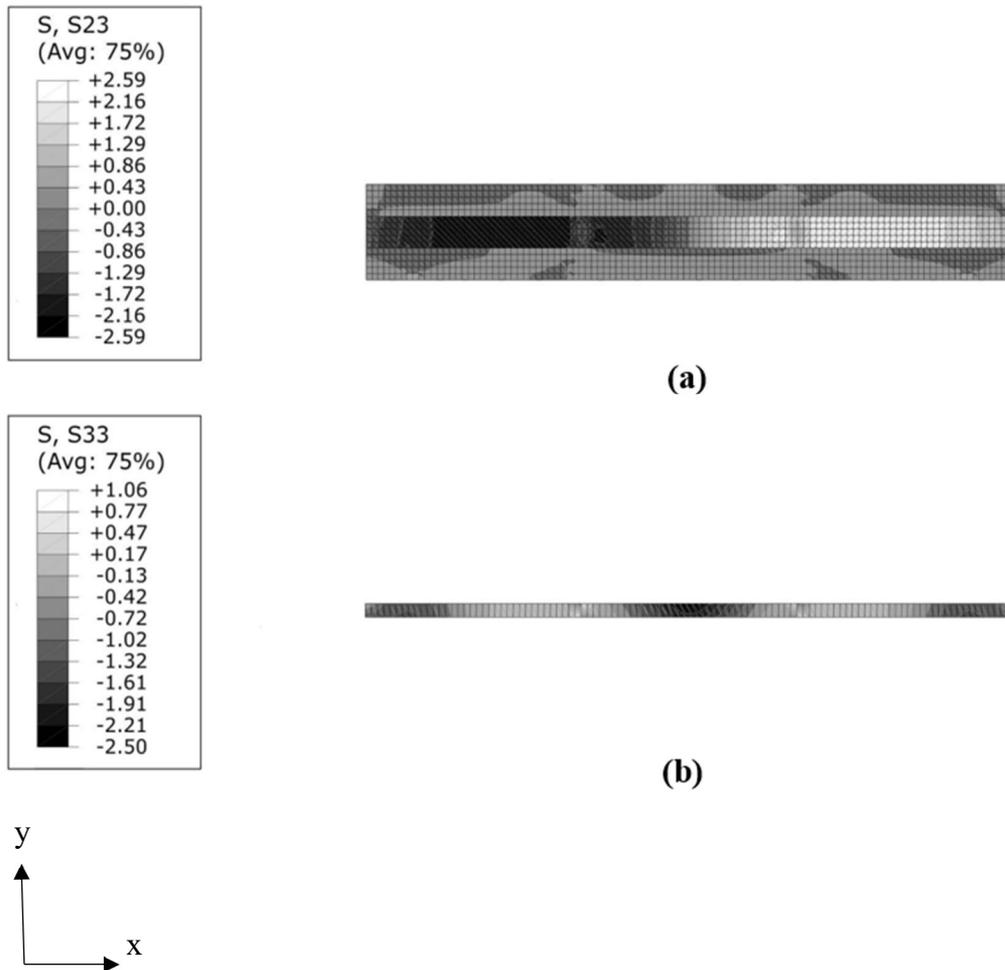
Tabela 2-Propriedades elásticas para madeira da espécie “*Pseudotsuga menziesii*”

EL (MPa)	$E_T=E_R$ (MPa)	$G_{LR}=G_{LT}$ (MPa)	G_{RT} (MPa)	$\nu_{LR}=\nu_{LT}$	ν_{RT}
8.000	267	533	53	0,29	0,39

Fonte: Li, Dong e Lim (2019)

As forças últimas, de cada um dos grupos de ensaio, foram aplicadas no modelo. Na simulação dos ensaios de flexão, as forças foram aplicadas no meio do vão com o carregamento distribuído em uma área de 30 mm x 50 mm, para os corpos de prova com lamelas de 20 mm de espessura, e de 60 mm x 50 mm para aqueles com espessura das lamelas de 35 e 45 mm, com o objetivo de simular as diferentes chapas que foram empregadas para a transmissão do carregamento. Para simular os ensaios de cisalhamento, a força de compressão foi aplicada no topo das chapas de aço, assim como as restrições nas bases e no topo das chapas. Os resultados obtidos, pelo modelo numérico do ensaio de flexão, mostraram que as tensões *rolling shear* nas proximidades dos espaçamentos laterais, entre lamelas, foram muito pequenas por terem sido simuladas sem o contato lateral. Além de que, foram baixas também na região abaixo do carregamento central, as quais foram compatíveis com o modo de ruptura por *rolling shear*, que ocorreram na região central das lamelas e distantes do ponto de aplicação da força. Em relação à compressão perpendicular às fibras, a maioria das camadas transversais teve tensões de 1,2 MPa a 2,5 MPa, principalmente nas regiões próximas ao ponto de aplicação da força. As distribuições das tensões normais (S_{33}) e de cisalhamento (S_{23}), no plano radial-tangencial para o ensaio de flexão, são ilustradas na Figura 81.

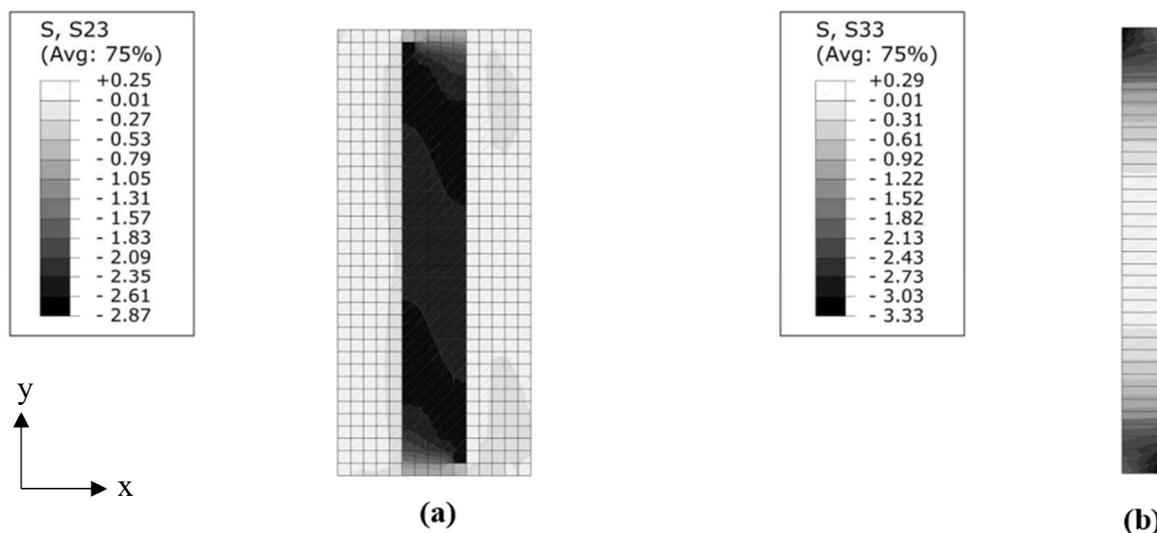
Figura 81-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões de cisalhamento e (b) Tensões normais do ensaio de flexão obtidas por Li, Dong e Lim (2019)



Fonte: Adaptado de Li, Dong e Lim (2019)

Os resultados obtidos pelo modelo numérico do ensaio de cisalhamento mostraram que a maioria das lamelas das camadas transversais apresentou altas tensões *rolling shear*, exceto a região próxima às extremidades da peça. A máxima tensão de compressão perpendicular às fibras foi observada em um intervalo de 1,5 MPa e 3,3 MPa, enquanto a máxima tensão de tração perpendicular às fibras foi em torno de 0,3 MPa. A distribuição das tensões de cisalhamento apresentou compatibilidade com o modo de ruptura típico por *rolling shear*, em que as fissuras foram inclinadas e concentradas na região central da peça. As distribuições das tensões normais e de cisalhamento no plano radial-tangencial, para o ensaio de cisalhamento, são ilustradas na Figura 82.

Figura 82-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões de cisalhamento e (b) Tensões normais do ensaio de cisalhamento obtidas por Li, Dong e Lim (2019)



Fonte: Adaptado de Li, Dong e Lim (2019)

Os resultados numéricos foram de 13-17% maiores do que os valores médios analíticos, uma vez que os modelos foram capazes de mostrar a distribuição não uniforme ao longo do corpo de prova. No geral, as tensões normais perpendiculares às fibras foram baixas e, dessa forma, concluíram que, de acordo com o modelo numérico desenvolvido, ambos os métodos de ensaio foram capazes de introduzir altas tensões *rolling shear* e que a influência das tensões normais perpendicular às fibras, nas camadas transversais, não foi significativa. Sendo assim, ambos os métodos são aplicáveis para avaliar a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC.

Navaratnam *et al.* (2020) desenvolveram um modelo numérico elástico-linear com o objetivo de estimar a rigidez à flexão e ao cisalhamento, assim como a resistência última de painéis de MLCC submetidos a ensaios de flexão. O modelo numérico foi desenvolvido no *software* ABAQUS, utilizando-se elementos do tipo (C3D8I), e a direção das fibras foi simulada por meio de alterações na orientação do material. As propriedades elásticas do material foram fornecidas pelo fabricante e o coeficiente de Poisson foi obtido em estudos anteriores, as quais são apresentadas na Tabela 3.

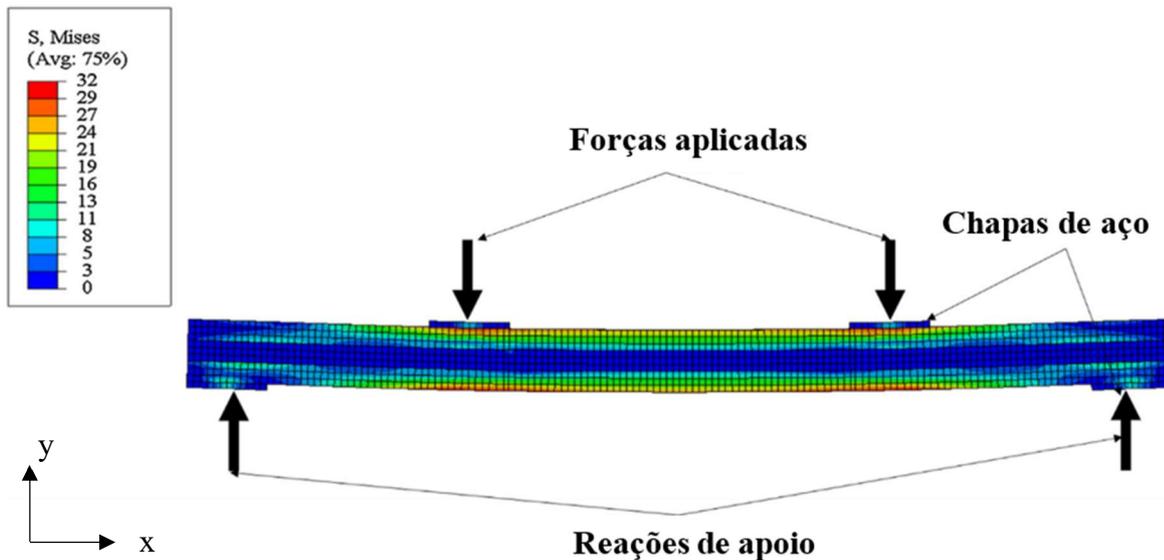
Tabela 3-Propriedades elásticas adotadas para madeira da espécie "*Pinus Radiata*" adotadas por Navaratnam *et al.* (2020)

E_L (MPa)	$E_T=E_R$ (MPa)	$G_{LR}=G_{LT}$ (MPa)	G_{RT} (MPa)	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}
6.000	200	400	40	0,20	0,18	0,21

Fonte: Navaratnam *et al.* (2020)

Para simular a colagem entre as peças, admitiu-se o contato das superfícies como coesivo, sendo que a resistência axial à tração e o módulo de elasticidade (E) do adesivo, obtidos de estudos experimentais realizados anteriormente, foram de 1,8 MPa e 7,8 MPa, respectivamente, e a energia de fratura foi admitida igual a 0,9 N/mm. Foram elaborados dois modelos numéricos para cada tipo de painel, de três e de cinco camadas, para prever o comportamento ao cisalhamento e à flexão. A distribuição das tensões de *Von Mises* obtida, para o painel de três camadas, é ilustrada na Figura 83.

Figura 83-Tensões de *Von Mises* em MPa modelo numérico desenvolvido por Navaratnam *et al.* (2020)



Fonte: Adaptado de Navaratnam *et al.* (2020)

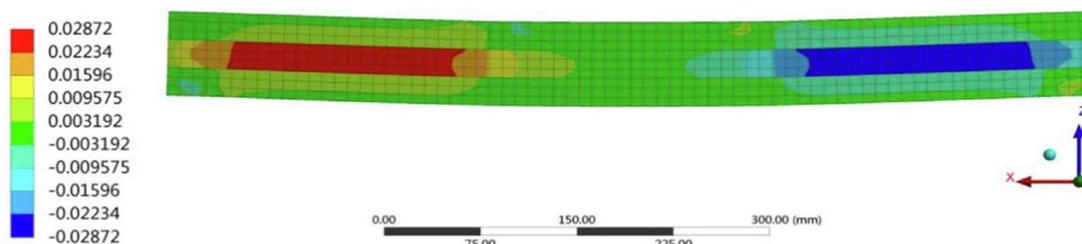
A força última prevista pelo modelo numérico, para os painéis de três camadas, foi de 126,3 kN, aproximadamente 2% menor do que a experimental, o que pode ser justificado devido à não-linearidade do material. As tensões previstas para o painel de cinco camadas foram menores do que as do ensaio experimental, e o ponto de ruptura do modelo numérico foi semelhante ao ponto inicial de ruptura dos experimentos. A comparação entre os resultados

numéricos e experimentais mostrou que o modelo desenvolvido conseguiu estimar a força de ruptura e a rigidez de painéis de MLCC, com diferença máxima de 15%.

As rigidezes à flexão local e global, obtidas no modelo numérico, foram comparadas com os valores experimentais, apresentando uma diferença em torno de 20%, a qual pode ser justificada devido à não-linearidade do material, à flexibilidade do suporte e à colagem realizada no ensaio experimental. Dessa forma, concluíram que a análise dos elementos finitos pode ser uma alternativa efetiva, a fim de se prever a resistência última e as rigidezes dos painéis de MLCC, desde que os parâmetros de entrada sejam adequados, para que o modelo numérico possa ser utilizado para prever o modo de ruptura e o comportamento do painel diante de diferentes condições de carregamento.

Li *et al.* (2020a) desenvolveram modelos numéricos para estudar a distribuição de tensões de cisalhamento em painéis de MLCC submetidos a ensaios de flexão de quatro pontos no *software* ANSYS. No total, foram elaborados quatro modelos elástico-lineares, alterando-se apenas a geometria dos corpos de prova em relação ao número de camadas (três ou cinco camadas), materiais (painéis de lascas de madeira orientadas e madeira da espécie do tipo “*spruce-pine-fir*”) e orientação das camadas (paralelas ou perpendiculares). Para simular os materiais, foi empregado o elemento sólido tridimensional com oito nós. A média da força última de cada grupo simulado, que foi obtida experimentalmente, foi aplicada de forma distribuída em uma área pequena de 24 mm x 190 mm. Os resultados numéricos obtidos para um dos painéis de três camadas são ilustrados na Figura 84.

Figura 84-Distribuição das distorções (em mm/mm) por cisalhamento para os painéis de três camadas obtida por Li *et al.* (2020a)

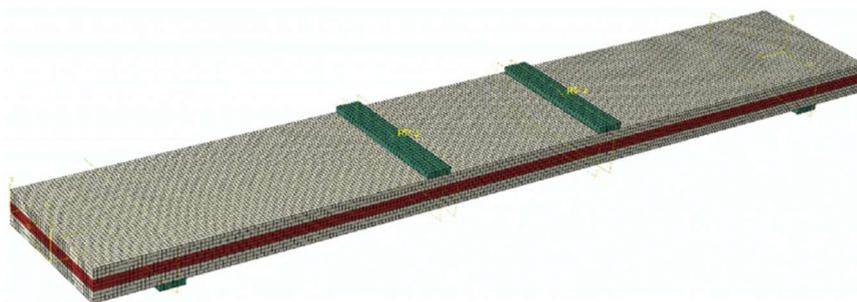


Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2020a)

De acordo com os resultados obtidos, notou-se que as tensões de cisalhamento foram principalmente concentradas entre o ponto de aplicação da força e o ponto de apoio vizinho. Dessa forma, concluíram que as hipóteses adotadas nos cálculos teóricos foram corretas. A distribuição de tensões de cisalhamento, obtidas nos modelos de elementos finitos, teve a mesma tendência que das tensões de cisalhamento calculadas analiticamente, especialmente para os elementos de cinco camadas. Ao comparar as tensões de cisalhamento teóricas e as numéricas, ocorreu que as numéricas resultaram em valores de 5 a 7% menores do que as teóricas, para os painéis de três camadas, e em torno de 3 a 10% maiores para os painéis de cinco camadas. Os valores teóricos da resistência ao cisalhamento, da maioria das amostras híbridas foram coincidentes com os valores experimentais. Dessa forma, concluíram que há uma boa correlação entre as tensões analíticas e as numéricas, especialmente para os de cinco camadas.

Li *et al.* (2020b) realizaram a simulação numérica de painéis de MLCC submetidos à flexão em relação à direção de maior e menor resistência. Do mesmo modo que em estudos anteriores, o efeito da lamela individual e os espaços laterais não foram considerados, assim sendo, as lamelas dentro da mesma camada foram consideradas como uma parte íntegra, como ilustrado na Figura 85. Cada camada foi modelada individualmente, e o efeito da direção das fibras foi simulado por meio da utilização de coordenadas locais. Além disso, foi assumida a simplificação da colagem perfeita rígida entre as camadas.

Figura 85-Modelo numérico desenvolvido por Li *et al.* (2020b)



Fonte: Li *et al.* (2020b)

Os parâmetros elásticos e as propriedades dos materiais, os quais são apresentados na Tabela 4, foram fornecidas pelo fabricante, e baseando-se em estudos anteriores e na literatura, o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) foi adotado entre 1/12 e 1/20 do módulo de elasticidade longitudinal (E_0), sendo considerado como 1/16 para madeira conífera, enquanto

o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi adotado como 1/10 do módulo de elasticidade transversal da madeira (G).

Tabela 4-Propriedades elásticas adotadas para madeira da espécie "*Pinus Radiata*" adotadas por Li *et al.* (2020b)

Classe	E_L	$E_T=E_R$	$G_{LR}=G_{LT}$	G_{RT}	$\nu_{LR}=\nu_{LT}$	ν_{RT}
Estrutural	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
VSG8	8.000	320	500	50	0,48	0,20
MSG6	6.000	240	375	38	0,48	0,20

Fonte: Li *et al.* (2020b)

Os componentes de madeira foram modelados usando elementos do tipo C3D8 e as vigas de carregamento e suportes de aço foram simulados como blocos de metal usando elemento do tipo C3D20R. A malha utilizada foi de 12 mm, em ambas as direções, e o painel de MLCC foi assumido como simplesmente apoiado, sendo que os carregamentos foram impostos por meio de um deslocamento controlado utilizando-se o modo quase estático.

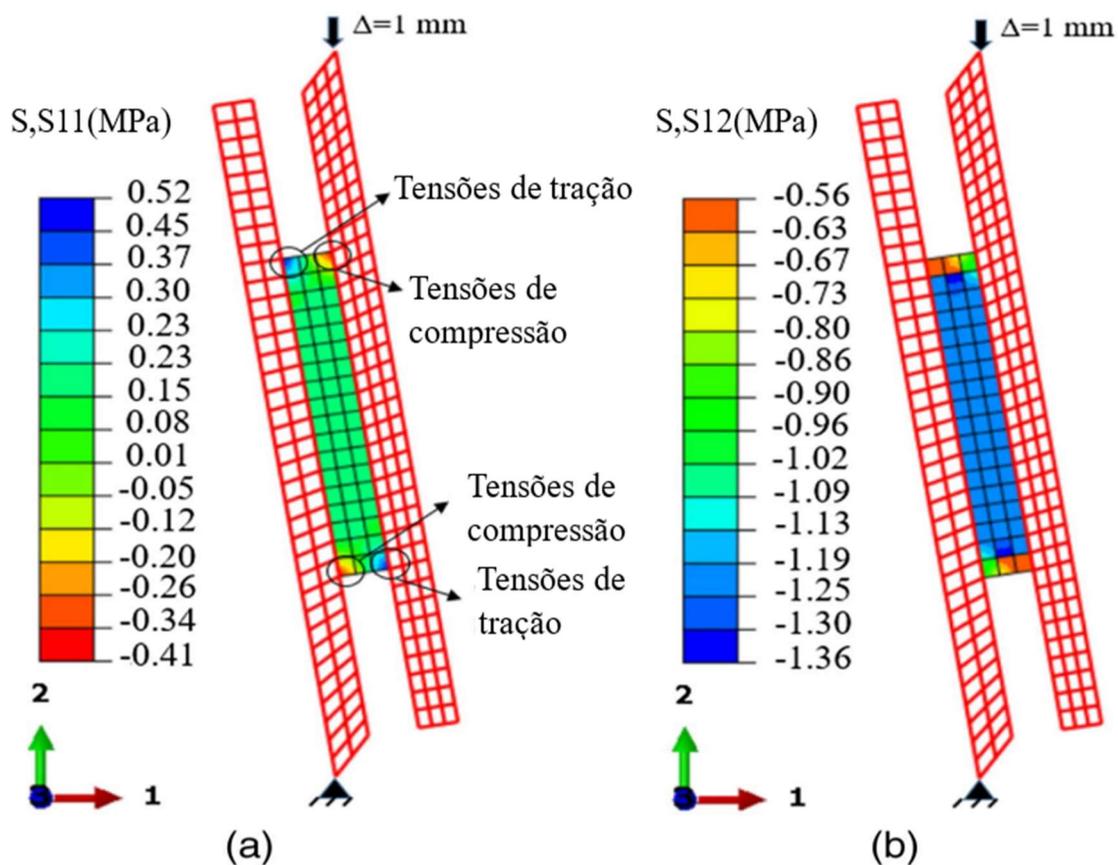
Para os corpos de prova simulados na direção de maior resistência ocorreu que as curvas numéricas de tensão por deslocamento vertical, quando comparadas as curvas experimentais, apresentaram uma superestimativa de 4%, em média, para a força de ruptura e rigidez inicial. Para a direção de menor resistência, especialmente nos modelos com camadas mais finas, ocorreu se uma superestimativa de 20% tanto quanto à força de ruptura quanto à rigidez inicial. Tais diferenças podem ter ocorrido devido às características adotadas, no caso da força última, e devido à adoção da hipótese de colagem perfeita entre as camadas e do desprezo do efeito dos espaçamentos laterais entre as lamelas. Dessa forma, concluíram que, no geral, a técnica de modelagem desenvolvida representou o comportamento dos painéis de MLCC e pode ser adotada para análise da influência da espessura das camadas.

Bahmanzad *et al.* (2020) estudaram a distribuição de tensões em corpos de prova submetidos a ensaios de cisalhamento, por meio de modelos numéricos desenvolvidos no ABAQUS 2019. A geometria do modelo foi construída seguindo-se as dimensões estabelecidas no ensaio experimental e em relação às condições de contorno, a base de uma das chapas de aço foi considerada como rotulada, enquanto a outra chapa teve a extremidade submetida à força de compressão, a qual foi simulada por meio da aplicação de deslocamento unitário.

O modelo numérico desenvolvido teve o comportamento adotado como elástico-linear e ortotrópico, e primeiramente foram feitos dois modelos planos, alterando-se em cada um deles o tipo de elemento utilizado, sendo um feito com o elemento bi quadrático com oito nós

(CPE8R) e o outro com elemento bi linear com quatro nós (CPE4R), e malha com dimensões de 33 mm x 48 mm. Ambos os modelos convergiram para os mesmos resultados e, dessa forma, foi adotado o modelo feito com o elemento CPE8R, com subdivisão da malha em 11 x 13 mm. As tensões normais e de cisalhamento no plano radial-tangencial obtidas para esse modelo numérico são ilustradas na Figura 86a e na Figura 86b, respectivamente.

Figura 86-Distribuição de tensões em MPa (a) Tensões normais (b) Tensões de cisalhamento obtida por Bahmanzad *et al.* (2020)

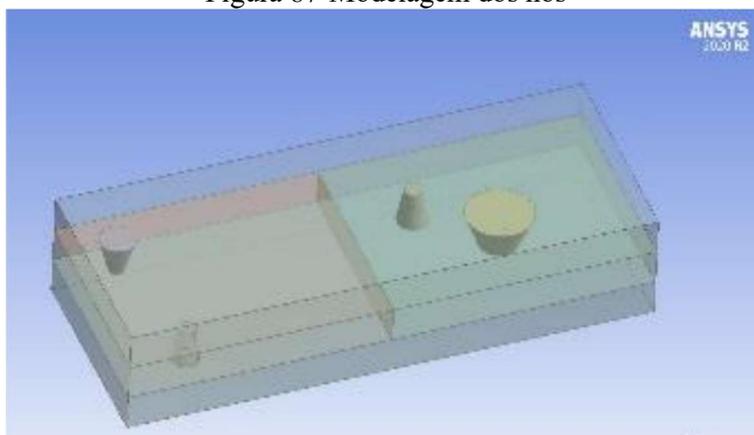


Fonte: Adaptado de Bahmanzad *et al.* (2020)

De acordo com os resultados, as tensões de cisalhamento foram relativamente baixas, uniformemente distribuídas na maior parte do corpo de prova e aproximadamente igual a 1,25 MPa. As tensões normais foram de aproximadamente de 0,1 MPa (8% da tensão de cisalhamento), sendo que se notou zonas de concentração de tensões normais localizadas próximas aos cantos do elemento central. Dessa forma, concluíram que o efeito de tensões secundárias foi mínimo para determinação das propriedades de cisalhamento, apesar do método de ensaio não reproduzir cisalhamento puro, e que ele foi adequado para determinar as propriedades de cisalhamento de painéis de MLCC.

Shahhosseini, Crovella e Smith (2021) desenvolveram modelos numéricos no ANSYS para estudar a distribuição das tensões em corpos de prova durante ensaios de cisalhamento. Eles foram modelados com dois materiais ortotrópicos diferentes, sendo um para as camadas de topo e de base, e outro para as camadas transversais. Os dados de entrada dos modelos foram consultados em Kretschmann (2010). As simulações foram desenvolvidas por meio de análise estática de painéis modelados com camadas transversais constituídas por lamelas com e sem nós, utilizando-se os mesmos materiais, carregamento e condições de contorno. Os nós foram modelados por meio de sólidos cônicos e com diâmetros aleatórios, conforme Figura 87, utilizando as propriedades elásticas obtidas por meio de ensaios de flexão realizados em galhos árvore.

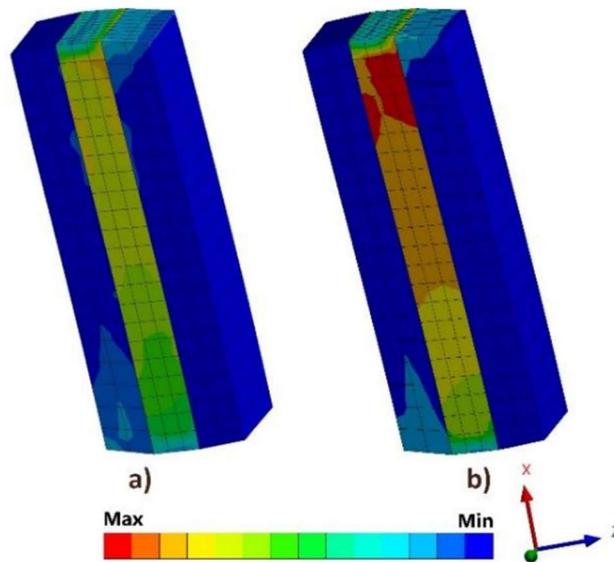
Figura 87-Modelagem dos nós



Fonte: Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)

Os resultados numéricos mostraram que os corpos de prova com a presença de nós na camada transversal, quando submetidos a uma mesma força, apresentaram distribuição de tensões com valores menores e mais espalhadas, enquanto os que não tinham nós, tiveram tensões maiores e mais concentradas, conforme ilustrado na Figura 88.

Figura 88-Distribuição das tensões de cisalhamento (a) Com nós e (b) Sem nós obtidas por Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)



Fonte: Shahhosseini, Crovella e Smith (2021)

As camadas transversais que possuíam nós, apresentaram maior rigidez ao cisalhamento, quando comparadas às camadas transversais sem nós. Ao analisarem as curvas numéricas e experimentais de tensão de cisalhamento por distorção, concluíram que ocorreu uma boa correlação entre as duas, confirmando-se os resultados dos ensaios de cisalhamento.

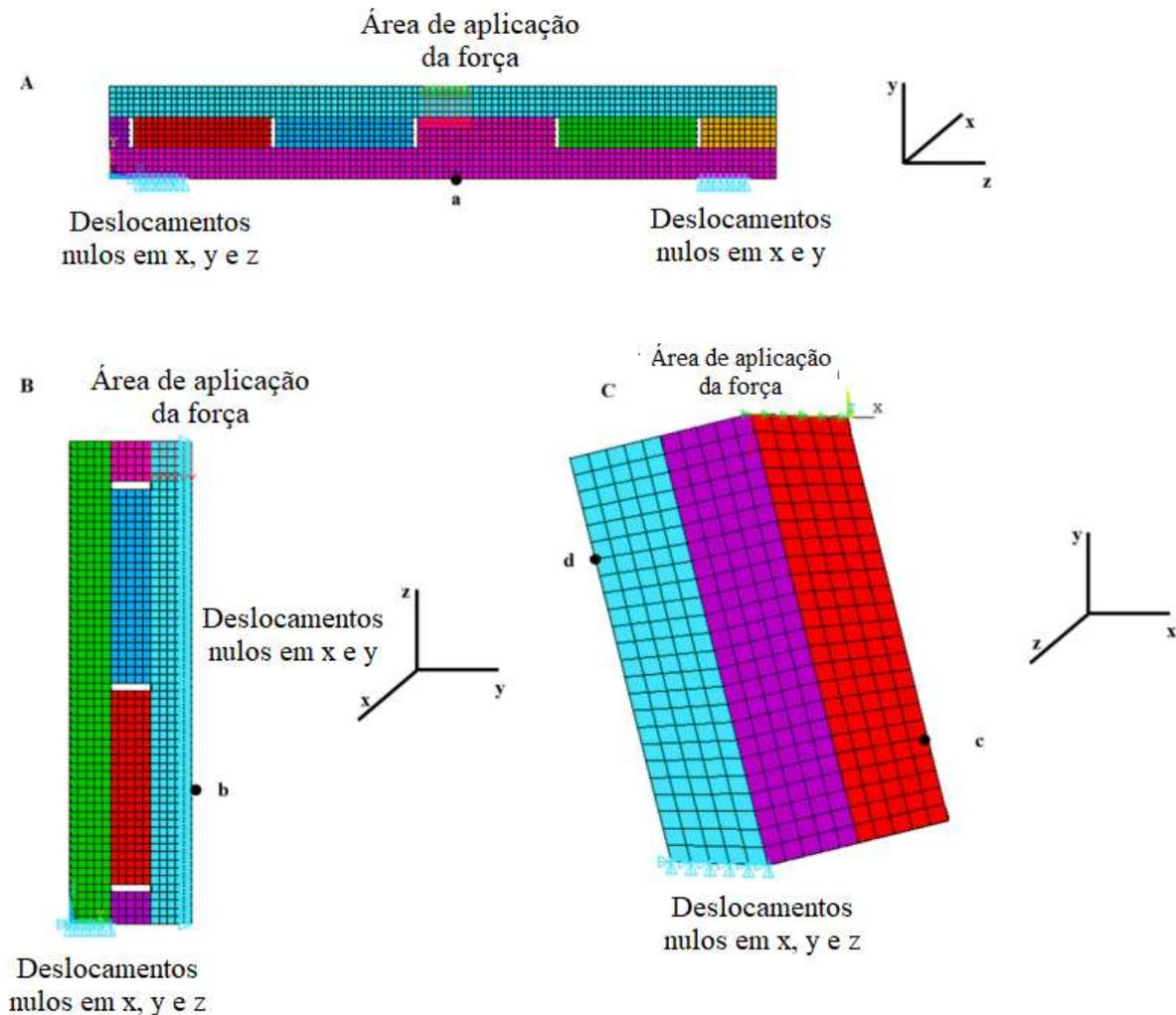
Sciomenta *et al.* (2021) fizeram várias simulações numéricas para avaliar os resultados dos ensaios experimentais de flexão realizados em painéis de MLCC homogêneos e híbridos. As modelagens foram elaboradas com o *software* ABAQUS utilizando-se o modo de força quase estático, elementos tridimensionais de oito nós (C3D8R). As superfícies de contato das linhas de cola foram consideradas como ligações rígidas e a ligação entre o painel e os elementos da máquina como contato de superfície para superfície, incluindo-se as opções de penalidade tangencial e o endurecimento normal, com coeficiente estático de atrito de 0,3 para o contato entre a madeira e o aço e 0,2 para o contato entre aço-aço. A madeira foi modelada como material elástico ortotrópico, cujos módulos de elasticidade longitudinais e transversais foram considerados sob duas diferentes formas, primeiramente, de acordo com CEN EN 338:2009, quanto à classificação das espécies, e depois de acordo com os resultados obtidos por caracterização prévia. O módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) foi calculado como $E_0/15$ e o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) igual a $E_0/16$, em que E_0 é o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras. O aço foi modelado como material isotrópico com módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

O comportamento estrutural dos painéis de MLCC foi estudado por meio do deslocamento vertical obtido no ensaio experimental e numericamente, e também pela comparação entre os dois valores. Com isso, concluíram que o modelo numérico desenvolvido foi adequado para simular o comportamento dos corpos de prova submetidos à flexão.

Silva *et al.* (2023) realizaram modelos numéricos tridimensionais lineares e não-lineares no ANSYS de três tipos de ensaios experimentais em MLCC (cisalhamento vertical, cisalhamento inclinado e flexão), a fim de avaliar a distribuição das tensões nas amostras ensaiadas. Inicialmente foi realizada a modelagem no regime linear e posteriormente foram feitos modelos considerando-se a não-linearidade por meio do critério de Hill e a ortotropia do material de cada uma das lamelas.

Os modelos foram desenvolvidos utilizando-se o elemento finito SOLID 45 e malhas de 45 mm. As condições de contorno foram realizadas de acordo com os ensaios experimentais realizados. No caso dos ensaios de flexão, a força de ruptura foi aplicada nos nós da região central do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 89a, sendo que a força aplicada em cada nó foi igual a força de ruptura total dividida pelo número de nós. Para os ensaios de cisalhamento, foram admitidas restrições de deslocamento na base da camada externa e a força de ruptura foi aplicada nos nós do topo da outra camada externa, conforme Figura 89b e Figura 89c, para o ensaio de cisalhamento vertical e inclinado, respectivamente.

Figura 89-Condições de contorno adotadas por Silva *et al.* (2023) (a) Ensaio de flexão (b) Ensaio de cisalhamento vertical (c) Ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2023)

As forças foram aplicadas apenas em uma etapa para os modelos lineares e por meio de incrementos de carregamentos no caso dos modelos não-lineares. Os resultados numéricos foram calibrados de acordo com a curva força por deslocamento obtida nos ensaios experimentais. Para os ensaios de cisalhamento foi utilizado o deslocamento localizado no terço do comprimento e indicado pelos pontos B, C e D da Figura 89b e Figura 89c, e para os ensaios de flexão, o deslocamento no ponto inferior e central da peça fletida indicado pelo ponto A, na Figura 89a.

Para comparação dos resultados numéricos e experimentais, foram escolhidos três diagramas de tensões (Tensões de *Von Mises*, tensões de cisalhamento no plano x-y e tensões normais na direção y) os quais foram comparados aos modos de ruptura dos ensaios experimentais. Após análise dos resultados, concluíram que as simulações foram capazes de

reproduzir o comportamento tanto dos corpos de prova de cisalhamento quanto dos de flexão, o que tornou possível a avaliação do comportamento global por meio das curvas de força x deslocamento e pela análise de tensões nos pontos de interesse dos elementos.

Após a análise das pesquisas apresentadas, pode-se notar que tanto os modelos bidimensionais quanto os tridimensionais foram adequados para simular o comportamento de painéis de MLCC. O *software* mais utilizado foi o ABAQUS, sendo que os trabalhos reportaram que foram desenvolvidos apenas modelos com comportamento elástico linear, não sendo considerada a não-linearidade física do material. A madeira foi simulada como material ortotrópico e a direção das fibras foi representada de acordo com a direção dos eixos locais dos elementos sendo que as lamelas que constituíram os painéis de MLCC foram simuladas individualmente ou como apenas elemento único. A ligação entre as camadas, na maioria dos casos, foi considerada como rígida e a ligação entre o corpo de prova e os elementos da máquina de ensaio foram consideradas com superfície de contato. As dimensões das malhas variaram de 5 a 12 mm e as forças de compressão foram simuladas tanto como forças aplicadas como também por deslocamentos.

Os resultados numéricos, quando comparados com os resultados experimentais, apresentaram pouca diferença entre si e dessa forma, pode-se concluir então, que os modelos numéricos desenvolvidos pelos autores foram adequados para simular o comportamento de corpos de prova de MLCC submetidos a ensaios de cisalhamento ou de flexão. Além disso, a partir desses modelos, foi possível estudar a distribuição das tensões de cisalhamento ou das distorções das camadas transversais dos painéis, a fim de se obter mais informações a respeito das propriedades *rolling shear*.

2.8 MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO PARA MLCC

Os métodos analíticos de cálculo são teorias propostas por diferentes autores para o cálculo das rigidezes efetivas à flexão e ao cisalhamento, considerando-se as propriedades geométricas da seção e as propriedades elásticas do material. No total, pode-se citar cinco métodos de cálculo: Teoria de Vigas Compostas, Analogia de Cisalhamento, Método Gama, Vigas de *Timoshenko* e Método K. O primeiro ponto em comum entre todos eles seria relação entre as tensões (τ) e a força cortante (V), dada pela Equação (13) (HUANG *et al.*, 2022).

$$\tau = \frac{VM_s}{b \cdot I} \quad (13)$$

Sendo que b , I e M_s correspondem à largura, ao momento de inércia da seção em relação ao eixo de flexão e momento estático da área considerada para o cálculo da tensão, respectivamente.

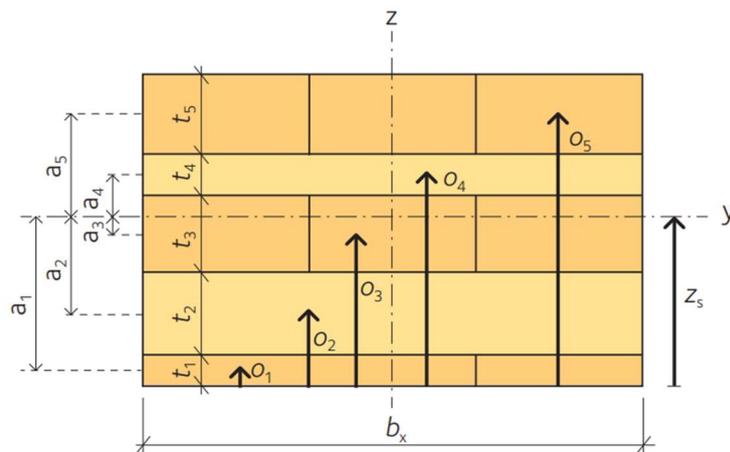
Sabendo-se que alguns métodos analíticos de cálculo trabalham com os valores de rigidez efetiva ao invés do momento estático e o momento de inércia, a equação anterior pode ser substituída pela Equação (14).

$$\tau = \frac{V \cdot (EQ)_{EF}}{b \cdot (EI)_{EF}} \quad (14)$$

Em que $(EQ)_{EF}$ é igual ao momento estático efetivo da área considerada e $(EI)_{EF}$ é igual à rigidez efetiva à flexão da seção. Tais valores variam de acordo com os métodos analíticos, sendo que cada um deles possui uma maneira diferente para o cálculo das rigidezes efetivas à flexão e ao cisalhamento.

Outra similaridade seria o cálculo de centro geométrico da seção do painel de MLCC, o qual é dependente das características geométricas da seção, conforme Figura 90, e das propriedades elásticas do material.

Figura 90-Exemplo de seção composta



Fonte: Swedish Wood (2019)

Para painéis com seção transversal assimétrica, o centro geométrico da seção do painel pode ser calculado pela Equação (15). Caso o painel seja simétrico, o centro geométrico será igual a espessura total da peça dividida por dois, conforme Equação (16).

$$z_s = \frac{\sum \frac{E_i}{E_{ref}} b \cdot t_i \cdot o_i}{\sum \frac{E_i}{E_{ref}} b \cdot t_i} \quad (15)$$

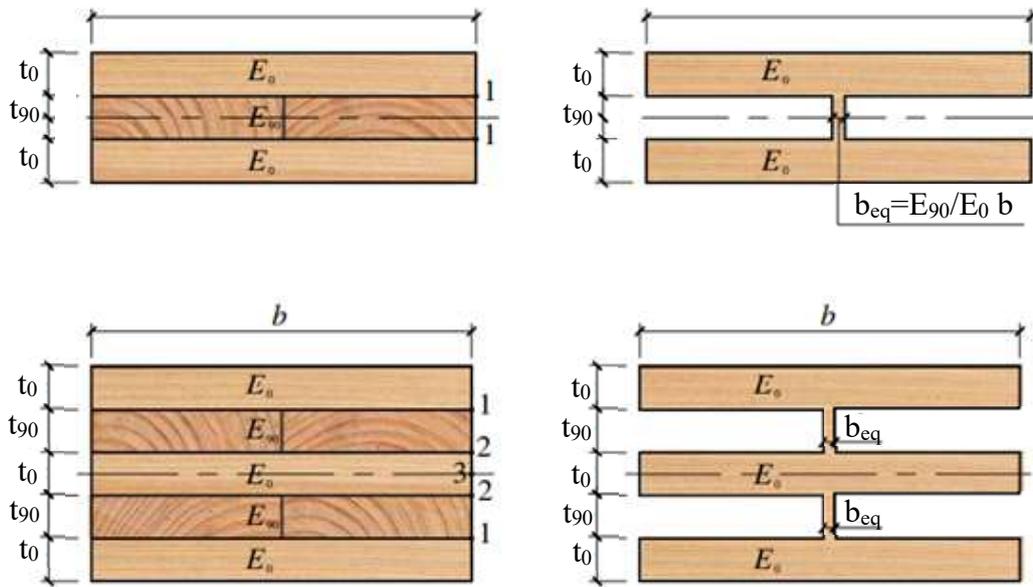
$$z_s = \frac{h}{2} \quad (16)$$

Em que E_i é o módulo de elasticidade longitudinal da camada i , E_{ref} é o módulo de elasticidade longitudinal adotado como referência, b e h são a largura e altura da seção, t_i é a espessura da camada i e o_i é a distância entre o centro geométrico da camada e o eixo de referência.

2.8.1 Teoria de Vigas Compostas

Na Teoria de Vigas Compostas, os painéis de MLCC são admitidos como uma viga composta por diferentes materiais, em que a largura das camadas é transformada em largura equivalente, proporcional aos módulos de elasticidade longitudinal de cada uma dessas camadas, como ilustrado na Figura 91.

Figura 91-Seções transversais reais e equivalentes para painéis de MLCC de três e cinco camadas



Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2022)

Adotando-se o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0), das camadas longitudinais, como referência, têm-se que a espessura equivalente pode ser calculada pela Equação (16), em que b_{eq} é a largura equivalente, E_0 e E_{90} são os módulos de elasticidade longitudinal paralelo e perpendicular às fibras, respectivamente, e b é a largura do corpo de prova.

$$b_{eq} = \frac{E_{90}}{E_0} \cdot b \quad (17)$$

As tensões devido ao *rolling shear*, das camadas transversais, podem ser calculadas conforme Equação (14), utilizando-se o momento de inércia e o momento estático da área, ambos com valores equivalentes.

De acordo com Huang *et al.* (2022), as tensões de cisalhamento são praticamente constantes ao longo das camadas transversais dos painéis de MLCC e, dessa forma, é preciso calcular o momento estático efetivo referente apenas à área das camadas longitudinais. O momento estático efetivo correspondente ao centro geométrico (CG), para os painéis de três e cinco camadas, é dado pela Equação (18) e Equação (19), respectivamente, em que b é a largura do painel, t_0 é a espessura das camadas longitudinais e t_{90} é a espessura das camadas transversais.

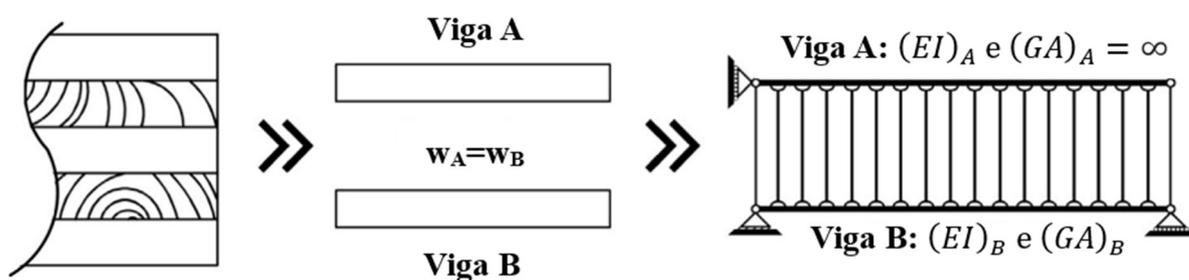
$$(EQ)_{ef} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot t_0 \cdot (t_{90} + t_0) \quad (18)$$

$$(EQ)_{ef} = b \cdot t_0 \cdot (t_{90} + t_0) \quad (19)$$

2.8.2 Analogia de Cisalhamento

O método da Analogia de Cisalhamento é o mais antigo e foi desenvolvido por Kreuzinger, em 1999, para o estudo de painéis sólidos de madeira com camadas cruzadas, o qual é considerado como método mais preciso e adequado para o cálculo das propriedades de rigidezes de painéis de MLCC. Este método admite o painel lamelado como um sistema virtual composto pela soma de duas vigas (vigas A e B), com deslocamentos verticais iguais ($w_A = w_B$), como ilustrado na Figura 92, em que cada uma delas tem sua rigidez à flexão e apenas para a viga B, calcula-se a rigidez ao cisalhamento, uma vez que a Viga A é considerada infinitamente rígida axialmente (POPOVISKI *et al.*, 2019).

Figura 92-Hipóteses Básicas adotadas pela Analogia de Cisalhamento



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2020b)

De acordo com Popoviski *et al.* (2019), a rigidez à flexão da viga A corresponde à soma da rigidez à flexão de todas as camadas individualmente, calculada pela Equação (20).

$$(EI)_A = \sum_{i=1}^n E_i I_i = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot b_i \cdot t_i^3}{12} \quad (20)$$

Em que $(EI)_A$ é a rigidez à flexão da viga A, E_i é o módulo de elasticidade longitudinal da camada i , sendo igual a E_0 para as camadas longitudinais e E_{90} para as transversais, b_i é a largura de cada camada i e t_i é a espessura da camada i . A viga B engloba as rigidezes à flexão e ao cisalhamento da viga e a rigidez das conexões entre as duas vigas, caso elas existam. A rigidez à flexão da viga B é calculada utilizando-se o teorema de Steiner, conforme Equação (21).

$$(EI)_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (21)$$

Em que $(EI)_B$ é a rigidez à flexão da viga B, z_i é a distância entre o centro geométrico de cada camada i e o centro geométrico do painel, E_i é o módulo de elasticidade longitudinal da camada i e A_i é a área da camada i . A rigidez efetiva à flexão do painel $(EI)_{EF}$ é a soma das rigidezes à flexão das vigas A e B, de acordo com a Equação (22) (POPOVISKI *et al.*, 2019).

$$(EI)_{EF} = (EI)_A + (EI)_B = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot b_i \cdot t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (22)$$

De acordo com Popoviski *et al.* (2019), a rigidez efetiva ao cisalhamento do painel $(GA)_{EF}$ é igual à rigidez ao cisalhamento da viga B, a qual é dependente das propriedades geométricas da seção e do módulo de elasticidade transversal das camadas e calculada pela Equação (23).

$$(GA)_{EF} = \frac{a^2}{\frac{t_1}{2G_1 b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{t_i}{G_i b_i} + \frac{t_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n}} \quad (23)$$

Em que a é igual à distância entre o centro geométrico das camadas externas e G_1 , G_i e G_n são os módulos de elasticidade transversal das camadas correspondentes, sendo que, para as longitudinais, o módulo de elasticidade transversal é o da madeira (G), o qual pode ser adotado igual a $E_0/16$, segundo ABNT NBR 7190-1:2022, e para as transversais, o módulo de elasticidade transversal é igual ao *rolling shear* (G_{vt}).

2.8.3 Método Gama

De acordo com Christovasilis *et al.* (2016), o método Gama foi desenvolvido por Blass e Gorlacher em 2003 e é baseado na teoria de vigas conectadas mecanicamente, disponível no Anexo B da CEN EN 1995:2004. Este é o método mais difundido na Europa, e tem como vantagem a possibilidade de ser aplicado em painéis com até nove camadas. Como o próprio nome diz, inicialmente, foi aplicado em vigas com seção transversal T e I, conectadas por parafusos mecânicos com rigidez K e uniformemente espaçados a uma distância S ao longo de todo o comprimento da viga (POPOVISKI *et al.*, 2019).

O método considera as camadas longitudinais dos painéis de MLCC como vigas, as quais são conectadas por ligações distribuídas uniformemente ao longo de seu comprimento, representadas pelas camadas transversais. Além disso, assume que apenas as vigas (camadas longitudinais do painel) que resistem aos esforços de flexão, enquanto a distorção devido ao cisalhamento é absorvida pelas camadas transversais do painel, as quais possuem rigidez ao cisalhamento igual ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Assim, para considerar a contribuição da distorção do cisalhamento na rigidez efetiva à flexão, o fator Gama (γ) foi introduzido para medir a eficiência das ligações das camadas transversais. Para esse método, a rigidez efetiva à flexão do painel pode ser calculada pela Equação (24) (HUANG *et al.* 2022).

$$(EI)_{EF} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot b_i \cdot t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad (24)$$

Em que E_i é o módulo de elasticidade longitudinal da camada longitudinal i , b_i e t_i são a largura e a espessura da camada i , A_i é área da camada e z_i é a distância entre o centro geométrico de cada camada i e o centro geométrico do painel. A novidade nesta fórmula é o coeficiente Gama da camada i (γ_i), que é calculado pela Equação (25).

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot b \cdot t_0}{L_{EF}^2 \cdot G_{vt} \cdot b / h_{90}}} \quad (25)$$

Em que L_{EF} é o comprimento entre dois pontos nulos do diagrama de momento fletor, G_{vt} é o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* da camada transversal j , que conecta as camadas longitudinais e b e t_{90} são a largura e a espessura da camada transversal, respectivamente. O esquema estático efetivo da área, para painéis de três e cinco camadas, é dado pela Equação (26) e Equação (27) (HUANG *et al.* 2022).

$$(EQ)_{EF} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot E_0 \cdot b \cdot t_0 \cdot (t_0 + t_{90}) + \frac{1}{8} \cdot E_{90} \cdot b \cdot t_{90}^2 \quad (26)$$

$$(EQ)_{EF} = \gamma_1 \cdot E_0 \cdot b \cdot t_0 \cdot (t_0 + t_{90}) + \frac{1}{2} \cdot E_{90} \cdot b \cdot t_{90} \cdot (t_0 + t_{90}) + \frac{1}{8} \cdot \gamma_2 \cdot E_0 \cdot b \cdot t_0^2 \quad (27)$$

Em que, γ_1 e γ_2 são os fatores Gama das camadas longitudinais um e dois, E_0 e E_{90} são os módulos de elasticidade longitudinais paralelos e perpendiculares às fibras, b é a largura do painel e t_0 e t_{90} são as espessuras das camadas longitudinais e transversais, respectivamente.

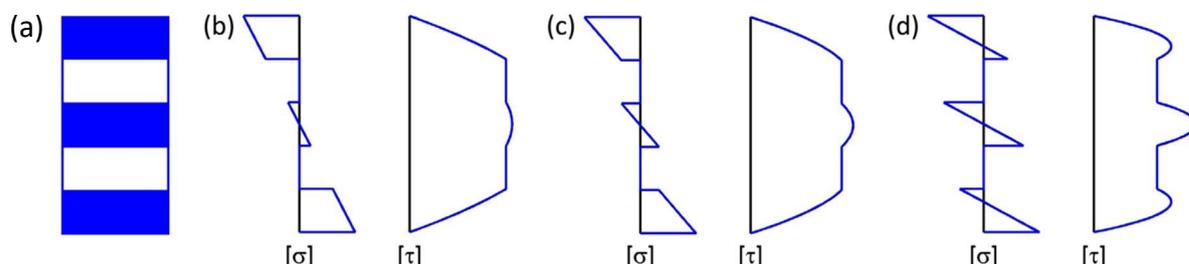
O método apresenta algumas desvantagens, como por exemplo a desconsideração da influência das deformações por cisalhamento das camadas longitudinais, no deslocamento total do painel, sendo que, dependendo da configuração da seção transversal, a parcela do deslocamento vertical devido ao cisalhamento pode ser em torno de 30% contribuinte para a deformação vertical do MLCC.

Outra desvantagem desse método é que a rigidez efetiva depende do vão e assim é uma variável dependente do sistema e a sua aplicação não é indicada para os casos que a relação entre vão/altura maior que 30. Ainda, é necessário que sejam feitas modificações quando for utilizado para os painéis de MLCC com o total de sete ou mais camadas. O coeficiente Gama pode variar de zero (sem ligação) a um (ligação rígida) e para aplicações reais, geralmente ele varia de 0,85 a 0,90 (POPOVISKI *et al.*, 2019).

As distribuições de tensões normais e de cisalhamento variam de acordo com o coeficiente Gama. A Figura 93a mostra um painel de MLCC composto por cinco camadas, em que, as hachuras representam as camadas longitudinais. Para cada um dos itens, a distribuição das tensões normais e de cisalhamento são colocadas à direita e à esquerda, respectivamente. A Figura 93b, Figura 93c e Figura 93d mostram a distribuição de tensões, para os casos em que o coeficiente Gama é igual a 1, 0,5 e 0,1, respectivamente. Quando o coeficiente Gama se aproxima de 1, as camadas longitudinais trabalham ao longo de toda a seção transversal e

quando o valor se aproxima de zero, elas trabalham independentemente (CHRISTOVASILIS *et al.*, 2016).

Figura 93-Representação das tensões normais e de cisalhamento de acordo com o coeficiente Gama.



Fonte: Christovasilis *et al.* (2016)

2.8.4 Teoria de Vigas de *Timoshenko*

A Teoria de Vigas de *Timoshenko* é considerada uma extensão da teoria de vigas de *Euler-Bernoulli* que inclui as deformações por cisalhamento e o efeito do giro das seções transversais. A hipótese de que as seções transversais permanecem planas quando fletidas não é mais válida, tornando-a adequada para prever o comportamento de vigas espessas ou materiais compostos como por exemplo a MLCC (POPOVISKI *et al.*, 2019).

De acordo com Christovasilis *et al.* (2016), esta teoria possui algumas vantagens em relação aos outros métodos, como, por exemplo, o fato de ser mais simples de implementar e mais geral do que o Método Gama, uma vez que ela pode ser aplicada para vários números de camadas, para vigas com vãos múltiplos e a rigidez efetiva à flexão não depende do comprimento efetivo da viga. A rigidez efetiva à flexão é calculada do mesmo modo que pelo método de Analogia de Cisalhamento, conforme Equação (22).

A rigidez efetiva ao cisalhamento $(GA)_{EF}$ dada pela Equação (28), pode ser calculada pelo ajuste da somatória das rigidezes ao cisalhamento das camadas pelo fator de correção de cisalhamento (κ), o qual corrige o efeito da suposição de uma tensão de cisalhamento constante ao longo da seção transversal (NIEDERWESTBERG *et al.* 2018b).

$$(GA)_{EF} = \kappa \cdot \sum_{i=1}^n G_i \cdot A_i = \kappa \cdot \sum_{i=1}^n G_i \cdot b_i \cdot t_i \quad (28)$$

Em que G_i é igual ao módulo de elasticidade transversal da camada i , sendo igual A_0 da madeira (G), para as longitudinais e igual *rolling shear* (G_{vt}) para as transversais.

Conforme Christovasilis *et al.* (2016), o κ pode variar entre 0,20 e 0,25. De acordo com Wallner-Novak, Koppelhuber e Pock (2014), para os casos em que a seção transversal do painel é simétrica, todas as camadas possuem a mesma espessura e adotando-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) como 1/10 do módulo de elasticidade transversal da madeira ($G_{vt}=G/10$), o coeficiente κ pode ser consultado na Tabela 5.

Tabela 5-Fatores de correção de cisalhamento

Quantidade de camadas do painel	Fator corrigido de Cisalhamento
1	0,83
3	0,21
5	0,24
7	0,26
9	0,27

Fonte: Adaptado de Wallner-Novak, Koppelhuber e Pock (2014)

2.8.5 Método K

De acordo com Popoviski *et al.* (2019), o método K foi inicialmente desenvolvido para o estudo de peças de madeira lamelada. Em sua versão original, as camadas transversais dos painéis eram desprezadas no cálculo das propriedades de flexão, como por exemplo, o módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) era considerado igual a zero. Para a sua aplicação em painéis de MLCC foram necessárias algumas modificações, as quais foram feitas de acordo com as seguintes hipóteses:

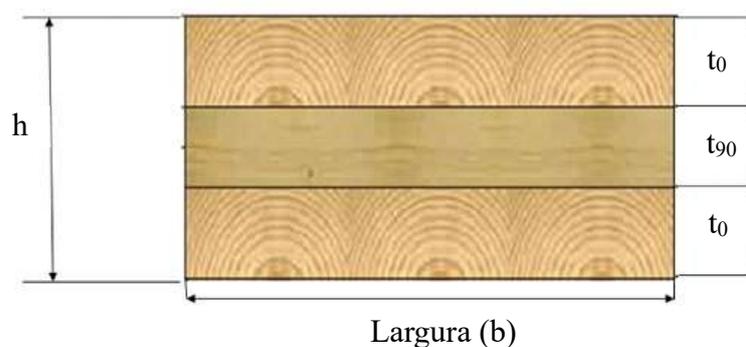
- Relação linear entre tensão e deformação e a hipótese de *Bernoulli* que as seções transversais permanecem planas;
- Inclusão das camadas solicitadas perpendicularmente às fibras e o módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) pode ser adotado igual a 1/30 do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0 ou E_{c0});

- A deformação por cisalhamento é desprezada e, dessa forma, o método pode ser utilizado apenas para os casos em que a relação vão/altura do corpo de prova seja maior que 30;

- Os fatores de composição são determinados de acordo com o modo de aplicação das forças nos painéis de MLCC.

Os fatores de composição para painéis de MLCC submetidos à força uniformemente distribuída ao longo da largura de painéis com camadas externas paralelas e perpendiculares ao vão são chamados de k_1 e k_2 . Os fatores de composição para painéis de três camadas podem ser calculados pelas Equações (29) e (30), cujos parâmetros são indicados na Figura 94.

Figura 94-Indicação das distâncias de interesse na seção transversal do painel



Fonte: Adaptado de Hematabadi *et al.* (2021)

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{t_{90}^3}{h^3} \quad (29)$$

$$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{t_{90}^3}{h^3} \quad (30)$$

De acordo com Blass e Fellmoser (2004), a rigidez efetiva à flexão dos painéis de MLCC, para painéis submetidos à flexão, pode ser calculada pela Equação (31), em que k pode ser k_1 ou k_2 e b é a largura do painel.

$$(EI)_{EF} = E_0 \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} k_{(1)(2)} \quad (31)$$

Nos trabalhos analisados, os métodos analíticos de cálculo foram adotados para estimar a rigidez efetiva teórica à flexão de painéis de MLCC e, conseqüentemente, a sua resistência última. Devido ao fato de a ruptura típica, nesses casos, ocorrer por *rolling shear* nas camadas transversais dos painéis, alguns autores admitem a resistência última à flexão do painel igual a *rolling shear*. A rigidez efetiva ao cisalhamento dos painéis foi calculada apenas nos trabalhos que utilizaram a Analogia de Cisalhamento, uma vez que os outros métodos analíticos calculam apenas a rigidez efetiva à flexão e a resistência última ao cisalhamento do painel.

Sikora, Mc Polin e Harte (2016) empregaram a Teoria de Vigas Compostas, Gama e Analogia de Cisalhamento. O valor calculado pela Teoria de Vigas Compostas e pela Analogia do Cisalhamento foram próximas e a calculada pelo Método Gama foi ligeiramente menor.

O'ceallaigh, Sikora e Harte (2018) utilizaram a Teoria de Vigas Compostas, o Método Gama e Analogia de Cisalhamento para calcular os valores teóricos de rigidez e compará-los aos valores experimentais. Os valores teóricos foram menores do que as rigidezes experimentais globais e locais, sendo que a rigidez teórica com o valor mais próximo à rigidez global foi a que considerou o efeito do cisalhamento. Com isso, concluíram que os deslocamentos locais e globais ocorrem necessariamente devido às distorções de cisalhamento, e devido à variação do módulo de elasticidade das lamelas que compõem o painel.

Crovella, Smith e Bartczak (2019) utilizaram o método de Analogia de Cisalhamento para estimar as rigidezes à flexão de vigas de MLCC e para comparar os valores teóricos com os experimentais. Os resultados experimentais mostraram que os valores estimados de rigidez foram conservadores, uma vez que o valor estimado foi 5% menor do que o experimental, para a madeira conífera, e em torno de 25% menor, para a madeira folhosa. Dessa forma, concluíram que é necessário que sejam propostas novas relações entre as propriedades elásticas para as madeiras folhosas, uma vez que o método é indicado para madeiras coníferas.

Yang *et al.* (2019) calcularam as rigidezes teóricas de painéis de três e cinco camadas pela teoria de Vigas Tradicional, de Viga Composta, Método Gama e Analogia de Cisalhamento. As resistências calculadas pela teoria de Vigas Tradicional foram maiores que todas as outras três teorias, mas apesar disso, adotou-se para comparação a teoria de Analogia de Cisalhamento, devido ao fato de não existir um modelo unificado de cálculo e várias pesquisas anteriores indicam que esse seja o método mais adequado para painéis de MLCC. As resistências últimas dos painéis ao cisalhamento, que tiveram seu cálculo baseado na Analogia de Cisalhamento, foram de 1,15 MPa e 1,36 MPa para ensaios de flexão de quatro e três pontos, cujos valores foram coerentes com os obtidos em estudos anteriores, em que a resistência ao

cisalhamento de corpos de prova de MLCC, com três camadas, foi obtida por ensaios de cisalhamento no plano.

Gong *et al.* (2019) usaram o método de Analogia do Cisalhamento para estimar as rigidezes efetivas à flexão e ao cisalhamento de painéis de MLCC de três e cinco camadas. Os valores analíticos foram comparados aos valores experimentais os quais foram bastante consistentes para ambas as rigidezes. Para a rigidez efetiva à flexão, a diferença entre os valores teóricos e experimentais foram da ordem de 1 a 3%, aproximadamente, enquanto, para rigidez efetiva ao cisalhamento foi da ordem de 1 a 6%. Dessa forma, concluíram que o método de Analogia de Cisalhamento é adequado para estimar tais propriedades dos painéis de MLCC.

Sandoli e Calderoni (2020) realizaram uma pesquisa para analisar a influência do *rolling shear* no deslocamento vertical dos painéis de MLCC e nas tensões normais e de cisalhamento. Para isso foram usados diferentes métodos analíticos de cálculo, com o objetivo de analisar as diferenças entre eles e comparar os resultados com os do modelo em elementos finitos que foi desenvolvido, considerando-se diferentes relações entre vão e altura dos painéis de MLCC. Em relação aos deslocamentos verticais, o Método Gama e o de Analogia de Cisalhamento apresentaram valores próximos e maiores do que os valores que foram calculados pelo Método Gama, considerando-se rigidez infinita da conexão, sendo que os dois primeiros métodos citados foram aqueles que tiveram as deflexões mais próximas às do modelo numérico. As tensões tangenciais tiveram os valores máximos obtidos na metade da altura dos painéis e as tensões normais e de cisalhamento calculadas pelos métodos Gama e Analogia do Cisalhamento, independentemente da relação vão/altura, tiveram valores próximos e comparáveis ao modelo numérico, principalmente para relações superiores a 20. Para valores inferiores, os valores numéricos e os teóricos, para as tensões cisalhantes, tiveram grandes diferenças. Quanto a influência do *rolling shear* no deslocamento vertical, observou-se que para relações entre vão e altura menores do que 30, o seu efeito é significativo e não pode ser desprezado. Para relações superior a 30, as tensões e os deslocamentos verticais podem ser analisados sem a influência do *rolling shear*, desde que as ligações entre as camadas sejam consideradas como rígidas.

Navaratnam *et al.* (2020) calcularam os valores teóricos de rigidez efetivas à flexão pelo método de Analogia do Cisalhamento, Método Gama e Método K. Os valores teóricos geraram estimativas aproximadas para as rigidezes a flexão e para a resistência ao cisalhamento. A rigidez experimental, determinada pelos deslocamentos globais, foi menor do que a rigidez calculada por meio dos deslocamentos locais, enquanto ambas as rigidezes experimentais foram maiores do que os valores teóricos, sendo que a maior rigidez foi observada em painéis de

MLCC com cinco camadas. Dessa forma, concluíram que aumentando-se a altura dos painéis, resultam em tensões cisalhantes menores.

He *et al.* (2020) usaram a Analogia de Cisalhamento, para estimar a rigidez efetiva à flexão, em pequenos vãos, e a resistência do painel. O método Gama também foi usado para estimar as rigidezes efetivas à flexão, com vãos maiores. A rigidez efetiva à flexão, calculada por Analogia de Cisalhamento, foi a que atingiu os valores mais próximos aos experimentais, uma vez que ela considera tanto às deformações devido à flexão, quanto as distorções devido ao cisalhamento, sendo considerada como o método mais preciso para a estimativa da rigidez.

Hematabadi *et al.* (2020) usaram a Analogia do Cisalhamento para estimar a rigidez efetiva ao cisalhamento de painéis de MLCC de três camadas. Ao realizar a comparação entre os valores analíticos e os experimentais, notaram que a rigidez efetiva ao cisalhamento estimada, para peças com camadas externas paralelas ao vão de flexão, foi de 510% menor do que os resultados experimentais. Para os corpos de prova com as camadas externas dispostas perpendicularmente ao vão de flexão, ocorreu que a rigidez efetiva ao cisalhamento experimental foi 9,2% menor do que o valor teórica. Assim sendo, notaram que o método de Analogia de Cisalhamento é conservador para o dimensionamento de MLCC, na direção de maior resistência.

Lim, Tripathi e Li (2020) usaram a Analogia de Cisalhamento para calcular a rigidez efetiva à flexão e a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) teóricas, as quais foram usados para estimar os valores experimentais de rigidez efetiva ao cisalhamento e módulo de elasticidade *rolling shear*, com o objetivo de avaliar a influência do tratamento conservativo nestas propriedades em painéis de MLCC.

Li *et al.* (2020a) usaram Analogia de Cisalhamento para estimar as rigidezes efetivas à flexão e a resistência ao cisalhamento *rolling shear* (f_{vt}) de painéis mistos e não mistos de MLCC formados por três e cinco camadas. No geral, os valores analíticos de resistência foram próximos aos resultados experimentais, principalmente para os painéis de cinco camadas. Em relação às tensões de cisalhamento, os corpos de prova de cinco camadas tiveram valores menores do que os painéis de três camadas, para a mesma configuração e materiais, conforme já havia sido reportado por estudos anteriores.

Hematabadi *et al.* (2021) calcularam a rigidez teórica efetiva à flexão, de painéis mistos e não mistos de MLCC, formados por três camadas, por meio de três diferentes métodos analíticos: Analogia de Cisalhamento, Método K e Método Gama. Os valores experimentais de rigidez efetiva à flexão para os painéis híbridos foram calculados de acordo com método proposto por ASTM D 198:2014 e ANSI/APA PRG 320:2012. As rigidezes efetivas à flexão

foram 20% maiores para os painéis híbridos do que para os painéis homogêneos, tanto para os valores teóricos quanto para os obtidos experimentalmente, nos casos em que os painéis foram dispostos com a camada longitudinal paralela ao vão de flexão. Para os corpos de prova com as camadas externas dispostas perpendicularmente ao vão, as rigidezes foram aproximadamente 60% maiores para os híbridos. Em ambos os casos, a rigidez experimental foi maior do que as rigidezes teóricas, sendo que a rigidez teórica que mais se aproximou da experimental foi a calculada por Analogia de Cisalhamento e a que mais apresentou diferença foi a calculada pelo Método K. Ainda, observaram que para os elementos com camadas externas paralelas ao vão de flexão ocorreu a diferença máxima de 6,5%, enquanto para aquelas com as camadas externas dispostas perpendicularmente ao vão a diferença máxima foi de 132%. Quanto a rigidez efetiva ao cisalhamento, o valor teórico foi calculado apenas pelo método de Analogia do Cisalhamento. Semelhantemente ao que aconteceu com a rigidez efetiva à flexão, os painéis mistos de MLCC foram maiores do que as rigidezes dos painéis não mistos. Sendo que, para ambas as disposições das lamelas nas camadas externas, ocorreu que os valores experimentais foram bem maiores do que o teórico, sendo que a maior diferença foi em torno de 573%.

Huang *et al.* (2022) estudaram a viabilidade de aplicação dos modelos analíticos, por meio de ensaios experimentais e cálculos analíticos. Os métodos analíticos estudados foram o de Teoria de Vigas Compostas, Método de Analogia do Cisalhamento e Método Gama. Além disso, uma simplificação da Teoria de Vigas foi proposta neste trabalho. Por meio da comparação entre os valores teóricos e os experimentais, concluíram que a Teoria de Vigas Compostas, o Método de Analogia do Cisalhamento e o Método Simplificado chegaram nos mesmos resultados, o qual teve o menor valor. Ainda, constataram que o Método Gama foi o mais apropriado para o cálculo da resistência *ao rolling shear* (f_{vt}), desde que as propriedades sejam previamente estimadas pelos ensaios de cisalhamento.

Dessa forma, pode-se concluir que todos os métodos de cálculo indicados são adequados para estimar as rigidezes, sendo que, o único método que indica a equação para determinar a rigidez ao cisalhamento é o de Analogia de Cisalhamento, sendo assim, o mais adequado para estudar as propriedades *rolling shear*. O Método Gama e o de Analogia de cisalhamento foram os que apresentaram valores teóricos mais próximos do experimental.

2.9 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a revisão bibliográfica apresentada, pode-se comentar que atualmente tem sido desenvolvidos vários trabalhos referentes a painéis de MLCC, principalmente quanto a resistência (f_{vt}) e rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), novos tipos de matéria-prima e painéis híbridos.

Em relação aos tipos de materiais utilizadas para fabricação dos elementos citados pode-se citar a madeira conífera, madeira folhosa, produtos fabricados a partir de madeira, como por exemplo, o painel de lascas orientadas. As densidades das madeiras utilizadas variaram aproximadamente de 150 kg/m^3 a 900 kg/m^3 . No entanto, não existem trabalhos referentes a painéis de MLCC fabricados com madeira nativas brasileiras, principalmente quanto à caracterização estrutural referente a resistência (f_{vt}) e rigidez ao *rolling shear* (G_{vt}), métodos de ensaio, modelos numéricos e analíticos.

Vários modelos de corpos de prova foram utilizados pelos diferentes pesquisadores para obtenção da resistência e da rigidez ao *rolling shear*, mas não existe um consenso sobre qual o melhor modelo de corpo de prova para a determinação destes parâmetros. Ainda, variou-se o tipo de adesivo utilizado e as dimensões das amostras, assim como o método de ensaio empregado. Os ensaios de cisalhamento inclinado foram realizados com inclinações variadas entre 10° e 20° e a medição dos deslocamentos foram feitos por diferentes dispositivos, como por exemplo, LVDTs e correlação de imagens digitais (DIC). No ensaio de cisalhamento reto, notou-se que não há um dispositivo normatizado para a contenção lateral dos corpos de prova assim como que o dispositivo indicado para fixação dos medidores de deslocamento não é adequado, uma vez que ele mede o deslocamento vertical de apenas uma camada sendo que o deslocamento que deveria ser medido é o deslocamento relativo entre as camadas externas da peça.

Os estudos apresentados utilizaram o método de ensaio de flexão apenas para determinação da resistência dos painéis de MLCC ao *rolling shear*. Assim sendo, notou-se a necessidade de utilizar o ensaio de flexão para a determinação do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Observou-se também a demanda de se desenvolver o cálculo da rigidez do painel ao cisalhamento em função dos módulos de elasticidade transversal da madeira (G) e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), uma vez que a BIS EN 16351:2021 e a ABNT NBR 7190-7:2022 apresenta uma expressão apenas para os painéis de cinco camadas.

As resistências (f_{vt}) e os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) variaram quanto a densidade do material, a orientação dos anéis de crescimento, espessura das camadas e principalmente em relação ao método de ensaio empregado. Dessa forma, observou-se a necessidade da determinação de um método normatizado para a aferição dessas propriedades e que há poucas pesquisas referentes ao tema, principalmente as que utilizam painéis de MLCC fabricados com madeira nativa brasileira.

Os modelos numéricos utilizados nos trabalhos também apresentaram algumas lacunas, principalmente em relação as propriedades elásticas utilizadas como entrada no modelo. Foram realizados ensaios experimentais apenas para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal paralelo as fibras em ensaios de compressão (E_{c0}) ou em ensaios de flexão (E_0) e as outras propriedades elásticas foram adotadas em relação a esse valor. Os coeficientes de Poisson foram adotados a partir de manuais técnicos ou outras referências e observou-se que não havia fontes de pesquisas para madeiras brasileiras. Entre os modelos analíticos apresentados, os que foram mais indicados pelos autores para estudo das rigidezes de painéis de MLCC foram o Método Gama e o de Analogia de Cisalhamento, os quais, foram adotados para estimativa das rigidezes dos painéis estudados.

Dessa forma, optou por neste trabalho, realizar um estudo completo da resistência (f_{vt}) e do modo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), definindo-se quais os métodos de ensaios são adequados para o estudo de elementos de MLCC fabricados com madeiras nativas brasileiras, assim como, quais os modelos numéricos e analíticos são indicados para essa finalidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

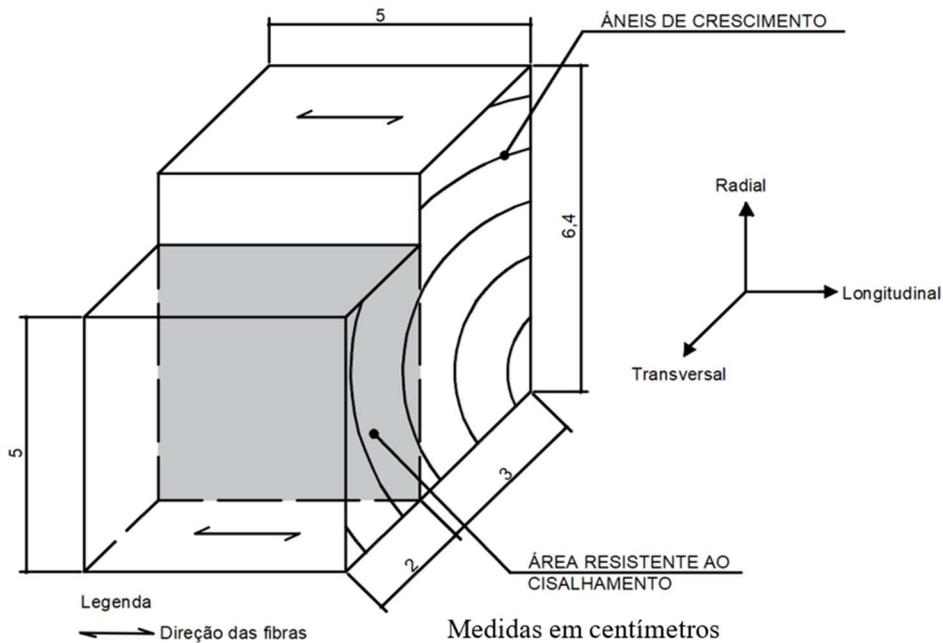
Nessa seção são apresentados os materiais utilizados para fabricação dos painéis de MLCC, assim como as metodologias empregadas em cada dos ensaios experimentais, para a realização dos modelos numéricos computacionais em elementos finitos e para a análise dos modelos de cálculo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA

Para a realização do trabalho, foram usadas duas espécies de madeira nativa folhosas, Marupá (“*Simarouba amara*”) e Piquiá (“*Caryocar villosum*”) na confecção dos elementos de MLCC. Essas espécies foram escolhidas com o objetivo de minimizar a influência dos defeitos naturais da madeira nos ensaios realizados, lembrando que, um dos objetivos do trabalho foi determinar o método de ensaio mais adequado para o estudo das propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez ao cisalhamento transversal *rolling shear* (G_{vt}).

As peças de madeira que foram usadas para fabricação dos corpos de prova dos ensaios experimentais foram previamente caracterizadas de acordo com ABNT NBR 7190-3:2022, a partir de amostras isentas de defeitos, quanto à umidade (U), densidade aparente (ρ_{ap}), módulo de elasticidade paralelo (E_{c0}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), tração perpendicular às fibras (f_{t90}) e cisalhamento paralelo (f_{v0}). Com o objetivo de se obter um parâmetro para a comparação entre a resistência ao cisalhamento paralelo (f_{v0}) e a resistência da madeira ao *rolling shear* (f_{vt}) também foi realizado outro método de ensaio, em peças isentas de defeitos, o qual foi desenvolvido por Mendes (1984). Esse método de ensaio é uma adaptação do ensaio de cisalhamento dado pela ABNT NBR 7190-3:2022, em que foi feita uma alteração quanto a direção das fibras, as quais foram posicionadas como ilustrado na Figura 95.

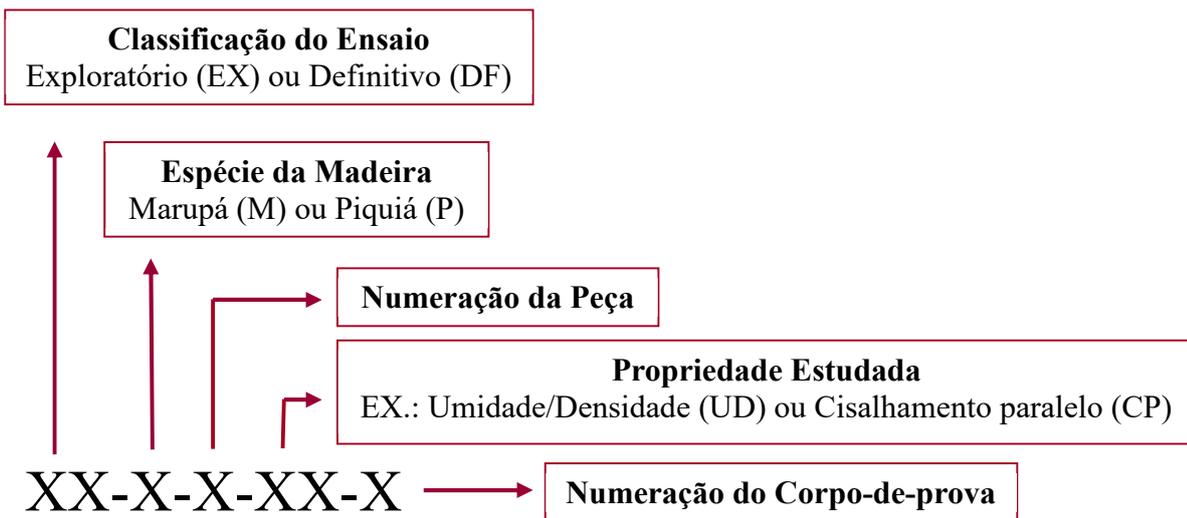
Figura 95-Disposição das fibras e dimensões dos corpos de prova



Fonte: A Autora

Os corpos de prova foram nomeados em função da etapa do trabalho, da espécie de madeira usada, da propriedade estudada e da numeração das peças e dos corpos de prova, conforme esquematizado na Figura 96.

Figura 96-Nomenclatura dos corpos de prova de caracterização



Fonte: A Autora

As etapas de trabalho foram divididas em exploratória e definitiva e em relação a numeração das peças, para o Marupá, foram numeradas de um a sete. As de número um a três foram usadas nos ensaios exploratórios, e as de quatro a sete foram usadas nos ensaios

definitivos, os quais ainda foram subdivididos quanto ao método de ensaio realizado. As peças quatro e cinco foram usadas na fabricação das amostras submetidas aos ensaios de cisalhamento, sendo que a peça quatro foi usada para o ensaio reto e a cinco para o ensaio inclinado. A peça seis foi usada para fabricar os elementos usados nos ensaios experimentais de flexão. As madeiras de Piquiá foram numeradas de um a cinco, sendo que as peça um foi usada na fabricação das peças para os ensaios de cisalhamento reto e inclinado e as de um a cinco foram usadas nos ensaios de flexão. Para cada tipo de ensaio de caracterização, foram usadas em média 23 amostras para o Marupá e sete para o Piquiá, totalizando 133 e 33 para cada uma das espécies, respectivamente. A quantidade das amostras para cada uma das espécies e propriedades estudadas são apresentados detalhamento na Tabela 6.

Tabela 6-Quantidade de corpos de prova

Propriedade	Marupá	Piquiá
$\rho_{ap,med}$ (kg/m ³)	26	9
U_{med} (%)	26	9
$f_{c0,med}$ (MPa)	21	6
$E_{c0,med}$ (MPa)	21	6
$E_{0,med}$ (MPa)	19	18
$f_{v0,med}$ (MPa)	24	5
$f_{vt,med}$ (MPa)	23	8
$f_{i90,med}$ (MPa)	19	5

Fonte: A Autora

3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO

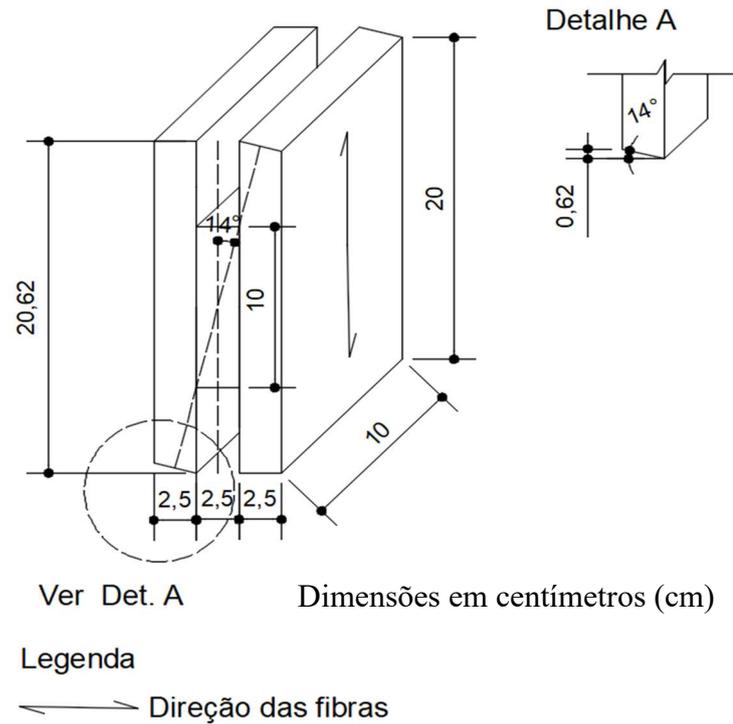
Os ensaios experimentais de cisalhamento, para determinação da resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), foram divididos em ensaios realizados em corpos de prova com camada transversal apenas e em elementos de MLCC. Todos eles foram obtidos pela colagem de lamelas os quais foram fabricados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos. Por sua vez, os ensaios realizados em elementos de MLCC foram subdivididos em ensaios de cisalhamento reto, o qual foi realizado em peças na vertical e que não tinham chanfro, e o ensaio de

cisalhamento inclinado, em que os elementos foram posicionadas inclinadamente em relação à vertical e que tinham chanfro. Assim sendo, nas próximas subseções, são apresentados a metodologia utilizada em cada tipo de ensaio.

3.2.1 Corpos de prova formados apenas por camada transversal

Para a realização destes ensaios, foram fabricados 11 corpos de prova, os quais foram compostos por peças de madeiras coladas, sendo que a lamela central única era da espécie Marupá e as duas lamelas externas eram de Piquiá. Quanto a fabricação dos elementos, as peças de madeira foram cortadas em peças menores, com pelo menos um metro de comprimento, uma vez que as suas superfícies foram preparadas para a colagem por meio da passagem delas na desgrossadeira. Então, as peças foram cortadas em tamanhos menores, de acordo com as dimensões adotadas, sendo a lamela central com dimensões 25 mm x 10 mm x 10 mm (espessura x largura x comprimento) e as peças externas com 25 mm x 10 mm x 35 mm (espessura x largura x comprimento). Para este caso, as amostras foram produzidas individualmente e a colagem foi feita com adesivo Cascophen RS 216-M com catalisador em pó, na proporção de 1:5 (pó: líquido), com gramatura de 300 g/m² e aplicado com pincéis, em ambas as faces das peças entre a lamela central e as externas, não sendo realizada a colagem lateral das lamelas da camada transversal, neste caso. A prensagem foi realizada por meio de mosquetão, sendo de quatro a cinco elementos por vez. Após o tempo de cura do adesivo (sete dias), foram feitos chanfros nas camadas externas de tal modo que ao ser posicionado na prensa, ele estivesse inclinado em 14° em relação à vertical e que a linha imaginária entre os pontos de carregamento estivesse alinhada com o centro do corpo de prova e na vertical. As dimensões das peças e a configuração final dos elementos são ilustradas na Figura 97, sendo que as fibras da lamela central estão dispostas perpendicularmente as das externas.

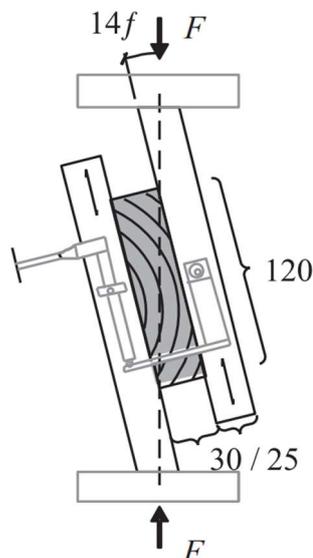
Figura 97-Corpo de prova formado apenas com camada transversal



Fonte: A Autora

Esse método de ensaio foi baseado nos estudos apresentados por Li *et al.* (2022a), Ukyo *et al.* (2019), R. Wang *et al.* (2021), Wang *et al.* (2018a) e Wu *et al.* (2021). Ele consistiu em aplicar uma força de compressão no topo do corpo de prova, mantendo-se a sua base apoiada, e medindo-se o deslocamento relativo entre as camadas externas, conforme ilustrado na Figura 98.

Figura 98-Exemplo ilustrativo do método de ensaio adotado como referência



Fonte: Ehrhart e Brandner (2018)

No caso deste trabalho, os deslocamentos relativos foram medidos, inicialmente, por meio de relógios comparadores fixados em ambos os lados dos corpos de prova, conforme Figura 99. Também tentou-se medir o deslocamento por meio de correlação de imagens digitais, mas, no primeiro momento, a alternativa não foi interessante devido às incompatibilidades no *software* de correlação das imagens.

Figura 99-Método adotado para o ensaio em corpos de prova formados apenas por camada transversal



Fonte: A Autora

O corpo de prova foi carregado com carga aplicada gradualmente até 40% da força de ruptura estimada, enquanto a leitura dos dois dos relógios era feita sincronizadamente em intervalos de 4 kN. Então, os relógios comparadores foram retirados para preservar a sua integridade e o corpo de prova era levado à ruptura. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram calculados pela Equação (2) e Equação (3), respectivamente, as quais foram previamente apresentadas na subseção 2.6.1.

3.2.2 Corpos de prova de MLCC

Na fase exploratória, foram produzidos nove corpos de prova para a realização dos ensaios, sendo quatros sem chanfro e cinco com chanfro. Para a fase definitiva, foram produzidos 48 no total, sendo que foram feitos seis para cada geometria (sem e com chanfro), espécie (Marupá e Piquiá) e espessura da lamela (25 e 38 mm). Eles foram retirados peças lineares de madeira, as quais eram formadas por camadas longitudinais de lamela única e transversal constituídas por várias lamelas posicionadas ortogonalmente às externas, como ilustrado na Figura 100.

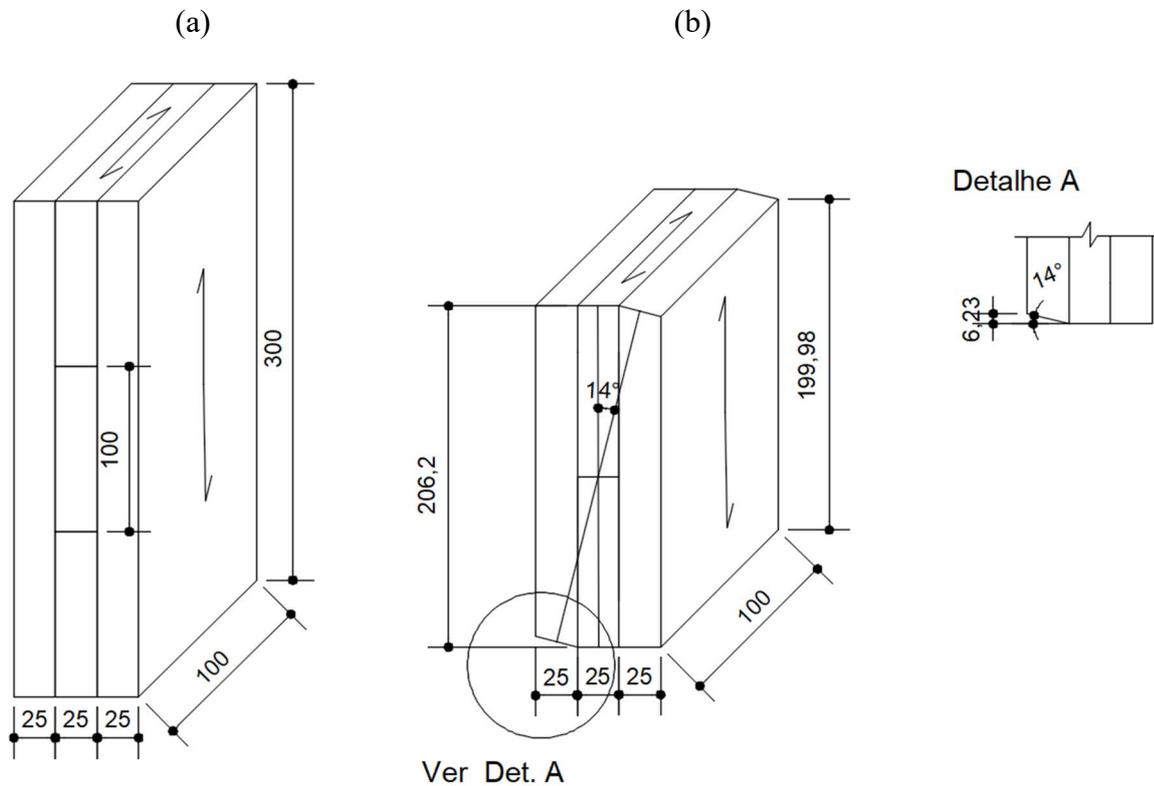
Figura 100-Peças lineares de madeira produzidas



Fonte: A Autora

Para os ensaios exploratórios, foram produzidas peças lineares com espessuras de 25 mm sendo que foi usada apenas a espécie Marupá. As lamelas transversais ficaram com dimensões de 25 mm x 100 mm x 100 mm (espessura x largura x comprimento), enquanto as peças das camadas longitudinais foram cortadas com dimensões de 25 mm x 100 mm x 1050 mm (espessura x largura x comprimento). As dimensões nominais dos corpos de prova da fase exploratória são ilustradas na Figura 101a e Figura 101b, para aqueles com e sem chanfro, os quais foram usados nos ensaios de cisalhamento reto e inclinado, respectivamente.

Figura 101-Corpo de prova com camada central composta por múltiplas lamelas usados na etapa exploratória (a) Ensaio de cisalhamento reto (b) Ensaio de cisalhamento inclinado

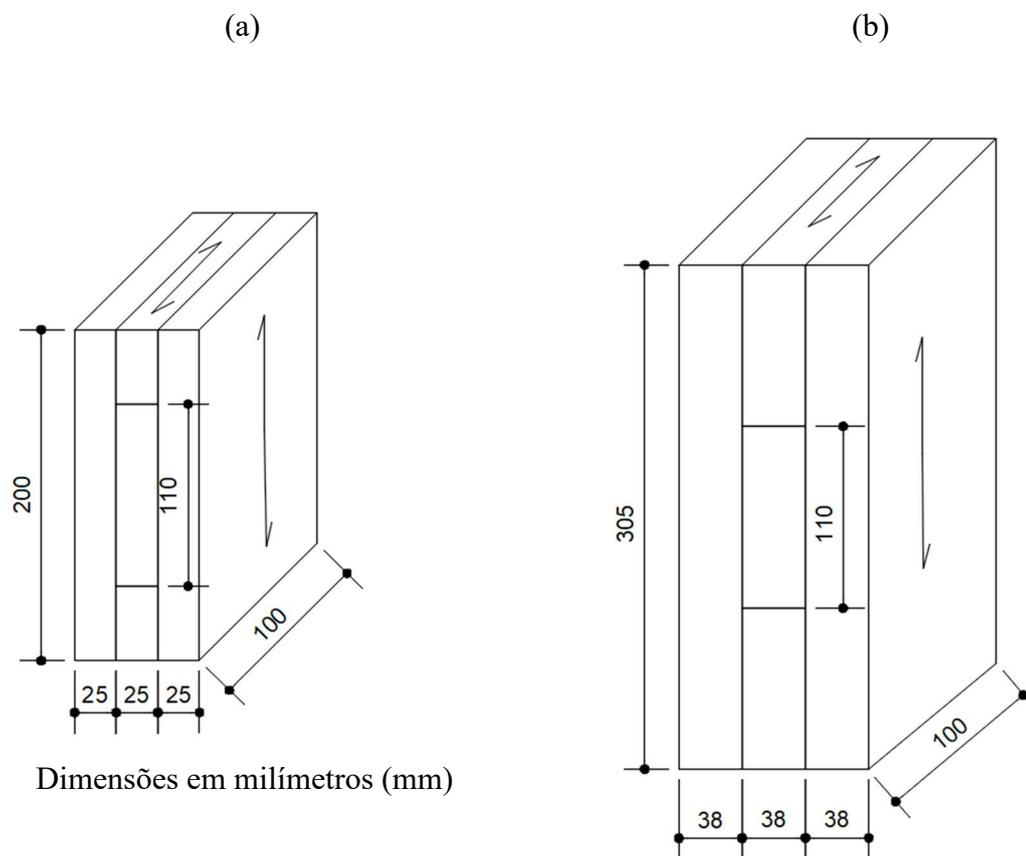


Dimensões em milímetros (mm)

Fonte: A Autora

Para os ensaios definitivos foram produzidas peças lineares com espessuras de 25 mm e 38 mm, para ambas as espécies, Marupá e Piquiá. As dimensões das lamelas transversais foram 25 mm x 110 mm x 100 mm (espessura x largura x comprimento) e 38 mm x 110 mm x 100 mm (espessura x largura x comprimento). As camadas longitudinais foram de 25 mm x 110 mm (espessura x largura) e 38 mm x 110 mm (espessura x largura) e comprimento variável para ambos os casos. As dimensões nominais das amostras da fase definitiva e sem chanfro são ilustradas na Figura 102a e Figura 102b, para espessuras finais de 75 mm e 114 mm, respectivamente.

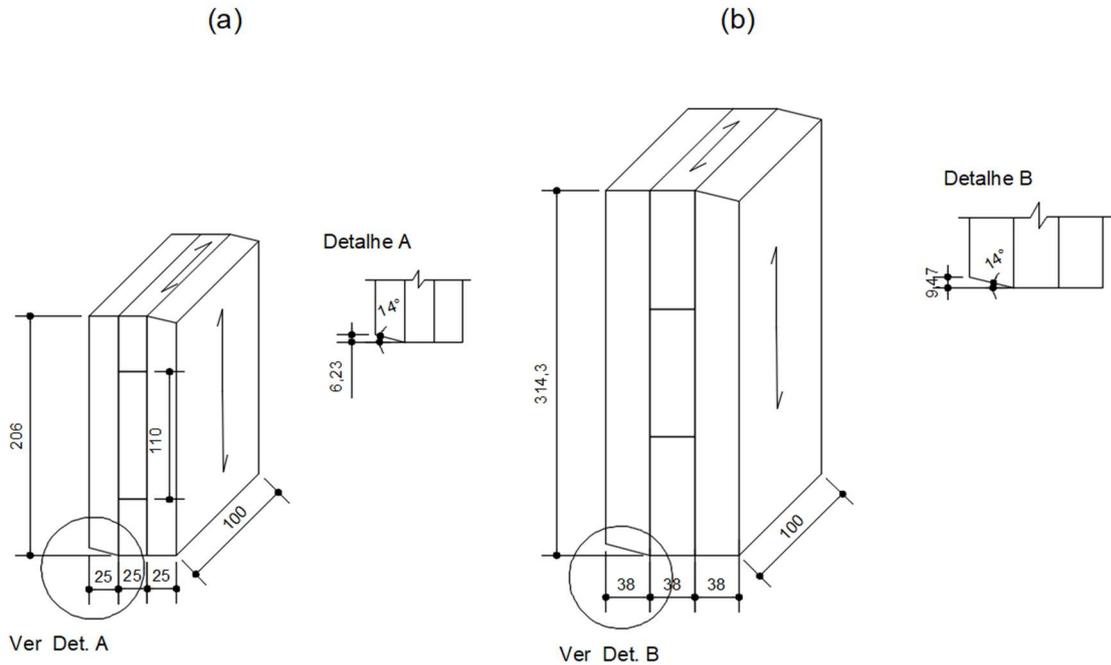
Figura 102-Corpos de prova na fase definitiva (sem chanfro) em (a) Espessura de 75 mm (b) Espessura de 114 mm



Fonte: A Autora

As dimensões nominais dos elementos da fase definitiva e com chanfro são ilustradas na Figura 103a e Figura 103b, para espessuras finais de 75 mm e 114 mm, respectivamente.

Figura 103-Corpos de prova na fase definitiva (com chanfro) em (a) Espessura de 75 mm e (b) Espessura de 114 mm



Dimensões em milímetros (mm)

Fonte: A Autora

O adesivo e o modo de aplicação utilizado foi o mesmo do ensaio anterior. Nas lamelas da camada transversal, a cada três lamelas, foi deixado um espaçamento lateral para definir os pontos de corte para retirada dos corpos de prova. As peças lineares de madeira foram posicionadas na prensa hidráulica e a superfície de contato entre a madeira e a prensa foi recoberta por papel para evitar a colagem das peças na prensa, conforme ilustrado na Figura 104. As peças lineares de madeira foram submetidas a pressão de 1,20 MPa, por pelo menos 24 horas. Esse nível de pressão seguiu as recomendações da ABNT NBR 7190-1:2022 que recomenda pressão de fabricação de 1,20 MPa para madeiras com densidade igual ou superior a 500 kg/m³.

Figura 104-Prensagem das peças lineares de madeira



Fonte: A Autora

Após sete dias, as peças foram cortadas, ao longo do comprimento, a cada três lamelas transversais, para a retirada dos corpos de prova. Então, cada elemento foi serrado nas dimensões finais e quando necessário, o chanfro era feito na serra inclinada. A inclinação foi conferida por meio da aferição das medidas das peças de tal modo que ela fosse igual a 14° e que quando ele fosse colocado em superfície horizontal, os pontos de carregamento estivessem alinhados com a vertical, como ilustrado na Figura 105.

Figura 105-Aferição da inclinação e alinhamento do corpo de prova



Fonte: A Autora

Para os ensaios de cisalhamento foram adotados dois métodos, sendo um com o corpo de prova sem chanfro, o qual foi usado no ensaio de cisalhamento reto e outro com chanfro, que foi utilizado no ensaio de cisalhamento inclinado. Para o primeiro caso, o método de ensaio foi baseado na ABNT NBR 7190-7:2022. Os deslocamentos foram medidos por relógios comparadores ou LVDTs fixados em chapas metálicas em ambos os lados do corpo de prova. Na fase exploratória, foram estudadas outras formas de medir os deslocamentos, como, por exemplo, por meio de transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) e por correlação de imagens digitais. Os LVDTs foram fixados da mesma maneira que os relógios comparadores, conforme ilustrado na Figura 106, e a correlação de imagens digitais não conseguiu ser feita, neste momento novamente, devido às incoerências no programa que faria a correlação das imagens.

Figura 106-Localização dos dispositivos de medição de deslocamento



Fonte: A Autora

Para a fase definitiva, os relógios comparadores foram substituídos por LVDTs, devido à facilidade de operação e aquisição dos dados, assim como, à agilidade em se realizar mais ensaios em um determinado período. O processo de aplicação da força foi semelhante ao ensaio anterior, em que a força de compressão foi aplicada até aproximadamente 40% da força última estimada e posteriormente os LVDTs foram retirados. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram calculados pelas Equações (4) e (5), respectivamente, citadas anteriormente na subseção 2.6.2.1.

Para este ensaio foi preciso apoiar o corpo de prova lateralmente, cuja alternativa encontrada foi representada na Figura 106. Essa estratégia pode resultar em interferências no ensaio, devido ao atrito lateral entre a peça o dispositivo de ensaio. Apesar dessa característica, ele foi escolhido para a fase definitiva do trabalho, uma vez que é indicado atualmente pela ABNT NBR 7190-7:2022.

Em relação ao ensaio de cisalhamento inclinado foi baseado em estudos anteriores, como por exemplo, o que foi realizado por Zhou *et al.* (2022), o qual é ilustrado na Figura 107.

Figura 107-Ensaio de cisalhamento inclinado usado na pesquisa



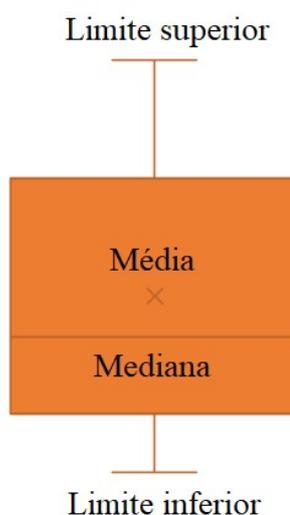
Fonte: A Autora

A aplicação das forças de compressão foi realizada conforme o ensaio anterior e a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram calculados pela Equação (2) e Equação (3), respectivamente, as quais foram previamente apresentadas na subseção 2.6.1.

No geral, esse método de ensaio, do ponto de vista de aplicação, foi o mais simples de se realizar, dentre os três feitos na etapa exploratória, devido ao fato da contenção lateral não ser necessária. Além disso, para a execução do chanfro, a linha de cola foi tomada como referência, o que também se tornou uma vantagem em relação ao ensaio de cisalhamento em lamelas, por exemplo. Assim sendo, ele também foi estudado na fase exploratória e adotado para a etapa definitiva da pesquisa.

A comparação entre os valores obtidos nos ensaios foi feita por meio de gráficos de diagrama de caixa, os quais são ilustrados na Figura 108. Esses diagramas foram adotados para apresentar a variação dos dados experimentais, em que, as extremidades representam o limite superior e inferior, a linha central representa a mediana e a média é dada pelo valor acima do símbolo x.

Figura 108-Diagrama de caixa



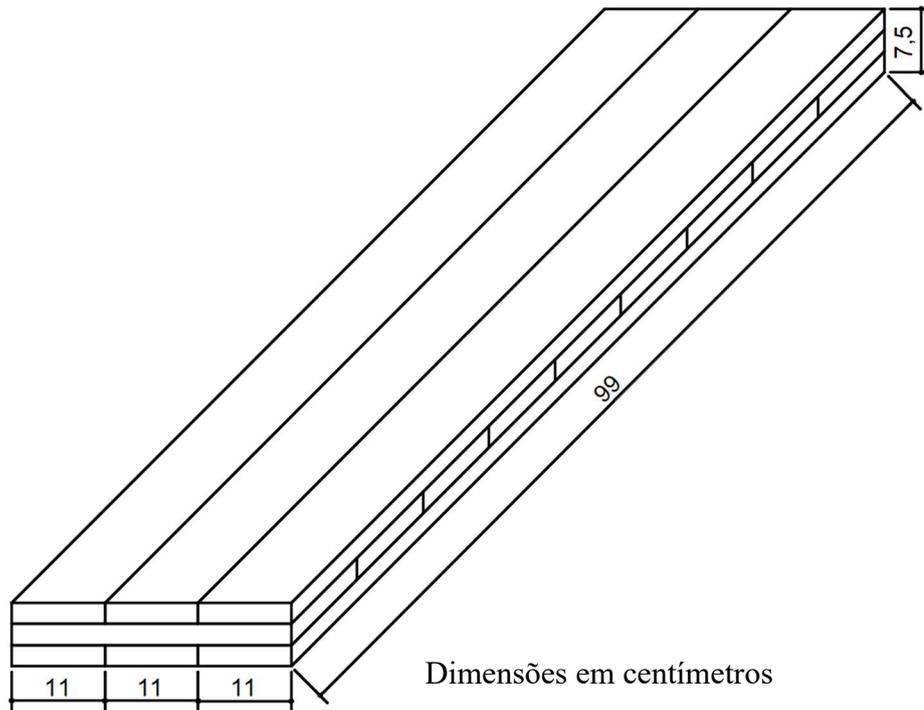
Fonte: A Autora

3.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão de quatro pontos foram realizados apenas na fase definitiva e de acordo com a ABNT NBR 7190-7:2022. Para estes ensaios foram produzidas duas placas (painéis MLCC), para cada espécie, totalizando quatro e utilizada apenas uma espessura de lamela de 25 mm. Em ambos os casos, uma placa foi levada à ruptura e a outra foi ensaiada apenas até 40% da força última estimada, já que posteriormente, ela foi serrada em vigas, gerando-se três corpos de prova por placa, resultando-se em seis peças com largura de 110 mm. As placas de madeira, semelhantemente às amostras anteriores, foram fabricadas por meio da colagem de peças de madeira com dimensões menores, as quais foram classificadas visualmente e mecanicamente, de acordo com ABNT NBR 7190-2:2022 e ABNT NBR 7190-4:2022, respectivamente.

As peças com módulos de elasticidade longitudinais paralelo às fibras semelhantes foram agrupadas na mesma camada, sendo que as camadas longitudinais foram formadas por três lamelas e a camada transversal por 11, com seção transversal de 25 mm x 110 mm e altura final de 75 mm. As dimensões das lamelas e dos painéis de MLCC fabricados constam na Figura 109.

Figura 109-Dimensões dos painéis de MLCC em cm



Fonte: A Autora

Após a classificação estrutural e estudo prévio da montagem dos painéis, as peças tiveram as suas superfícies superior e inferior preparadas para a colagem por meio da passagem na desengrossadeira. Após a aferição da espessura com o paquímetro, foi feita a colagem com o mesmo adesivo usado para a fabricação dos outros corpos de prova. O adesivo foi espalhado apenas nas faces superior e inferior das peças, utilizando-se pincéis, sendo que, assim como nos outros casos, as lamelas não tiveram as faces laterais coladas. O adesivo foi aplicado por pincel em ambas as faces das lamelas na superfície de contato entre as camadas, sendo que não foi realizada a colagem lateral das lamelas. Para evitar a colagem entre as peças ou entre as peças e a prensa foram colocadas lonas plásticas entre as placas e entre as placas e a prensa. Após a colagem, foi feita a prensagem das lamelas, conforme Figura 110, em que a pressão de 1,20 MPa foi aplicada por meio de torquímetro e mantida por aproximadamente sete dias. Esse nível

de pressão seguiu as recomendações da ABNT NBR 7190-1:2022 que recomenda pressão de fabricação de 1,2 MPa para madeiras com densidade igual ou superior a 500 kg/m^3 .

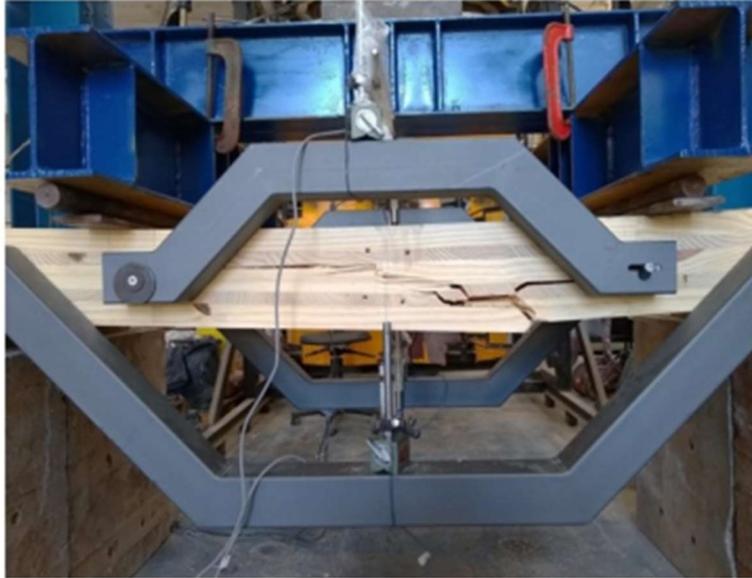
Figura 110-Prensagem dos painéis de MLCC em prensa manual com pressão aferida por torquímetro



Fonte: A Autora

Após o tempo de cura do adesivo, sete dias, as peças foram planificadas e finalizadas e então ensaiadas à flexão. Os ensaios de flexão foram feitos a quatro pontos, conforme especificado na ABNT NBR 7190-7:2022 e BIS EN 16351:2021, com vão entre apoios igual 12 vezes a altura do elemento. As forças foram aplicadas em dois pontos distantes entre si de seis vezes a altura do elemento (ponto A e E) e distantes do apoio de três vezes a altura do elemento e os deslocamentos verticais foram medidos no meio do vão (ponto C) e nos pontos localizados a $h/2$ do ponto de aplicação da força e distantes entre si de cinco vezes a altura do corpo de prova (pontos B e D). A ABNT NBR 7190-7 (2022) indica um dispositivo de ensaio para medição dos deslocamentos, semelhante ao ilustrado na Figura 111.

Figura 111-Dispositivo indicado para o ensaio de flexão



Fonte: Vilela (2020)

No entanto, devido ao cronograma do trabalho não foi possível produzi-lo e a alternativa encontrada foi realizar a medição nos pontos B e C e D, sendo que os LVDTs foram fixados em bases magnéticas e posicionados no ponto médio entre as faces laterais da placa, conforme Figura 112, e nos apoios, conforme Figura 113.

Figura 112-Posicionamento dos LVDTs na parte central do elemento a ser ensaiado



Fonte: A Autora

Figura 113-Posicionamento dos LVDTs nos apoios



Fonte: A Autora

Para cada espécie, conforme citado anteriormente, foram fabricadas duas placas, sendo que uma delas foi levada até a ruptura, com a força aplicada a uma taxa constante. A força de ruptura foi usada como referência para calcular a força que foi aplicada na segunda placa e os deslocamentos medidos por LVDTs até o deslocamento no meio do vão ser igual $L/200$, em que L foi igual ao vão entre os apoios (12h) e, após isso, os dispositivos foram retirados.

A força aplicada na segunda placa foi igual a 40% do valor da força de ruptura da placa anterior, de tal modo a se trabalhar dentro do regime elástico, uma vez que essa placa foi usada para a produção de outros três corpos de prova com largura de 110 mm. O deslocamento global (δ_{global}) foi calculado como o deslocamento medido no meio do vão menos a média dos medidos nos apoios e o deslocamento local (δ_{local}) foi calculado como o deslocamento medido no meio do vão menos os medidos nos pontos A e B.

A rigidez local à flexão do painel e a rigidez aparente à flexão do painel foram calculadas conforme Equação (6) e Equação (7), respectivamente, e a rigidez ao cisalhamento do painel foi calculada pela Equação (8), as quais foram previamente descritas na subseção 2.6.2.2.

A resistência do painel de MLCC ao *rolling shear* (f_{vt}) foi obtida pela Equação (10) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* foi calculado pela Equação (55), a qual foi deduzida especificadamente para esse trabalho. A dedução da equação para painéis de MLCC formado por três camadas iguais é mostrada na subseção 3.3.1.

$$(GA)_{MLCC} = \kappa \cdot \sum_{i=1}^3 G_i \cdot A_i = \kappa \cdot b \cdot t_{cam} \cdot (1,62 \cdot G + 1,38 \cdot G_{vt}) \quad (55)$$

3.3.1 Dedução de equação para painéis de MLCC com três camadas

A equação analítica para a avaliação painéis de MLCC de três camadas com a mesma espessura foi desenvolvida correlacionando-se a rigidez do painel ao cisalhamento com o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) e o *rolling shear* (G_{vt}). Para a definição da equação, considerou-se inicialmente que a tensão de cisalhamento máxima, para uma seção transversal retangular é dada pela Equação (32).

$$\tau = \frac{V \cdot M_{s,z}}{b \cdot I_z} \quad (32)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento, V é a força cortante, $M_{s,z}$ é o momento estático ou momento de primeira ordem em relação ao eixo z , b é a largura do painel e I_z é o momento de inércia ou momento de segunda ordem em relação ao eixo z . A força cortante pode ser expressa em função de outros termos conforme a Equação (33).

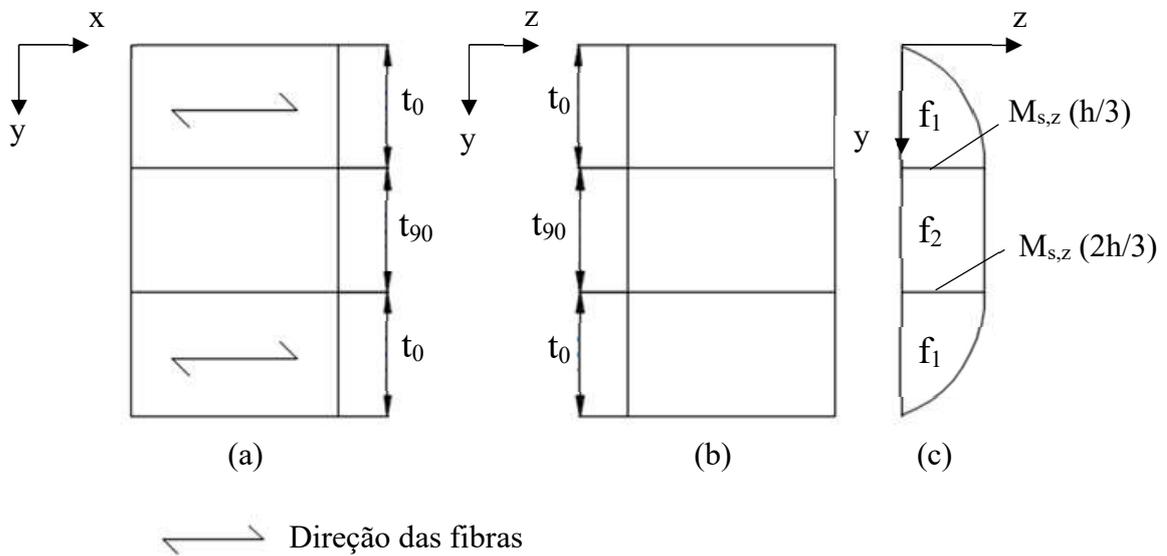
$$V = \int_A \tau \cdot dA \quad (33)$$

Reorganizando os termos das equações (32) e (33) tem-se:

$$V = \frac{V}{b \cdot I_z} \int_A M_{s,z} \cdot dA \quad (34)$$

A distribuição do momento estático ao longo das seções do painel é parabólica nas camadas longitudinais e aproximadamente constante na camada transversal, conforme ilustrado na Figura 114c, em que o painel tem espessura total h e espessura das camadas longitudinais é igual a t_0 e espessura das camadas transversais é igual a t_{90} .

Figura 114-Parâmetros de cálculo (a) Seção Longitudinal (b) Seção Transversal e (c) Distribuição do Momento Estático



Fonte: A Autora

Para $y=0$:

$$M_{s,z}(0) = 0 \quad (35)$$

Para $y=h/6$:

$$M_{s,z}\left(\frac{h}{6}\right) = \frac{5 \cdot b \cdot h^2}{72} \quad (36)$$

Para $y=h/3$:

$$M_{s,z} \left(\frac{h}{3} \right) = \frac{b \cdot h^2}{9} \quad (37)$$

Como a função do momento estático, no trecho das camadas transversais, é parabólica, ela pode ser descrita conforme a Equação (38).

$$M_{s,z}(y) = \alpha \cdot y^2 + \beta \cdot y + \varphi \quad (38)$$

Para $y = 0$, tem-se que o momento estático é nulo, igualando-se as Equação (35) e a Equação (38):

$$M_{s,z}(0) = 0 \rightarrow \varphi = 0 \quad (39)$$

Igualando-se as Equação (36) e Equação (38) tem-se:

$$M_{s,z} \left(\frac{h}{6} \right) = \frac{5 \cdot b \cdot h^2}{72} \rightarrow \frac{5 \cdot b \cdot h^2}{72} = \alpha \frac{h^2}{36} + \beta \frac{h}{6} \quad (40)$$

Igualando-se as Equação (37) e a Equação (38):

$$M_{s,z} \left(\frac{h}{3} \right) = \frac{b \cdot h^2}{9} \rightarrow \frac{b \cdot h^2}{9} = \alpha \frac{h^2}{9} + \beta \frac{h}{3} \quad (41)$$

Resolvendo-se o sistema de Equações formado pela Equação (40) e pela Equação (41), determina-se o valor dos coeficientes da equação.

$$\alpha = \frac{-b}{2} \quad (42)$$

$$\beta = \frac{b \cdot h}{2} \quad (43)$$

Dessa forma, a função do momento estático no trecho das camadas longitudinais fica igual a Equação (44).

$$M_{s,z}(y) = \frac{-b}{2} \cdot y^2 + \frac{b \cdot h}{2} \cdot y \quad (44)$$

A contribuição de cada uma das camadas foi calculada por meio do fluxo da função (f) do momento estático, conforme Equação (45).

$$f = \int_A M_{s,z}(y) \cdot dA \quad (45)$$

$$dA = b \cdot dy \quad (46)$$

Para cada camada externa do painel, o fluxo da função foi nomeado de f_1 cujo valor foi calculado pela Equação (47).

$$f_1 = \int_0^{h/3} \left(\frac{-b}{2} \cdot x^2 + \frac{b \cdot h}{2} \cdot x \right) \cdot b \cdot dy \quad (47)$$

$$f_1 = \frac{7 \cdot b^2 \cdot h^3}{324} \quad (48)$$

Para a camada central do painel, o fluxo da função do momento estático foi nomeado de f_2 cujo valor é calculado pela Equação (49):

$$f_2 = \int_{h/3}^{2h/3} \left(\frac{b \cdot h^2}{9} \right) \cdot b \cdot dy \quad (49)$$

$$f_2 = \frac{b^2 \cdot h^3}{27} \quad (50)$$

O fluxo total é dada pela soma dos fluxos de todas as camadas conforme Equação (51).

$$f = 2 \cdot f_1 + f_2 \quad (51)$$

Admitindo-se os valores encontrados para os fluxos nas Equações (48) e (50) e substituindo-se os termos na Equação (51), têm-se:

$$f = \frac{26 \cdot b^2 \cdot h^3}{324} \quad (52)$$

A contribuição das camadas longitudinais e da camada transversal são dadas pelas Equações (53) e (54), respectivamente.

$$\frac{2 \cdot f_1}{f} = 2 \cdot \frac{7 \cdot b^2 \cdot h^3}{324} \cdot \frac{324}{26 \cdot b^2 \cdot h^3} = 0,54 \quad (53)$$

$$\frac{f_2}{f} = \frac{b^2 \cdot h^3}{27} \cdot \frac{324}{26 \cdot b^2 \cdot h^3} = 0,46 \quad (54)$$

Dessa forma, a rigidez ao cisalhamento do painel, pode-se ser dada pela somatória das rigidezes ao cisalhamento das camadas, conforme Equação (55).

$$(GA)_{MLCC} = \kappa \cdot \sum_{i=1}^3 G_i \cdot A_i = \kappa \cdot b \cdot t_{cam} \cdot (1,62 \cdot G + 1,38 \cdot G_{vt}) \quad (55)$$

Em que $(GA)_{MLCC}$ é a rigidez ao cisalhamento do painel de MLCC, κ é o fator de cisalhamento e igual a 0,25, b é a largura do painel, t_{cam} é a espessura da camada do painel de MLCC e igual a t_0 e t_{90} , G é o módulo de elasticidade transversal da madeira e G_{vt} é o módulo de elasticidade transversal *rolling shear*.

3.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA BASEADA NO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A simulação numérica foi feita por meio de modelos computacionais com base no método dos elementos finitos, utilizando-se o *software* ABAQUS. Os modelos numéricos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a distribuição das tensões das amostras, estudadas experimentalmente, quando submetidos aos ensaios de cisalhamento e de flexão. Para os ensaios de cisalhamento foram construídos nove modelos numéricos, sendo um modelo na fase exploratória e oito na etapa definitiva. Na fase exploratória, foi realizado o modelo correspondente ao ensaio de cisalhamento inclinado em corpos de prova formado apenas por camada transversal, e na fase definitiva foram feitos dois modelos para cada espécie (Marupá e Piquiá) e um modelo por espessura de camada (25 e 38 mm), resultando em quatro modelos para cada tipo de ensaio (reto ou inclinado). No caso do ensaio de flexão, foram construídos quatro modelos numéricos, os quais corresponderam aos elementos de ambas as larguras (110 mm e 330 mm) e de ambas as espécies (Marupá e Piquiá). Para todos os casos de ensaio foi escolhido um corpo de prova de cada tipo para ser simulado.

A simulação numérica dos ensaios por meio de modelo elástico-linear, utilizando-se elementos sólidos e tridimensionais do tipo C3D8R. Para a simulação dos ensaios de cisalhamento inclinado, devido a geometria do corpo de prova, estes foram divididos em três partes (elementos sólidos). Para a simulação do ensaio de cisalhamento reto, eles foram divididos em dois sólidos apenas, sendo um referente às camadas externas e o outro às camadas internas. Para os ensaios de flexão, simulou-se a camada única, sem separá-las em lamelas. Dessa forma, foram divididos em dois sólidos, sendo um referente às camadas transversais e o outro às camadas longitudinais. Para todos os casos, a orientação das fibras foi simulada pela alternância dos eixos locais, em que os eixos globais, longitudinal (L), radial (R) e transversal (T) da madeira correspondem aos eixos locais um dois e três do modelo.

As propriedades elásticas da madeira foram obtidas por meio de caracterização prévia, sendo que foram usados dois módulos de elasticidade longitudinal paralelo às fibras, o E_{c0} na simulação dos ensaios de cisalhamento e o E_0 na simulação dos ensaios de flexão. O módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) foi adotado igual a 1/20 do paralelo às fibras, sendo igual a E_{c0} ou E_0 , dependendo do ensaio, e o módulo de elasticidade transversal da madeira (G) foi adotado igual a 1/16 do paralelo às fibras (E_{c0} ou E_0) conforme especificado pela ABNT NBR 7190-1:2022. O módulo de elasticidade transversal no plano radial-tangencial (G_{23}) foi usado para calibrar as curvas numéricas de força aplicada por

deslocamento relativo entre as camadas externas, sendo que a estimativa inicial foi igual ao valor obtido experimental. O coeficiente de Poisson no plano radial tangencial (RT) cujo valor estimado foi de 0,52, para o Marupá, foi obtido no ensaio de compressão perpendicular às fibras, conforme ilustrado na Figura 115, em que foram colados extensômetros nas direções de interesse, em ambos os lados do corpo de prova.

Figura 115-Ensaio para determinação do coeficiente de Poisson no plano radial-tangencial (RT)



Fonte: A Autora

Em relação aos outros coeficientes de Poisson, nos planos longitudinal-radial (LR) e longitudinal-tangencial (LT), o valor utilizado foi igual a 0,318 para ambos os planos, de acordo com Kretschmann (2010). Para o Piquiá, os valores dos coeficientes foram adotados iguais ao do Marupá, uma vez que foi realizado um estudo prévio influência das propriedades elásticas no modelo numérico e constatou-se que ela foi mínima no caso do coeficiente de Poisson.

Os materiais foram considerados com comportamento elástico com tipo igual a constantes de engenharia. As propriedades elásticas de entrada necessárias para os modelos foram os módulos de elasticidade longitudinal, os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade transversal. No modelo foi adotada a isotropia transversal para as direções radial (R) e tangencial (T), uma vez que as propriedades nessas direções são próximas. Os módulos de elasticidade longitudinal são adotados no programa em função das direções do eixo local e, dessa forma adotou-se o módulo de elasticidade longitudinal da direção um (E_1), que

correspondeu ao módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras adotado é igual a E_{c0} para os ensaios de cisalhamento e igual a E_0 para os ensaios de flexão, o módulo de elasticidade longitudinal da direção dois (E_2) e da direção três (E_3), os quais foram adotados com o mesmo valor e iguais ao módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras às fibras ($E_{c90,med}$). Os módulos de elasticidade transversal foram nomeados de acordo com os planos principais dos eixos locais. Assim, adotou-se os módulos de elasticidade transversal no plano um-dois (G_{12}) e no plano um-três (G_{13}), que foram adotados com o mesmo valor e iguais ao módulo de elasticidade transversal da madeira (G), e o módulo de elasticidade transversal no plano dois-três (G_{23}), que corresponde ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Os coeficientes de Poisson foram nomeados conforme a resistência dos materiais e foi definido em função dos eixos um-dois (ν_{12}) e em função dos eixos um-três (ν_{13}), e em função dos eixos dois-três (ν_{23}). As propriedades elásticas usadas como dados de entrada dos modelos de ensaio de cisalhamento reto e inclinado são apresentadas na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente, sendo que as espécies indicadas foram usadas em corpos de prova diferentes.

Tabela 7-Propriedades elásticas utilizadas no modelo numérico dos ensaios de cisalhamento reto

Espécie	$E_L=E_{c0}$ E_1 (MPa)	$E_T=E_R=E_{c90,med}$ $E_2=E_3$ (MPa)	$G_{LR}=G_{LT}=G$ $G_{12}=G_{13}$ (MPa)	$\nu_{LR}=\nu_{LR}$ $\nu_{21}=\nu_{31}$	ν_{RT} ν_{23}
Marupá	9818	491	614	0,318	0,52
Piquiá	111990	600	749	0,318	0,52

Fonte: A Autora

Tabela 8-Propriedades elásticas utilizadas no modelo numérico dos ensaios de cisalhamento inclinado em corpos de prova com camada transversal formada por múltiplas lamelas

Espécie	$E_L=E_{c0}$ E_1 (MPa)	$E_T=E_R=E_{c90,med}$ $E_2=E_3$ (MPa)	$G_{LR}=G_{LT}=G$ $G_{12}=G_{13}$ (MPa)	$\nu_{LR}=\nu_{LT}$ $\nu_{12}=\nu_{13}$	ν_{RT} ν_{23}
Marupá	9350	468	585	0,318	0,52
Piquiá	11990	600	749	0,318	0,52

Fonte: A Autora

No ensaio de cisalhamento reto, o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_{c0}) foi determinado pelo ensaio experimental de compressão paralela às fibras em corpos de prova isentos de defeitos retirados da peça 5, do Marupá, e da peça 1, do Piquiá. Para o ensaio

de cisalhamento inclinado, o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_{c0}) corresponde aos retirados da peça 4, do Marupá, e da peça 1, do Piquiá.

Para a simulação do ensaio de flexão, as propriedades elásticas foram definidas em função do módulo de elasticidade longitudinal (E_0). De acordo com a disposição camadas (longitudinais ou transversais), foi adotado o valor médio dos módulos das lamelas que a constituíam. Dessa forma, para os com largura de 330 mm, foi adotado o valor médio do módulo de seis lamelas, para as camadas longitudinais, e o valor médio de três lamelas, para a camada transversal. No caso dos com largura de 110 mm, nas camadas longitudinais, foi adotado o valor médio de duas lamelas, sendo um referente a camada superior e a outra referente camada inferior do corpo de prova. Para a camada transversal, foi adotado o valor médio dos módulos das três lamelas que a formavam. O módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras das lamelas obtido nos ensaios de flexão (E_0), para cada uma das lamelas, podem ser consultados na Tabela A.11 e na Tabela A.12, para o Marupá e o Piquiá, respectivamente. As lamelas que constituíam as camadas transversais e longitudinais, de cada um dos elementos, são listadas na Tabela 9.

Tabela 9-Lamelas das camadas dos corpos de prova

Corpo de prova	Camadas	Lamelas
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	Longitudinal	708, 709, 711, 712, 714, 715
	Transversal	601, 704, 713
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	Longitudinal	702, 710
	Transversal	207, 602, 604
DF-FLEX-25-P-2-330-2	Longitudinal	201, 202, 203, 402, 403, 502
	Transversal	503, 605, 504
DF-FLEX-25-P-2-110-3	Longitudinal	201, 202
	Transversal	503, 605, 504

Fonte: A Autora

As propriedades elásticas usadas como os dados de entrada dos modelos de ensaio de flexão, para cada uma das amostras, de acordo com as camadas, são apresentadas na Tabela 10.

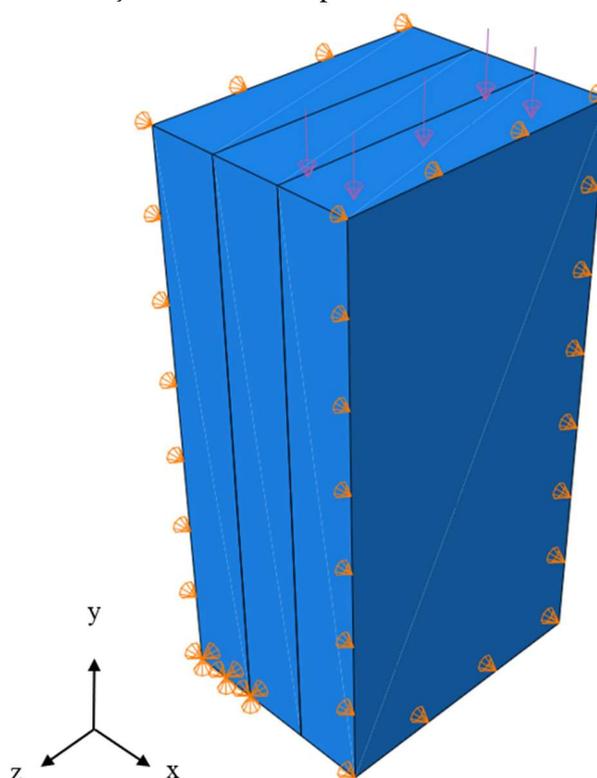
Tabela 10-Propriedades elásticas em MPa utilizadas no modelo numérico dos ensaios de flexão

Corpo de prova	Camada	$E_L=E_0$ E_1 (MPa)	$E_T=E_R=E_{c90med}$ $E_2=E_3$ (MPa)	$G_{LR}=G_{LT}=G$ $G_{12}=G_{13}$ (MPa)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	Longitudinal	11540	577	721
	Transversal	9125	456	570
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	Longitudinal	10635	532	665
	Transversal	10145	508	634
DF-FLEX-25-P-2-330-2	Longitudinal	20083	1004	1255
	Transversal	14924	746	933
DF-FLEX-25-P-2-110-3	Longitudinal	24463	1223	1529
	Transversal	14924	746	933

Fonte: A Autora

Em relação às condições de contorno, para o ensaio de cisalhamento reto, a base de uma das camadas externas foi adotada como apoiada, admitindo-se deslocamentos (u) nulos em todas as direções ($u_x = u_y = u_z = 0$). Devido ao fato de o corpo de prova precisar ser contido lateralmente, o deslocamento das faces laterais das camadas externas, na direção x do eixo global, também foi adotado como nulo também ($u_x = 0$). A força de ruptura foi aplicada por meio de pressão de superfície na face de topo da outra camada externa do corpo de prova, como ilustrado na Figura 116.

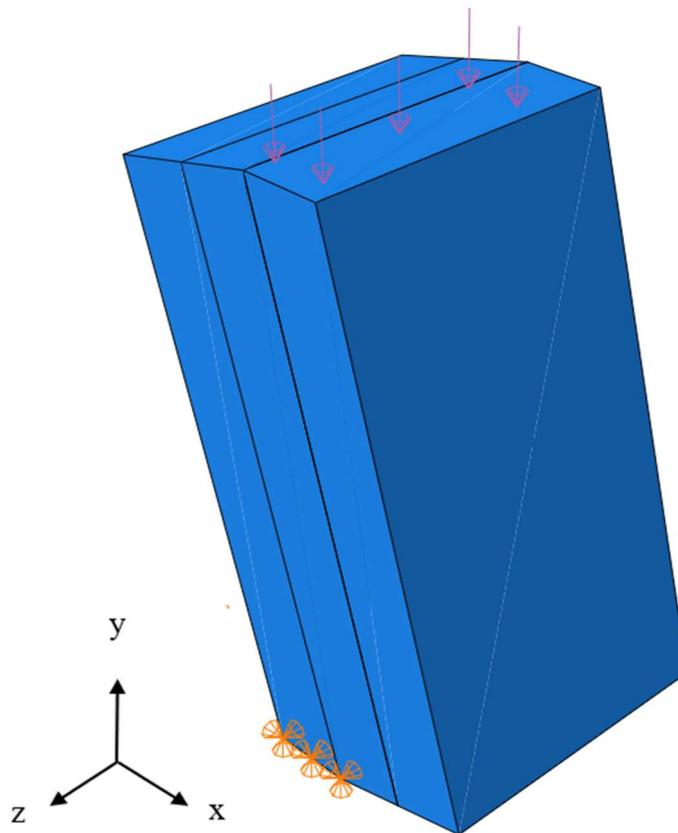
Figura 116-Condições de contorno para o ensaio de cisalhamento reto



Fonte: A Autora

Semelhantemente ao ensaio anterior, no de cisalhamento inclinado, a base de uma das camadas externas foi adotada como apoiada, admitiu-se deslocamentos nulos em todas as direções ($u_x = u_y = u_z = 0$) e a força de ruptura de ensaio foi aplicada por meio de pressão de superfície na face de topo da outra camada externa do corpo de prova, como ilustrado na Figura 117.

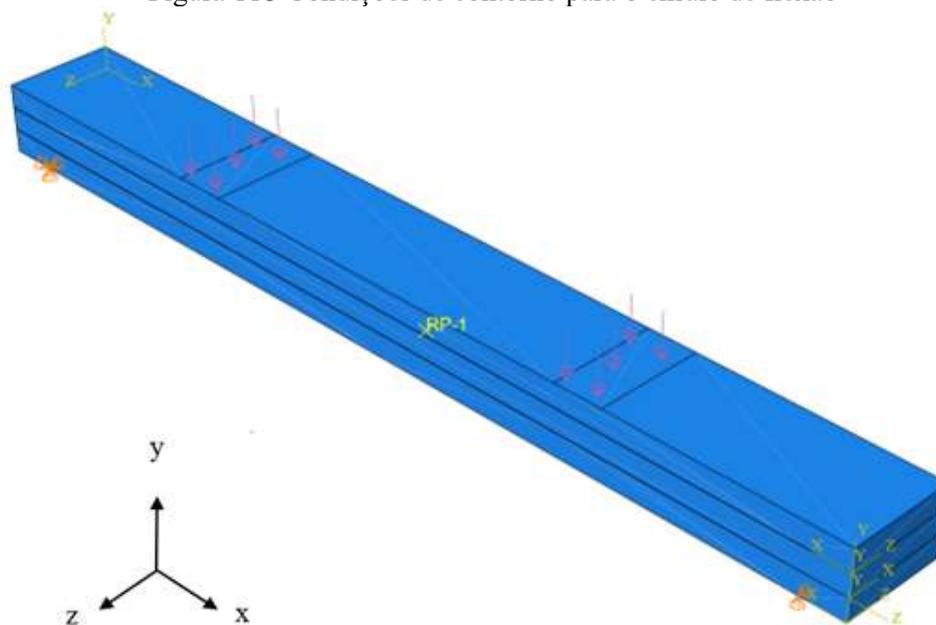
Figura 117-Condições de contorno adotada no modelo do ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

Na simulação dos ensaios de flexão, os corpos de prova foram adotados como bi apoiado, sendo que um dos apoios foi fixo, admitindo-se os deslocamentos nulos em todas as direções ($u_x = u_y = u_z = 0$), e o outro apoio foi adotado como móvel, admitindo-se os deslocamentos nulos nas direções y e z globais ($u_y = u_z = 0$) conforme ilustrado na Figura 118. Além disso, um ponto de referência (RP) foi colocado na mesma posição do transdutor, localizado no meio do vão flexão, sendo que a interação entre a superfície e o ponto de referência foi considerada como rígida. A força de ruptura foi aplicada, por meio de pressão de superfície, sobre uma área com dimensões de 5 mm x 110 mm ou 5 mm x 330 mm.

Figura 118-Condições de contorno para o ensaio de flexão



Fonte: A Autora

A interação entre a superfície de contato das camadas foi adotada como rígida e a malha dos elementos sólidos foi igual a 5 mm, para todos os modelos. A calibração dos modelos numéricos foi feita a partir das curvas numéricas força aplicada x deslocamento relativo em comparação a curva de resposta obtidas nos ensaios experimentais dos corpos de prova. Como dado de entrada dos modelos, numa estimativa inicial, foi usado o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), posteriormente, os valores de G_{23} foram alterados até a aproximação da curva numérica e da curva experimental.

3.5 VERIFICAÇÃO ANALÍTICA DOS MODELOS DE CÁLCULO

A estimativa das rigidezes efetivas a flexão e ao cisalhamento dos painéis de MLCC estudados na etapa experimental foi feita por análise analítica, a partir dos resultados obtidos na fase experimental, utilizando-se o método de Analogia do Cisalhamento e Gama. Tais métodos foram escolhidos devido ao fato de serem mais confiáveis, considerarem a distorção a cisalhamento e obter valores mais próximos dos valores experimentais, conforme citado por Gong *et al.* (2019) e He *et al.* (2020).

Para o cálculo das rigidezes, a largura foi adotada igual a 330 mm ou 115 mm, dependendo do tipo do corpo de prova. A espessura da camada e a distância entre o centro geométrico da camada até o centro geométrico do painel foi adotado igual 25 mm. Em relação às propriedades elásticas, o módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0) foi admitido como a média dos módulos das peças de madeira que constituíram as camadas longitudinais inferiores e superiores, enquanto, o módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c90,med}$) foi adotado como a média dos módulos de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0) das peças que formaram as camadas transversais dividido por 20. O módulo de elasticidade transversal da madeira (G) foi adotado igual a 1/16 do módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi admitido igual à média dos valores obtidos nos ensaios de cisalhamento e de flexão, para cada um dos corpos de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresenta os resultados experimentais, numérico e verificações analíticas dos modelos de cálculo, obtidos durante a realização da pesquisa. Primeiramente apresenta-se a média dos resultados obtidos na caracterização prévia. Após isso, são apresentados os resultados experimentais referentes aos ensaios de cisalhamento e de flexão para determinação dos valores de resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Posteriormente, são apresentados os resultados numéricos, tais como diagramas de tensões normais e de cisalhamento referentes ao plano radial-tangencial da camada central das peças, valores numéricos de resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e a comparação entre os valores numéricos e experimentais. Por fim, são colocados os resultados referentes às verificações analíticas e realizada a comparação entre os resultados experimentais e analíticos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA

Os resultados experimentais foram organizados de acordo com a espécie e a propriedade estudada, os quais são apresentados resumidamente na Tabela 11, lembrando que todos os dados são referentes à umidade padrão de 12%. Os valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação em porcentagem seguido pelo valor entre colchetes que representa o número de amostras ensaiadas.

Tabela 11-Valores médios das propriedades estudadas, U=12%.

Propriedade	Marupá	Piquiá
$\rho_{ap,med}$ (kg/m ³)	410 (5%) [26]	760 (13%) [9]
U_{med} (%)	10,90 (10%) [26]	10,60 (15%) [9]
$f_{c0,med}$ (MPa)	35,22 (10%) [21]	54,95 (21%) [6]
$E_{c0,med}$ (MPa)	8.468 (27%) [21]	14.128 (21%) [6]
$E_{0,med}$ (MPa)	10.807 (16%) [19]	17.334 (26%) [18]
$f_{v0,med}$ (MPa)	9,17 (15%) [24]	15,21 (9%) [5]
$f_{vt,med}$ (MPa)	4,92 (16%) [23]	9,00 (24%) [8]
$f_{i90,med}$ (MPa)	3,26 (21%) [19]	4,00 (26%) [5]

Fonte: A Autora

A densidade média do Marupá foi menor do que a do Piquiá, sendo de 410 kg/m³ e de 760 kg/m³, respectivamente. Conseqüentemente, todas as resistências estudadas foram maiores para Piquiá do que para o Marupá. Ao comparar as densidades obtidas com as fornecidas pela literatura, tem-se que a densidade aparente obtida para o Marupá está dentro do intervalo dado (entre 352 kg/m³ e 550 kg/m³) e a obtida para o Piquiá foi menor do que o valor fornecido (930 kg/m³).

Ao comparar os valores de resistência e rigidez do Marupá, na umidade de 12%, em relação aos fornecidos pela revisão bibliográfica, na Tabela 1, pode-se comentar que, no geral, os valores obtidos foram maiores do que os fornecidos. O módulo de elasticidade longitudinal paralelo médio obtido ($E_{c0,med}=8.468$ MPa) foi aproximadamente 17% maior do que o fornecido pela literatura ($E_{c0}=7257$ MPa). A resistência média à compressão paralela obtida ($f_{c0,med}=35,22$ MPa) foi ligeiramente superior do que a dada ($f_{c0}=33$ MPa), no entanto, dentro da mesma classe de classificação (D30). A resistência média ao cisalhamento paralelo obtida ($f_{v0,med}=9,17$ MPa) foi aproximadamente 30% acima da fornecida na literatura ($f_{c0}=7,0$ MPa). A resistência média à tração perpendicular obtida ($f_{i90,med}=3,26$ MPa) foi ligeiramente menor do que a fornecida ($f_{i90}=3,6$ MPa).

Em relação ao Piquiá, serão utilizadas para fins de comparação apenas as propriedades dadas na umidade de 15% uma vez que a alteração nas propriedades mecânicas entre as umidades de 12% e 15% é pequena. Desse modo, pode-se comentar que os valores fornecidos para a resistência média característica à compressão ($f_{c0}=86,5$ MPa) foi aproximadamente 57% maior do que a obtida nos ensaios de caracterização prévia ($f_{c0,med}=54,95$ MPa), ocasionando-

se a alteração da classificação estrutural da madeira de D50 para classe superior a D60, conforme ABNT NBR 7190-1:2022.

A resistência média ao *rolling shear* da madeira (f_{vt}) foi igual a 4,92 (16%) e 9,00 (24%), para o Marupá e Piquiá, respectivamente. Ao comparar os seus valores médios com os de outras propriedades mecânica, pode-se notar que a que mais se aproxima seria a resistência à tração perpendicular às fibras (f_{t90}), as quais foram, aproximadamente, 51% e 125% menores do que a resistência ao cisalhamento transversal (f_{vt}).

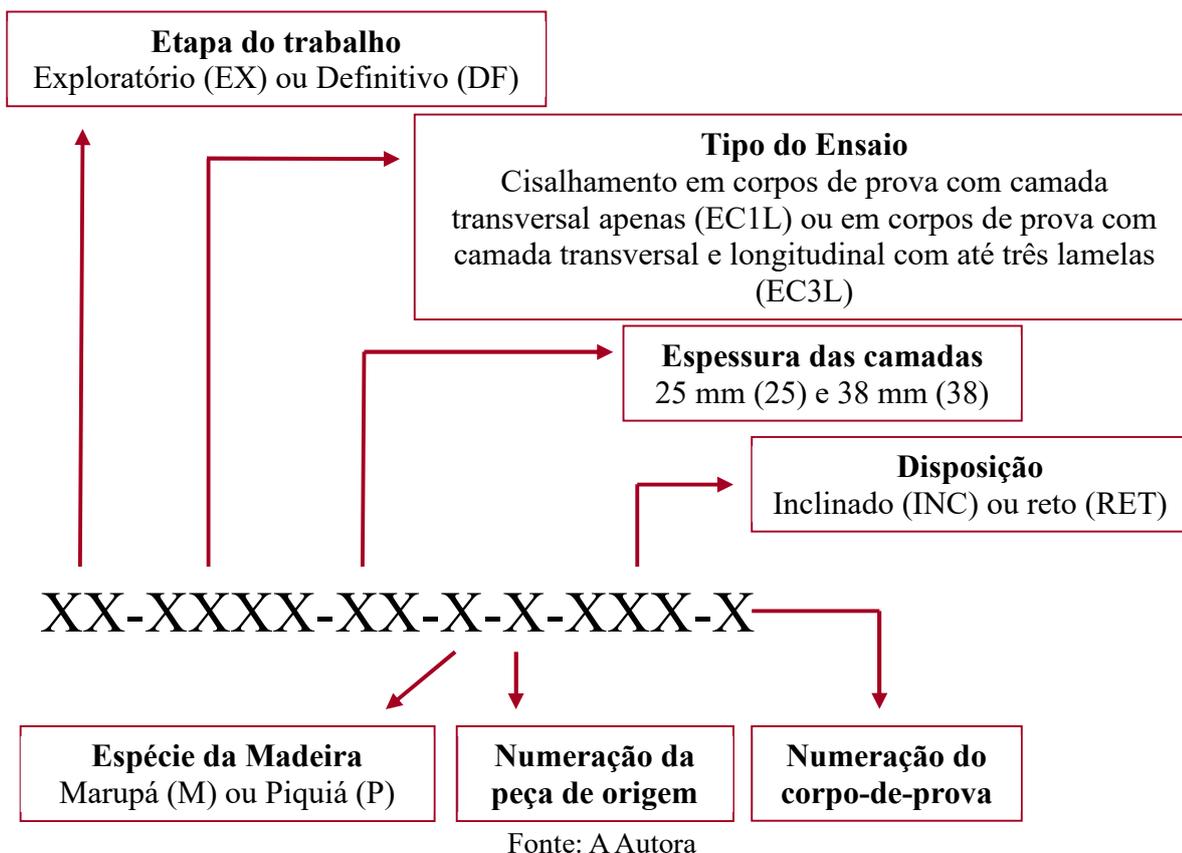
4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CISALHAMENTO

Os ensaios experimentais de cisalhamento, conforme comentado anteriormente, foram divididos nos ensaios em corpos de prova formados apenas por camada transversal e por camadas transversais e longitudinais (MLCC), os quais foram subdivididos em ensaios de cisalhamento reto e inclinado. Assim sendo, nas próximas subseções, são apresentados os resultados experimentais em função de cada tipo de ensaio.

4.2.1 Corpos de prova composto apenas por camada transversal

As amostras foram nomeadas de acordo com a etapa do trabalho, o tipo de ensaio realizado, a espécie de madeira usada e a numeração do corpo de prova, conforme explicado na Figura 119.

Figura 119-Nomenclatura adotada para os ensaios de cisalhamento



A resistência (f_{vt}), o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e o modo de ruptura são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa (Marupá)-
Etapa exploratória-Cisalhamento em lamelas, U=12%

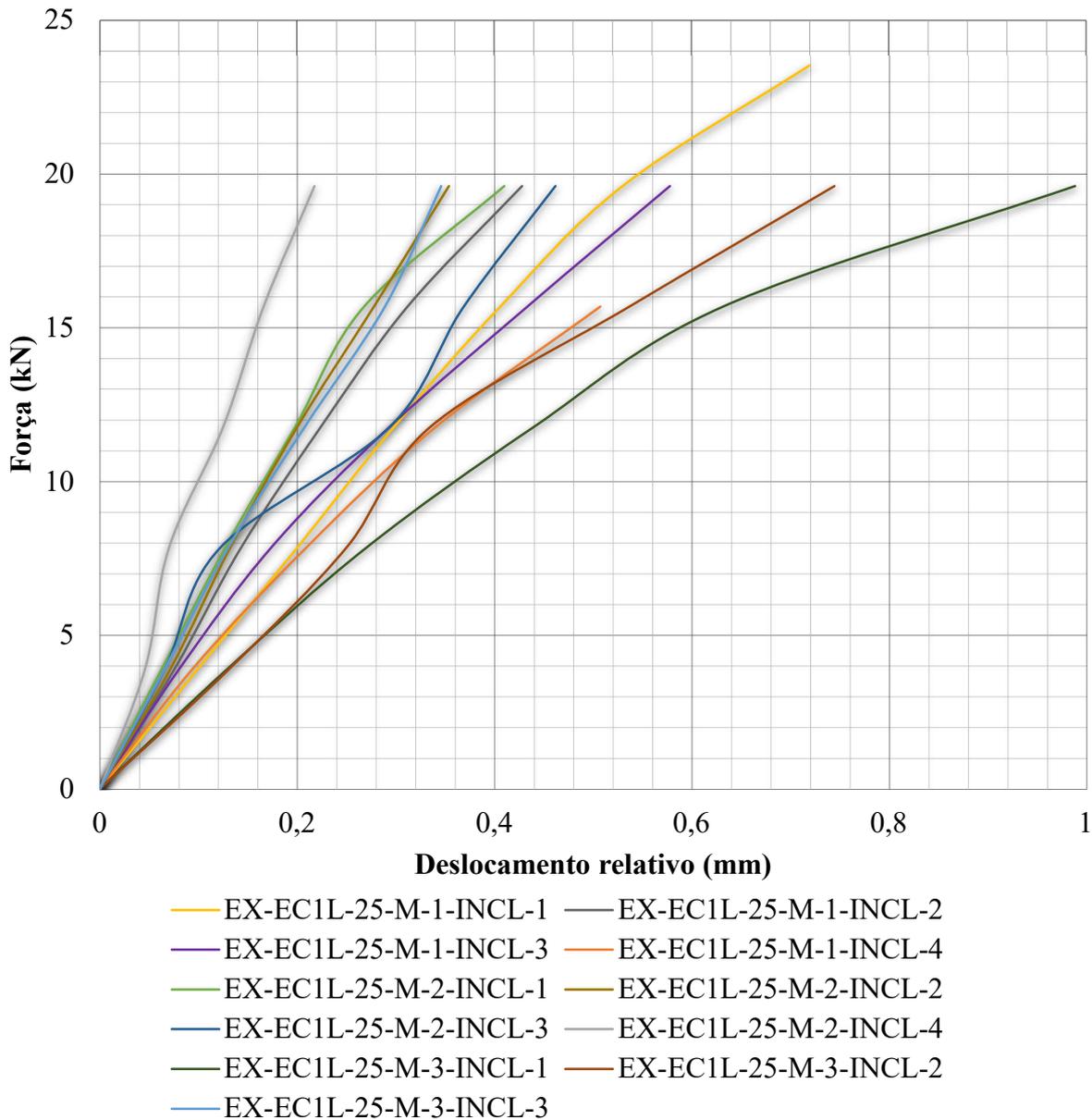
Nome	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)	Modo de ruptura
EX-EC1L-25-M-1-INCL-1	3,38	94	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-1-INCL-2	3,09	126	Separação das camadas
EX-EC1L-25-M-1-INCL-3	3,66	82	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-1-INCL-4	3,09	72	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-2-INCL-1	2,36	145	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-2-INCL-2	3,98	137	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-2-INCL-3	3,74	94	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-2-INCL-4	4,38	223	<i>Rolling shear</i>
EX-EC1L-25-M-3-INCL-1	2,83	63	Separação das camadas
EX-EC1L-25-M-3-INCL-2	2,74	89	Separação das camadas
EX-EC1L-25-M-3-INCL-3	2,78	136	<i>Rolling shear</i>
Média	3,28	115	-
Desvio Padrão	0,61	46	-
Coefficiente de variação (COV)	19%	40%	-

Fonte: A Autora

Os valores médios de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foram de 3,31 MPa, 3,61 MPa e 2,78 MPa para as peças um, dois e três, respectivamente. Em relação ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) os valores foram de 95 MPa, 150 MPa e 96 MPa para as peças um, dois e três, respectivamente. A média geral quanto à resistência (f_{vt}) e ao módulo de elasticidade *rolling shear* (G_{vt}) foram de 3,28 (19%) MPa e 115 (40%) MPa, respectivamente. Lembrando que os valores de G_{vt} foram calculados para o intervalo de forças e deslocamentos relativos entre 10% e 40%.

A maior resistência (f_{vt}) obtida foi de 4,38 MPa e a menor de 2,36 MPa, sendo que ambos os corpos de prova apresentaram ruptura por *rolling shear*. Em relação ao módulo de elasticidade transversal (G_{vt}), o maior valor foi de 223 MPa e o menor valor de 63 MPa, sendo que o corpo de prova com maior módulo apresentou ruptura por *rolling shear* e o de menor por separação das camadas ao longo da linha de cola. Dessa forma, pode-se concluir que o modo de ruptura pode afetar significativamente o módulo de elasticidade transversal *rolling shear*. Ainda, notou-se que o módulo de elasticidade transversal (G_{vt}) e a resistência (f_{vt}) não apresentaram correlação linear, uma vez que o corpo de prova com menor valor não teve o menor módulo. As curvas experimentais obtidas nos ensaios são ilustradas na Figura 120.

Figura 120-Curvas Experimentais-Marupá-Etapa Exploratória-Cisalhamento em lamelas, U=12%



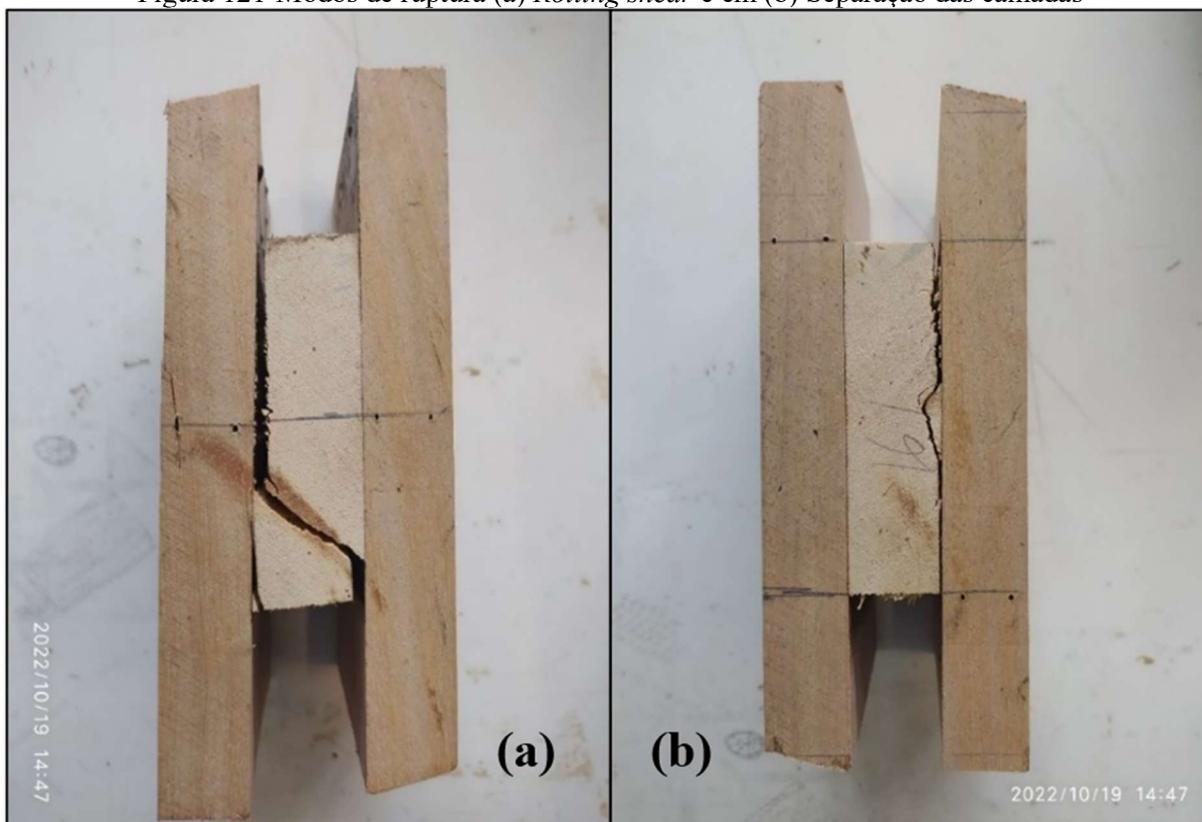
Fonte: A Autora

As curvas experimentais de força aplicada pelo deslocamento relativo entre as camadas externas tiveram inclinações próximas, sendo que, a que apresentou maior inclinação correspondeu ao corpo de prova EX-EC1L-25-M-2-INCL-4 que teve a maior resistência (f_{vt}) e com modo de ruptura por *rolling shear*.

Os corpos de prova apresentaram ruptura típica por *rolling shear*, em que foram formadas fissuras inclinadas na lamela central do corpo de prova, conforme ilustrado na

Figura 121a, e por separação das camadas ao longo da linha de cola, conforme ilustrado na

Figura 121b.

Figura 121-Modos de ruptura (a) *Rolling shear* e em (b) Separação das camadas

Fonte: A Autora

Apesar destes ensaios apresentarem resultados satisfatórios e ruptura típica por *rolling shear*, o método foi descartado para a fase definitiva devido à dificuldade em se montar os corpos de prova e de não conseguir se medir a tensão de prensagem empregada. Além disso, podem apresentar resultados diferentes do que os painéis disponíveis no mercado, uma vez que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) é afetado por diversos fatores, como por exemplo, a geometria da lamela e os parâmetros de fabricação (tensão de prensagem e tipo de adesivo). No entanto, o método de ensaio de cisalhamento em lamelas pode ser bastante útil para estimar as propriedades *rolling shear* da madeira usada como matéria prima para fabricação de painéis de MLCC.

4.2.2 Corpos de prova de MLCC

A nomenclatura dos corpos de prova foi realizada de acordo com a Figura 119. A resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos no ensaio de cisalhamento reto da fase exploratória são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa (Marupá)-
Etapa exploratória-Corpo de prova reto U=12%

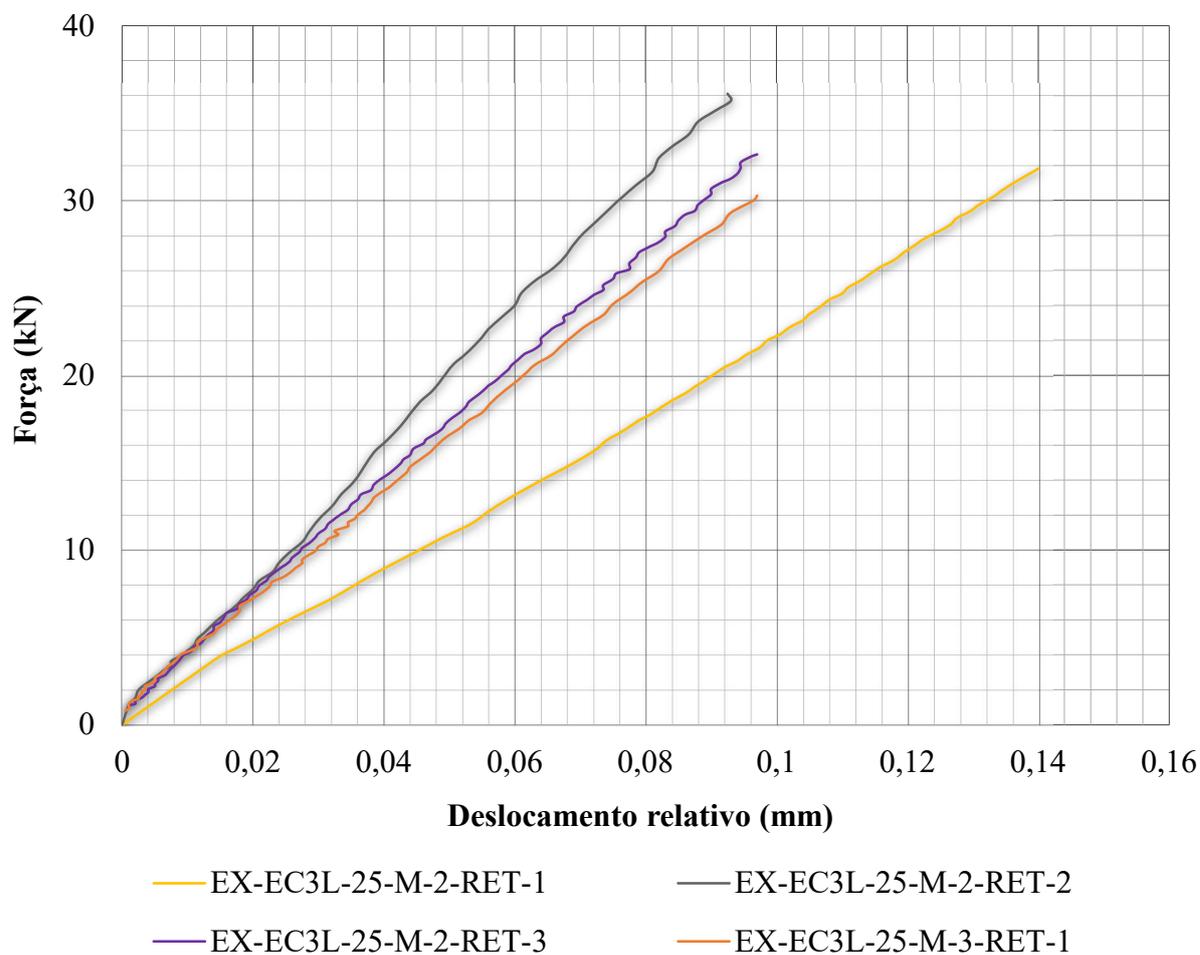
Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
EX-EC3L -25-M-2-RET-1	2,52	188
EX-EC3L -25-M-2-RET-2	2,71	330
EX-EC3L -25-M-2-RET-3	2,66	271
EX-EC3L-25-M-3-RET-1	3,16	250
Média	2,76	260
Desvio Padrão	0,28	58,64
COV	10%	23%

Fonte: A Autora

De acordo com os resultados obtidos, a maior resistência (f_{vt}) foi de 3,16 MPa, enquanto a menor foi de 2,52 MPa, sendo que o valor médio foi de 2,76 MPa (10%). Em relação ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), o maior valor foi de 330 MPa e o menor de 188 MPa e o valor médio de 260 MPa (23%). A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) obtida pelos ensaios de cisalhamento reto foi menor do que a obtida no ensaio anterior, enquanto o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi maior. Para ambas as propriedades, o coeficiente de variação foi menor para o ensaio de cisalhamento reto do que para os realizados em corpos de prova com lamela central única.

As curvas entre força e deslocamento relativo, as quais são ilustradas na Figura 122, tiveram inclinações próximas para todos os elementos, sendo que, apresentaram comportamento próximo ao linear, para o intervalo estudado. Ainda, notou-se que o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) é bastante sensível à inclinação das curvas, sendo que, para pequenas variações, ocorre um impacto significativo no módulo.

Figura 122-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa exploratória-Corpo de prova vertical, U=12%



Fonte: A Autora

Todos os corpos de prova apresentaram ruptura frágil e por *rolling shear*, conforme ilustrado na Figura 123, sendo que os itens a, b, c e d são referentes a EX-EC3L-25-M-2-RET-1, EX-EC3L-25-M-2-RET-2, EX-EC3L-25-M-2-RET-3 e EX-EC3L-25-M-3-RET-1, respectivamente.

Figura 123-Modos de ruptura (Marupá)-Etapa Exploratória-Corpo de prova vertical



Fonte: A Autora

Para a etapa definitiva, foram usadas duas espécies de madeira (Marupá e Piquiá) e duas espessuras de camadas de painéis (25 mm e 38 mm). A resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos no ensaio de cisalhamento para a espécie Marupá são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa (Marupá)-Etapa definitiva-Corpo de prova reto, $U=12\%$

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
DF-EC3L-38-M-5-RETO-1	2,82	191
DF-EC3L-38-M-5-RETO-2	2,34	180
DF-EC3L-38-M-5-RETO-3	2,62	247
DF-EC3L-38-M-5-RETO-4	2,66	189
DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	2,11	194
DF-EC3L-25-M-5-RETO-1	2,63	395
DF-EC3L-25-M-5-RETO-2	2,89	207
DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	3,15	336
DF-EC3L-25-M-5-RETO-4	2,76	506
DF-EC3L-25-M-5-RETO-5	3,25	257
DF-EC3L-25-M-5-RETO-6	3,45	189
Média	2,79	263
Desvio Padrão	0,39	106
COV	14%	41%

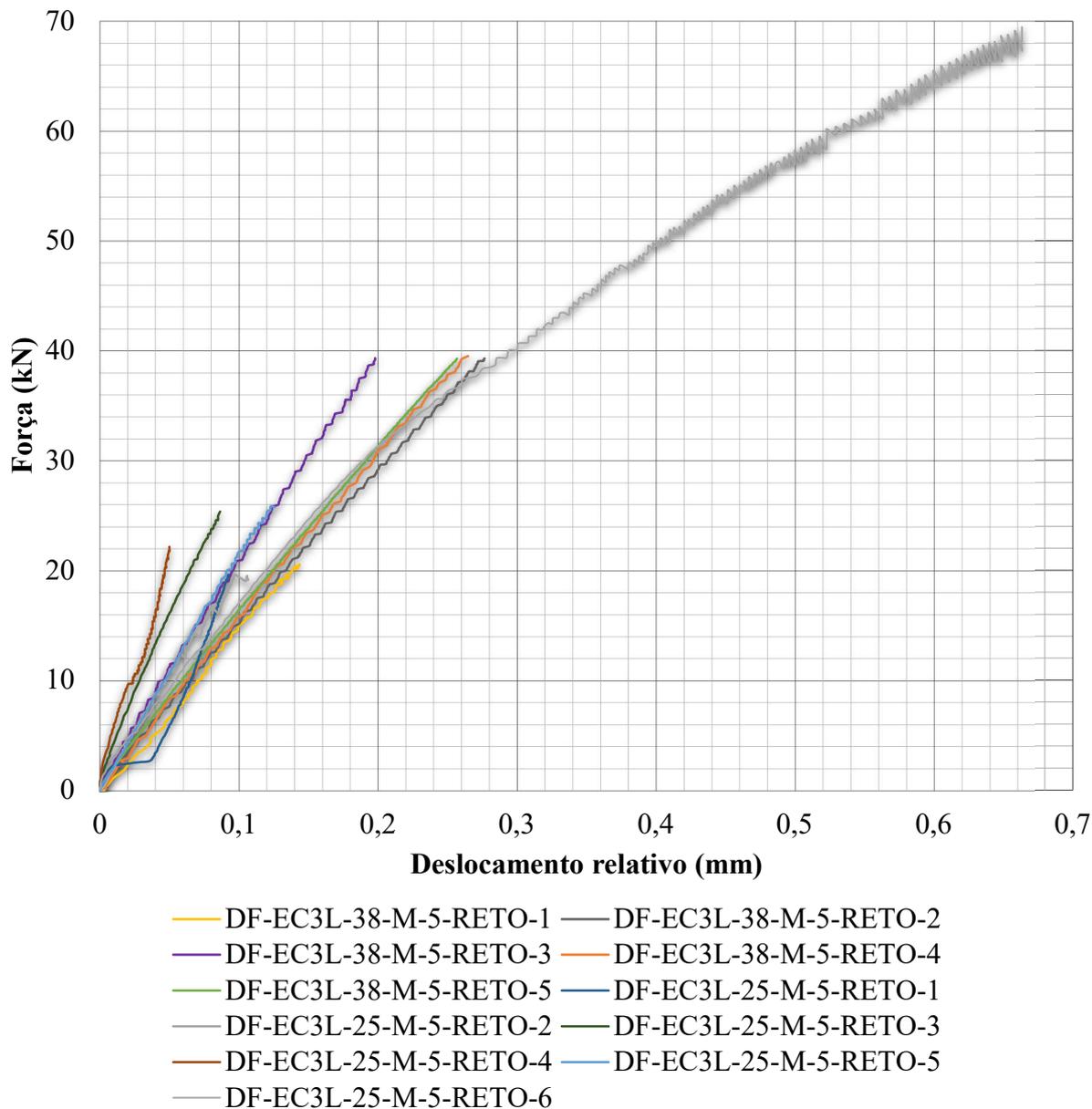
Fonte: A Autora

As resistências ao *rolling shear* (f_{vt}) obtidas nos ensaios de cisalhamento reto variaram entre 2,11 MPa e 3,45 MPa, para as amostras de Marupá. Para as peças fabricadas com 75 mm e 114 mm de espessura, os valores médios foram de 3,02 (10%) MPa e de 2,51 (11%) MPa, respectivamente, sendo que para todos os corpos de prova foi de 2,79 MPa (14%). Ao comparar os resultados da etapa exploratória e definitiva, apenas para as amostras de 25 mm, observou-se um aumento de 9%, o que pode ser justificativo devido a melhor colagem realizada.

Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) variaram entre 180 MPa e 506 MPa, sendo que para as peças de 25 mm e de 38 mm os valores médios foram de 202 (13%) MPa e 315 (39%), respectivamente, e para todos os elementos foi de 263 (41%) MPa. Pode-se observar que os coeficientes de variação para o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foram maiores do que os da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) e que quando comparados aos ensaios exploratórios, os módulos (G_{vt}) foram praticamente os mesmos. Além disso, o aumento da espessura das amostras resultou na redução da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}).

As curvas de força aplicada pelo deslocamento relativo entre as camadas externas são apresentadas na Figura 124.

Figura 124-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa definitiva-Corpo de prova vertical, U=12%



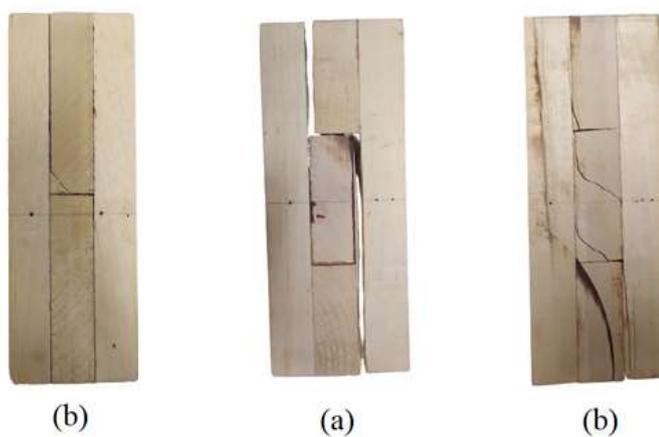
Fonte: A Autora

De acordo com a Figura 124, observou-se que as curvas tiveram comportamento linear, no geral, até aproximadamente, 50% da força média última, que foi de 66620 N. Após isso, como pode ser visto na curva do DF-EC3L-25-M-5-RETO-6, a inclinação da curva foi alterada, apresentando comportamento não-linear, fato que provavelmente ocorreria em todos os corpos de prova, caso os deslocamentos tivessem sido medidos até a ruptura. O DF-EC3L-25-M-5-RETO-1 também apresentou alteração na curva, o que pode ser justificado devido a colagem inadequada ou alguma interferência no dispositivo de medição de deslocamentos. Ainda, notou-se que a inclinação da curva foi diretamente proporcional ao módulo de elasticidade transversal

rolling shear (G_{vt}), uma vez que as curvas mais e menos inclinadas coincidiram com as amostras DF-EC3L-25-M-5-RETO-4 e DF-EC3L-38-M-5-RETO-1.

Os corpos de prova de prova com 75 mm de espessura apresentaram ruptura típica apenas por *rolling shear*, enquanto, aqueles com 114 mm de espessura tiveram ruptura por separação das camadas (a) e por *rolling shear* (b). Os modos de ruptura são ilustrados na Figura 125.

Figura 125-Modo de ruptura (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto em (a) Ruptura por separação das camadas e em (b) Ruptura por *rolling shear*.



Fonte: A Autora

A resistência (f_{vt}) e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos no ensaio de cisalhamento reto, para a espécie Piquiá, são apresentados na Tabela 15.

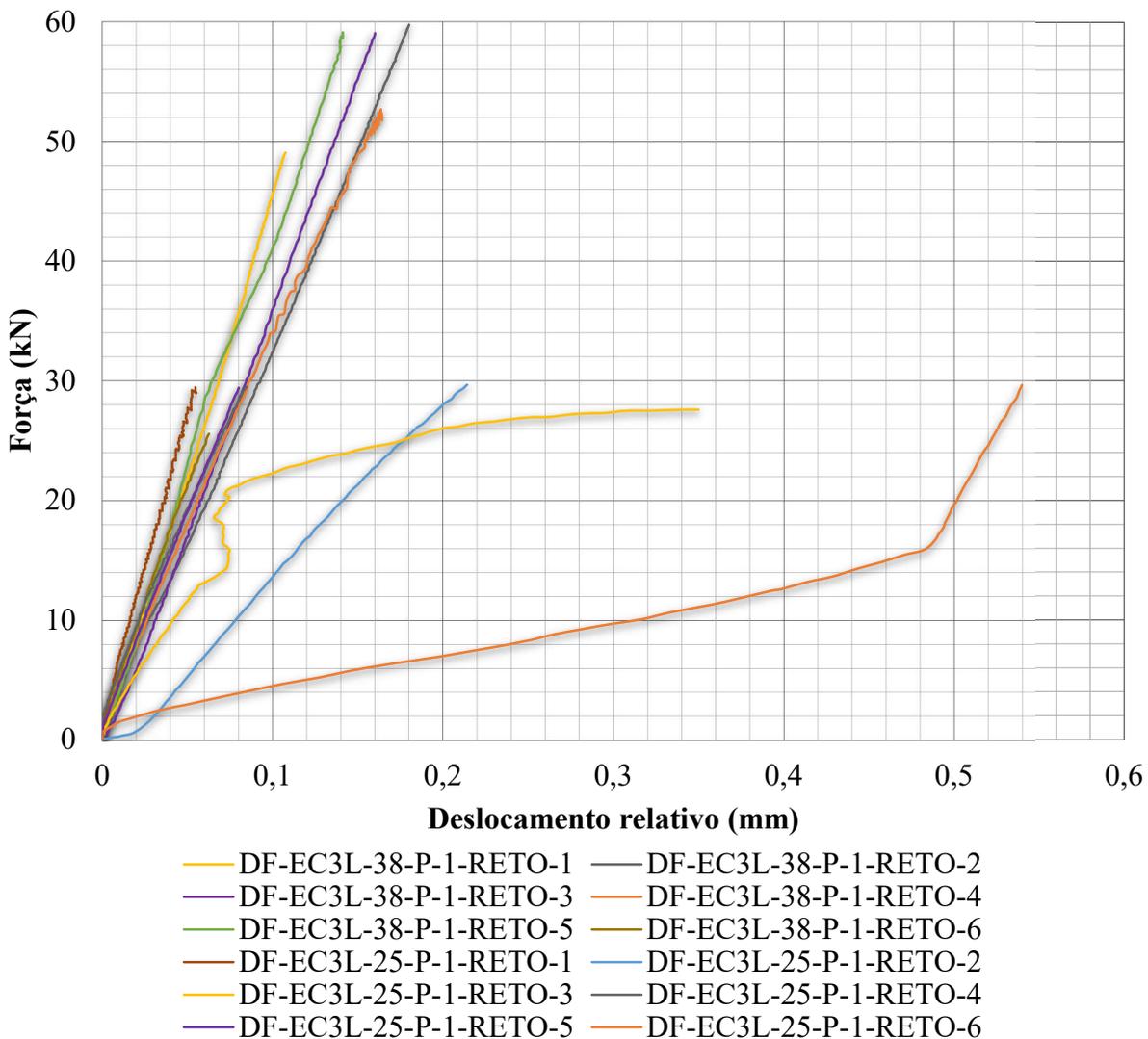
Tabela 15-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa (Piquiá)-Etapa definitiva-Corpo de prova reto, $U=12\%$

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
DF-EC3L-38-P-1-RETO-1	3,77	565
DF-EC3L-38-P-1-RETO-2	2,71	385
DF-EC3L-38-P-1-RETO-3	3,80	481
DF-EC3L-38-P-1-RETO-4	2,95	419
DF-EC3L-38-P-1-RETO-5	4,16	511
DF-EC3L-38-P-1-RETO-6	2,10	491
DF-EC3L-25-P-1-RETO-1	4,15	629
DF-EC3L-25-P-1-RETO-2	2,48	196
DF-EC3L-25-P-1-RETO-3	1,40	269
DF-EC3L-25-P-1-RETO-4	3,35	404
DF-EC3L-25-P-1-RETO-5	3,61	437
Média	3,13	435
Desvio Padrão	0,89	124
COV	28%	29%

Fonte: A Autora

Como esperado, as propriedades *rolling shear* das amostras de Piquiá foram maiores do que as do Marupá, uma vez que possuem densidades maiores do que a espécie anterior. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 1,40 MPa e 4,16 MPa, sendo que os valores médios para as amostras com camadas de 25 mm e 38 mm foram de 3,00 (36%) MPa e 3,25 (24%) MPa, respectivamente, e a média geral foi de 3,13 (28%) MPa. Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) variaram entre 196 Mpa e 629 MPa, para os painéis com camadas de 25 mm e 38 mm, as médias foram de 387 (43%) MPa e de 475 (14%) MPa, com média geral de 435 (29%) MPa. Novamente, o aumento da espessura das amostras resultou no aumento da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}).

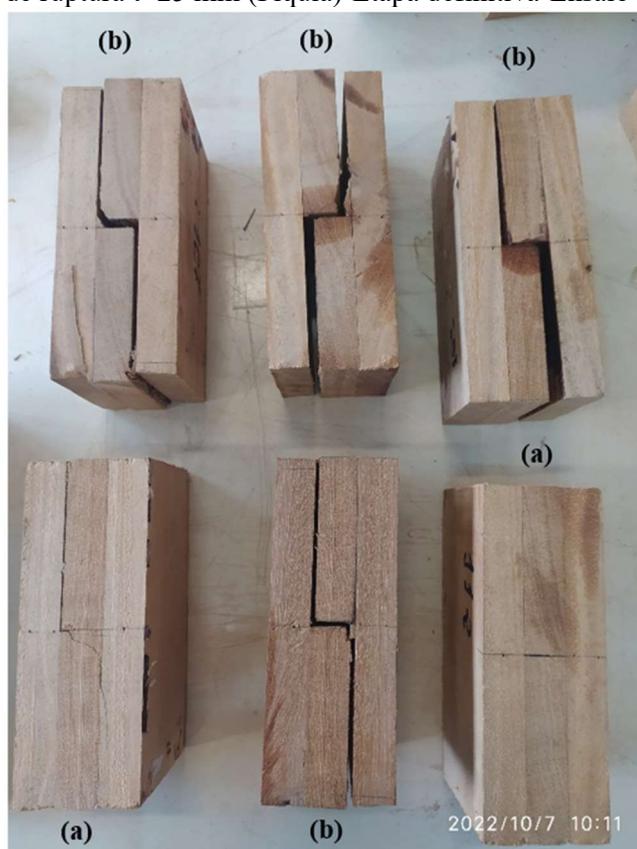
Figura 126-Curvas de força x deslocamento relativo (Piquiá)-Etapa definitiva-Corpo de prova vertical, $U=12\%$



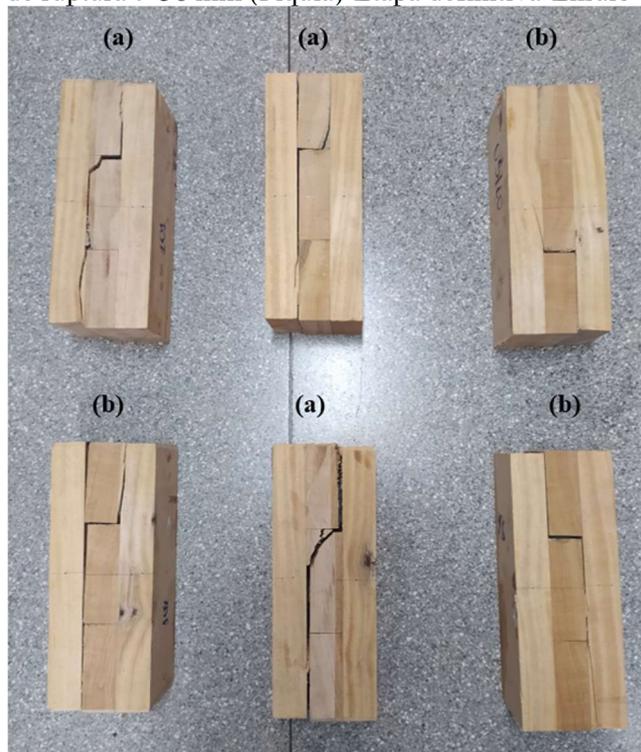
Fonte: A Autora

As curvas apresentaram comportamento linear, para o período estudado, com inclinações próximas, apenas as curvas referentes ao DF-EC3L-25-P-1-RETO-6 e ao DF-EC3L-25-P-1-RETO-3 tiveram comportamento diferente, o que pode ser justificado por algum problema na colagem ocasionando a separação precoce ente as camadas. Assim sendo, os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* tiveram pouca variabilidade. Os corpos de prova tiveram ruptura típica por *rolling shear* (representada por a) e por separação das camadas na linha de cola (representada por b), conforme ilustrado na Figura 127 e Figura 128, para as amostras com espessuras de 75 mm e 114 mm, respectivamente.

Figura 127-Modos de ruptura $t=25$ mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto



Fonte: A Autora

Figura 128-Modos de ruptura $t=38$ mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento reto

Fonte: A Autora

Além dos ensaios de cisalhamento com o corpo de prova reto, posicionado na vertical, também foram feitos ensaios com elementos inclinados, tanto na fase exploratória, quanto na fase definitiva. Os resultados desse ensaio para a fase exploratória são apresentados na Tabela 14.

Tabela 16-Resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos pelo ensaio com MLCC inclinado em MPa (Exploratória), $U=12\%$

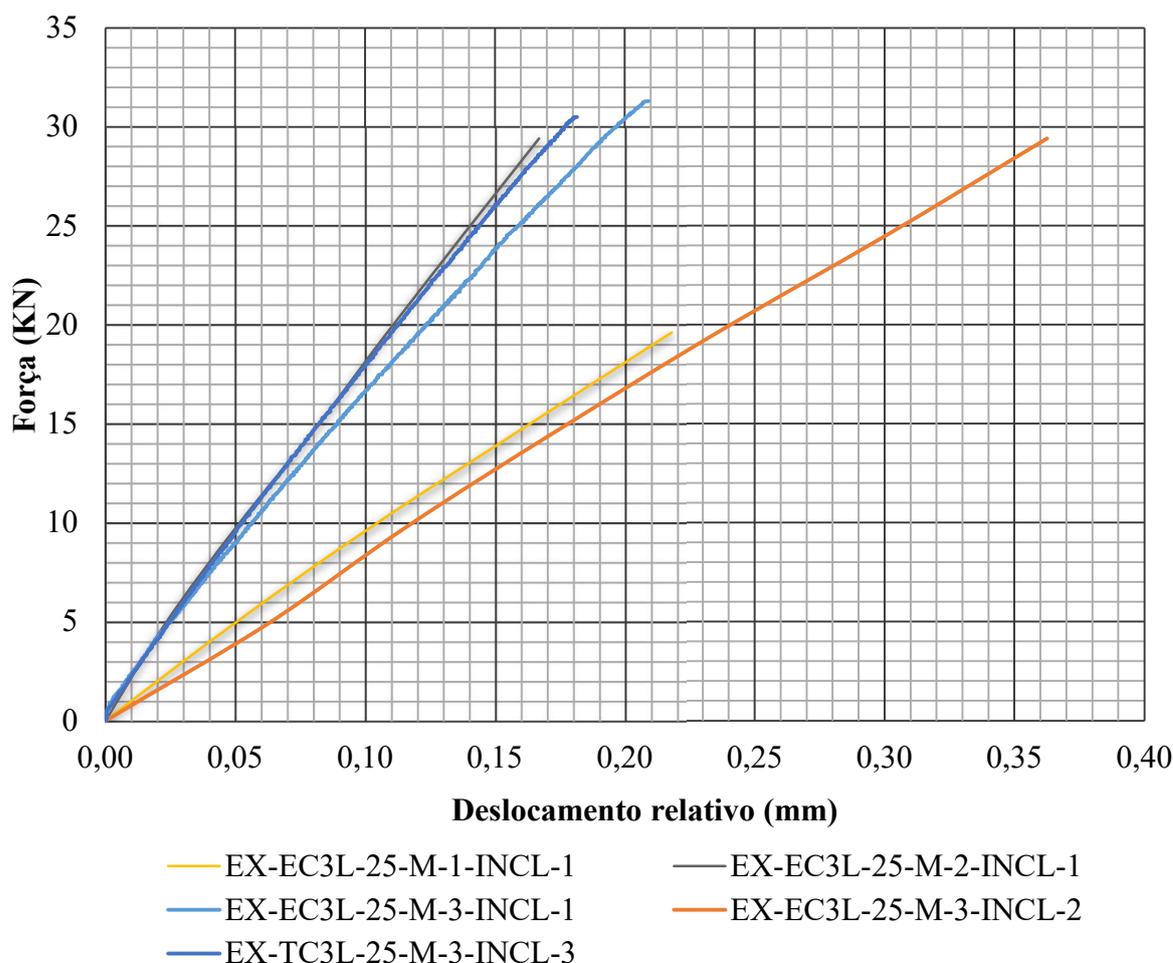
Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
EX-EC3L-25-M-1-INCL-1	2,19	103
EX-EC3L-25-M-2-INCL-1	2,69	201
EX-EC3L-25-M-3-INCL-1	2,75	179
EX-EC3L-25-M-3-INCL-2	2,56	100
EX-EC3L-25-M-3-INCL-3	2,30	200
Média	2,50	156
Desvio Padrão	0,22	46
COV	9%	30%

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 2,19 MPa e 2,75 MPa e o módulo (G_{vt}) variou entre 100 MPa e 201 MPa. Os valores médios de resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) foi de 2,50 (9%) MPa e do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi 156 (30%) MPa.

Tais resultados foram menores dos que os obtidos pelo ensaio de cisalhamento reto, em ambas as etapas. As curvas de força aplicada pelo deslocamento relativo entre as camadas externas são apresentadas na Figura 129.

Figura 129-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa exploratória-Corpo de prova inclinado, U=12%



Fonte: A Autora

As curvas tiveram comportamento linear, para o intervalo estudado e devido à grande variação nos módulos de elasticidade transversal dos corpos de prova, elas foram bastante dispersas, lembrando que as curvas mais inclinadas foram aquelas com menor módulo e as menos inclinadas foram as com maior. Os corpos de prova apresentaram dois modos diferentes de ruptura, como ilustrado na Figura 130, por separação das camadas na linha de cola (a) e por *rolling shear* (b).

Figura 130-Modos de Ruptura (Marupá)-Etapa exploratória-MLCC inclinado em (a) Ruptura por separação das camadas e (b) Ruptura por *rolling shear*



Fonte: A Autora

A resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade *rolling shear* (G_{vt}) são dados na Tabela 17, para o Marupá, na etapa definitiva.

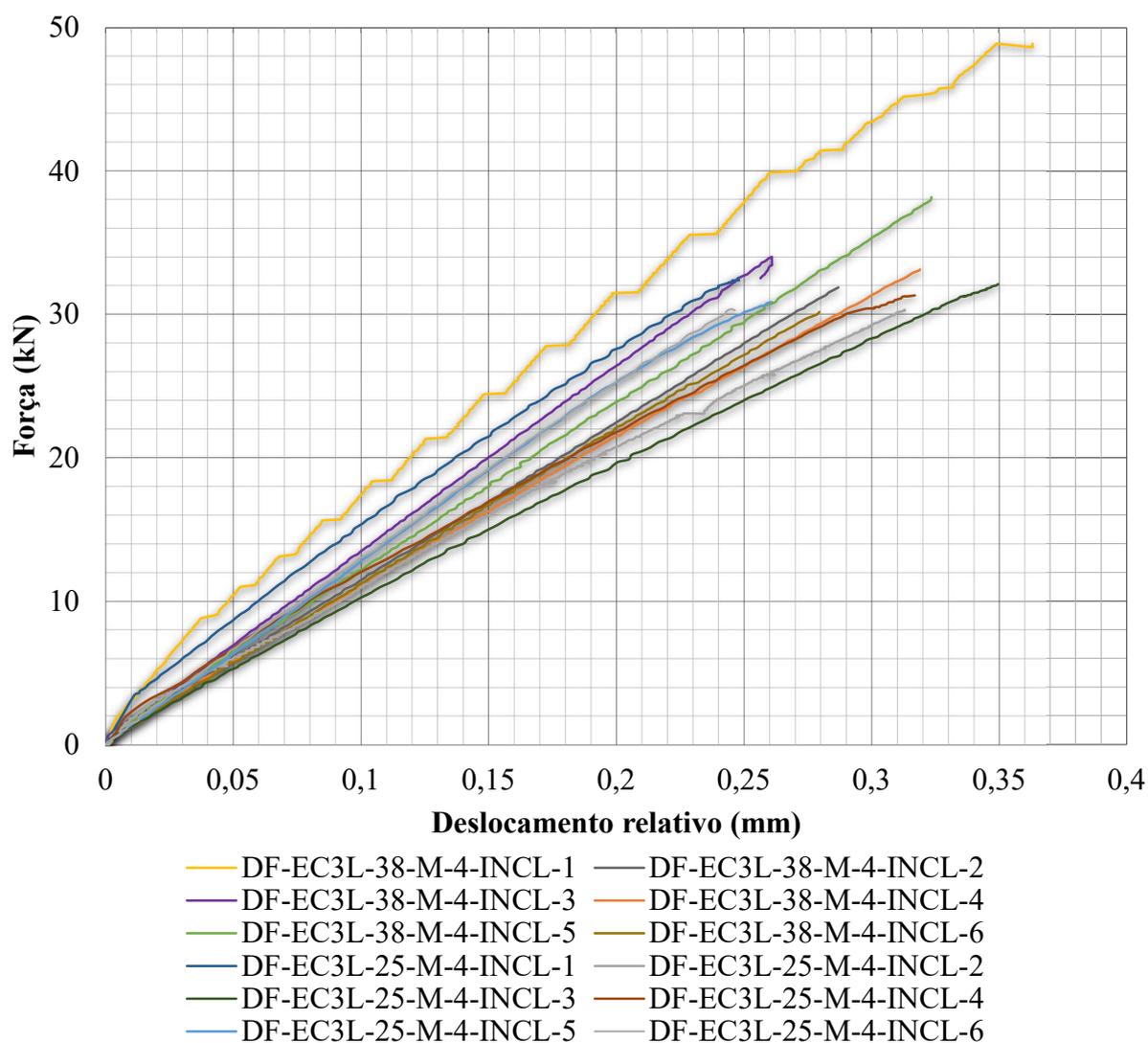
Tabela 17-Propriedades *rolling shear* em MPa (Marupá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, U=12%

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
DF-EC3L-38-M-4-INCL-1	1,93	165
DF-EC3L-38-M-4-INCL-2	1,98	129
DF-EC3L-38-M-4-INCL-3	1,54	154
DF-EC3L-38-M-4-INCL-4	1,37	126
DF-EC3L-38-M-4-INCL-5	1,75	139
DF-EC3L-38-M-4-INCL-6	1,80	127
DF-EC3L-25-M-4-INCL-1	2,77	150
DF-EC3L-25-M-4-INCL-2	1,98	120
DF-EC3L-25-M-4-INCL-3	1,88	117
DF-EC3L-25-M-4-INCL-4	1,60	130
DF-EC3L-25-M-4-INCL-5	2,36	152
DF-EC3L-25-M-4-INCL-6	2,75	147
Média	1,98	138
Desvio Padrão	0,44	15
COV	22%	11%

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 1,37 MPa e 2,77 MPa e o módulo (G_{vt}) entre 117 MPa e 165 MPa. A média das resistências para as espessuras de 25 mm e 38 mm foi de 2,22 MPa e 1,73 MPa, enquanto para as dos módulos de elasticidade transversal *rolling shear* foram de 140 MPa e 136 MPa, para as amostras com camadas de 25 mm e 38 mm, respectivamente. Considerando-se todas as amostras, os valores médios de resistência e módulo de elasticidade transversal foram de 1,98 (22%) MPa e 138 (11%) MPa, respectivamente. Tais valores foram os menores, em comparação com os ensaios de cisalhamento reto. Além disso, contrariamente aos ensaios anteriores, o aumento da espessura das amostras resultou na redução da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}). As curvas de força aplicada por deslocamento relativo entre as camadas externas são ilustradas na Figura 131.

Figura 131-Curvas de força x deslocamento relativo (Marupá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, $U=12\%$



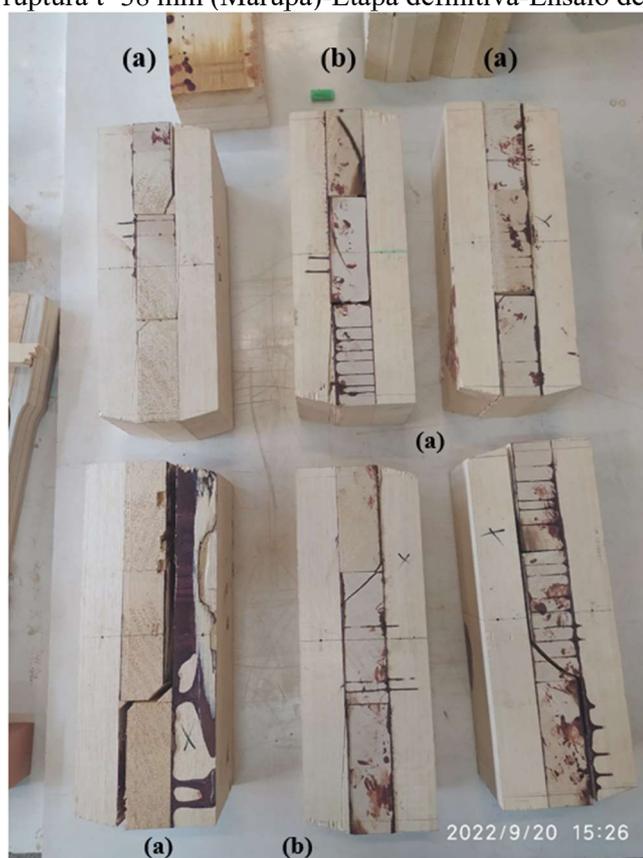
Para o intervalo estudado, as curvas apresentaram comportamento linear, com comportamento bastante próximo, sendo que alguns casos ocorreu até mesmo a sobreposição das linhas. O corpo de prova que apresentou o maior módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi o DF-EC3L-38-M-4-INCL-1, uma vez que a curva correspondeu à maior inclinação. Quanto ao modo de ruptura, para os corpos de prova com 75 mm de espessura, foi por *rolling shear*, conforme ilustrado na Figura 132, enquanto aqueles com espessura de 75 mm, ela ocorreu por *rolling shear* (a) e por separação das camadas na linha de cola (b), conforme ilustrado na Figura 133.

Figura 132-Modos de ruptura $t=25$ mm (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

Figura 133-Modos de ruptura $t=38$ mm (Marupá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

A resistência (f_{vt}) e módulo de elasticidade *rolling shear* (G_{vt}) são dados na Tabela 18, para o Piquiá, na etapa definitiva.

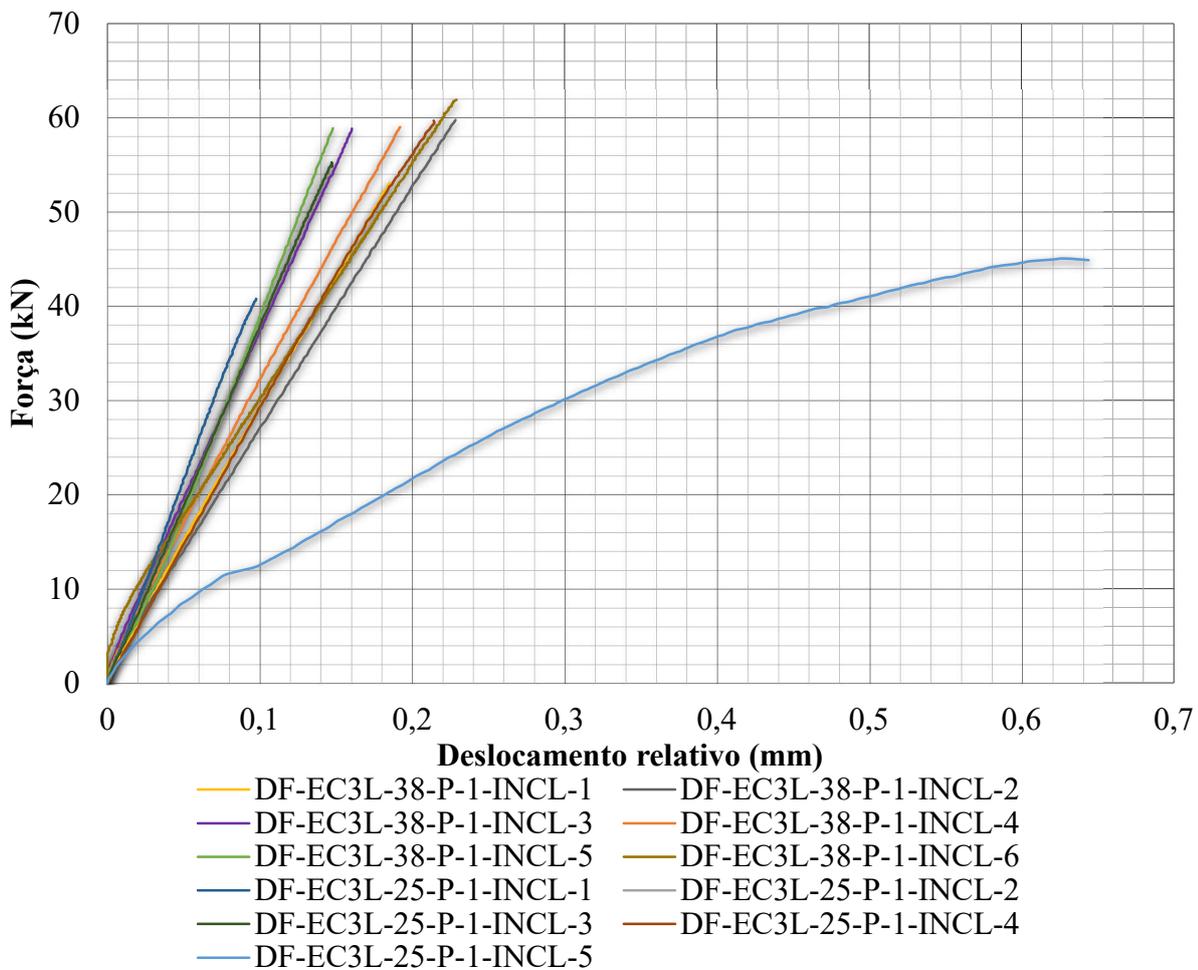
Tabela 18-Resistência e módulo de elasticidade transversal *rolling shear* em MPa (Piquiá)-MLCC inclinado, $U=12\%$

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)
DF-EC3L-38-P-1-INCL-1	3,28	332
DF-EC3L-38-P-1-INCL-2	3,54	304
DF-EC3L-38-P-1-INCL-3	4,59	424
DF-EC3L-38-P-1-INCL-4	4,87	345
DF-EC3L-38-P-1-INCL-5	5,60	513
DF-EC3L-38-P-1-INCL-6	4,07	304
DF-EC3L-25-P-1-INCL-1	3,77	532
DF-EC3L-25-P-1-INCL-2	3,60	273
DF-EC3L-25-P-1-INCL-3	3,84	461
DF-EC3L-25-P-1-INCL-4	3,90	352
DF-EC3L-25-P-1-INCL-5	2,18	117
Média	3,93	360
Desvio padrão	0,89	119
COV	23%	33%

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 2,18 MPa e 5,60 MPa e o módulo (G_{vt}) entre 117 MPa e 532 MPa. A média geral das resistências (f_{vt}) foi de 3,46 (21%) MPa e 4,32 (20%) MPa, respectivamente, enquanto para todas as amostras foi de 3,93 (23%) MPa. Neste caso, o resultado foi diferente do que o esperado, uma vez que quanto mais fina a camada do MLCC, menor foi a resistência. Em relação ao módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), para os elementos com espessura de 75 mm e 114 mm, foram de 347 (47%) MPa e 370 (22%) MPa, respectivamente, enquanto a média geral foi de 360 (33%) MPa. A resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}), quando comparada com o método de ensaio anterior, foi maior, enquanto, o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi menor. As curvas de força aplicada por deslocamento relativo entre as camadas externas são apresentadas na Figura 134.

Figura 134-Curvas de força x deslocamento relativo (Piquiá)-Etapa definitiva-MLCC inclinado, $U=12\%$

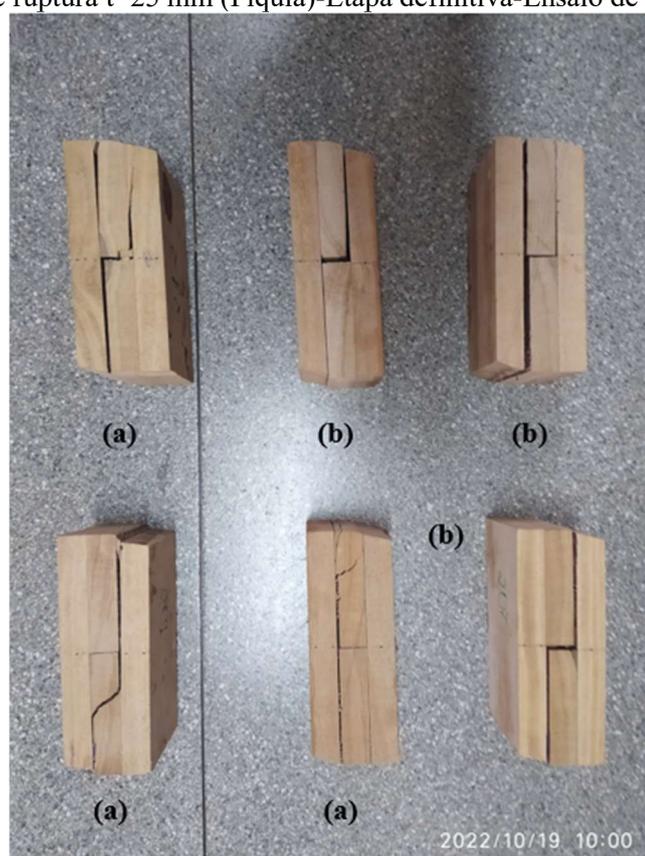


Fonte: A Autora

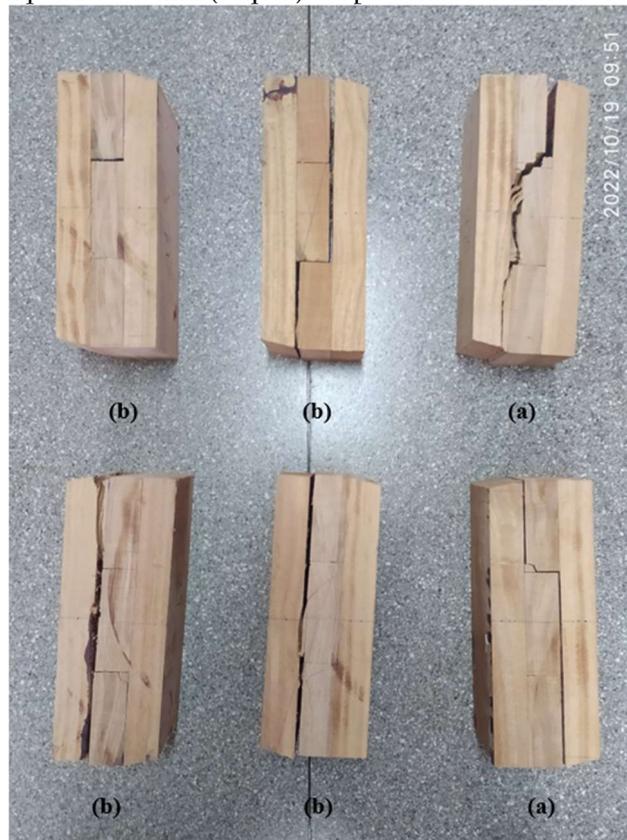
De acordo com a Figura 134, observou-se que as curvas apresentaram comportamento linear, para o intervalo estudado, e que os corpos de prova com as camadas mais grossas tiveram

maior módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Apenas a amostra DF-EC3L-25-P-1-INCL-5 apresentou comportamento diferente dos demais, sendo que provavelmente pode ter ocorrido algum problema na colagem entre as camadas da peça. Quanto ao modo de ruptura, elas ocorreram por *rolling shear* e por separação das camadas ao longo da linha de cola, conforme ilustrado na Figura 135, para os elementos com espessura de 75 mm, e na Figura 136 para os com espessura de 114 mm.

Figura 135-Modos de ruptura $t=25$ mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado



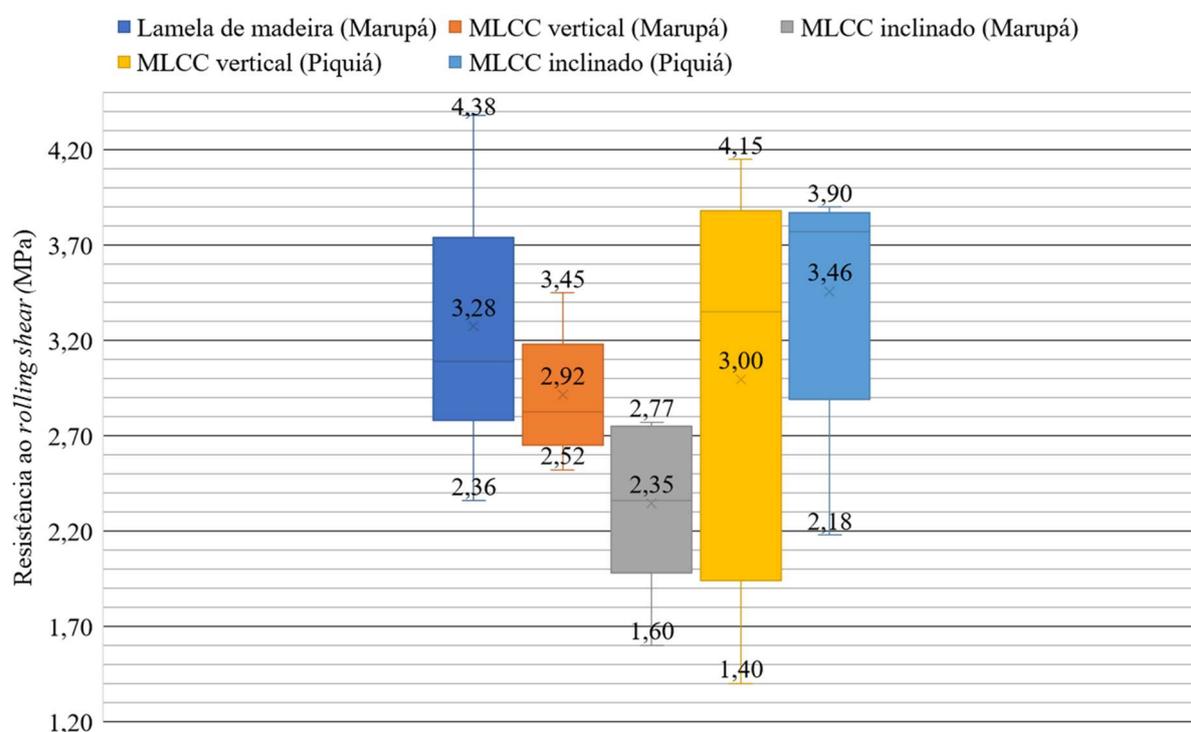
Fonte: A Autora

Figura 136-Modos de ruptura $t=38$ mm (Piquiá)-Etapa definitiva-Ensaio de cisalhamento inclinado

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) dos corpos de prova com 75 e 114 mm de espessura, para ambas as espécies, em função dos métodos de ensaio, é apresentada na Figura 137 e na Figura 138.

Figura 137-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 75 mm de espessura

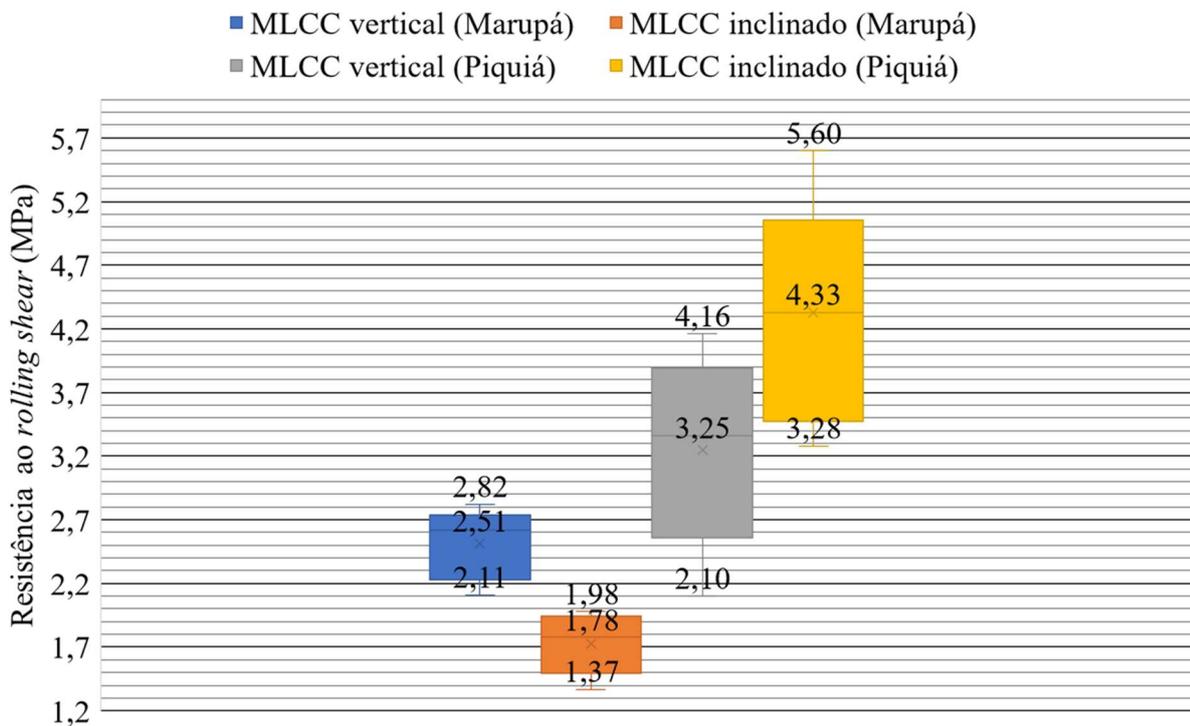


Nota: Lamela de madeira refere-se aos corpos de prova formados apenas por camada transversal

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou de acordo com o método de ensaio e a espessura das camadas da amostra. Para as amostras de Marupá com camadas de 25 mm, essa propriedade variou entre 4,38 MPa e 1,60 MPa. A maior e a menor resistência média ao *rolling shear* foi de 3,28 MPa e 2,35 MPa, as quais foram obtidas nos ensaios de cisalhamento realizado em corpos de prova com apenas camada transversal e em corpos de prova de MLCC, apresentando-se uma diferença de aproximadamente 40%. Para o Piquiá, foram realizados apenas ensaios de cisalhamento em elementos de MLCC, sendo que, a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 4,15 MPa e 1,40 MPa. O maior valor médio foi de 3,46 MPa e o menor foi de 3 MPa, para os ensaios com o corpo de prova inclinado e vertical, com diferença de 17%, sendo que os resultados com maior variabilidade foram para os ensaios de cisalhamento reto.

Figura 138-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 114 mm de espessura

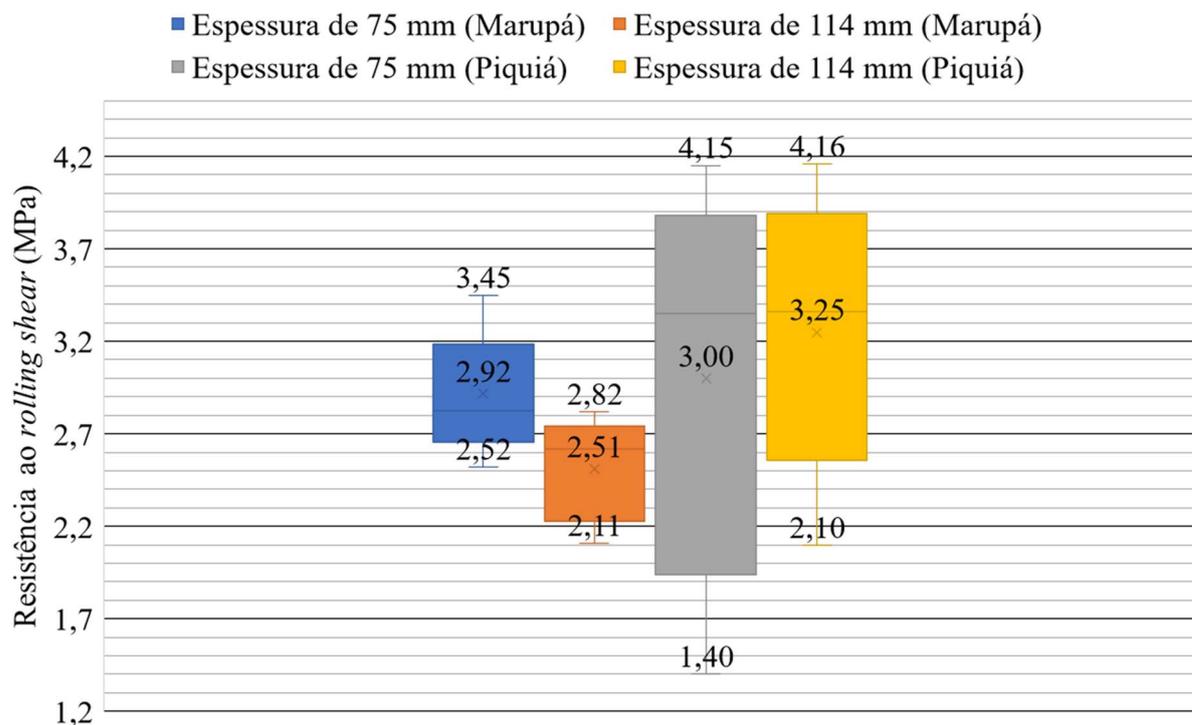


Fonte: A Autora

No caso das amostras de Marupá com camadas de 38 mm de espessura, a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) variou entre 2,82 MPa e 1,37 MPa. O maior valor foi obtido no ensaio de cisalhamento reto e igual a 2,51 MPa, enquanto o menor foi igual a 1,78 MPa, obtido no ensaio de cisalhamento inclinado, com diferença entre valores de 41%. No caso do Piquiá, a resistência (f_{vt}) variou entre 2,10 MPa e 5,60 MPa sendo que o maior valor médio obtido foi no ensaio de cisalhamento inclinado e igual a 4,33 MPa e o menor foi de 3,25 MPa obtido no ensaio de cisalhamento reto, apresentando diferença de 33%, a qual foi menor do que a apresentada pelo Marupá. Além do que, notou-se que o método de ensaio que apresentou maior variabilidade dos resultados, para o Marupá, foi o de cisalhamento reto e para o Piquiá foi o inclinado.

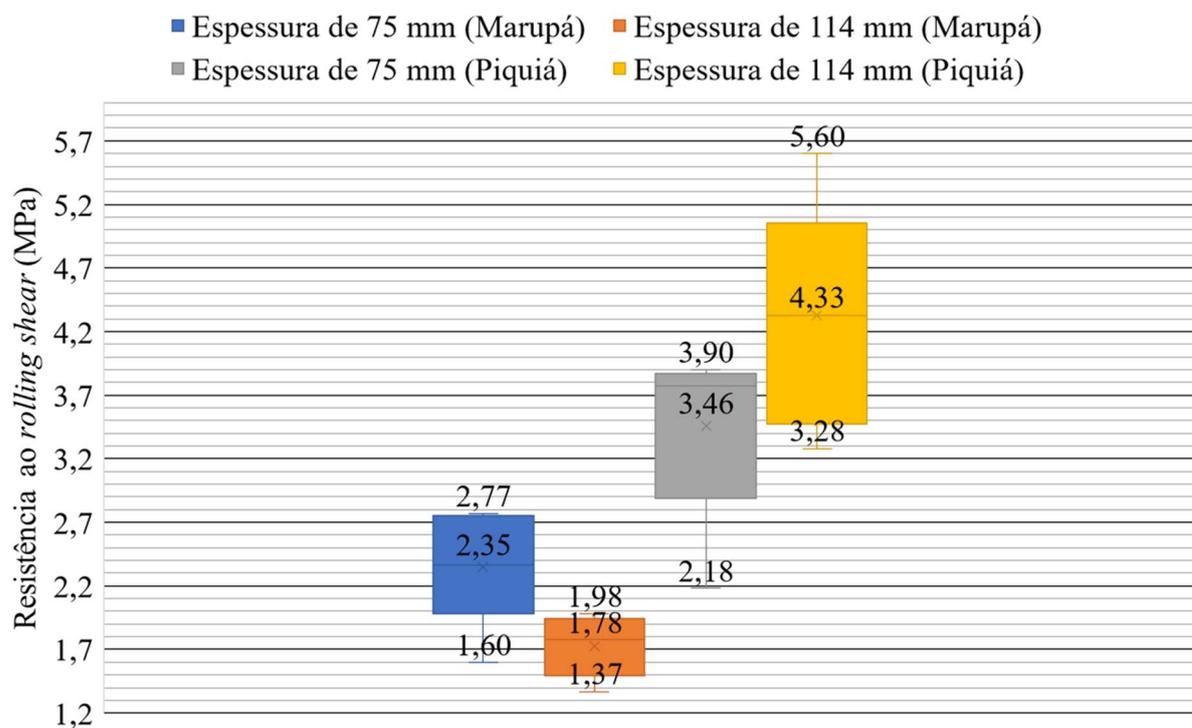
Além do método do ensaio, também foi estudada a influência da espessura das lamelas as propriedades *rolling shear*. A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), em função da espessura das lamelas, para os ensaios de cisalhamento reto e inclinado é apresentada na Figura 139 e na Figura 140, respectivamente.

Figura 139-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa obtida no ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

Figura 140-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa obtida no ensaio de cisalhamento inclinado

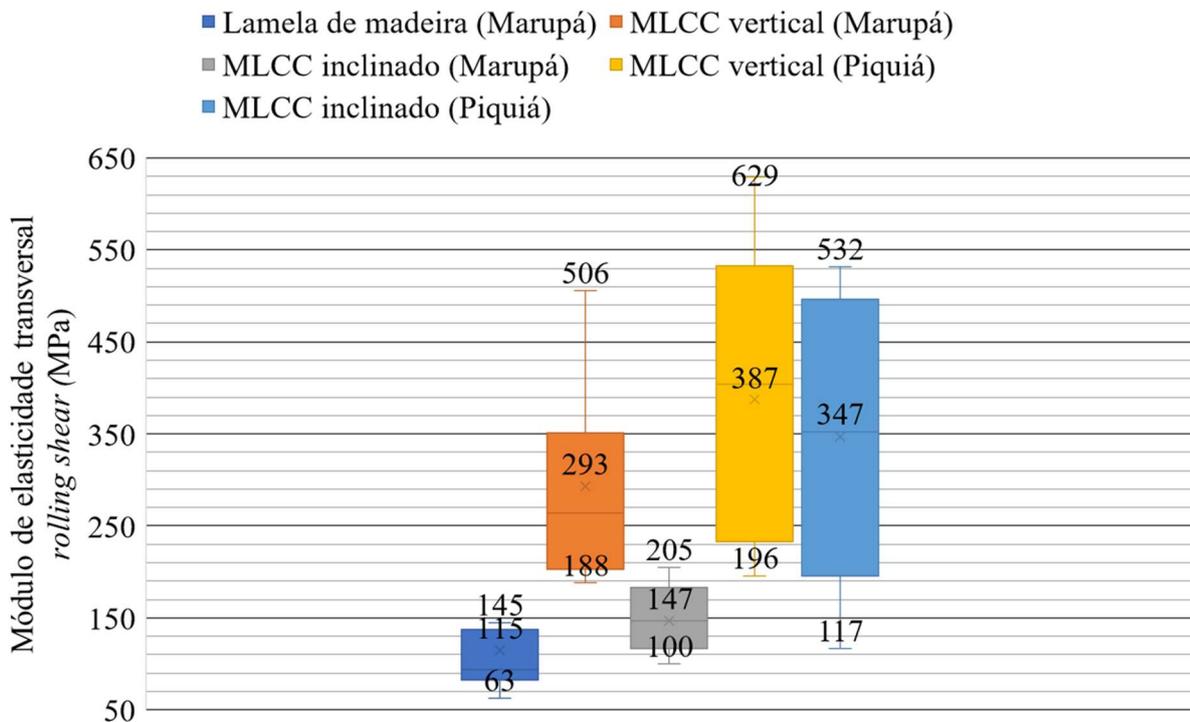


Fonte: A Autora

De acordo com os resultados, concluiu-se que para o Marupá, em ambos os ensaios, a resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) foi inversamente proporcional ao aumento da espessura da lamela, conforme já relatado por alguns autores na bibliografia, como por exemplo, O’Ceallaigh, Sikora e Harte (2018). Para o Piquiá, em ambos os métodos de ensaio, o resultado foi inverso, ou seja, a média aumentou conforme o aumento da espessura das camadas.

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) dos corpos de prova com 75 e 114 mm de espessura, para ambas as espécies, em função dos métodos de ensaio, é apresentado na Figura 141 e na Figura 142, respectivamente.

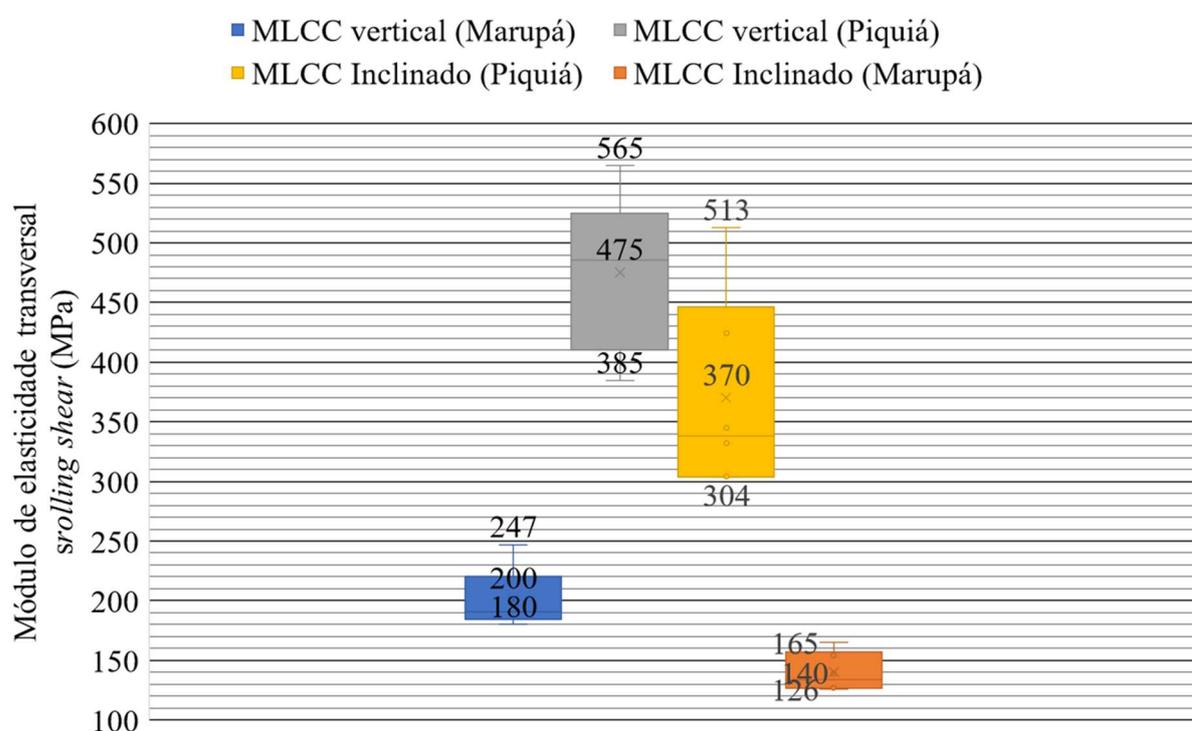
Figura 141-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 75 mm de espessura



Fonte: A Autora

Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) para os corpos de prova de 75 mm de espessura variaram entre 63 MPa e 506 MPa para o Marupá e entre 100 MPa e 629 MPa para o Piquiá. Para ambas as espécies, o módulo de elasticidade transversal médio *rolling shear* (G_{vt}) foi maior para o ensaio de cisalhamento reto do que para o inclinado, sendo igual a 293 MPa e 387 MPa para o Marupá e Piquiá, respectivamente. As variações entre o maior e o menor módulo de elasticidade transversal médio *rolling shear* (G_{vt}) foi de quase 100% para o Marupá e de 12%, para o Piquiá, comparando-se os valores apenas dos ensaios de cisalhamento em amostras de MLCC.

Figura 142-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa para os corpos de prova com 114 mm de espessura

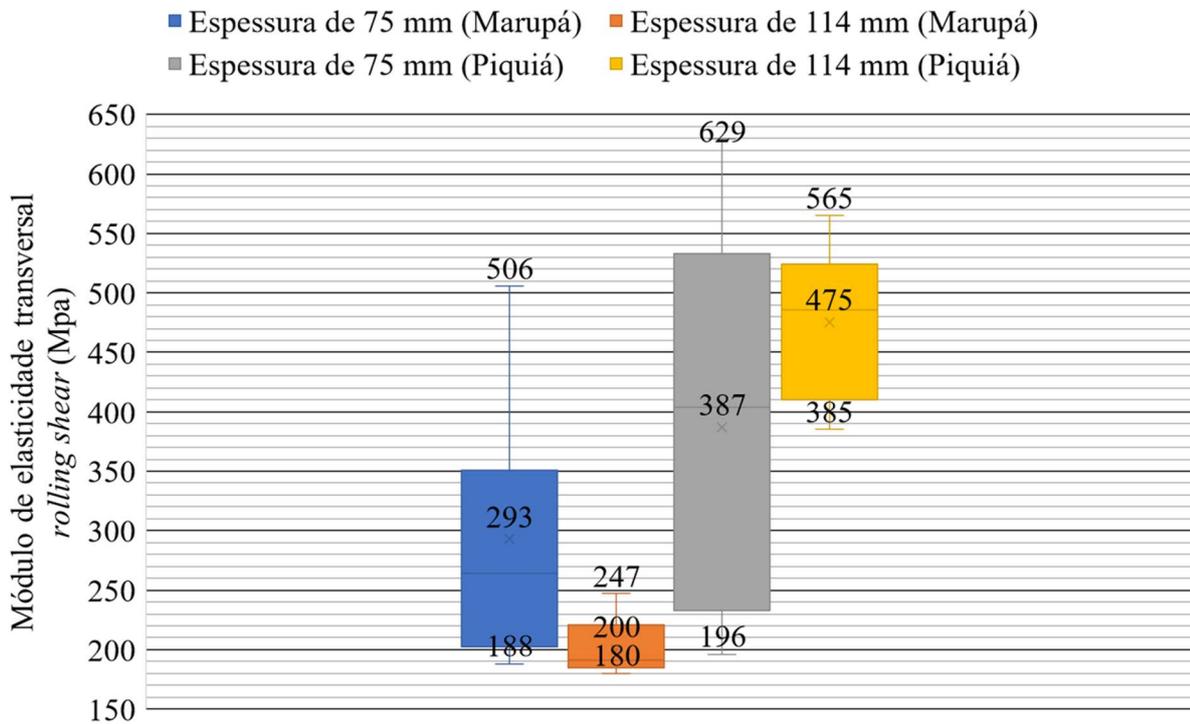


Fonte: A Autora

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), para os elementos com 114 mm de espessura, variaram entre 126 MPa e 247 MPa para o Marupá e entre 304 MPa e 565 MPa para o Piquiá. O maior módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) médio foi de 200 MPa, para o Marupá, e de 475 MPa, para o Piquiá, os quais foram obtidos no ensaio de cisalhamento reto, o que pode ser justificado devido ao atrito lateral entre o corpo de prova e as peças de contenção colocadas para manter o corpo de prova na vertical. A variação entre os valores foi de 49% para o Marupá, e de 40% para o Piquiá. Dessa forma, concluiu-se que o método de ensaio influencia consideravelmente no módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). O ensaio que apresentou menor variabilidade foi o de cisalhamento inclinado, assim sendo, ele pode ser o mais indicado para determinar o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}).

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), em função da espessura das lamelas, para os ensaios de cisalhamento reto e inclinado, é apresentado na Figura 143 e na Figura 144, respectivamente.

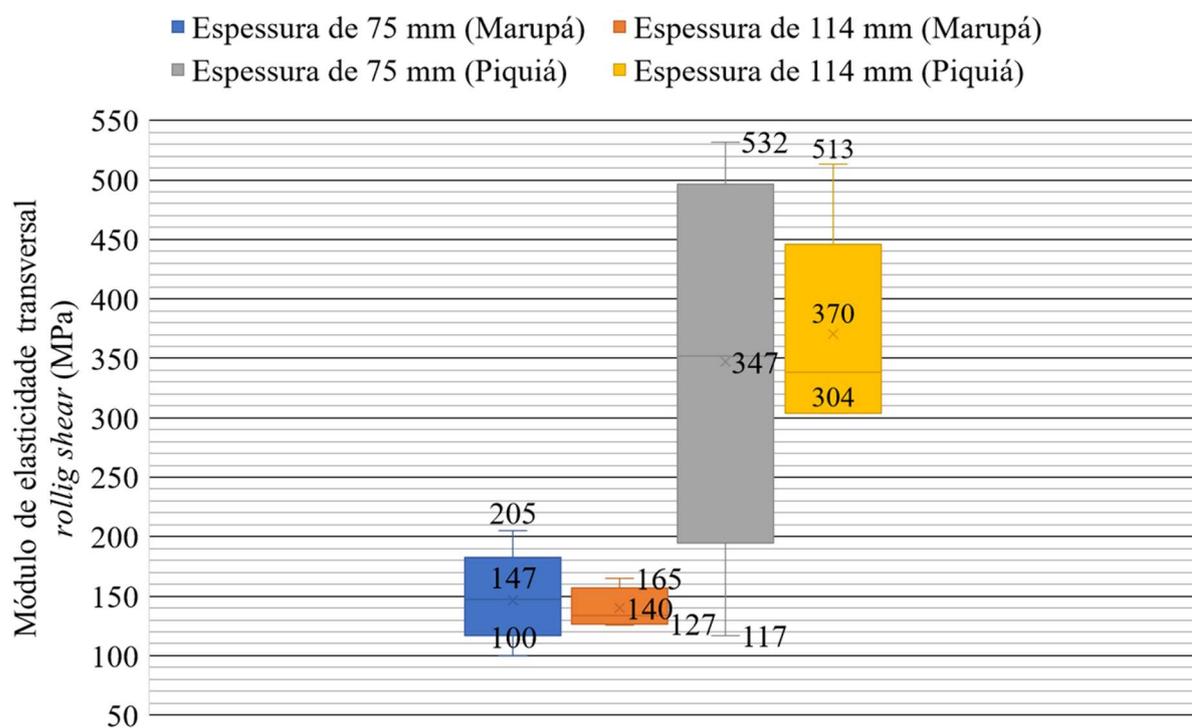
Figura 143-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa obtido no ensaio de cisalhamento reto



Fonte: A Autora

O comportamento dos resultados para o ensaio de cisalhamento reto, em relação ao aumento da espessura das camadas, foi semelhante ao que ocorreu na resistência (f_{vt}), ou seja, o aumento da lamela resultou na redução do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e para o Marupá, resultou no aumento dessa propriedade.

Figura 144-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) em MPa obtido no ensaio de cisalhamento inclinado



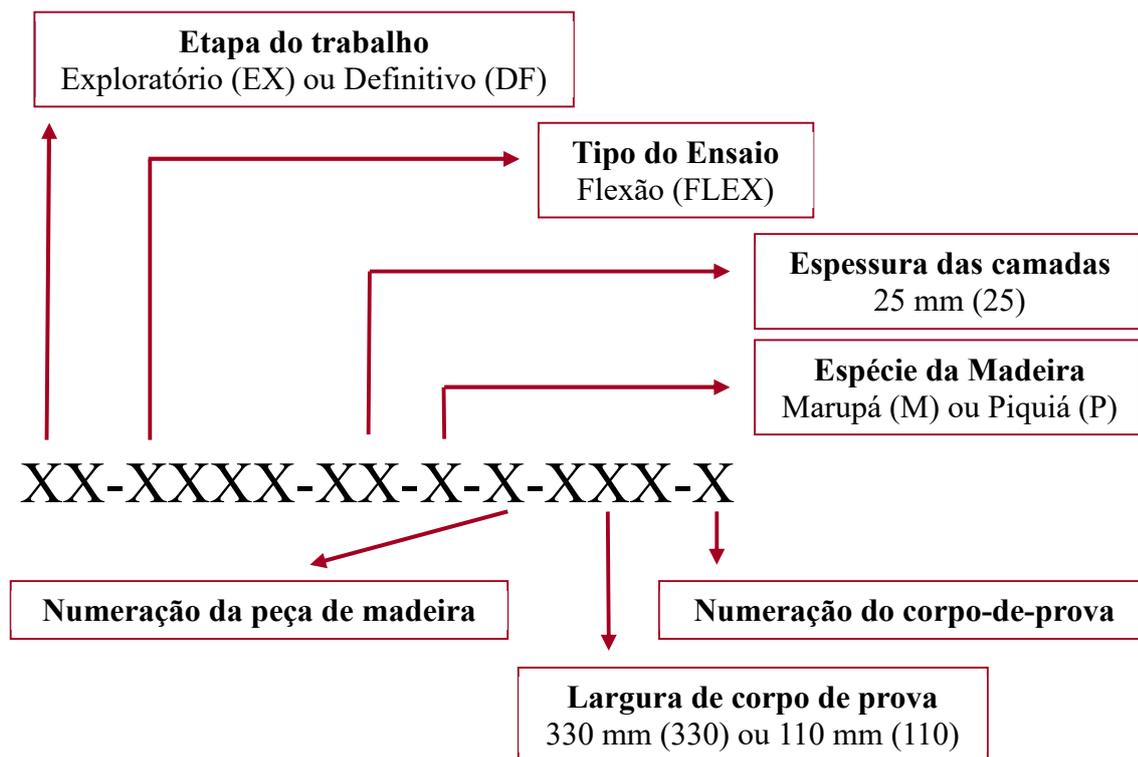
Fonte: A Autora

Para o ensaio de cisalhamento inclinado, o aumento da espessura das camadas resultou na diminuição do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Dessa forma, pode-se concluir que a alteração da espessura das camadas influencia tanto a resistência (f_{vt}) quanto o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Considerando-se ambas as espessuras, os módulos obtidos nos ensaios de cisalhamento inclinado das amostras de Marupá variaram entre 100 MPa e 205 MPa e das amostras de Piquiá variaram entre 117 MPa e 532 MPa.

4.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FLEXÃO

A nomenclatura adotada para os ensaios de flexão é ilustrada na Figura 145.

Figura 145-Nomenclatura adotada para os ensaios de flexão



Fonte: A Autora

A resistência (f_{vt}) última dos painéis de MLCC na flexão são apresentadas na Tabela 19, para o Marupá, e na Tabela 20, para o Piquiá.

Tabela 19-Resistência ao *rolling shear* dos corpos de prova de MLCC em MPa (Marupá), $U=12\%$

Nome	f_{vt} (MPa)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	2,08
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	-
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	1,57
DF-FLEX-25-M-6/7-110-2	1,75
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	1,62
Média	1,76
Desvio Padrão	0,23
COV	13%

Fonte: A Autora

A resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) dos painéis de MLCC do Marupá foi de 1,76 (13%) MPa, sendo que o valor máximo ocorreu para elementos com largura maior (345 mm). A menor resistência foi de 1,57 MPa, para as peças com largura de 115 mm, sendo apenas 11% menor do que o valor máximo, no caso de peças com mesma largura, cuja média foi de 1,65 MPa.

Tabela 20-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Piquiá), U=12%

Nome	f_{vt} (MPa)
DF-FLEX-25-P-2-330-1	3,91
DF-FLEX-25-P-2-330-2	-
DF-FLEX-25-P-2-110-1	3,32
DF-FLEX-25-P-2-110-2	3,62
DF-FLEX-25-P-2-110-3	4,72
Média	3,89
Desvio Padrão	0,60
COV	16%

Fonte: A Autora

Para o caso dos painéis de MLCC fabricados com Piquiá, a resistência média ao *rolling shear* (f_{vt}) foi de 3,89 (16%) MPa. No entanto, seu comportamento foi diferente, uma vez que o maior valor ocorreu para os elementos de menor na largura e igual a 4,72 MPa. A resistência média (f_{vt}) para as amostras com largura de 110 mm foi de 3,88 MPa. Dessa forma, pode-se concluir que, os ensaios de flexão apresentaram resultados coerentes de acordo com a sua densidade ao compará-lo com os do Marupá, com menor variabilidade e que os valores podem variar de acordo com a largura do corpo de prova.

As curvas experimentais de força aplicada por deslocamento vertical no meio do vão são ilustradas na Figura 146 e na Figura 147, para as peças de Marupá e Piquiá, respectivamente.

Figura 146-Curvas experimentais de força x deslocamento dos ensaios de flexão (Marupá), U=12%

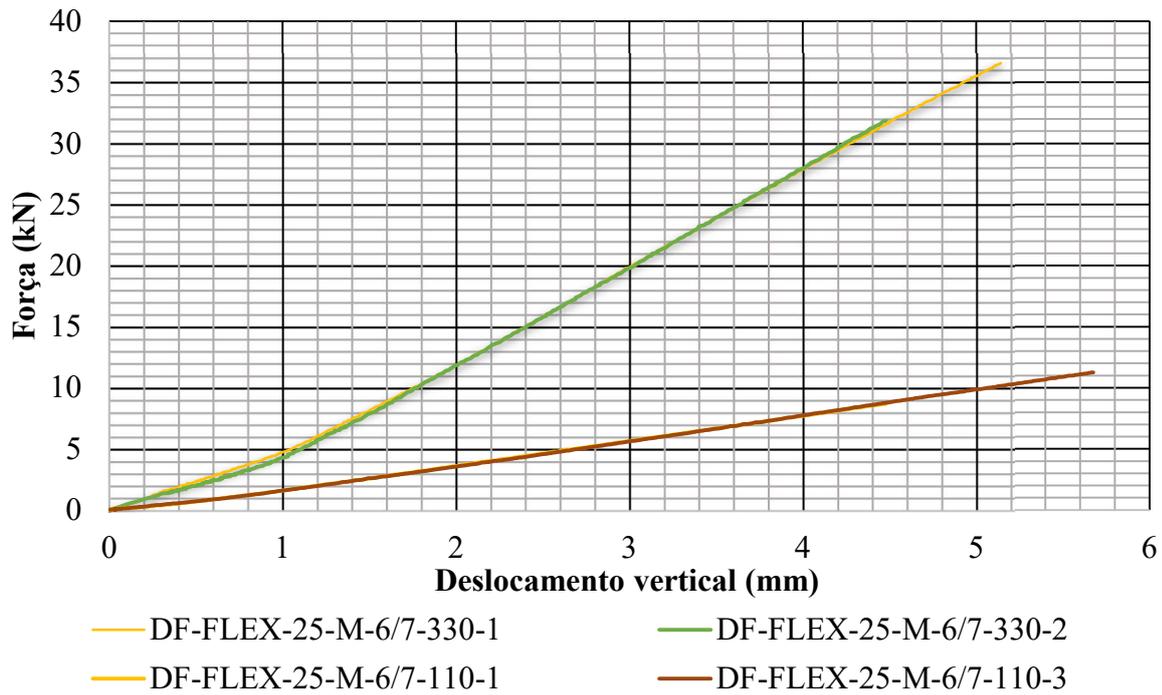
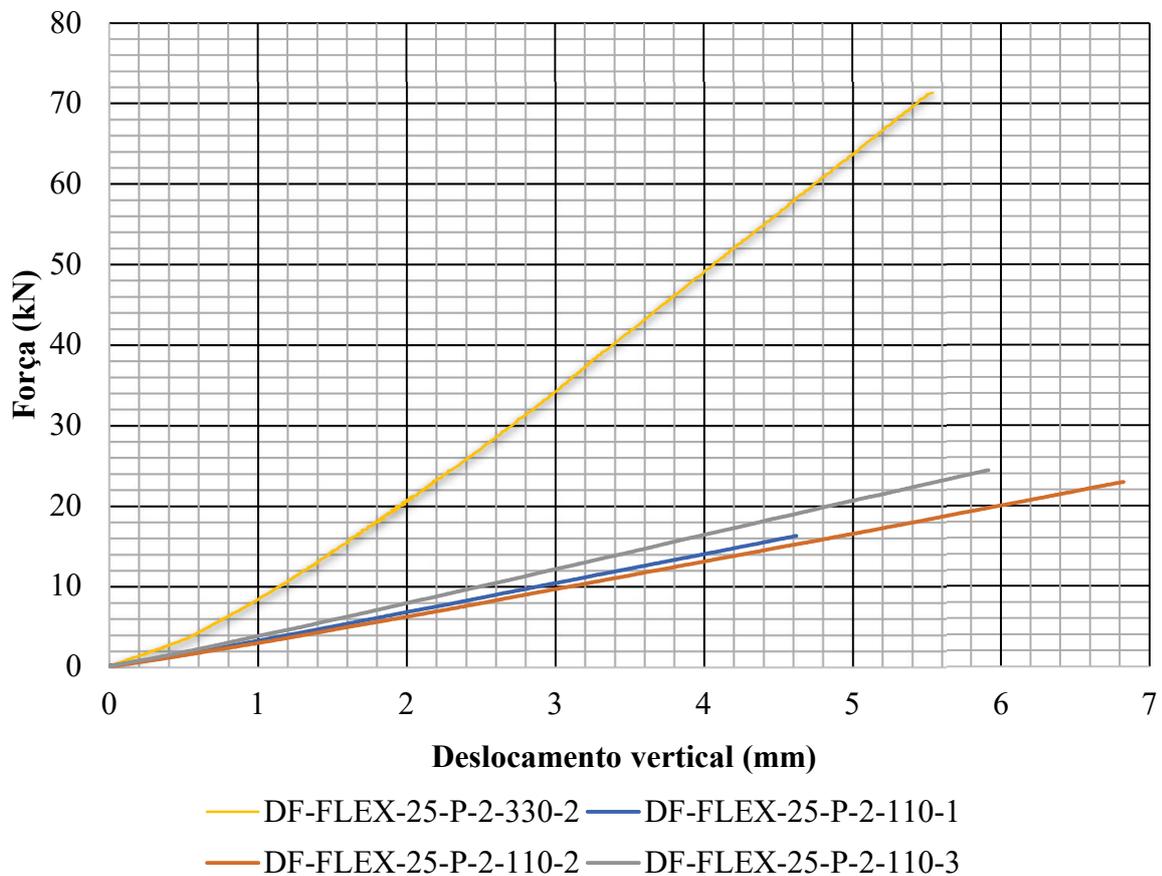


Figura 147-Curvas experimentais de força x deslocamento dos ensaios de flexão (Piquiá), U=12%



As curvas experimentais tiveram inclinações próximas, sendo que para aqueles com largura de 330 mm, as inclinações foram mais acentuadas, indicando que as rigidezes à flexão desses painéis foram maiores. O modo de ruptura ocorreu apenas por *rolling shear*, independentemente da largura da peça, a qual é ilustrada na Figura 148, para aqueles com 345 mm de largura e na Figura 149, com largura de 115 mm.

Figura 148-Vista frontal da ruptura da placa de MLCC de Marupá (com 345 mm de largura)



Fonte: A Autora

Figura 149-Modo de ruptura da viga de MLCC de Marupá (com 115 mm de largura)



Fonte: A Autora

Além da resistência última dos painéis de MLCC, foram calculadas a rigidez aparente líquida e a local líquida, as quais são apresentadas na Tabela 21, para ambas as larguras e espécies.

Tabela 21-Rigidezes líquidas aparentes e locais em N.mm² e rigidez ao cisalhamento em N dos painéis de MLCC estudados

Nome	$(EI)_{mlcc, ap, liq}$ (N.mm ²)	$(EI)_{mlcc, local, liq}$ (N.mm ²)	$(GA)_{mlcc}$ (N)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	$1,01 \cdot 10^{11}$	$1,32 \cdot 10^{11}$	$4,67 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	$9,80 \cdot 10^{10}$	$1,38 \cdot 10^{11}$	$3,65 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	$2,56 \cdot 10^{10}$	$3,29 \cdot 10^{10}$	$1,25 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	$2,44 \cdot 10^{10}$	$3,40 \cdot 10^{10}$	$9,39 \cdot 10^5$
DF-FLEX-25-P-2-330-2	$1,79 \cdot 10^{11}$	$2,34 \cdot 10^{11}$	$8,23 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-P-2-110-1	$4,26 \cdot 10^{10}$	$5,12 \cdot 10^{10}$	$2,73 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-P-2-110-2	$4,03 \cdot 10^{10}$	$5,17 \cdot 10^{10}$	$1,98 \cdot 10^6$
DF-FLEX-25-P-2-110-3	$5,05 \cdot 10^{10}$	$7,01 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^6$

Fonte: A Autora

A rigidez aparente líquida média dos painéis de MLCC com largura de 330 mm para o Marupá foi de $9,95 \cdot 10^{10}$ (2%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$, enquanto para o Piquiá, apenas um corpo de produziu resultados coerentes. Assim, a rigidez efetiva à flexão para o Piquiá, dos elementos com 330 mm de largura foi igual a $1,79 \cdot 10^{11}$ $\text{N} \cdot \text{mm}^2$, a qual foi 80% maior em comparação ao Marupá e correspondente ao valor máximo obtidos pelos ensaios. Em relação aos elementos com largura de 110 mm, as rigidezes aparentes líquidas médias foram de $2,50 \cdot 10^{10}$ (3%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ e de $4,45 \cdot 10^{10}$ (12%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ para o Marupá e para o Piquiá, respectivamente, apresentando uma variação entre as espécies de 78%, a qual foi semelhante à variação entre as peças com 330 mm de largura.

As rigidezes aparentes líquidas dos painéis de MLCC foram menores do que as rigidezes aparentes locais líquidas sendo que os valores foram da ordem de 10^{11} para os painéis com largura maior e de 10^{10} para os painéis com largura menor.

Os painéis de MLCC fabricados com Marupá e com 330 mm de largura tiveram rigidez local líquida média de $1,35 \cdot 10^{11}$ (3%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ e o de Piquiá com $2,34 \cdot 10^{11}$ $\text{N} \cdot \text{mm}^2$, a qual foi 73% maior. Quanto as amostras com largura de 110 mm, as rigidezes locais médias foram de $3,34 \cdot 10^{10}$ (2%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ e de $5,76 \cdot 10^{10}$ (19%) $\text{N} \cdot \text{mm}^2$, para o Marupá e Piquiá, respectivamente, resultando em uma diferença entre espécies de 72%.

Em relação a rigidez ao cisalhamento dos painéis, os elementos de Marupá com largura de 330 mm teve média de $4,16 \cdot 10^6$ (17%) N e o Piquiá teve rigidez de $8,23 \cdot 10^6$ N, a qual foi 103% maior. Quanto às peças com 110 mm de largura, tem-se que a rigidez ao cisalhamento média foi de $1,09 \cdot 10^6$ (20%) N e de $2,22 \cdot 10^6$ (20%) N, para o Marupá e Piquiá, respectivamente, apresentando diferença entre espécies de 104%.

A ABNT NBR 7190-7:2022 indica em nota que a aferição do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) não leva a resultados precisos. Apesar disso, tais módulos foram calculados a partir da Equação (55). Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), calculados a partir da rigidez ao cisalhamento dos painéis e do módulo de elasticidade transversal da madeira (G), são apresentados na Tabela 22.

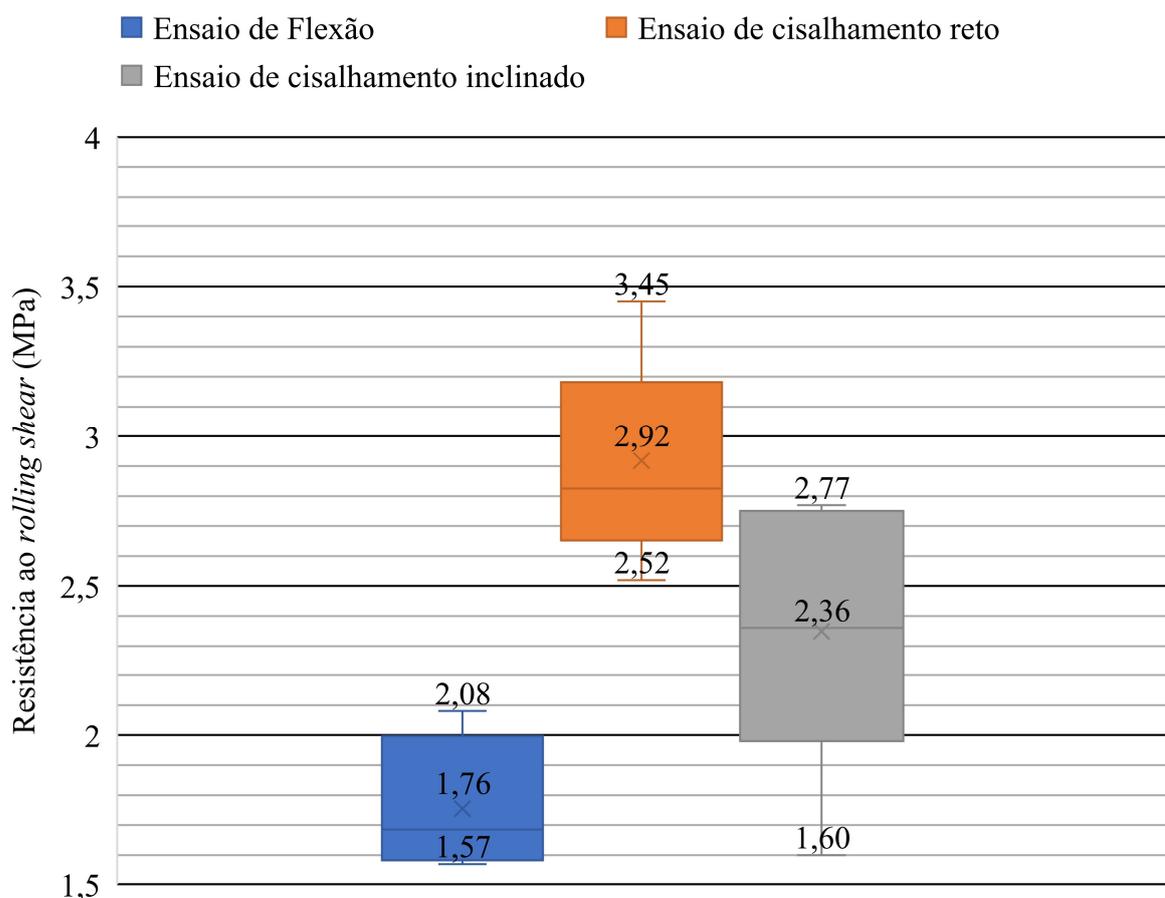
Tabela 22-Módulos de elasticidade transversal da madeira (G) e *rolling shear* (G_{vt}) em MPa, U=12%

Nome	E_0 (MPa)	G (MPa)	G_{vt} (MPa)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	11540	721	795
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	11701	731	424
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	10635	665	537
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	12140	759	99
DF-FLEX-25-P-2-330-2	20083	1255	1418
DF-FLEX-25-P-2-110-1	19379	1211	1459
DF-FLEX-25-P-2-110-2	16406	1025	880
DF-FLEX-25-P-2-110-3	24463	1529	260

Fonte: A Autora

De acordo com os resultados apresentados, pode-se observar que o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi maior para a espécie Piquiá do que para o Marupá. Os valores máximos, para ambas as espécies, ocorreram para os elementos com larguras diferentes, com valores médios de 609 (43%) MPa e 1418 MPa, para o Marupá e Piquiá, respectivamente. Em relação aos elementos com 110 mm de largura, os valores médios foram de 318 (97%) MPa e 866 (69%) MPa, para o Marupá e o Piquiá, respectivamente. De acordo com os coeficientes de variação, pode-se concluir que os resultados obtidos possuem grande variabilidade, o que pode ser justificado devido a variação dos módulos de elasticidade longitudinal paralelo às fibras, além do que, o valor exato do módulo de elasticidade transversal da madeira (G) não ter sido determinado, o qual foi adotado em relação ao módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras (E_0).

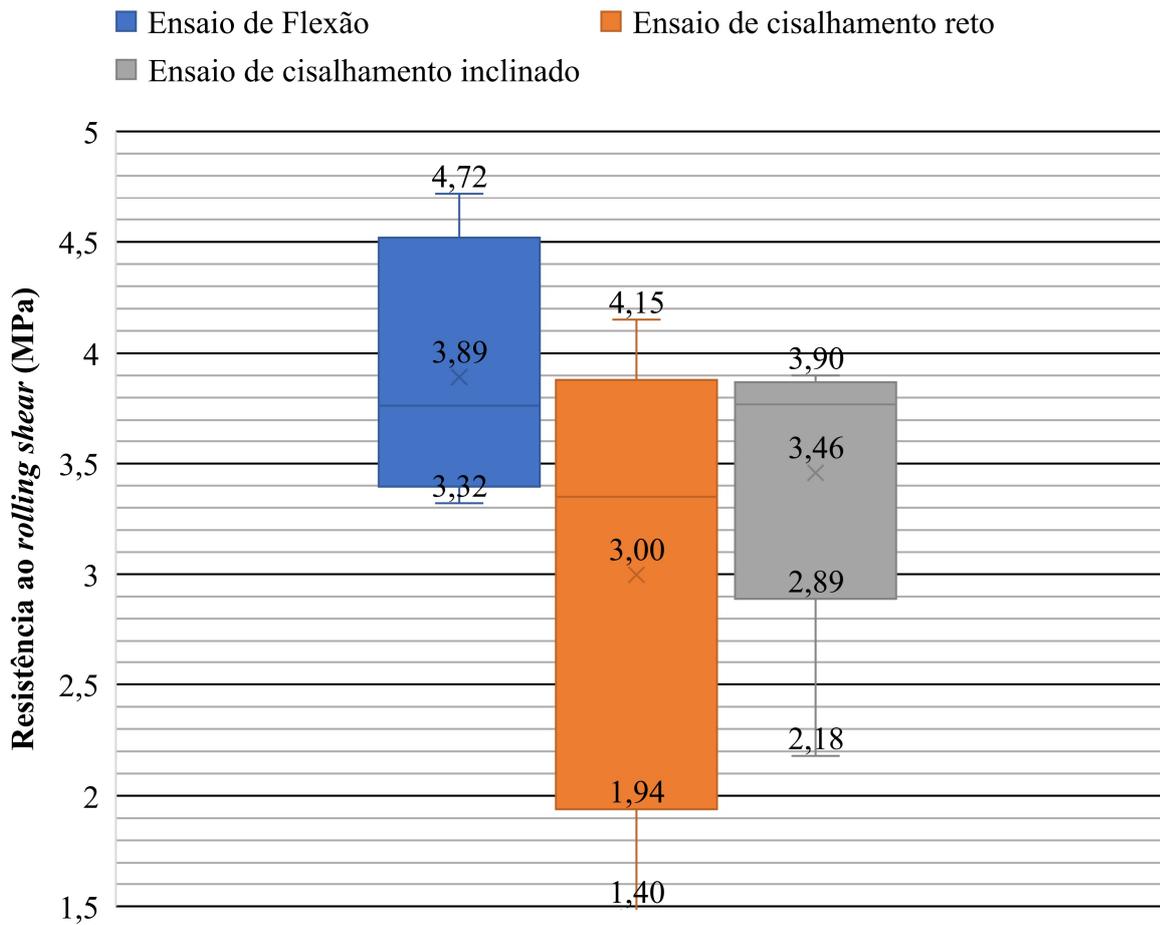
As resistências ao *rolling shear* (f_{vt}), para todos os métodos de ensaios realizados, dos corpos de prova de MLCC são apresentadas na Figura 150, para o Marupá, e na Figura 151, para o Piquiá.

Figura 150-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Marupá)

Fonte: A Autora

A resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) também é influenciada pelo método de ensaio utilizado, sendo que, de acordo com as informações apresentadas, para a espécie Marupá, o método de ensaio que apresentou maior média foi o cisalhamento reto (2,92 MPa) e o que teve menor foi o de flexão (1,76 MPa), apresentado uma variação de 66%, esse aumento na resistência ao cisalhamento (f_{vt}) no ensaio reto pode ser justificada devido à ocorrência de atrito lateral entre o corpo de prova corpo e as peças de travamento.

Entretanto, conforme citado por Ehrhart e Brandner (2018), o método de ensaio mais interessante é o que provoca o mesmo estado de tensões ao qual o painel de MLCC estará submetido durante a vida útil da estrutura. No geral, os painéis de MLCC aplicados como placas de pisos submetidas à flexão e então, o ensaio de flexão será tomado como referência. Assim, entre os ensaios de cisalhamento em corpos de prova de MLCC, o ensaio de cisalhamento mais adequado foi o inclinado, uma vez que é o que obteve resistência média ($f_{vt} = 2,36$ MPa) mais próxima ao valor de referência ($f_{vt} = 1,76$ MPa), com diferença de 34%.

Figura 151-Resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em MPa dos corpos de prova de MLCC (Piquiá)

Fonte: A Autora

Para o Piquiá, a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) teve comportamento diferente do que o Marupá, sendo que o maior valor foi obtido no ensaio de flexão e igual a 3,89 MPa, enquanto o menor foi de 3 MPa, obtida no ensaio de cisalhamento reto. Admitindo-se a resistência do ensaio de flexão (f_{vt}) como referência, tem-se que o valor que mais se aproximou é o obtido no ensaio de cisalhamento inclinado, da mesma forma que para o Marupá, apresentando uma diferença de 12%.

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS

4.4.1 Ensaio de cisalhamento

O módulo de elasticidade transversal no plano radial-tangencial (G_{23}) usado para a calibração do modelo variou de acordo com cada modelo realizado, os quais apresentados em na Tabela 23, para os casos de simulação do ensaio de cisalhamento reto.

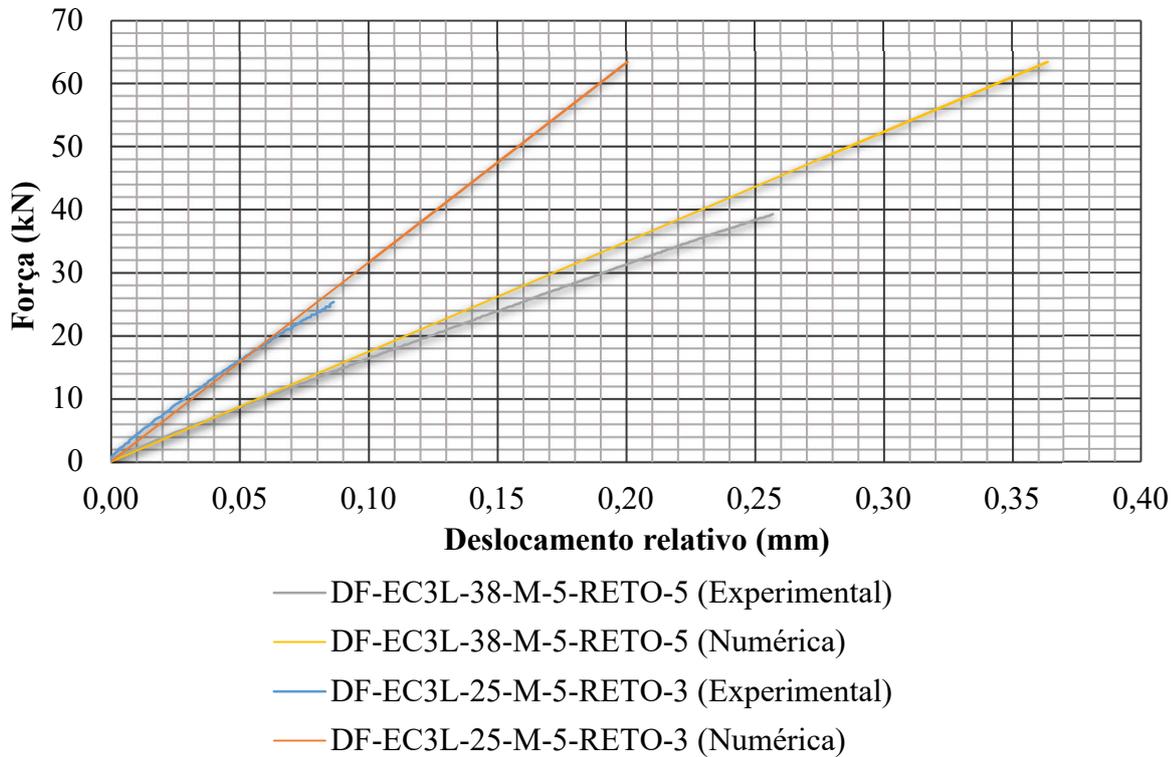
Tabela 23-Módulo de elasticidade transversal de entrada em MPa no plano radial tangencial usados na simulação do ensaio de cisalhamento reto

Corpo de prova	G_{23} (MPa)	G_{vt} (Experimental)	Diferença (%)
DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	420	335	25
DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	91	194	113
DF-EC3L-25-P-1-RETO-4	404	404	0
DF-EC3L-38-P-1-RETO-5	319	511	60

Fonte: A Autora

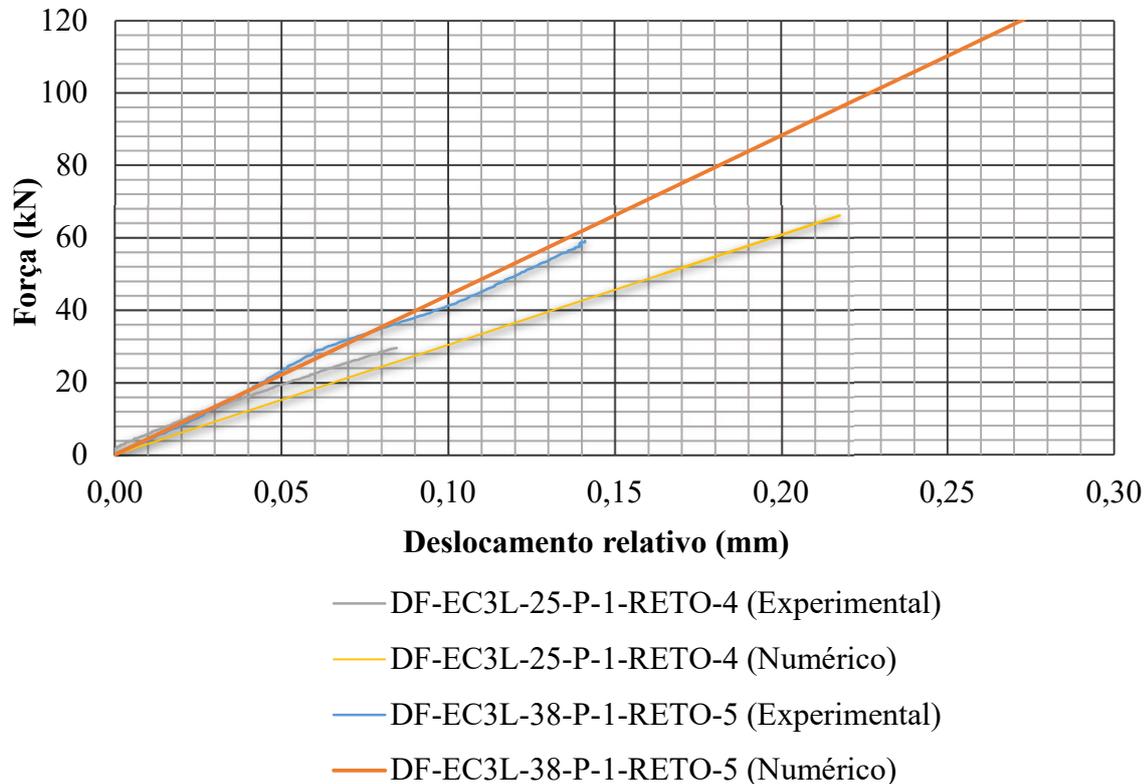
As curvas numéricas e experimentais são apresentadas na Figura 152 para o Marupá e na Figura 153 para o Piquiá, para elementos de ambas as espessuras.

Figura 152-Curvas experimentais x numéricas calibradas para os corpos de prova de Marupá do ensaio de cisalhamento reto



Fonte: A Autora

Figura 153-Curvas experimentais x numéricas calibradas para os corpos de prova de Piquiá do ensaio de cisalhamento reto



Fonte: A Autora

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) das camadas internas foram obtidos pelas curvas numéricas calibradas. Os valores numéricos e experimentais são apresentadas na Tabela 24, em MPa, juntamente com a variação encontrada entre elas, em porcentagem (%).

Tabela 24-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear*, em MPa, experimental x numérico obtidos do modelo numérico do ensaio de cisalhamento reto, $U=12\%$

Corpo de prova	G_{vt} (MPa)⁽¹⁾	G_{vt} (MPa)⁽²⁾	Variação (%)
DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	392	335	17
DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	220	194	13
DF-EC3L-25-P-1-RETO-4	377	404	7
DF-EC3L-38-P-1-RETO-3	556	511	9

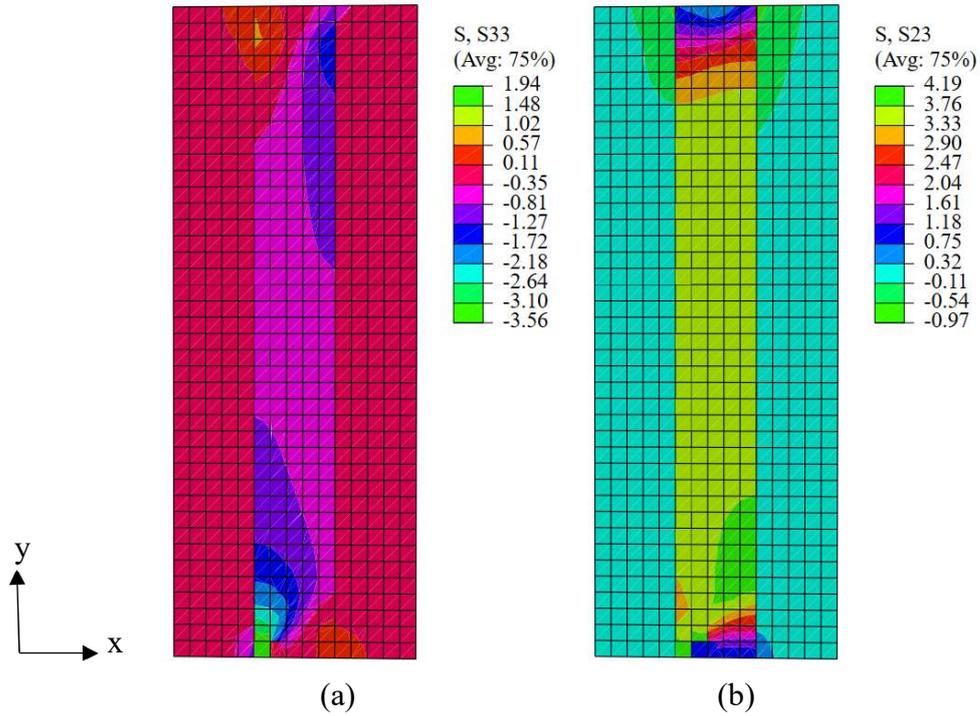
⁽¹⁾ Numérico

⁽²⁾ Experimental

Fonte: A Autora

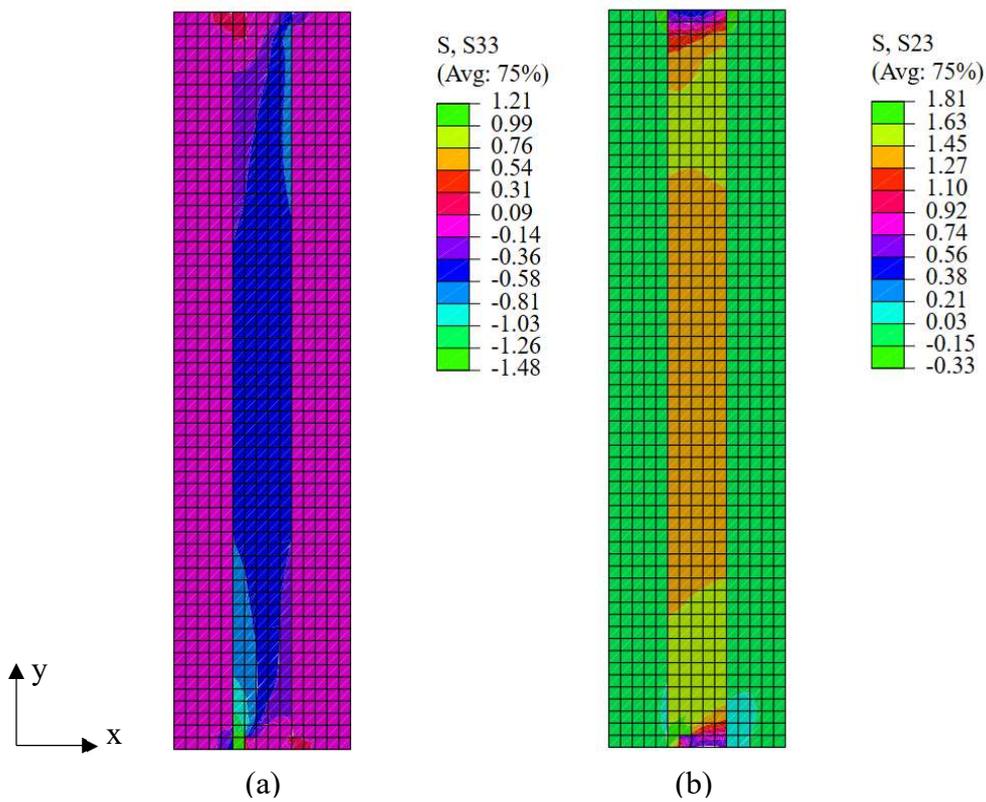
No geral, os valores numéricos foram ligeiramente maiores do que os experimentais, sendo que o que apresentou maior variação foi o corpo de prova de Marupá, com 75 mm de espessura, a qual foi em torno de 17%. A distribuição das tensões normais na direção perpendicular às fibras (S_{33}) e as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para as amostras de Marupá, com espessuras de 75 mm e 114 mm é ilustrada na Figura 154 e na Figura 155, respectivamente.

Figura 154-Distribuição das tensões em MPa. (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-M-5-RETO-3



Fonte: A Autora

Figura 155-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-M-5-RETO-5

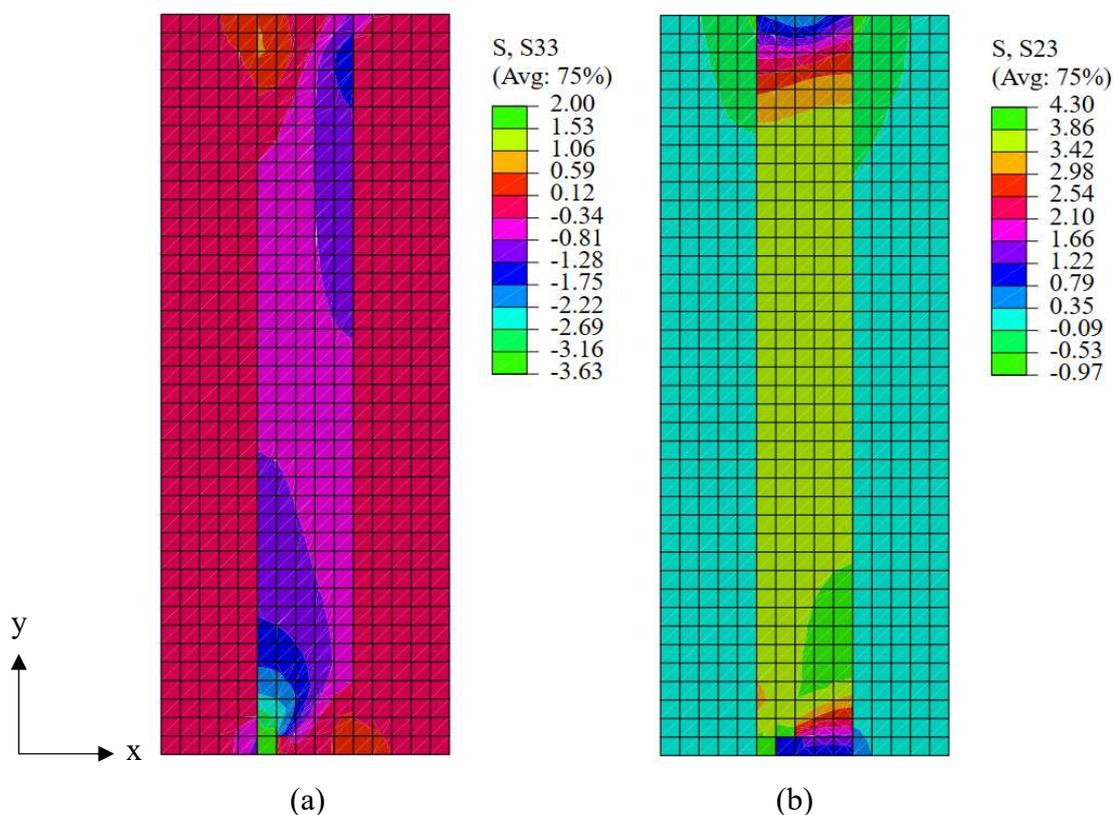


Fonte: A Autora

De acordo com os resultados apresentados pelo modelo numérico, observou-se que as tensões normais foram menores do que as tensões de cisalhamento em todos os casos e que ocorreu esmagamento próximo ao ponto de apoio da peça, uma vez que houve concentração de tensões nessa região. As tensões normais máximas (S_{33}) que ocorreram na região central da lamela interna foram ocasionadas por compressão perpendicular às fibras e variaram de 0,35 a 0,81 MPa, para a camada central com espessura de 25 mm, e de 0,36 MPa a 0,58 MPa, para as com espessura de 38 mm. Dessa forma, concluiu-se que ao aumentar a espessura da camada, ocorreu a diminuição das tensões normais de compressão perpendicular às fibras. Em relação à distribuição das tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), elas variaram entre 3,33 MPa e 3,76 MPa e entre 1,27 MPa e 1,63 MPa, para os corpos de prova com 75 mm e 114 mm de espessura, respectivamente.

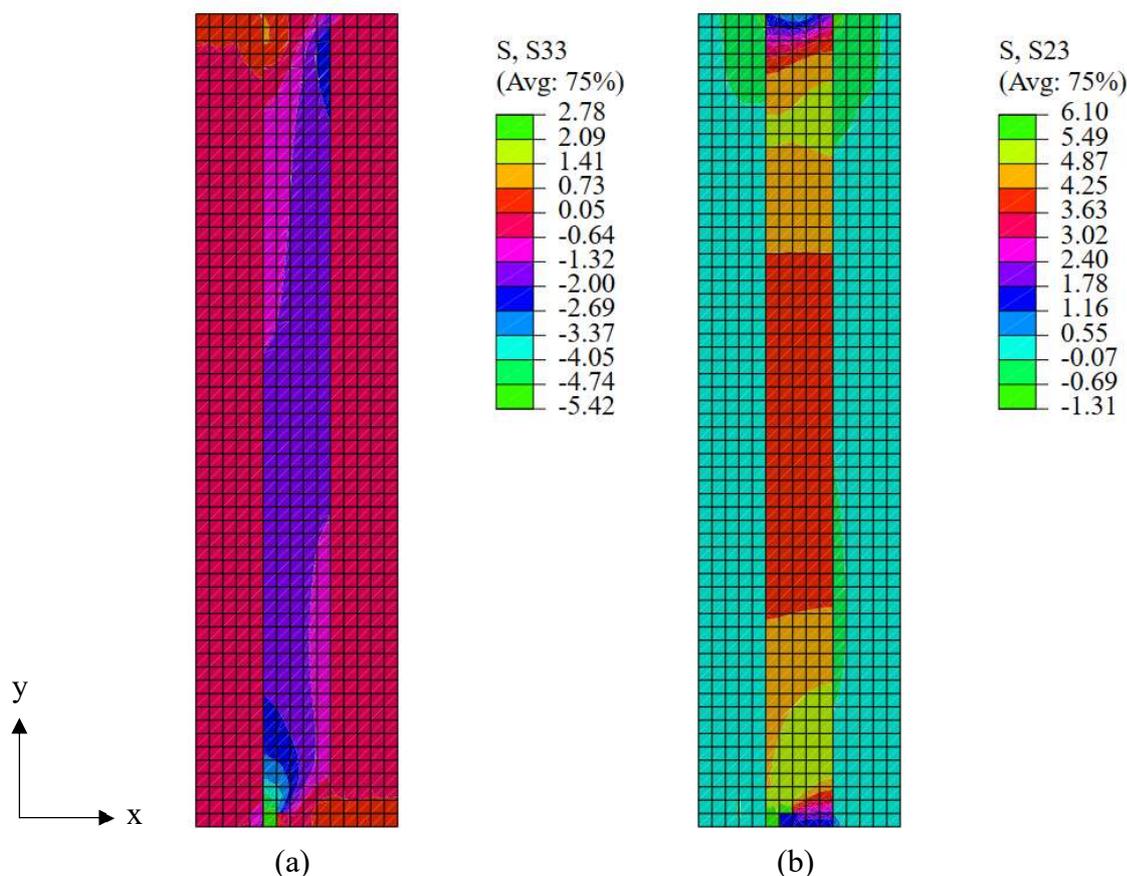
A distribuição das tensões normais (S_{33}) na direção perpendicular às fibras e das tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para os elementos de Piquiá, com espessuras de 75 mm e 114 mm é ilustrada na Figura 156 e na Figura 157, respectivamente.

Figura 156-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-P-1-RETO-4



Fonte: A Autora

Figura 157-Distribuição das tensões em MPa em (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-P-1-RETO-5



Fonte: A Autora

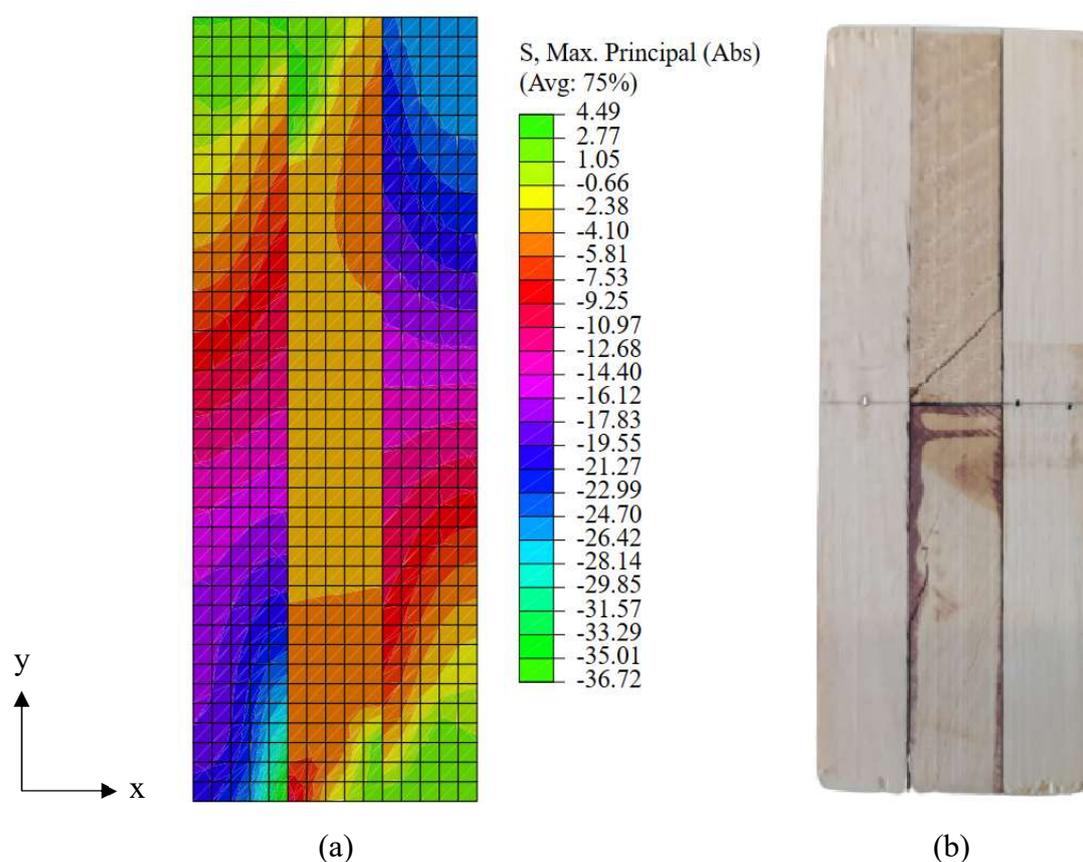
De acordo com os resultados numéricos, as tensões normais na direção perpendicular às fibras (S_{33}), ocorreram principalmente por compressão normal. A distribuição das tensões foi bastante parecida com a apresentada para a espécie Marupá, uma vez que ela foi homogênea, localizando-se com a maior parcela na região central da peça com as tensões variando entre 0,34 MPa e 0,81 MPa, para as camadas de 25 mm de espessura, e de 1,32 MPa e 2 MPa, para as camadas de 38 mm de espessura. Em relação às tensões de cisalhamento (S_{23}), a distribuição foi menos uniforme do que a das tensões normais, sendo que ocorreram concentração de tensões na parcela inferior da peça, com valor máximo de 4,30 MPa e 5,49 MPa. Na região central da lamela interna, as tensões de cisalhamento variaram de 3,42 MPa a 3,86 MPa e de 3,63 MPa a 4,25 MPa, para os corpos de prova com espessuras de lamelas de 25 mm e 38 mm, respectivamente.

De acordo com a caracterização prévia, a resistência a compressão paralela as fibras (f_{c0}) foram de 33,97 MPa, para a peça cinco de Marupá, e de 45,58 MPa, para a peça um de Piquiá. Dessa forma, conforme citado na ABNT NBR 7190-3:2022, a resistência a compressão perpendicular às fibras (f_{c90}) característica pode ser adotada igual a 25% da resistência à

compressão paralela (para distribuição da carga distribuída a partir de 15 cm de extensão), resultando em valores aproximados de 8,49 MPa e 11,39 MPa, para o Marupá e Piquiá, respectivamente. O nível de tensões normais, na compressão paralela às fibras, apresentado pelo modelo numérico é menor que os valores das resistências aproximadas, dessa forma, possivelmente a ruptura pode ter ocorrido devido ao cisalhamento *rolling shear*.

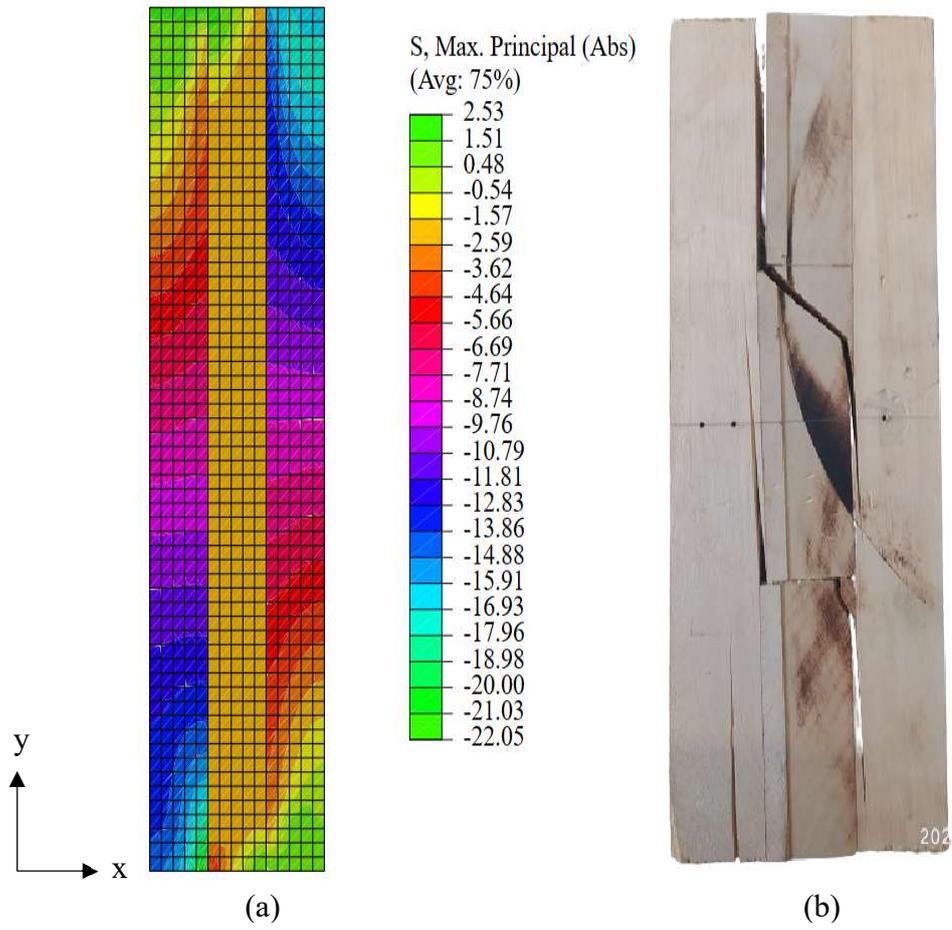
O diagrama tensões máximas absolutas ($S_{MÁX}$) dos corpos de prova, para o Marupá, e o modo de ruptura são ilustrados nas Figura 158 e Figura 159, para as camadas centrais com 25 mm e 38 mm de espessura, respectivamente.

Figura 158-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-M-5-RETO-3



Fonte: A Autora

Figura 159-Diagrama de tensões em MPa em (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-M-5-RETO-5



Fonte: A Autora

Os valores máximos absolutos das tensões na camada central dos corpos de prova, para o Piquiá, e o modo de ruptura são ilustrados na Figura 160 e Figura 161, para as camadas centrais com 25 mm e 38 mm de espessura, respectivamente.

Figura 160-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-P-1-RETO-4

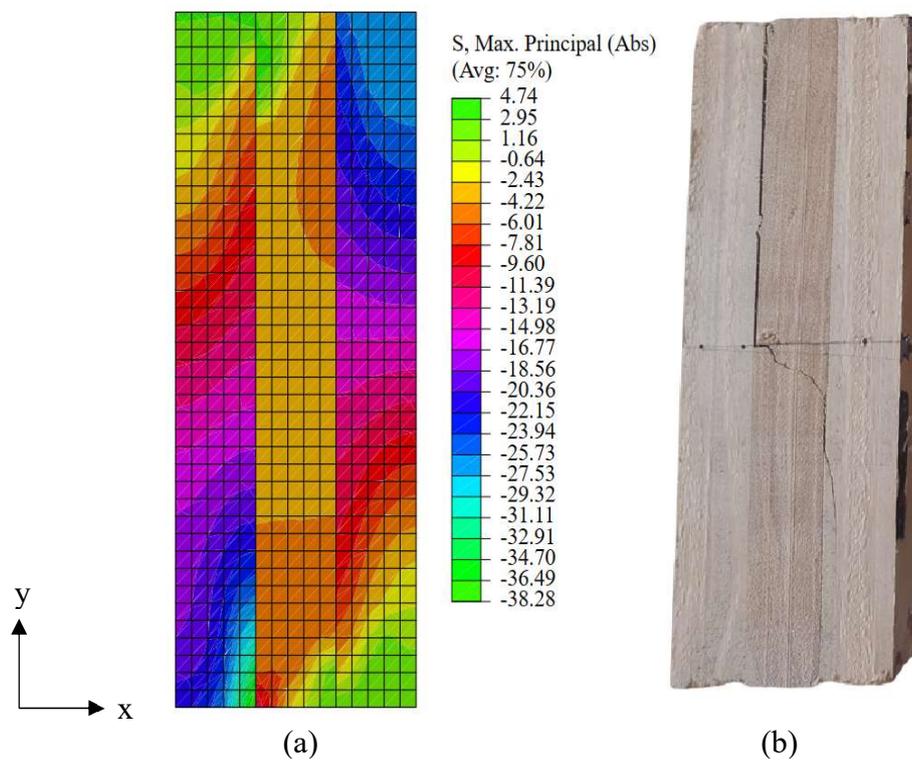
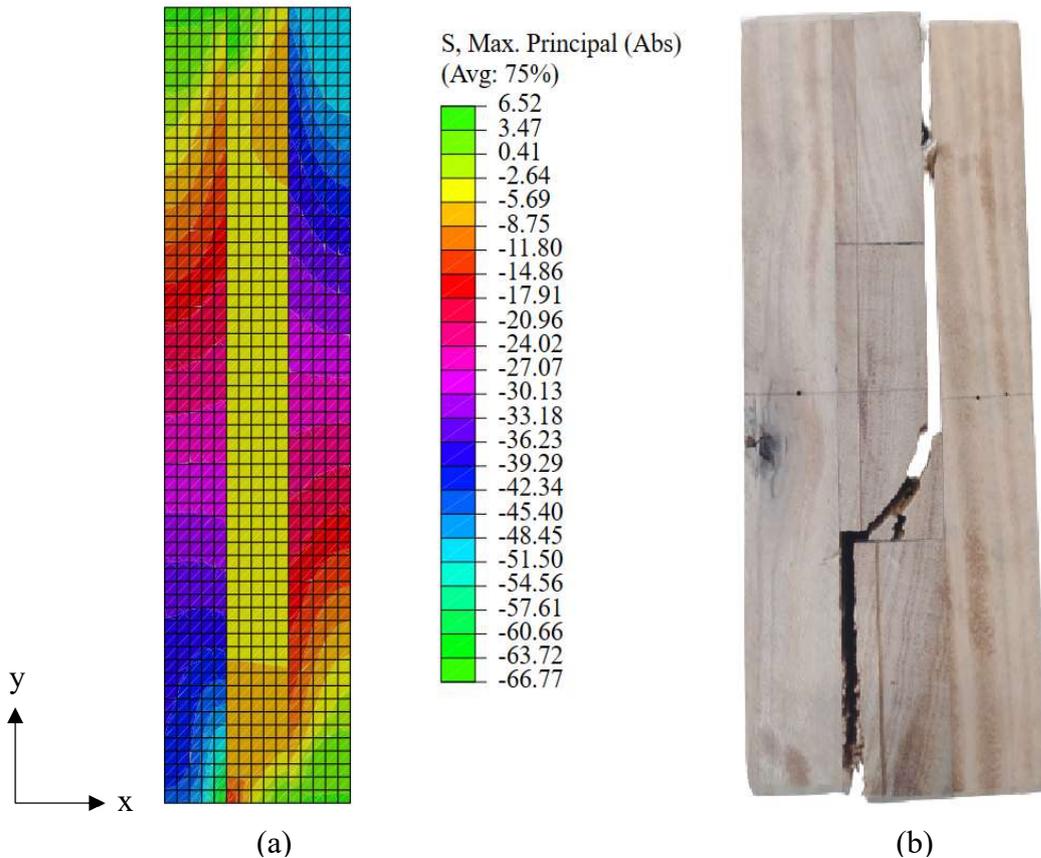


Figura 161-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-P-1-RETO-5



Fonte: A Autora

As tensões máximas ($S_{MÁX}$) na região central da peça para o Marupá foram variaram de 2,38 MPa a 4,10 MPa e de 1,57 MPa a 2,59 MPa, para os elementos com 75 mm e 114 mm de espessura, respectivamente. Para o Piquiá, as tensões máximas ($S_{MÁX}$) variaram de 2,43 MPa a 4,22 MPa e de 2,64 MPa a 5,69 MPa, para as espessuras de 25 e 38 mm, respectivamente. Na Tabela 25 é apresentado o comparativo entre as resistências experimentais (f_{vt}), o intervalo das tensões devido *rolling shear* (S_{23}) e o intervalo das tensões máximas ($S_{MÁX}$), ambas localizadas na região de ruptura real.

Tabela 25-Comparativo entre os diagramas de tensões normais, *rolling shear* e máximas em MPa para os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento reto

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	S_{33} (MPa)	S_{23} (MPa)	$S_{MÁX}$ (MPa)
DF-EC3L-25-M-5-RETO-3	3,15	0,35-0,81	3,33-3,76	2,38-4,10
DF-EC3L-38-M-5-RETO-5	2,11	0,36-0,58	1,27-1,63	1,57-2,59
DF-EC3L-25-P-1-RETO-4	3,35	0,34-0,81	3,42-3,86	2,43-4,22
DF-EC3L-38-P-1-RETO-5	4,16	1,32-2	3,63-4,25	2,69-5,69

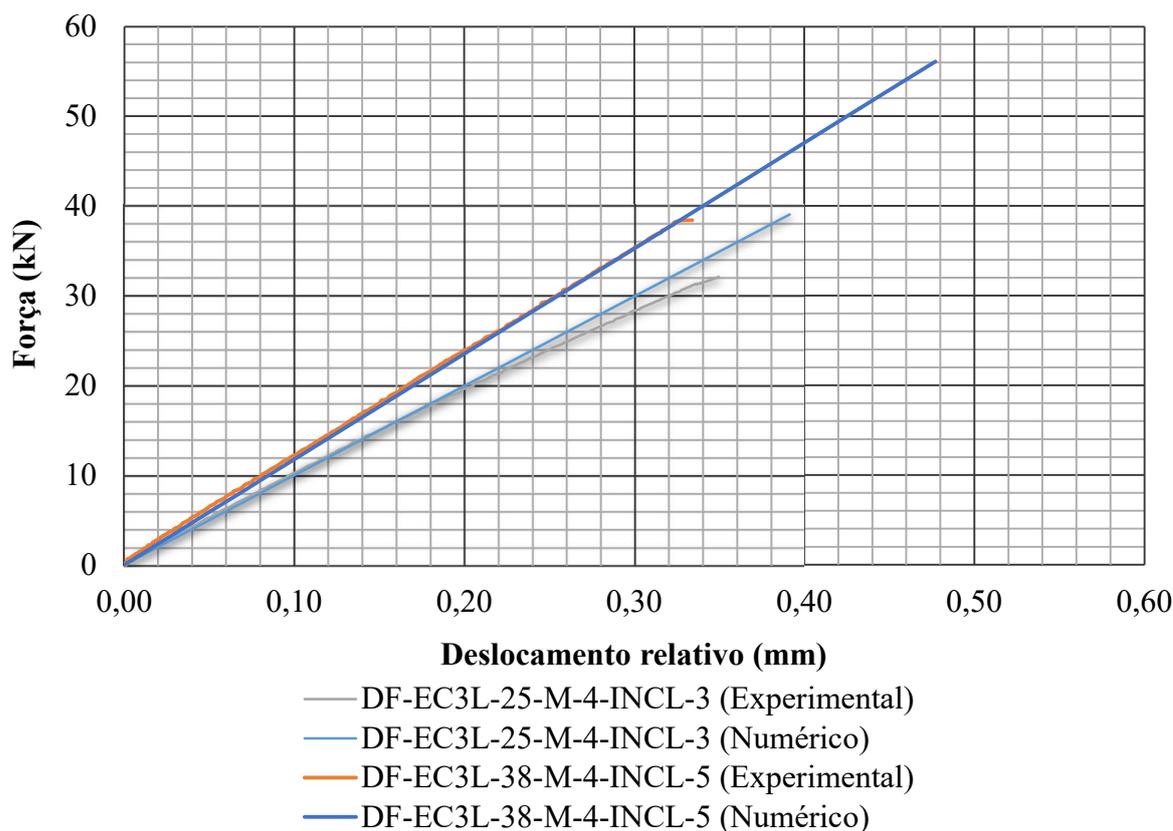
Fonte: A Autora

De acordo com os resultados apresentados, notou-se que a resistência (f_{vt}) esteve localizada no intervalo de tensões dos diagramas de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) e de tensões máximas ($S_{MÁX}$). Além do que, o diagrama de tensões normais apresentou nível baixo de tensões quando comparados ao nível das tensões de cisalhamento.

Também foram feitos modelos para os ensaios de cisalhamento inclinado. No entanto, para este caso, não foi necessária a calibração das curvas, uma vez que os modelos numéricos com o módulo de elasticidade transversal no plano radial-tangencial (G_{23}) adotado igual ao experimental (G_{vt}) resultou em curvas numéricas próximas às experimentais.

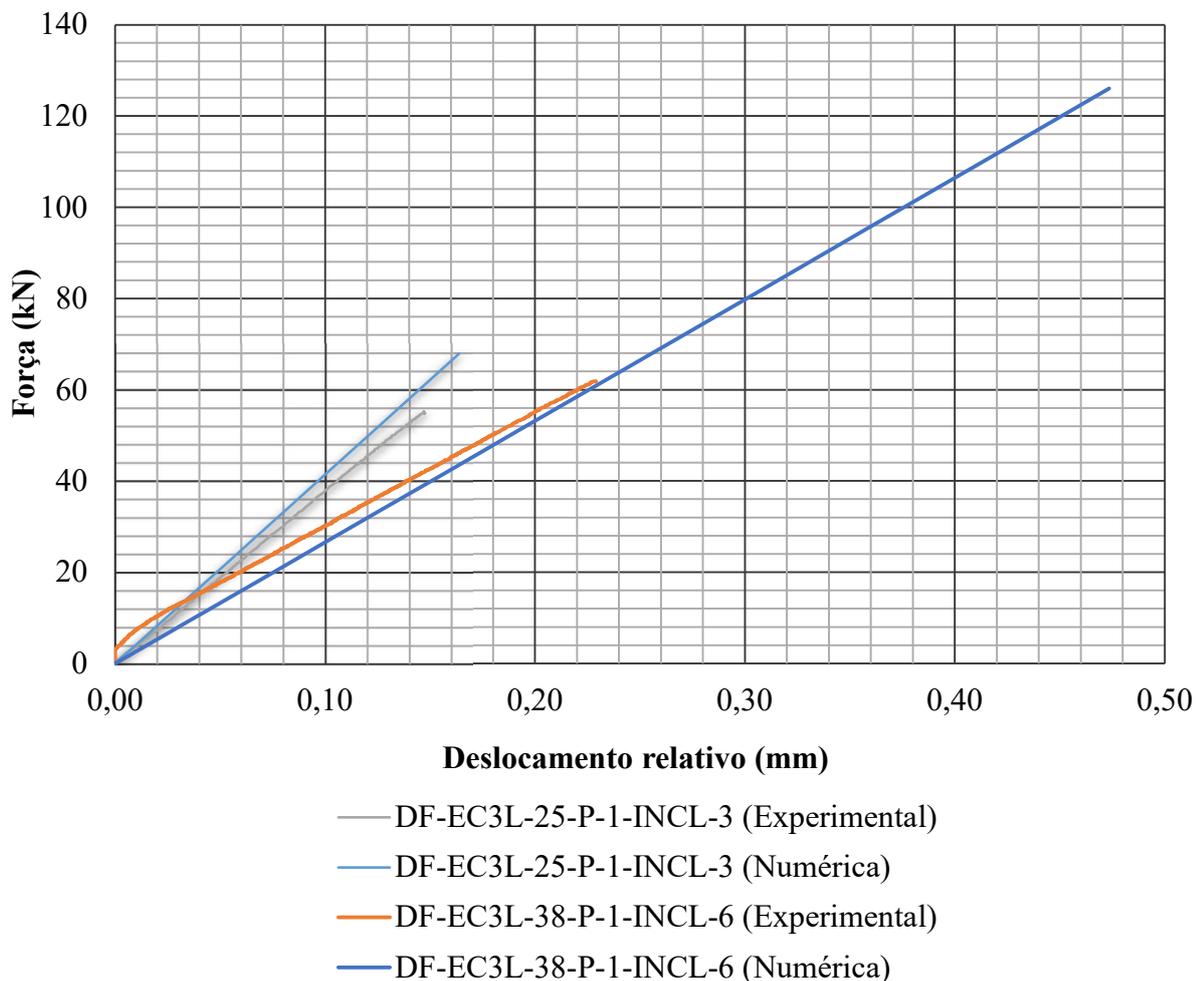
Os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi obtido graficamente pelas curvas numéricas, as quais são apresentadas na Figura 162, para o Marupá, e na Figura 163, para o Piquiá, juntamente com as curvas experimentais de cada um dos ensaios.

Figura 162-Curvas experimentais x numéricas para os corpos de prova de Marupá do ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

Figura 163-Curvas experimentais x numéricas para os corpos de prova de Piquiá do ensaio de cisalhamento inclinado



Fonte: A Autora

Os valores numéricos do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e os experimentais são apresentadas na Tabela 26, em MPa, juntamente com a variação encontrada entre eles, em porcentagem (%).

Tabela 26-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear*, em MPa, experimental x numérico obtidos do modelo numérico do ensaio de cisalhamento inclinado

Corpo de prova	G_{vt} (MPa) ⁽¹⁾	G_{vt} (MPa) ⁽²⁾	Variação(%)
DF-EC3L-25-M-4-INCL-3	123	118	4
DF-EC3L-38-M-4-INCL-5	143	138	4
DF-EC3L-25-P-1-INCL-3	516	460	12
DF-EC3L-38-P-1-INCL-6	336	304	10

⁽¹⁾ Numérico

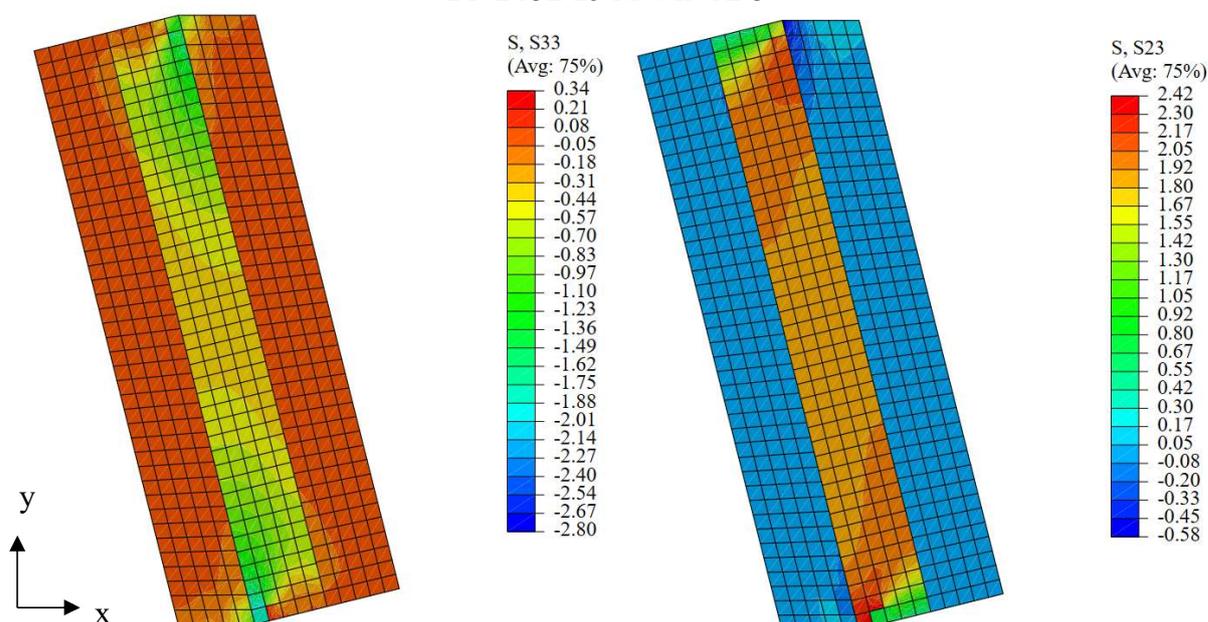
⁽²⁾ Experimental

Fonte: A Autora

Em relação aos módulos de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) pode-se comentar que os valores foram bem próximos sendo que a maior variação foi de 12% para o DF-EC3L-25-P-1-INCL-3.

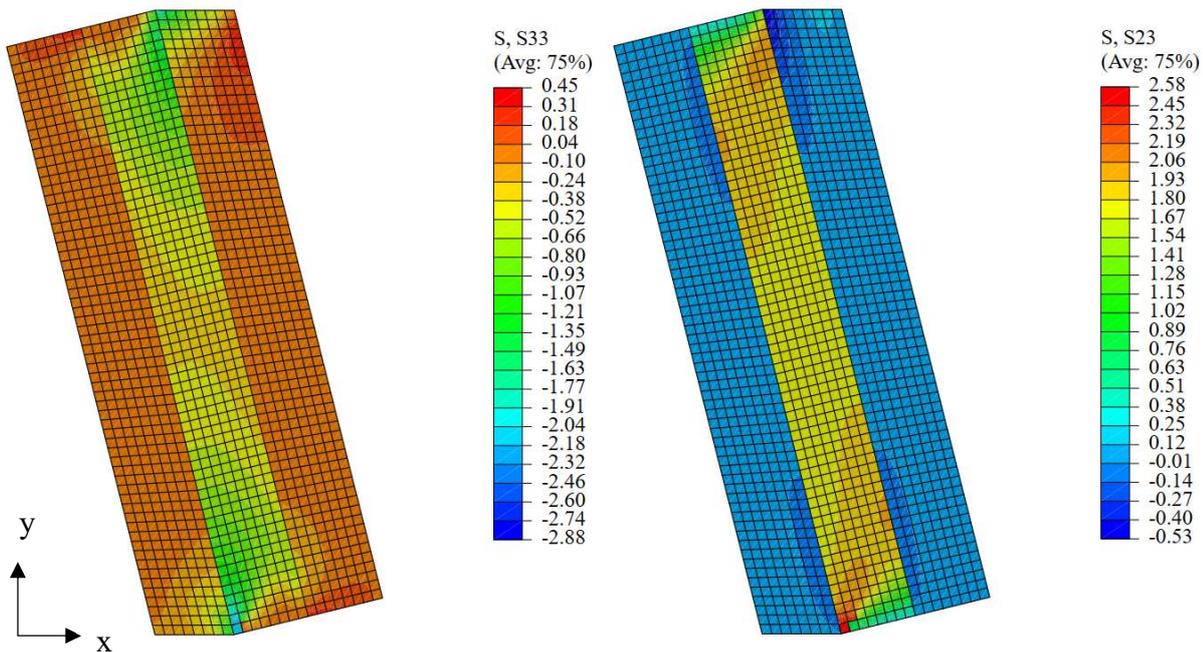
A distribuição das tensões normais (S_{33}), na direção perpendicular às fibras e as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para os corpos de prova da espécie Marupá, com espessuras de 75 mm e 114 mm é ilustrada na Figura 164 e na Figura 165, respectivamente.

Figura 164-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-M-4-INCL-3



Fonte: A Autora

Figura 165-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-M-4-INCL-5



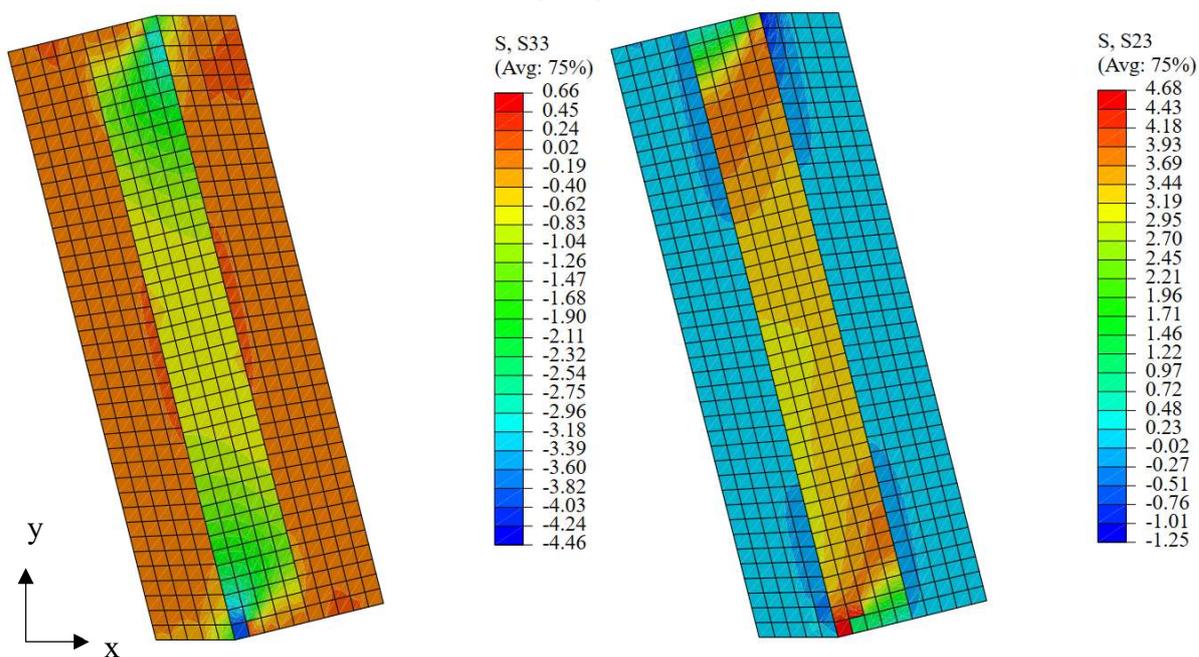
Fonte: A Autora

A distribuição das tensões normais perpendiculares às fibras (S_{33}) ocorreu devido à solicitação de compressão perpendicular. Para o corpo de prova com 25 mm de espessura, na região central, elas variaram de 0,31 MPa a 0,57 MPa, enquanto para aqueles com camada interna de 38 mm, elas variaram entre 0,24 MPa e 0,52 MPa.

Em relação a distribuição das tensões de cisalhamento no plano-radial tangencial (S_{23}), das camadas internas das peças, ela foi semelhante ao apresentado pelos elementos submetidos ao ensaio de cisalhamento reto. Elas foram distribuídas na região central do corpo de prova com valores entre 1,80 MPa e 1,92 MPa, para aqueles com camadas de 25 mm e entre 1,67 MPa e 2,06 MPa, para os corpos de prova de 38 mm.

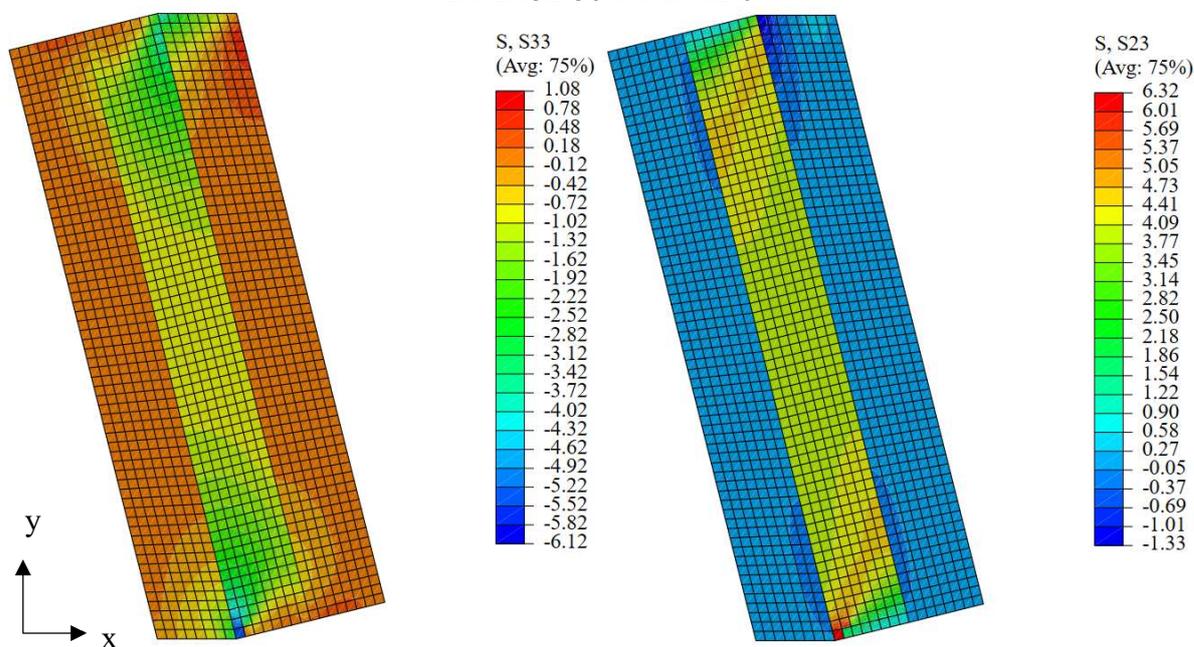
A distribuição das tensões normais (S_{33}), na direção perpendicular às fibras, e as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para as amostras de Piquiá, com espessuras de 75 mm e 114 mm é ilustrada na Figura 166 e na Figura 167, respectivamente.

Figura 166-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-25-P-1-INCL-3



Fonte: A Autora

Figura 167-Distribuição das tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento do DF-EC3L-38-P-1-INCL-5



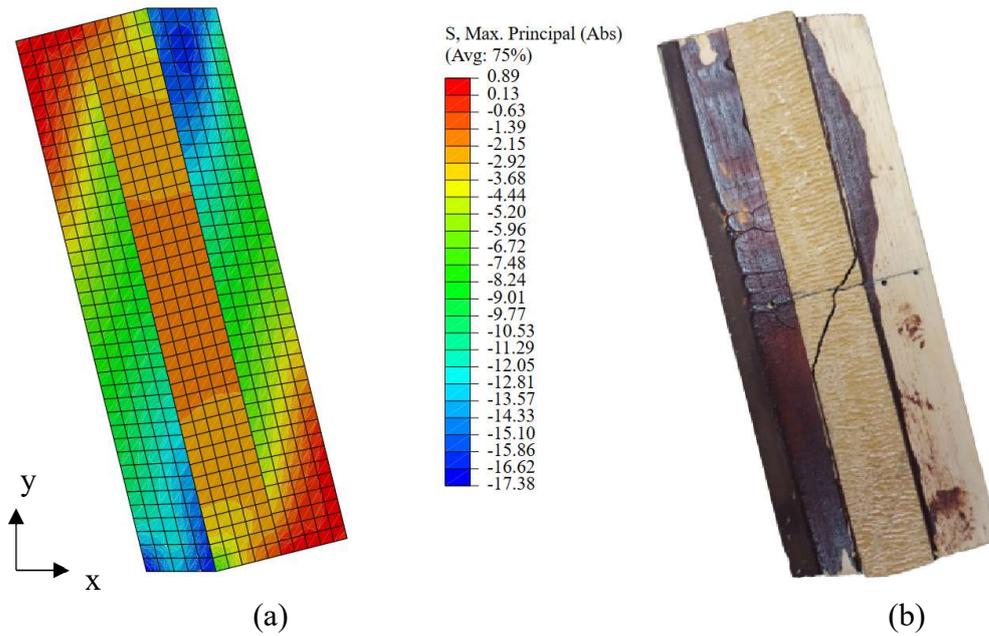
Fonte: A Autora

As tensões normais (S_{33}) ocorreram devido à compressão perpendicular, para os corpos de prova com camada interna de 25 mm, foram entre 0,62 e 0,83 MPa, enquanto as de cisalhamento (S_{23}) foram entre 2,95 MPa e 3,44 MPa. Para os com camada interna de 38 mm,

as tensões normais (S_{33}) na região central variaram entre 0,72 MPa e 1,02 MPa e as tensões devido ao cisalhamento (S_{23}) entre 3,77 MPa e 4,09 MPa.

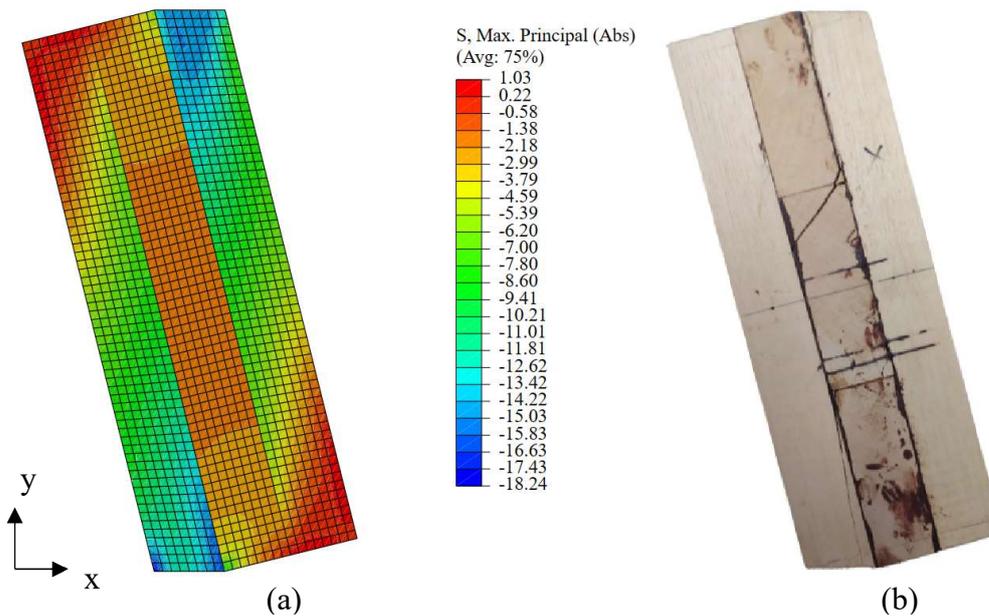
Os valores máximos absolutos das tensões na camada central dos corpos de prova ($S_{MÁX}$) em MPa e o modo de ruptura, para o Marupá, são ilustrados na Figura 168 e Figura 169, para as camadas centrais com 25 mm e 38 mm de espessura, respectivamente.

Figura 168-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-M-4-INCL-3



Fonte: A Autora

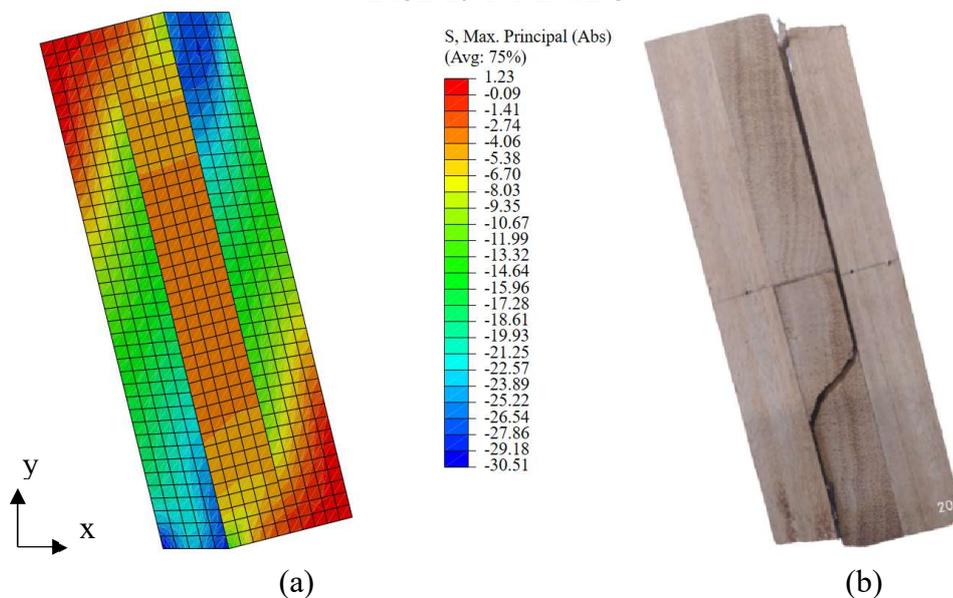
Figura 169-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-M-4-INCL-5



Fonte: A Autora

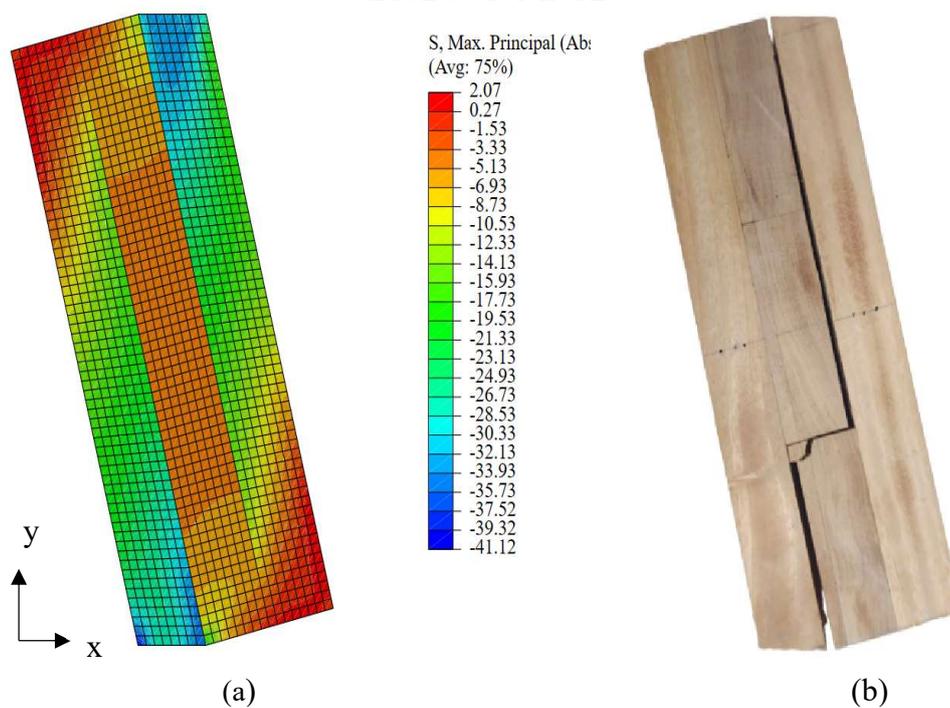
Os valores máximos absolutos das tensões ($S_{MÁX}$) na camada central dos corpos de prova em MPa o modo de ruptura, para o Piquiá, são ilustrados na Figura 170 e Figura 171, para as camadas centrais com 25 mm e 38 mm de espessura, respectivamente.

Figura 170-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-25-P-1-INCL-3



Fonte: A Autora

Figura 171-Diagrama de tensões em MPa (a) Tensão máxima absoluta e (b) Ruptura real do DF-EC3L-38-P-1-INCL-6



Fonte: A Autora

De acordo com os dados apresentados, para os corpos de prova de Marupá, a tensão máxima principal ($S_{MÁX}$) para o de 75 mm de espessura variou entre 1,39 MPa e 2,15 MPa, e para aquele com 114 mm de espessura, variou entre 1,38 MPa e 2,18 MPa. Dessa forma, pode-se concluir que o intervalo das tensões numéricas corresponderam aos valores experimentais, uma vez que as resistências experimentais (f_{vt}) que foram de 1,88 MPa e 1,75 MPa, para as amostras com camada interna de 25 mm e 38 mm, respectivamente.

Para o de Piquiá, a tensão máxima principal ($S_{MÁX}$) variou entre 2,74 MPa e 4,06 MPa, para aqueles com largura de 75 mm, e entre 3,33 MPa e 5,13 MPa, para os com largura de 114 mm, região de ruptura. Os intervalos das tensões numéricas corresponderam às resistências últimas obtidas nos ensaios de cisalhamento, que foram iguais a 3,84 MPa e 4,07 MPa, para os de 75 mm e 114 mm, respectivamente.

Na Tabela 27, é apresentado o comparativo entre as resistências experimentais (f_{vt}), o intervalo das tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) e o intervalo das tensões máximas ($S_{MÁX}$), ambas localizadas na região da camada central.

Tabela 27-Comparativo entre os diagramas de tensões normais, *rolling shear* e máximas em MPa para os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento inclinado

Corpo de prova	f_{vt} (MPa)	S_{33} (MPa)	S_{23} (MPa)	$S_{MÁX}$ (MPa)
DF-EC3L-25-M-4-INCL-3	1,88	0,31-0,57	1,80-1,92	1,39-2,15
DF-EC3L-38-M-4-INCL-5	1,75	0,24-0,52	1,67-2,06	1,38-2,18
DF-EC3L-25-P-1-INCL-3	3,84	0,62-0,83	2,95-3,44	2,74-4,06
DF-EC3L-38-P-1-INCL-5	4,07	0,72-1,02	3,77-4,09	3,84-4,07

Fonte: A Autora

De acordo com os resultados apresentados, os diagramas de tensões normais (S_{33}) apresentaram nível baixo de tensões quando comparados ao nível das tensões de cisalhamento (S_{23}). Dessa forma, pode-se concluir que a ruptura ocorreu por um estado combinado de tensões, o qual é formado por tensões normais de compressão perpendiculares às fibras (S_{33}) e tensões de cisalhamento perpendicular às fibras (S_{23}), no plano radial-tangencial (RT), as quais também podem ser nomeadas por *rolling shear*. Além disso, foi possível observar que a contribuição do cisalhamento foi maior do que a contribuição das tensões normais, uma vez que os valores das tensões de cisalhamento e de ruptura são bastante próximos, no entanto, não caracteriza a ruptura por cisalhamento puro, independentemente do ensaio de cisalhamento (reto e inclinado).

Ao comparar os resultados de ambos os métodos de ensaios, notou-se que o ensaio de cisalhamento reto possuiu influência maior das tensões normais (S_{33}) na ruptura, sendo que, em pesquisas anteriores, ele foi até mesmo desprezado devido a sua pequena contribuição. Desse modo, o ensaio de cisalhamento inclinado é o que mais se aproxima do estado de tensões de cisalhamento puro. A variação entre os resultados numéricos e os experimentais foi menor para os resultados obtidos pelo método de ensaio de cisalhamento inclinado, sendo em torno de 12%, para o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) e em relação a resistência (f_{vt}) em torno de 26%.

Em relação aos resultados numéricos, para o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), pode-se comentar que os valores foram bastante próximos, o que indica que o modelo foi adequado para representar o comportamento dos corpos de prova de MLCC submetidos aos ensaios de cisalhamento.

4.4.2 Ensaios de flexão

Os modelos numéricos dos ensaios de flexão foram calibrados por meio da alteração do módulo de elasticidade transversal no plano radial-tangencial (G_{23}), das camadas transversais, cujo valores são apresentados na terceira coluna da Tabela 28.

Tabela 28-Módulo de elasticidade transversal *rolling shear* em MPa usados na simulação do ensaio de flexão

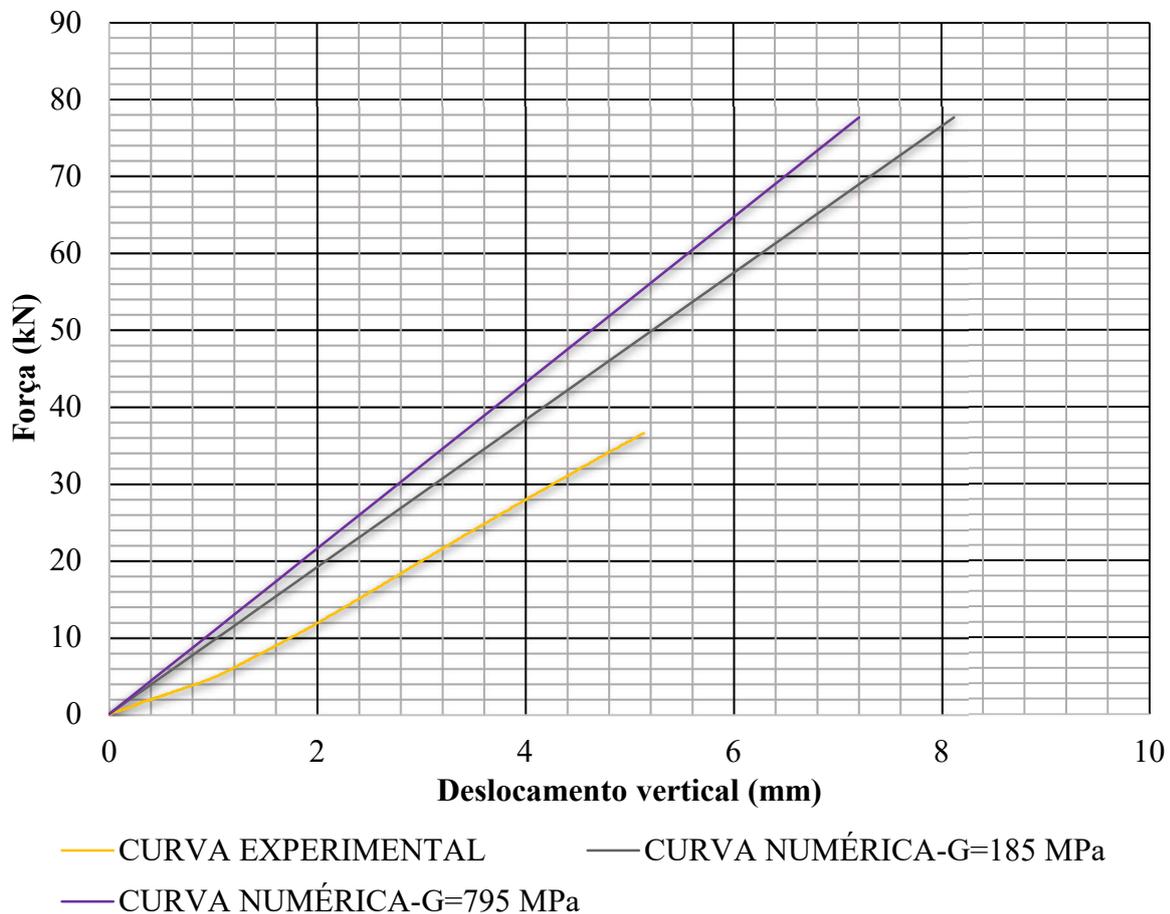
Nome	Camada	G_{vt} (MPa)	G_{vt} (MPa)	G_{23} (MPa)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	Longitudinal	72		
	Transversal	185 ⁽¹⁾	795 ⁽²⁾	185 ⁽³⁾
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	Longitudinal	67		
	Transversal	185 ⁽¹⁾	537 ⁽²⁾	45 ⁽³⁾
DF-FLEX-25-P-2-330-2	Longitudinal	125		
	Transversal	367 ⁽¹⁾	1418 ⁽²⁾	230 ⁽³⁾
DF-FLEX-25-P-2-110-3	Longitudinal	153		
	Transversal	367 ⁽¹⁾	260 ⁽²⁾	70 ⁽³⁾

⁽¹⁾Obtido nos ensaios de cisalhamento, ⁽²⁾ Determinado nos ensaios de flexão, ⁽³⁾ Valor que calibrou a curva

Fonte: A Autora

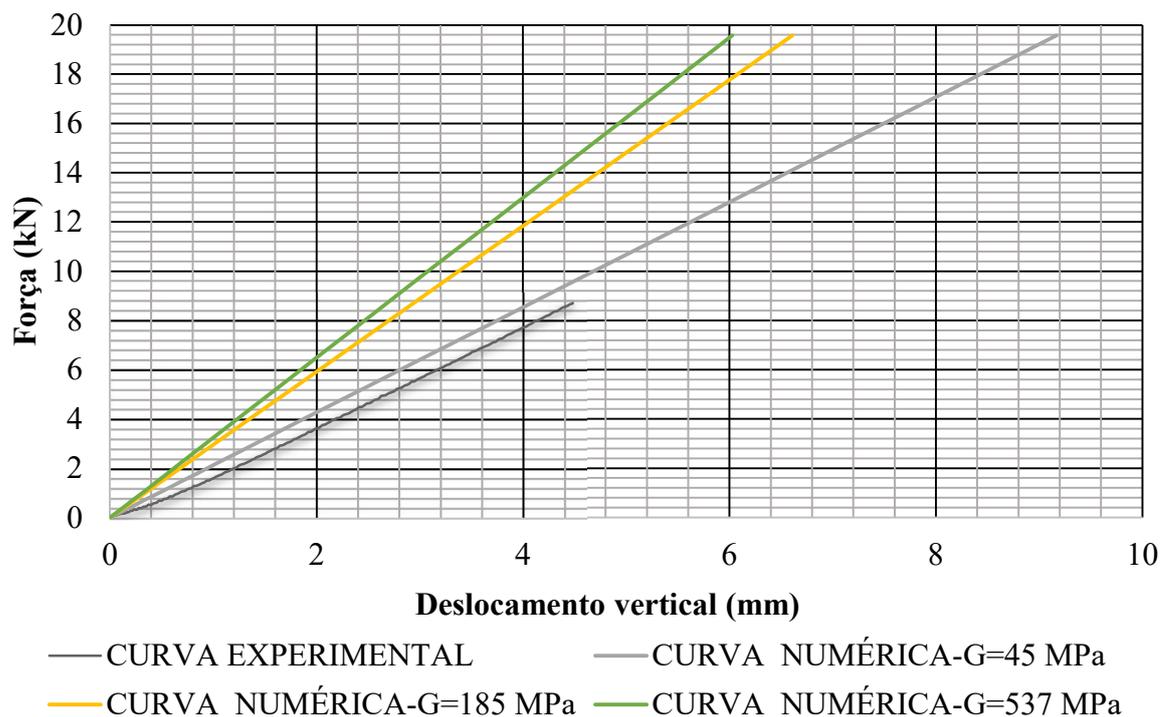
A peça de Marupá, com largura de 330 mm, teve a curva numérica aproximada da experimental quando o valor adotado para o módulo foi igual a média dos obtidos nos ensaios de cisalhamento. Para aqueles com 110 mm de largura, a curva numérica foi calibrada pelo módulo de elasticidade transversal (G_{23}) quatro vezes menor que a média dos obtidos nos ensaios de cisalhamento. Quanto aos elementos de Piquiá, as curvas numéricas foram calibradas quando o módulo de elasticidade transversal (G_{23}) adotado foi menor ao do ensaio de cisalhamento, com redução de 60% e 80%, aproximadamente, para aqueles com largura de 330 mm e 110 mm, respectivamente. As curvas numéricas calibradas são ilustradas na Figura 172, Figura 173, Figura 174 e na Figura 175, para cada um dos elementos escolhidos.

Figura 172-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-M-6/7-330-1



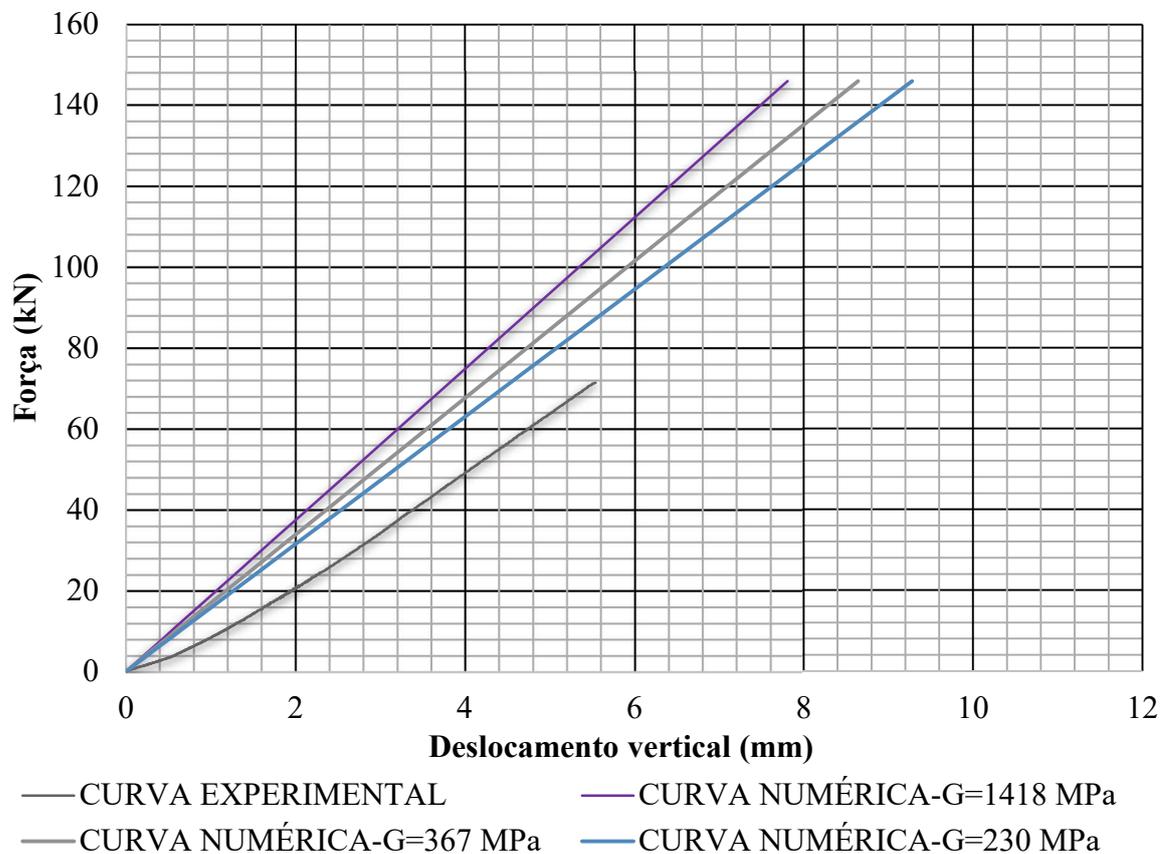
Fonte: A Autora

Figura 173-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-M-6/7-110-1



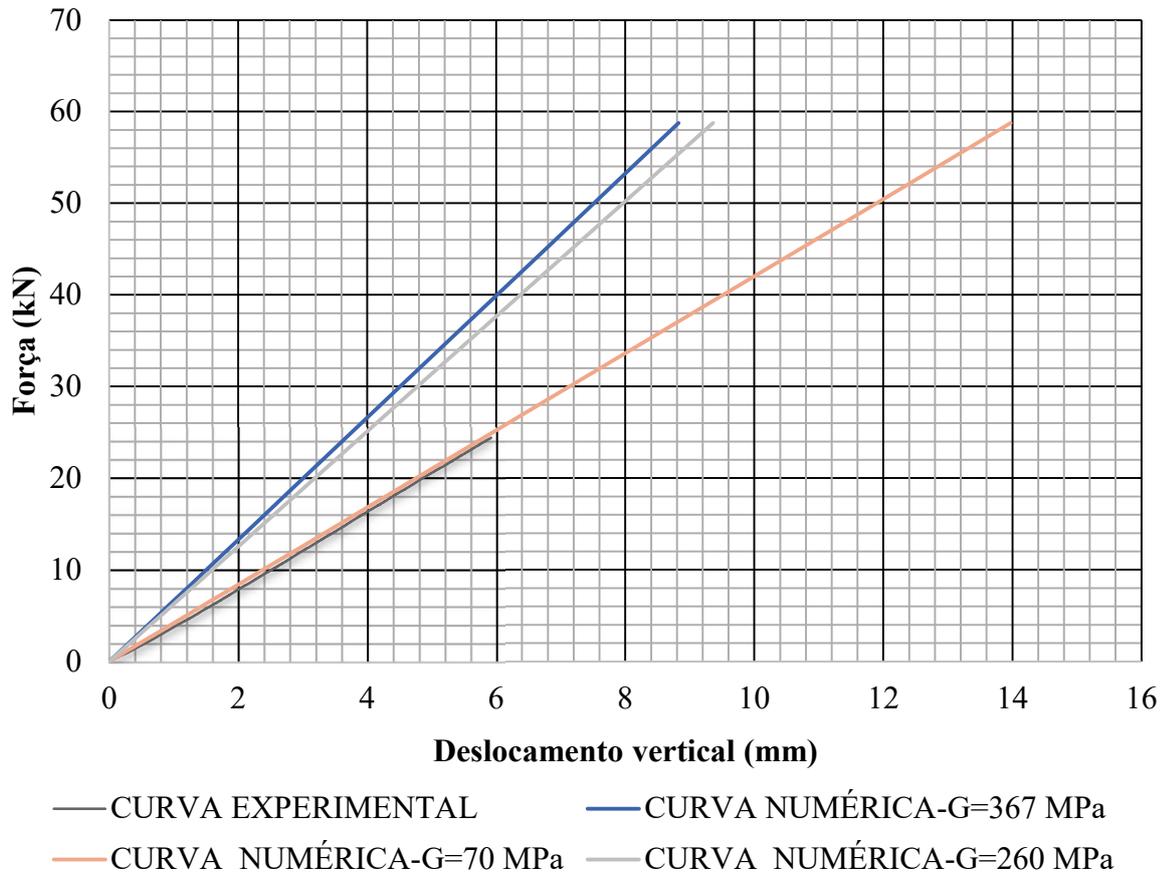
Fonte: A Autora

Figura 174-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-P-2-330-2



Fonte: A Autora

Figura 175-Curva experimental x curvas numéricas do corpo de prova DF-FLEX-25-P-2-110-3

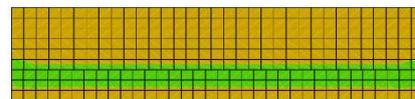


Fonte: A Autora

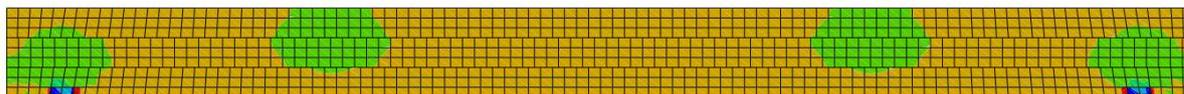
Como descrito anteriormente, foram usados três módulos de elasticidade transversal no plano radial-tangencial (RT), nas camadas transversais, o módulo de elasticidade médio dado pelos ensaios de cisalhamento, o obtido pelos ensaios de flexão e/ou o que calibrou o modelo, ou seja, que aproximou a curva numérica e a experimental. Após análise dos modelos, notou-se que a distribuição das tensões normais e de cisalhamento foram bastante parecidas e assim sendo, para efeito de comparação, foi adotada a distribuição de tensões dos modelos numéricos que tiveram a curva mais próxima da experimental. A distribuição das tensões normais na direção perpendicular às fibras (S_{22}) e as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para os corpos de prova da espécie Marupá, com larguras de 330 mm e 110 mm é ilustrada na Figura 176 e na Figura 177, respectivamente.

Figura 176-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-M-6/7-330-1

S, S22
(Avg: 75%)
3.41
1.52
-0.37
-2.26
-4.15
-6.04
-7.94



(a) Vista Lateral



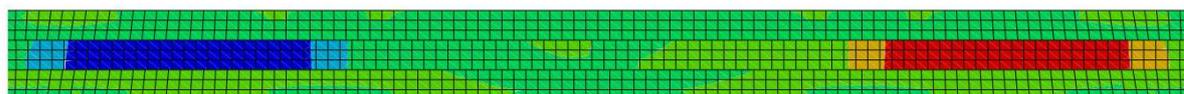
y
x

(a) Vista Frontal

S, S23
(Avg: 75%)
2.17
1.45
0.72
0.00
-0.72
-1.45
-2.17



(b) Vista Lateral



y
x

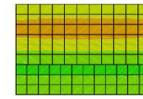
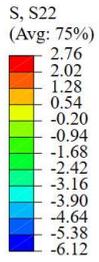
(b) Vista Frontal



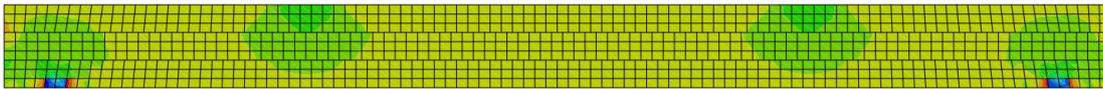
(c) Modo de Ruptura

Fonte: A Autora

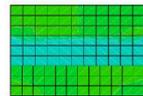
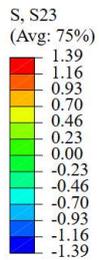
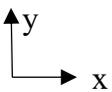
Figura 177-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-M-6/7-110-1



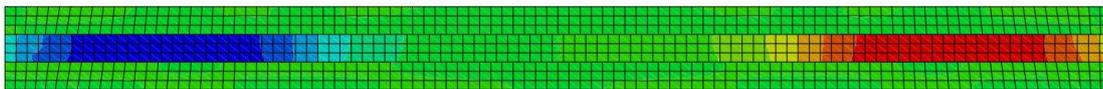
(a) Vista Lateral



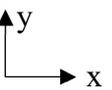
(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral



(b) Vista Frontal



(c) Modo de Ruptura

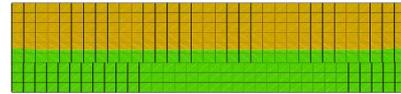
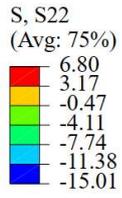
Fonte: A Autora

Em relação ao digrama de tensões normais na direção perpendicular às fibras (S_{22}) as quais ocorrem devido à tração, ocorreu concentração de tensões próximas aos apoios, região em que elas foram máximas, em ambas as larguras. Para os elementos com 330 mm, as tensões variaram de 0,37 MPa a 2,26 MPa, enquanto para aqueles com largura de 110 mm, as tensões

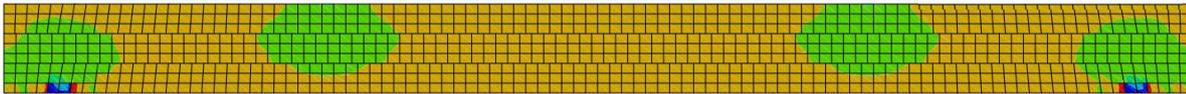
tiveram amplitude maior e variaram de 0,20 MPa a 3,16 MPa. Na região em que ocorreu a ruptura, as tensões normais de tração foram de 1,52 MPa e 1,21 MPa, para as peças de 330 mm e 110 mm, respectivamente. Quanto as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), elas variaram de 0 a 2,17 MPa e de 0 a 1,63 MPa, para os elementos com 330 mm e 110 mm de largura. Na região de ruptura, as tensões de cisalhamento (S_{23}) foram máximas e de 2,17 MPa e 1,63 MPa. Quanto ao modo de ruptura, o diagrama obtido pelo modelo numérico foi bastante parecido com o a ruptura real, sendo que possivelmente ela ocorreu por *rolling shear*, uma vez que o nível de tensões normais devido à tração foi baixo em relação à resistência média à tração normal das fibras ($f_{t90,med}$) das peças de madeira, que conforme a caracterização prévia foi de 2,5 MPa, para as peças seis e sete. Entretanto, de acordo com a caracterização prévia, a resistência média ao *rolling shear* ($f_{vt,med}$), para as peças usadas na fabricação dos corpos de prova, foi de 4,88 MPa, o qual é superior ao valor da resistência à tração perpendicular ($f_{t90,med}$), indicando a possibilidade da ocorrência da ruptura por tração perpendicular às fibras.

A distribuição das tensões normais, na direção perpendicular às fibras (S_{22}), e as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}), em MPa, para os da espécie Piquiá, com larguras de 330 mm e 110 mm é ilustrada na Figura 178 e Figura 179, respectivamente.

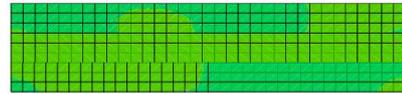
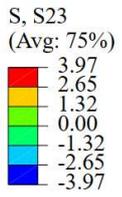
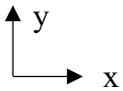
Figura 178-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-P-2-330-2



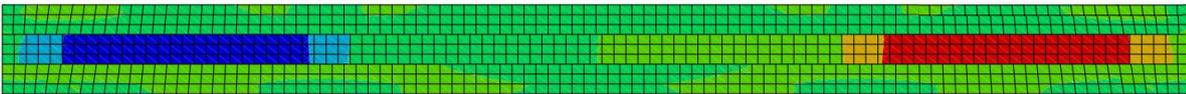
(a) Vista Lateral



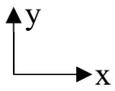
(a) Vista Frontal



(b) Vista Lateral



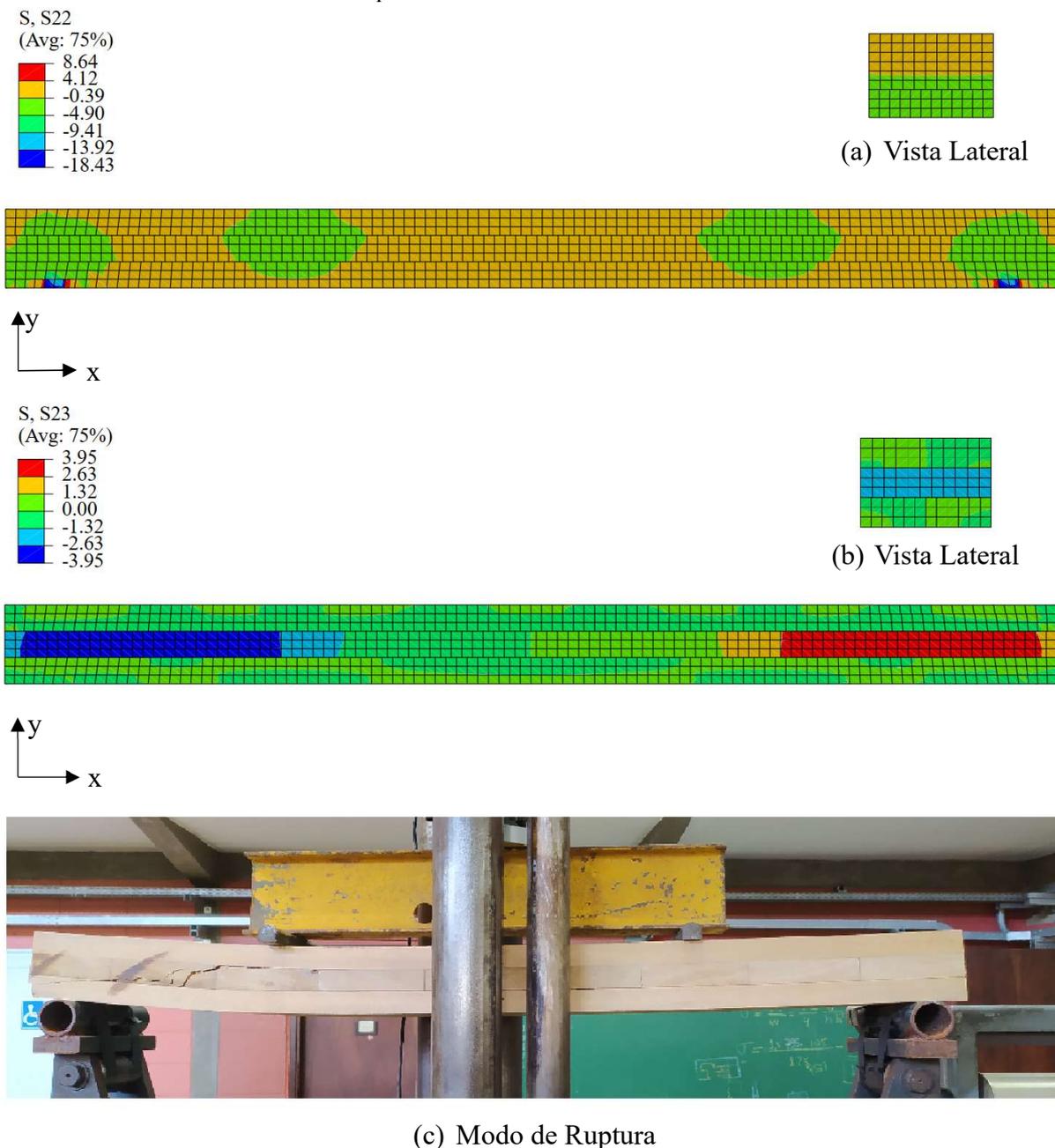
(b) Vista Frontal



(c) Modos de Ruptura

Fonte: A Autora

Figura 179-Diagramas de tensões em MPa (a) Tensões normais e (b) Tensões de cisalhamento e (c) Ruptura do DF-FLEX-25-P-2-110-3



Fonte: A Autora

A distribuição das tensões normais (S_{22}) e de cisalhamento (S_{23}) foram semelhantes às peças de Marupá, uma vez que ocorreu concentração das tensões normais próximas ao apoio, aos pontos de aplicação da força e concentração das tensões de cisalhamento na vista frontal da peça. Em relação à ruptura, ela aconteceu em duas regiões, na vista frontal do painel, próxima aos apoios e lateralmente, ao longo da região inferior da seção, a qual foi semelhante ao modo de ruptura apresentado pelo modelo numérico.

As tensões normais (S_{22}) variaram de 0,47 MPa a 4,11 MPa, desconsiderando-se os pontos de concentração de tensão, para os elementos com 330 mm de largura e variaram de 0,39 MPa a 4,90 MPa, para as peças com largura de 110 mm. As tensões normais (S_{22}) na região de ruptura na vista frontal ocorreram por tração perpendicular às fibras e foram iguais a 3,17 MPa e 4,12 MPa, para aqueles com 330 mm e 110 mm de largura, respectivamente. As tensões de cisalhamento (S_{23}) variaram de 0 a 3,97 MPa e de 0 a 3,95 MPa, para as peças de 330 mm e de 110 mm de largura, respectivamente. Na região de ruptura, as tensões de cisalhamento no plano radial-tangencial (S_{23}) foram iguais aos valores máximos apresentados pelos diagramas (3,97 MPa e 3,95 MPa).

Conforme comentado anteriormente, a ruptura obtida pela simulação numérica e a real ocorrem na mesma região, sendo que possível ela deve ter ocorrido por *rolling shear* ou por tração perpendicular às fibras, uma vez que o nível de tensões normais devido à tração ao qual a camada transversal foi submetida foi maior do que a resistência média obtida na caracterização prévia ($f_{t90,med}$), que foi igual a 3,90 MPa, para as peças dois, três, quatro e cinco. Ainda, de acordo com a caracterização prévia em corpos de prova isentos de defeitos, a resistência média ao cisalhamento *rolling shear* ($f_{vt,med}$) foi de 8,92 MPa, foi maior que média da resistência a tração perpendicular ($f_{t0,med}$).

Para efeito de comparação, foi adotada a tensão de cisalhamento no plano radial-tangencial (RT), uma vez que foi o que mais se aproximou da resistência última do painel de MLCC. Os valores das propriedades *rolling shear* numéricas e experimentais são apresentadas na Tabela 29, em MPa, juntamente com a variação encontrada entre elas, em %.

Tabela 29-Resistência ao *rolling shear* em MPa (f_{vt}) experimental x numérica obtidas nos ensaios de flexão

Nome	f_{vt} (Experimental)	f_{vt} (Numérico)	Variação (%)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	2,08	2,17	4
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	1,57	1,39	13
DF-FLEX-25-P-2-330-2	3,91	3,97	2
DF-FLEX-25-P-2-110-3	4,72	3,95	20

Fonte: A Autora

De acordo com os dados apresentados, o corpo de prova que apresentou maior variação entre o modelo numérico e o experimental, quanto a resistência (f_{vt}), foi o DF-FLEX-25-P-2-110-3 com variação de 20%, enquanto o que apresentou menor variação foi a peça de Piquiá, com largura de 330 mm e variação de 2%. Quanto aos modelos numéricos desenvolvidos, os

resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}), as curvas experimentais e o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos foram próximos aos valores experimentais.

4.5 VERIFICAÇÃO ANALÍTICA DOS MODELOS DE CÁLCULO

As rigidezes efetivas à flexão foram calculadas pelo Método Gama e de Analogia de Cisalhamento, as quais são apresentadas na Tabela 30.

Tabela 30-Rigidezes analíticas à flexão em N.mm² calculadas por Analogia do Cisalhamento

Nome	E_M (MPa)	E_{c90} (MPa)	G (MPa)	$(EI)_{ef, analogia}$ (N.mm ²)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	11540	456	721	$1,29 \cdot 10^{11}$
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	11701	507	731	$1,34 \cdot 10^{11}$
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	10635	507	731	$4,05 \cdot 10^{10}$
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	12140	507	731	$4,62 \cdot 10^{10}$
DF-FLEX-25-P-2-330-2	20083	746	1255	$2,29 \cdot 10^{11}$
DF-FLEX-25-P-2-110-1	19379	746	1211	$7,36 \cdot 10^{10}$
DF-FLEX-25-P-2-110-2	16406	746	1025	$6,25 \cdot 10^{10}$
DF-FLEX-25-P-2-110-3	24463	746	1529	$9,25 \cdot 10^{10}$

Fonte: A Autora

Tabela 31-Rigidezes analíticas à flexão em N.mm² calculadas pelo Método Gama

Nome	$G_{vt}^{(1)}$ (MPa)	$(EI)_{ef, Gama1}^{(1)}$ (N.mm ²)	$G_{vt}^{(2)}$ (MPa)	$(EI)_{ef, Gama2}^{(2)}$ (N.mm ²)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	185	9,06.10 ¹⁰	795	1,17.10 ¹¹
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	185	9,15.10 ¹⁰	424	1,10.10 ¹¹
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	185	2,85.10 ¹⁰	537	3,48.10 ¹⁰
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	185	3,13.10 ¹⁰	185	2,51.10 ¹⁰
DF-FLEX-25-P-2-330-2	367	1,63.10 ¹¹	99	2,04.10 ¹¹
DF-FLEX-25-P-2-110-1	367	5,31.10 ¹⁰	367	6,60.10 ¹⁰
DF-FLEX-25-P-2-110-2	367	4,68.10 ¹⁰	1418	5,41.10 ¹⁰
DF-FLEX-25-P-2-110-3	367	6,28.10 ¹⁰	1459	5,60.10 ¹⁰

⁽¹⁾ Adotou-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* igual ao valor médio obtido pelos ensaios de cisalhamento

⁽²⁾ Adotou-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* igual ao valor médio obtido pelos ensaios de flexão

Fonte: A Autora

As rigidezes efetivas ao cisalhamento foram calculadas apenas pelo Método de Analogia de Cisalhamento, as quais são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32-Rigidezes ao cisalhamento em N

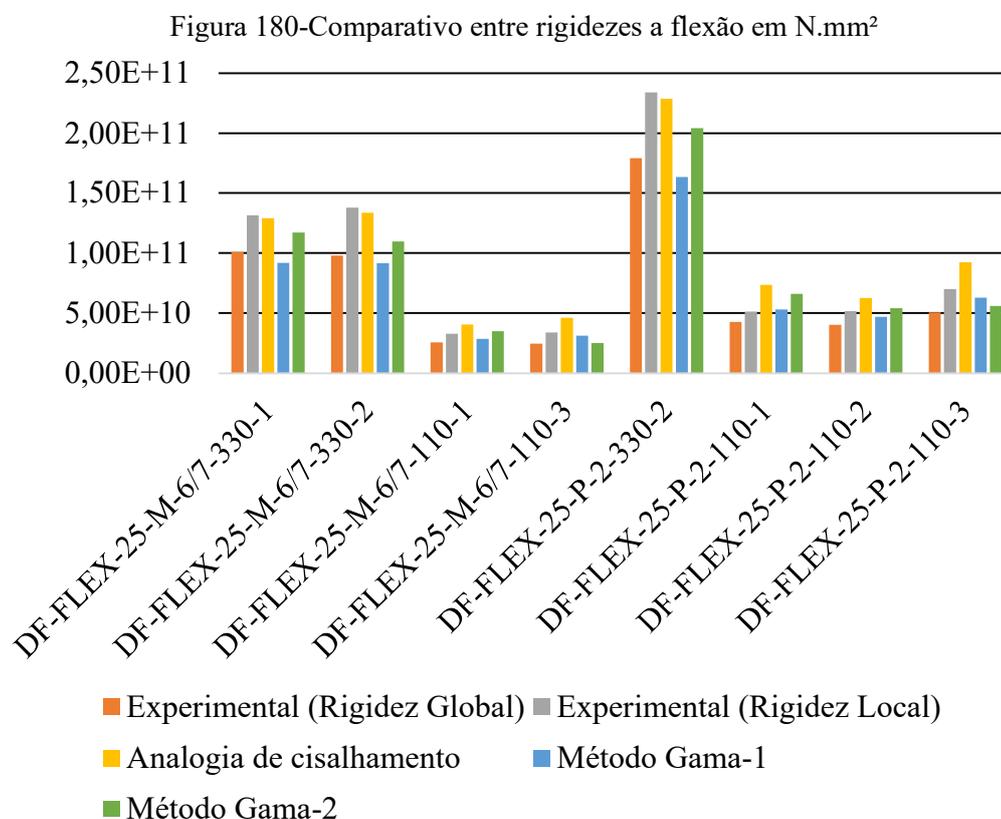
Nome	$G_{vt}^{(1)}$ (MPa)	$(GA)_{ef, analogia1}^{(1)}$ (N)	$G_{vt}^{(2)}$ (MPa)	$(GA)_{ef, analogia2}^{(2)}$ (N)
DF-FLEX-25-M-6/7-330-1	185	1,21.10 ⁶	795	3,12.10 ⁶
DF-FLEX-25-M-6/7-330-2	185	1,22.10 ⁶	424	2,21.10 ⁶
DF-FLEX-25-M-6/7-110-1	185	4,06.10 ⁵	537	8,51.10 ⁵
DF-FLEX-25-M-6/7-110-3	185	4,06.10 ⁵	185	2,40.10 ⁵
DF-FLEX-25-P-2-330-2	367	2,34.10 ⁶	99	5,49.10 ⁶
DF-FLEX-25-P-2-110-1	367	7,75.10 ⁵	367	1,82.10 ⁶
DF-FLEX-25-P-2-110-2	367	7,43.10 ⁵	1418	1,30.10 ⁶
DF-FLEX-25-P-2-110-3	367	8,14.10 ⁵	1459	6,11.10 ⁵

⁽¹⁾ Adotando-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* obtido pelos ensaios de cisalhamento

⁽²⁾ Adotou-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* obtido pelos ensaios de flexão

Fonte: A Autora

Os resultados analíticos e experimentais obtidos são apresentados resumidamente na Figura 180 e na Figura 181, das rigidezes à flexão e ao cisalhamento, respectivamente.

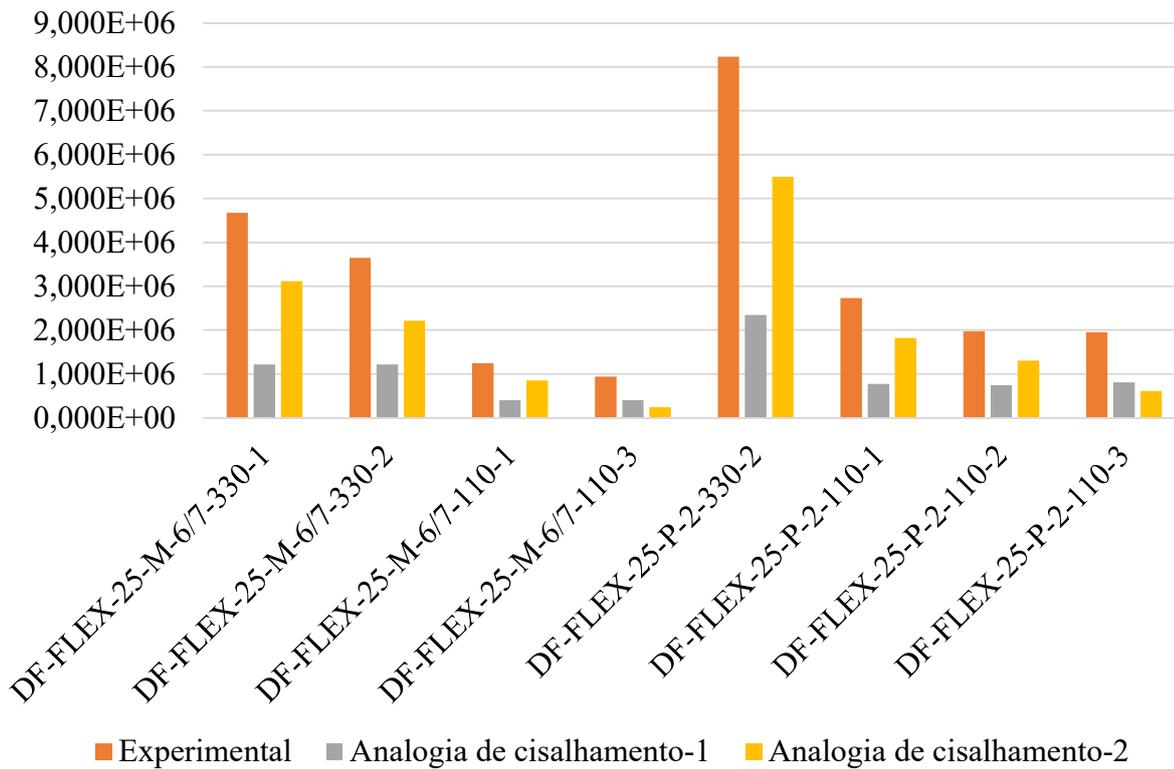


Fonte: A Autora

Ao analisar os dados analíticos, têm-se que a rigidez global foi menor do que a rigidez local e que os elementos com larguras maiores são mais rígidos do que aqueles com 110 mm de largura. Ao se comparar os dados experimentais e os analíticos, ocorre que a rigidez calculada pelo Método de Analogia de Cisalhamento, foi a que mais se aproximou da rigidez local experimental, dessa forma, o valor analítico foi intermediário entre as rigidezes locais e globais experimentais.

Em relação ao Método Gama, o valor calculado considerando o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) igual ao valor médio obtido nos ensaios de cisalhamento foi que o mais se aproximou à rigidez global experimental. A rigidez calculada adotando-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) dos ensaios de flexão resultou em valores maiores. Dessa forma, pode-se concluir que o método mais adequado para estimar a rigidez global a flexão seria o método Gama, adotando-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos nos ensaios de cisalhamento, uma vez que foi o que mais se aproximou do valor experimental.

Figura 181-Comparativo entre rigidezes ao cisalhamento em N



Fonte: A Autora

Em relação as rigidezes ao cisalhamento, ao se comparar os valores experimentais, tem-se que os elementos mais largos são mais rígidos do que os painéis com 110 mm de largura. Além do mais, a rigidez calculada com o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) igual ao valor obtido nos ensaios de flexão, foi a que mais se aproximou do valor experimental. Dessa forma, pode-se concluir que tal método é indicado para a estimativa das rigidezes ao cisalhamento, apesar de que, os valores experimentais foram maiores do que os analíticos.

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve como objetivo estudar as propriedades de resistência (f_{vt}) e rigidez (G_{vt}) de painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) por meio de estudo teórico prévio, ensaios experimentais, análise numérica e analítica.

O estudo teórico foi realizado a respeito dos temas relevantes sobre os painéis de MLCC. Assim sendo, pode-se concluir que os estados limite últimos dos painéis estão diretamente relacionados às propriedades *rolling shear*, as quais são influenciadas pela densidade, orientação dos anéis de crescimento, geometria da lamela e o processo de fabricação das peças. Ainda, observou-se que as espécies utilizadas na fabricação dos elementos atualmente são principalmente de madeira coníferas originadas de florestas nativas, para o caso dos painéis comercializados em outros países, ou de florestas plantadas, o qual é o caso dos painéis comercializados no Brasil. Devido a isso, foi realizado nesse trabalho, o estudo das propriedades *rolling shear* de painéis de MLCC fabricados com madeira de espécies nativas, uma vez que sua quantidade é abundante e com o processo de extração correto, pode se tornar uma fonte renovável de matéria-prima bastante interessante para a indústria. Além disso, as espécies de madeiras nativas possuem propriedades mecânicas melhores do que as coníferas e desse modo, podem ser produzidos painéis de MLCC mais resistentes ou até mesmo painéis mistos formados por camadas transversais de madeira folhosa e longitudinais de madeira conífera a fim de se reduzir os custos em relação a painéis homogêneos fabricados apenas com madeira folhosa e melhorar as propriedades mecânicas dos painéis comercializados atualmente.

Ainda nessa etapa, foi possível verificar a inexistência de uma normalização global a respeito de métodos de ensaios e de projeto e dimensionamento de estruturas utilizando a MLCC, sendo que estão disponíveis apenas normativas a respeito do processo de fabricação e métodos de ensaios aplicadas as quais variam de um país para o outro. No Brasil, utiliza-se a NBR 7190-7:2022 a qual foi baseada em normas estrangeiras que não são aplicáveis a madeiras nativas brasileiras.

Na etapa experimental, durante o processo de fabricação dos corpos de prova, concluiu-se que as espécies de madeira escolhidas tiveram colagem adequada, indicando-se a sua viabilidade de aplicação para fabricação de painéis de MLCC. Os ensaios experimentais foram realizados em laboratório quanto a caracterização mecânica de amostras formadas apenas por camada transversal e por elementos de MLCC quanto ao *rolling shear*, os quais foram divididos em exploratório e definitivos.

Em relação às resistências ao *rolling shear* (f_{vt}) nos ensaios de cisalhamento, observou-se que as do Marupá variaram entre 2,11 MPa e 3,45 MPa, no caso dos resultados do cisalhamento reto, e de 1,37 MPa a 2,77 MPa para o cisalhamento inclinado. Enquanto as do Piquiá, variaram entre 1,40 MPa e 4,16 MPa, os quais foram determinados pelo ensaio de cisalhamento reto, e de 2,18 MPa e 5,60 MPa para os obtidos no ensaio de cisalhamento inclinado. Assim sendo, pode-se concluir que, para ambos os métodos de ensaios, a resistência (f_{vt}) foi maior para a espécie com maior densidade e ainda foram superiores aos valores estipulados atualmente pelos manuais internacionais para as espécies coníferas, que variam entre 1,0 e 2,0 MPa.

Em relação ao método de ensaio empregado, para as amostras de Marupá, a resistência média (f_{vt}) foi de 2,67 (13%) MPa, para o cisalhamento reto, e de 2,06 (22%) MPa, para o cisalhamento inclinado. Enquanto para as de Piquiá, a média foi de 3,13 (28%) MPa, para o cisalhamento reto, e de 3,68 (24%) MPa, para o ensaio de cisalhamento inclinado. Observou-se que o ensaio de cisalhamento reto gerou o valor maior para o Marupá e o de cisalhamento inclinado para o Piquiá. Assim sendo, o comportamento da resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) em relação aos métodos de ensaio variou de acordo com a espécie.

Em relação à influência da espessura das camadas, notou-se que no caso do Marupá, a resistência média foi de 2,54 (18%) MPa, para espessura de 25 mm, e de 1,90 (23%) MPa, para espessura de 38 mm. No caso do Piquiá, a média foi de 3,02 (30%) MPa, para espessura de 25 mm, e de 3,57 (27%) MPa, para espessura de 38 mm. Desse modo, observou-se que a influência da espessura dos corpos de prova também variou de acordo com a espécie estudada.

Para os ensaios de flexão, a resistência média de 1,76 (13%) MPa e de 3,89 (16%) MPa, para o Marupá e Piquiá, respectivamente. Em comparação aos resultados dos ensaios de cisalhamento, tem-se que a que mais se aproximou aos resultados obtidos nos ensaios de flexão foram as obtidas nos ensaios de cisalhamento inclinado, para ambas as espécies. Dessa forma, pode-se concluir que, o ensaio mais adequado para estimar a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) de painéis de MLCC por meio de amostras menores e ensaios experimentais menos onerosos seria o ensaio de cisalhamento inclinado e não o ensaio de cisalhamento reto, conforme indicado pela norma brasileira.

O módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) apresentou variação maior nos resultados do que os de resistência (f_{vt}), sendo que, não houve correlação entre as duas propriedades. Para o ensaio de cisalhamento das peças formadas por camada transversal, o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) das amostras de Marupá foram de 115 (40%) MPa, enquanto para o ensaio de cisalhamento reto, o módulo foi igual a 315 (39%) MPa

e de 202 MPa (13%), para os corpos de prova com 114 mm e 75 mm de espessura, respectivamente. Para os ensaios de cisalhamento inclinado, o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* foi igual a 136 (12%) e 140 (12%), para os corpos de prova com 75 mm e 114 mm de espessura. Enquanto, para os corpos de prova de Piquiá, os módulos de elasticidade transversal *rolling shear* obtidos nos ensaios de cisalhamento reto, para os painéis com camadas de 25 mm e 38 mm, foram de 475 (145) MPa e de 337 (57%) MPa e para os ensaios de cisalhamento inclinado foram de 347 (47%) MPa e de 370 (22%) MPa, para os corpos de prova com 75 mm e de 114 mm de espessura, respectivamente.

Para ambas as espécies, o módulo de elasticidade transversal foi maior para o ensaio de cisalhamento reto do que para o inclinado, sendo igual a 293 MPa e 387 MPa para o Marupá e Piquiá, respectivamente. Dessa forma, concluiu-se que o método de ensaio influencia bastante no valor do módulo de elasticidade transversal (G_{vt}), sendo que o ensaio de cisalhamento reto gerou valores maiores devido ao atrito lateral entre o corpo-de-prova e as peças de contenção colocadas para manter o corpo de prova na vertical.

Em relação a influência do aumento da espessura da lamela, no geral, o aumento da espessura das camadas resultou na diminuição do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}). Além disso, observou-se que a alteração da espessura impacta tanto na resistência (f_{vt}) quanto no módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}).

Em relação aos ensaios de flexão, os módulos de elasticidade transversal (G_{vt}) obtidos, no geral, foram maiores do que os obtidos nos ensaios de cisalhamento e com maior variabilidade. Além disso, os elementos com larguras maiores tiveram módulos de elasticidade transversal *rolling shear* maiores, sendo que os valores máximos corresponderam às amostras de Piquiá, o qual foi igual ao valor médio de 1439 MPa, evidenciando-se que o ensaio de flexão não gerou valores coerentes de módulo quando comparado aos ensaios de cisalhamento. Além do mais, a determinação do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) foi bastante sensível à variação dos deslocamentos sendo que se sugere o emprego de um método mais preciso para medição, como por exemplo, o método de correlação de imagens digitais (DIC).

Ainda de acordo com os resultados experimentais, pode-se concluir que ocorreram dois modos de ruptura: por *rolling shear* e por separação das camadas ao longo da linha de cola. O tipo de ruptura afetou no valor do módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}), sendo que os corpos de prova com valores menores foram os que romperam por separação das camadas. Quanto as curvas, pode-se concluir que independentemente do ensaio e/ou espécie, elas tiveram comportamento linear para o intervalo estudado.

Em relação a modelagem numérica, concluiu-se que os resultados apresentados foram satisfatórios, uma vez que foram próximos aos obtidos experimentalmente, quanto as propriedades *rolling shear* e que foram coerentes com estudos anteriores. Além disso, ao analisar os diagramas de cores gerados, notou-se que as tensões normais (S_{33}) que ocorreram nos ensaios de cisalhamento foram devido a compressão perpendicular às fibras. Essas tensões foram menores do que as tensões de cisalhamento no plano radial tangencial (S_{23}). Assim sendo, concluiu-se que possivelmente a ruptura tenha ocorrido por *rolling shear*, uma vez que as tensões normais foram bem menores do que a resistência à compressão perpendicular às fibras (f_{c90}) determinada por correlação da resistência a compressão paralela as fibras (f_{c0}), obtida em caracterização prévia. Além disso, as solicitações devido ao *rolling shear* foram próximas aos valores de ruptura dos corpos-de-prova, sendo mais um indicador de que ela tenha ocorrido devido a esse tipo de cisalhamento. Para o caso dos ensaios de flexão, as tensões normais (S_{22}) ocorreram devido a tração perpendicular às fibras cujos valores foram próximos às tensões por cisalhamento no plano radial tangencial (S_{23}). Dessa forma, pode-se concluir que a ruptura pode ter ocorrido por tração normal e/ou por *rolling shear*, sendo que as tensões de cisalhamento foram máximas na região de ruptura apresentada no ensaio experimental.

Além dos assuntos comentados anteriormente, foi realizado a análise analítica da rigidez à flexão e ao cisalhamento, as quais foram calculadas pelo método de analogia de cisalhamento e pelo método Gama. De acordo com os resultados, concluiu-se que ambos os métodos são adequados para a estimativa das rigidezes. A rigidez calculada pelo método de analogia de cisalhamento, foi a que mais se aproximou da rigidez local experimental, enquanto a rigidez calculada pelo método Gama, considerando o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) igual ao valor médio obtido nos ensaios de cisalhamento foi que o mais se aproximou à rigidez global experimental. Dessa forma, conclui-se que o método mais adequado para estimar a rigidez global a flexão seria o método Gama, adotando-se o módulo de elasticidade transversal *rolling shear* (G_{vt}) obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Em relação a realização dos ensaios de ensaio, pode-se comentar que o ensaio de cisalhamento em camadas transversais apresentaram resultados satisfatórios e ruptura típica *por rolling shear*, no entanto foi mais difícil de executar devido à preparação dos corpos de prova, devido à necessidade de serem produzidos individualmente. Além do que, o resultado obtido pelas amostras pode ser diferente do que o obtido pelos painéis disponíveis no mercado, pois a resistência ao *rolling shear* (f_{vt}) é afetada por diversos fatores, como por exemplo, a tensão de prensagem e o tipo de adesivo utilizado. Apesar dos pontos negativos pontuados, ele pode ser

bastante útil para estimar as propriedades *rolling shear* da madeira usada como matéria prima para dos painéis.

Quanto aos ensaios de cisalhamento em elementos de MLCC, concluiu-se que foram mais fáceis de executar do que em lamelas, uma vez que eles foram retirados de elementos lineares prontos e também podem ser retirados de painéis prontos, provenientes da indústria. Entre os dois métodos, o ensaio de cisalhamento reto foi mais difícil de se executar, devido ao fato da necessidade da contenção lateral, e de não existir um dispositivo normatizado indicado para o ensaio. Os ensaios de flexão foram mais onerosos, devido ao tamanho das amostras e o processo de fabricação das amostras. Além disso, conclui-se que eles são adequados apenas para determinação da resistência (f_{vt}) e que o dispositivo de medição utilizado não foi adequado.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se os seguintes temas:

- Desenvolver modelos numéricos considerando-se o efeito do deslizamento entre as camadas do painel, a fim de se estudar a influência do tipo de adesivo utilizado.
- Realizar ensaios experimentais de cisalhamento e de flexão e medir os deslocamentos por meio de correção de imagens digitais (DIC) e comparar os módulos de elasticidade *rolling shear* obtidos com deslocamentos medidos por transdutores lineares de deslocamento (LVDT).
- Realizar a caracterização completa da madeira quanto às propriedades elásticas de entrada para o modelo numérico e comparar os valores obtidos com os de modelos numéricos realizados com as propriedades estimadas.
- Realizar modelo numérico plano e comparar os valores com os modelos numéricos tridimensionais.
- Realizar estudo numérico em relação às dimensões dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento inclinado e verificar qual mais se aproxima dos estados de tensões imposto às camadas transversais de painéis de MLCC submetidos à flexão.
- Modelar os painéis de MLCC à flexão com camadas transversais constituídas de lamela individuais e com colagem lateral dessas peças.
- Desenvolver equação analítica para painéis de MLCC com sete camadas e/ou com espessuras de camadas iguais e diferentes.
- Desenvolver equação analítica para painéis de MLCC de três e cinco camadas com espessuras diferentes.
- Realizar estudo experimental da qualidade da colagem por meio de ensaios de cisalhamento na linha de cola e delaminação para várias combinações de espécies e adesivos.

REFERÊNCIAS

- AICHER, S. DILL-LANGER, G. Basic considerations to *rolling shear* modulus in wooden boards. **Otto Graf Journal**, v. 11, p. 157–166, 2000.
- AICHER, S.; HIRSCH, M.; CHRISTIAN, Z. Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 1007–1018, 15 out. 2016a. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.051>.
- AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; HIRSCH, M. *Rolling shear* modulus and strength of beech wood laminations. **Holzforschung**, v. 70, n. 8, p. 773–781, 24 fev. 2016b. Walter de Gruyter GmbH. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2015-0229>.
- ALEMDAĞ, E. L.; TANDOĞAN, G.; ARTUN, H. **Energy efficiency in cross laminated timber (CLT) buildings**. In: MURAT, Prof. Dr. Architectural Sciences and Technology. Lyon: Livre de Lyon, 2021. p. 247-268. (978-2-38236-136-8).
- ANWAR-US-SAADAT, M. *et al.* Comparative Study on Various Strength Parameters of Structural Elements Made from Cross-Laminated Timber. **Journal Of Renewable Materials**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1575-1606, 2022. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2022.018919>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira-Parte 1: Critérios de dimensionamento. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-2**: Projeto de estruturas de madeira-Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3**: Projeto de estruturas de madeira-Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-4**: Projeto de estruturas de madeira-Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-7**: Projeto de estruturas de madeira-Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 27 p.
- ASSOCIAÇÃO CANADENSE DE NORMALIZAÇÃO. **CSA-O86-01**: Engineering Design in Wood. 8 ed. Ottawa: 2001. 215 p.
- BAHMANZAD, A. *et al.* Shear Properties of Eastern Hemlock with Respect to Fiber Orientation for Use in Cross Laminated Timber. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 7, p. 1-1, Jul. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asci\)mt.1943-5533.0003232](http://dx.doi.org/10.1061/(asci)mt.1943-5533.0003232)

BLASS, H. J.; FELLMOSE, P. Design of solid wood panels with cross layers. **Materials Science**, Karlsruhe, p. 1001-1006, Jan. 2004.

BRANDNER, R. *et al.* Cross laminated timber (CLT): overview and development. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 331–351, 19 Jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.

BRANDNER, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. In: Focus solid timber solutions-**European Conference on cross laminated timber (CLT), 2013**, Graz. Bath: Universidade de Bath, 2013. p. 3-36.

BRANDNER, R. *et al.* **Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber: a state-of-the-art report by cost action fp1402 / wg 2**. Duren e Maastricht: Shaker Verlag, 2018. 481 p.

CALIL JUNIOR, Carlito *et al.* **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.

CALIL JUNIOR, C. *et al.* **Estruturas de Madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CAO, Y. *et al.* Evaluation of the effect of knots on *rolling shear* strength of cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 222, p. 579–587, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.165>.

CHERRY, R. *et al.* Out-of-grade sawn pine: A state-of-the-art review on challenges and new opportunities in cross laminated timber (CLT). **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 858-868, jun. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.293>.

CHRISTOVASILIS, I.P. *et al.* Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 202–213, set. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082>.

COMITÊ AUSTRALIANO E COMITE NEOZELANDÊS DE NORMALIZAÇÃO. **AS/NZS 2269.1: Plywood-Structural: Part 1: Determination of structural properties-Test methods**. 2 ed., 2012. 41 p.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 338: Structural timber-Strength classes**. Bruxelas: 2009. 14 p.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 1995-1: Eurocode 5: Design of timber structures-Part 1-1: General-Common rules and rules for buildings**. Bruxelas: 2004. 124 p.

CORPATAUX, L.; OKUDA, S.; KUA, H. W. Panel and plate properties of Cross-laminated timber (CLT) with tropical fast-growing timber species in compliance with Eurocode 5. **Construction and Building Materials**, v. 261, 20 Nov. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119672>.

CROSSLAM (Brasil). **Cross laminated timber: informações técnicas**. Suzano: 2016. 19 p. Disponível em: <http://crosslam.com.br/home/?q=content/clt-cross-laminated-timber>. Acesso em: 15 abr. 2021.

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**, v. 229, Dez. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116895>.

DAVIDS, W. G. *et al.* Structural performance of hybrid SPFs-LSL cross-laminated timber panels. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 149, p. 156-163, set. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.131>.

DAHL, K. B.; MALO, K. A. Linear shear properties of spruce softwood. **Wood Science and Technology**, v. 43, n. 5–6, p. 499–525, mar. 2009. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-009-0246-5>.

Dassault Systèmes. **Abaqus/CAE User's Manual**. 2011. 1174 p.

DIVEKAR, N. K. Introduction to New Material-Cross Laminated Timber. **International Journal of Engineering Research**. [S.L.], p. 675-679. fev. 2016.

DONG, W. *et al.* Experimental study on bending properties of cross-laminated timber-bamboo composites. **Construction and Building Materials**, v. 300, set. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124313>.

EHRHART, T. *et al.* Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): test configuration and parameter study. **Eth Zurich**, [S.L.], 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3929/ETHZ-A-010548168>.

EHRHART, T.; BRANDNER, R. *Rolling shear*: Test configurations and properties of some European soft-and hardwood species. **Engineering Structures**, v. 172, p. 554-572, out. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.118>.

EMBRAPA (Brasil). Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília: 2008. 597 p. Volume 3.

ETTELAEI, A.; TAOUM, A.; NOLAN, G. *Rolling shear* properties of cross-laminated timber made of fibre-managed plantation eucalyptus under short-span bending. **Wood Material Science and Engineering**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1942201>.

ETTELAEI, A. *et al.* Rolling Shear Properties of Cross-Laminated Timber Made from Australian Plantation Eucalyptus nitens under Planar Shear Test. **Forests**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 84, 7 jan. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/f13010084>.

Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em: 3 Out 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FOA). **Global Forest Resources Assessment 2020**. Roma: 2020.

FRANKE, S. **Mechanical properties of beech CLT**. Viena, Áustria, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312198447>.

GAGNON, S. *et al.* **Chapter 1-Introduction to cross-laminated timber**. In: KARACABEYLI, E.; DOUGLAS, B. *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber (U.S. Edition)*. Pointe-Claire: FPInnovations, 2013. Cap. 1, p. 45. (978-0-86488-553-1).

GARDNER, C. *et al.* The effect of edge gaps on shear strength and *rolling shear* modulus of cross laminated timber panels. **Construction and Building Materials**, v. 259, 30 out. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119710>.

GONG, Y. *et al.* Evaluation of mechanical properties of cross-laminated timber with different lay-ups using Japanese larch. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, n. 10, p. 941–956, 2019. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.07354>.

GRANDMONT, J. *et al.* **Chapter 2-Cross-laminated timber manufacturing**. In: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. *Canadian CLT Handbook*. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 2, p. 45.

GRANDVUINET, T. MUSZYŃSKI, L. Effect of knots and slope of grains on the rolling shear in dimensional timber used in CLT core layers. In: WCTE 2016-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING, 2016, Viena. **WCTE 2016 e-book**. Austria, 2016. p. 1067-1072.

GRANDVUINET, T.; MUSZYŃSKI, L. Effect of knots and related grain deviation on the *rolling shear* in dimension lumber used in cross-laminated timber transverse core layers. **Forest Products Journal**, v. 69, n. 1, p. 81–86, 1 Jan. 2019. Forest Products Society. Disponível em: <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-16-00042>.

GU, M.; PANG, W.; STONER, M. Bending and Rolling shear Capacities of Southern Pine Cross Laminated Timber (CLT). In: WCTE 2016-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING, 2016, Viena. **WCTE 2016 e-book**, p. 1867-1874.

GUI, T. *et al.* Influence of aspect ratio on *rolling shear* properties of fast-grown small diameter eucalyptus lumber. **Journal of Renewable Materials**, v. 8, n. 9, p. 1053–1066, 2020. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2020.011645>.

GUTIERREZ, M. *et al.* Structural Properties of Commercial Australian Plantation Hardwood CLT. **Buildings**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 208, 12 Jan. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13010208>.

HUBBELL, S. P. *et al.* How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct? **Proceedings Of the National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 105, n. 1, p. 11498-11504, 12 ago. 2008. Proceedings of the National Academy of Sciences. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0801915105>.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Informações sobre madeiras: Marupá**. 2023. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=43. Acesso em: 15 maio 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Informações sobre madeiras: Pequiá**. 2023. Disponível em: https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/72-pequia.htm. Acesso em: 15 maio 2023.

I INSTITUTO BRITÂNICO DE NORMALIZAÇÃO. **EN 408**: Timber structures-Structural timber and glued laminated timber-Determination of some physical and mechanical properties. 2010. 40 p.

INSTITUTO BRITÂNICO DE NORMALIZAÇÃO. **EN 789**: Timber structures-Test methods-Determination of mechanical properties of wood-based panels. [S.L.]: 2004. 36 p.

INSTITUTO BRITÂNICO DE NORMALIZAÇÃO. **EN 16351**: Timber structures-Cross laminated timber-Requirements. 2021. 100 p.

INSTITUTO NACIONAL AMERICANO DE NORMALIZAÇÃO. **PRG 320**: Standard for performance-rated Cross-Laminated Timber. 1 ed. Tacoma: APA-The Engineered Wood Association, 2019. 65 p.

HE, M. *et al.* Bending, shear, and compressive properties of three-and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. **Journal of Wood Science**, v. 66, n. 1, 19 Maio 2020. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s10086-020-01886-z>.

HEMATABADI, H. *et al.* Structural performance of hybrid Poplar-Beech cross-laminated-timber (CLT). **Journal of Building Engineering**, v. 44, 1 Dez. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102959>.

HEMATABADI, H. *et al.* Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*). **Construction and Building Materials**, v. 265, 30 Dez. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120326>

HUANG, Z. *et al.* The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending. **Research Square**. 2022. 6 out. 2022. Research Square Platform LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2124951/v1>.

KABOLI, H. *et al.* Feasibility of Two Northeastern Species in Three-Layer ANSI-Approved Cross-Laminated Timber. **Journal Of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 3, mar. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em:

KACARABEYLI, E.; GAGNON, S.; LUM, C. **Chapter 1-Introduction to cross-laminated timber**. In: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. Canadian CLT Handbook. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 1, p. 35.

KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical Properties of Wood**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (Madison). Wood Handbook: wood as an engineering material. 100. ed. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory., 2010. Cap. 5, p. 508.

KUBOJIMA, Y. *et al.* Accuracy of shear properties of wood obtained by simplified Iosipescu shear test. **Journal Of Wood Science**, [S.L.], v. 46, n. 4, p. 279-283, ago. 2000. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/bf00766217>.

KUMAR, C. *et al.* A review of factors influencing *rolling shear* in CLT and test methodology. **Journal of Testing and Evaluation**. v. 50, n. 3, 1 mai. 2022. ASTM International. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1520/jte20210160>.

KURZINSKI, S.; CROVELLA, P.; KREMER, P. Overview of Cross-Laminated Timber (CLT) and Timber Structure Standards Across the World. **Mass Timber Construction Journal**, v. 5, n. 1, p. 1-1, 05 abr. 2022.

LI, H. *et al.* Cross-laminated Timber (CLT) in China: a state-of-the-art. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 22-30, fev. 2019a. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21967/jbb.v4i1.190>.

LI, X. *et al.* Experimental and numerical study on bending properties of heterogeneous lamella layups in cross laminated timber using Australian Radiata Pine. **Construction and Building Materials**, v. 247, 30 jun. 2020b. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020b.118525>.

LI, X. *et al.* Experimental investigation on shear properties of cross laminated timber made from Australian Radiata Pine. In: **WCTE 2020-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING**, 2020c, Santiago.

LI, M. Evaluating *rolling shear* strength properties of cross-laminated timber by short-span bending tests and modified planar shear tests. **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 4, p. 331–337, 1 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-017-1631-6>.

LI, M.; DONG, W.; LIM, H. Influence of Lamination Aspect Ratios and Test Methods on *Rolling shear* Strength Evaluation of Cross-Laminated Timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 12, Dez. 2019b. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002977](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002977).

LI, X. *et al.* *Rolling shear* properties of cross-laminated timber (CLT) made from Australian Radiata Pine – An experimental study. **Structures**, [S.L.], v. 33, p. 423-432, out. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.067>.

LI, Z. *et al.* Shear properties of composite cross-laminated bamboo panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, [S.L.], v. 80, n. 3, p. 635-646, 24 jan. 2022a. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-022-01786-7>.

LI, H. *et al.* Bending and shear performance of cross-laminated timber and glued-laminated timber beams: a comparative investigation. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 45, jan. 2022b. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103477>.

LI, Q. *et al.* Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. **Construction and Building Materials**, v. 261, 20 Nov. 2020a. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120504>.

LIAO, W. *et al.* The shear capacity characterization of cross laminated timber using torsion test and digital image correlation. In: **WCTE 2020-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING**, 2020, Santiago. WCTE 2020. Chile.

LIM, H.; TRIPATHI, S.; LI, M. Rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C). **Construction and Building Materials**, v. 259, 30 out. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120419>.

MA, Y. *et al.* Mechanical Property Evaluation of Hybrid Mixed-Species CLT Panels with Sugar Maple and White Spruce. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 7, Jul. 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003760](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003760).

MENDES, A. P. **Resistência da madeira ao cisalhamento**. 1984. 171 f. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, 1984.

MOHAMMAD, M. *et al.* Introduction to Cross Laminated Timber. **A Journal of Contemporary Wood Engineering**, p. 3–12, 2012. Disponível em: [http://www.forestprod.org/buy_publications/resources/untitled/summer2012/Volume 22, Issue 2 Mohammad.pdf](http://www.forestprod.org/buy_publications/resources/untitled/summer2012/Volume%2022,%20Issue%20Mohammad.pdf).

MÜLLER, U. *et al.* Homogeneous shear stress field of wood in an Arcan shear test configuration measured by means of electronic speckle pattern interferometry: description of the test setup. **Wood Science and Technology**, v. 49, n. 6, p. 1123–1136, 21 Jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-015-0755-3>.

NAVARATNAM, S. *et al.* Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. **Construction and Building Materials**, v. 232, 30 jan. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117215>.

NERO, R.; CHRISTOPHER, P.; NGO, T. Investigation of *rolling shear* properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. **Construction and Building Materials**, v. 316, 17 jan. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125897>.

NIEDERWESTBERG, J. *et al.* Shear properties of innovative multi-layer composite laminated panels. In: **WCTE 2018-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING, 2018a, Seul**.

NIEDERWESTBERG, J. *et al.* Comparison of Theoretical and Laboratory Out-of-Plane Shear Stiffness Values of Cross Laminated Timber Panels. **Buildings**, [S.L.], v. 8, n. 10, p. 146, 22 out. 2018b. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings8100146>.

O'CEALLAIGH, C.; SIKORA, K.; HARTE, A. M. The influence of panel lay-up on the characteristic bending and *rolling shear* strength of CLT. **Buildings**, v. 8, n. 9, p. 114, 21 ago. 2018. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings8090114>.

OLIVEIRA, G. L. **Cross laminated timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho: recomendações para o processo de projeto arquitetônico**. 2018. 194 f. Dissertação (Mestrado)-Curso de Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO 13910: Timber structures-Strength graded timber-Test methods for structural properties**. Genebra: 2013. 25 p.

PENFIELD, P. *et al.* Assessing the adoption of cross laminated timber by architects and structural engineers within the United States. **Journal of Green Building**, v. 17, n. 1, p. 127–147, 1 jan. 2022. College Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3992/jgb.17.1.127>.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

POPOVISKI, M. *et al.* **Chapter 3-Structural Design**. In: KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. *Canadian CLT Handbook*. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Cap. 3, p. 62.

RAHMAN, M. *et al.* Evaluating Timoshenko Method for Analysing CLT under Out-of-Plane Loading. **Buildings**, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 184, 14 out. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings10100184>.

RAHMAN, M. *et al.* Effect of heterogeneity within cross-layer on the performance of cross-laminated timber under out of plane loading. In: **WCTE 2020-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING**, 2020, Santiago. WCTE 2020.

REMADE. **Madeiras Brasileiras e Exóticas: Marupá**. Marupá. 2023. Disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/213/madeiras-brasileiras-e-exoticas/marupa>. Acesso em: 16 maio 2023.

REMADE. **Madeiras Brasileiras e Exóticas: Pequiá**. Pequiá. 2023. Disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/228/madeiras-brasileiras-e-exoticas/pequia>. Acesso em: 16 Maio 2023

ROSS, L. A.; GAGNON, S.; KEITH, E. **Chapter 3-Structural: structural design of cross-laminated timber elements**. In: EROL KARACABEYLI (Canada). *CLT handbook: cross-laminated timber (U.S. Edition)*. Pointe-Claire: set., 2013. Cap. 3, p. 572.

RUAN, G.; XIONG, H.; CHEN, J. Bending and *rolling shear* properties of cross-laminated timber fabricated with Canadian hemlock. **Structural Durability & Health Monitoring**,

[S.L.], v. 13, n. 2, p. 227-246, 2019. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32604/sdhm.2019.04743>.

SANDOLI, A.; CALDERONI, B. The *rolling shear* influence on the out-of-plane behaviour of CLT panels: A comparative analysis. **Buildings**, v. 10, n. 3, p. 42, 3 mar. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings10030042>.

Serviço Florestal Brasileiro (SBF). **Florestas do Brasil em resumo**. Brasília 2019. 207 p. Elaborado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Serviço Florestal Brasileiro (SBF). **Florestas do Brasil em resumo**. Brasília 2009. 122 p. Elaborado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

SCHICKHOFER, G.; BRANDNER, R.; BAUER, H. **Introduction to CLT, Product Properties, Strength Classes**. Suécia, p. 9-30, 2016.

SCIOMENTA, M. *et al.* Mechanical characterization of novel Homogeneous Beech and hybrid Beech-Corsican Pine thin Cross-Laminated timber panels. **Construction and Building Materials**, v. 271, 15 fev. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121589>.

SHAHHOSSEINI, S.; CROVELLA, P. L.; SMITH, W. B. Comparing the effect of presence of the knot and the size of the knot on the *rolling shear* properties in cross laminated timber (CLT) by modified planar shear test and fem analysis. **In: WCTE 2021-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING**, 2021, Santiago.

SHAHNEWAZ, M. *et al.* EXPERIMENTAL RESEARCH ON POINT-SUPPORTED CLT PANELS. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), [S.L.], p. 352-357, jun. 2023. **World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.52202/069179-0048>.

SIKORA, K. S.; MCPOLIN, D. O.; HARTE, A. M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 141–150, 30 Jul. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145>.

SILVA, J. V. F. *et al.* Experimental and numerical analysis of specimen configurations for Cross Laminated timber on rolling shear stiffness and strength response. **Engineering Structures**, v. 284, p. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115973>.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D143-22**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken: 2022. 32 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. West Conshohocken: 2022. 29 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D2344**: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. West Conshohocken: 2016. 8 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D2718**: Standard Test Methods for Structural Panels in Planar Shear (*Rolling shear*). West Conshohocken: 2000. 6 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D3518/D3518M-18**: In - Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate. West Conshohocken: 2018. 8 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **D4761-19**: Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Based Structural Materials. West Conshohocken: 2019. 11 p.

SOCIEDADE AMERICANA DE TESTAGEM E MATERIAIS. **ASTM D5379**: Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. West Conshohocken: 2019. 14 p.

SRIVARO, S. *et al.* Properties of mixed species/density cross laminated timber made of rubberwood and coconut wood. **Structures**, v. 40, p. 237–246, 1 jun. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.016>.

SUN, X.; HE, M.; LI, Z. Experimental investigation on the influence of lamination aspect ratios on *rolling shear* strength of cross-laminated timber. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 22, n. 1, 2 Dez. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s43452-021-00345-w>.

STORA ENSO (Finlândia). **CLT: technical brochure**. Helsinque: 2021. 34 p.

SWEDISH WOOD (Suécia). **The CLT Handbook: CLT structures: facts and planning**. Estocolmo, 2019. 188 p. Disponível em: <https://www.woodcampus.co.uk/clt/#/>. Acesso em: 25 maio 2021.

TIAN, S.; SAMARASINGHE, D. A. S. Feasibility Analysis of Cross Laminated Timber (CLT) for the Christchurch Rebuild Project in New Zealand. In: NEW ZEALAND BUILT ENVIRONMENT RESEARCH SYMPOSIUM, 7., 2022, Auckland. **Proceedings of the 7th NZBERS Symposium**. New Zealand: 2022. p. 256-275.

UKYO, S.; SHINDO, K.; MIYATAKE, A. Evaluation of *rolling shear* modulus and strength of Japanese cedar cross-laminated timber (CLT) laminae. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 1, 8 Jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s10086-019-1810-8>.

UKYO, S. *et al.* Shear strength properties of hybrid (hinoki cypress and Japanese cedar) cross-laminated timber. **Journal Of Wood Science**, [S.L.], v. 67, n. 1, 10 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s10086-021-01954-y>.

VILELA, Ramon. **Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à Flexão**. Campinas 2020. 2020. 257 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

WALLNER-NOVAK, M.; KOPPELHUBER, J.; POCK, K. **Cross-Laminated Timber Structural Design: basic design and engineering principles according to Eurocode**. Viena: Pro: Holz Austria, 2014. 191 p.

WALSH, F. J.; WATTS, R. L. **Composite Lumber**. Washington: United States Patent Office, 1923. 4 p.

WANG, Z.; YIN, T. Cross-Laminated Timber: a review on its characteristics and an introduction to Chinese practices. **Engineered Wood Products for Construction**. 28 abr. 2021. Intech Open. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98956>.

WANG, Z. *et al.* Effect of macro characteristics on *rolling shear* properties of fast-growing poplar wood laminations. **Wood Research**, Bratislava, v. 63, n. 2, p. 227-238, jan. 2018b.

WANG, Z. *et al.* Influence of technical characteristics on the *rolling shear* properties of cross laminated timber by modified planar shear tests. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 3, p. 469–478, 2018a. SCIELO agência nacional de investigacion y desarrollo (ANID). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2018005031601>.

WANG, Z. *et al.* Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 172–177, 1 out. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.205>.

WANG, R. *et al.* *Rolling shear* performance of cross-laminated bamboo-balsa timber panels. **Construction and Building Materials**, v. 299, 13 set. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123973>.

WANG, T. *et al.* *Rolling shear* failure damage evolution process of CLT based on AE technology and DIC method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 80, n. 3, p. 719–730, 19 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-022-01796-5>.

WU, G.; ZHONG, Y.; REN, H. Effects of grain pattern on the *rolling shear* properties of wood in cross-laminated timber. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 668, 25 maio 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/f12060668>.

XAVIER, J.C. *et al.* A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of *Pinus Pinaster Ait.* **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.L.], v. 35, n. 7-8, p. 827-840, Jul. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.013>.

XAVIER, J. C. *et al.* Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. v. 63, n. 2, p. 217-225, 3 fev. 2009. **Walter de Gruyter**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/hf.2009.034>.

XU, B. H. *et al.* *Rolling shear* Properties of Hybrid Cross-Laminated Timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 7, jul. 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003785](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003785).

YANG, Y. *et al.* Evaluation of the out-of-plane shear properties of cross-laminated timber. **Journal of Renewable Materials**, v. 7, n. 10, p. 957–966, 2019. Computers, Materials and Continua (Tech Science Press). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2019.07558>.

YAWALATA, D.; Lam F.,. **Development of Technology for Cross Laminated Timber Building Systems**. Timber Engineering and Applied Mechanics Laboratory Department Of Wood Science, Vancouver, 31 mar. 2011.

YEH, B.; KRETSCHMANN, D.; WANG, B. **Chapter 2-Manufacturing: cross-laminated timber manufacturing**. In: KARACABEYLI, E.; DOUGLAS, B. *The CLT Handbook: cross-laminated timber (U.S. edition)*. Pointe-Claire: FPInnovations, 2013. Cap. 2, p. 20. (978-0-86488-554-8).

YOUNIS, A. *et al.* Cross-laminated timber for building construction: a life-cycle-assessment overview. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 52, p. 104482, jul. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104482>.

YUSOF, N. M. *et al.* Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 1, 9 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>.

ZHANG, L.; YANG, N. Evaluation of a modified Iosipescu shear test method for determining the shear properties of clear wood. **Wood Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 323–343, 16 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-016-0888-z>.

ZHANG, X. *et al.* Bending and shear performance of a cross-laminated composite consisting of flattened bamboo board and Chinese fir lumber. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 392, p. 131913, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131913>.

ZHOU, Q. *et al.* Effect of growth ring orientation on the *rolling shear* properties of wooden cross layer under two-plate shear test. In: **WCTE 2014-WORLD CONFERENCE TIMBER ENGINEERING**, 2014b, Quebec.

ZHOU, Q. *et al.* Measurement of *rolling shear* modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 64, p. 379-386, ago. 2014a. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014b.04.039>.

ZHOU, Y. *et al.* Study on in-plane shear failure mode of cross-laminated timber panel. **Journal of Wood Science**, v. 68, n. 1, 18 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s10086-022-02045>

APÊNDICE A – PROPRIEDADES DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA

Os resultados experimentais foram organizados de acordo com a espécie e a propriedade estudada, os quais são apresentados para cada um dos corpos de prova da Tabela A.1 a Tabela A.5, para a o Marupá, e da Tabela A.6 a Tabela A.10, para o Piquiá, lembrando que todos os dados são referentes à umidade padrão de 12%.

Tabela A.1-Densidade aparente (ρ_{ap}) em kg/m^3 (Marupá), $U=12\%$

Nome	ρ_{ap} (kg/m^3)
EX – M – 1 – UD – 1	400
EX – M – 1 – UD – 2	380
EX – M – 1 – UD – 3	370
EX – M – 1 – UD – 4	380
EX – M – 1 – UD – 5	390
EX – M – 2 – UD – 1	390
EX – M – 2 – UD – 2	400
EX – M – 2 – UD – 3	390
EX – M – 2 – UD – 4	390
EX – M – 2 – UD – 5	400
EX – M – 3 – UD – 1	430
EX – M – 3 – UD – 2	420
EX – M – 3 – UD – 3	430
EX – M – 3 – UD – 4	430
EX – M – 3 – UD – 5	430
DF – M – 4 – UD – 1	380
DF – M – 5 – UD – 1	400
DF – M – 5 – UD – 2	430
DF – M – 6 – UD – 1	400
DF – M – 6 – UD – 2	400
DF – M – 6 – UD – 3	450
DF – M – 6 – UD – 4	440
DF – M – 7 – UD – 1	420
DF – M – 7 – UD – 2	410
DF – M – 7 – UD – 3	410
Média	410
Desvio Padrão	20
COV	5%

Fonte: A Autora

Tabela A.2-Compressão e Módulo de Elasticidade Longitudinal paralelo às fibras em MPa (Marupá),
U=12%

Nome	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
EX – M – 1 – CP – 1	34,69	7303
EX – M – 1 – CP – 2	32,88	5718
EX – M – 1 – CP – 3	26,58	5953
EX – M – 1 – CP – 4	29,73	5322
EX – M – 2 – CP – 1	35,11	5858
EX – M – 2 – CP – 2	35,36	8291
EX – M – 2 – CP – 3	34,53	4136
EX – M – 2 – CP – 4	36,85	9604
EX – M – 3 – CP – 1	37,92	9870
EX – M – 3 – CP – 2	38,14	10617
EX – M – 3 – CP – 3	37,74	11730
EX – M – 3 – CP – 4	39,36	10850
DF – M – 4 – CP – 1	33,15	9440
DF – M – 4 – CP – 2	32,95	9143
DF – M – 4 – CP – 3	35,46	9467
DF – M – 5 – CP – 1	38,04	10492
DF – M – 5 – CP – 2	29,90	9143
DF – M – 6 – CP – 1	35,90	7398
DF – M – 6 – CP – 2	37,44	10001
DF – M – 7 – CP – 1	38,34	11365
DF – M – 7 – CP – 2	39,61	10814
EX – M – 1 – CP – 1	34,69	7303
Média	35,22	8468
Desvio Padrão	3,41	2325
COV	10%	27%

Fonte: A Autora

Tabela A.3-Cisalhamento paralelo às fibras em MPa (Marupá), U=12%

Nome	f_{v0} (MPa)
EX – M – 1 – VP – 1	7,69
EX – M – 1 – VP – 2	7,61
EX – M – 1 – VP – 3	8,14
EX – M – 1 – VP – 4	9,58
EX – M – 2 – VP – 1	7,50
EX – M – 2 – VP – 2	10,16
EX – M – 2 – VP – 3	9,50
EX – M – 2 – VP – 4	12,40
EX – M – 3 – VP – 1	10,69
EX – M – 3 – VP – 2	10,04
EX – M – 3 – VP – 3	8,46
EX – M – 3 – VP – 4	10,69
DF – M – 4 – VP – 1	6,91
DF – M – 4 – VP – 2	11,20
DF – M – 5 – VP – 1	10,12
DF – M – 5 – VP – 2	11,06
DF – M – 6 – VP – 1	8,31
DF – M – 6 – VP – 2	9,41
DF – M – 6 – VP – 3	8,66
DF – M – 6 – VP – 4	8,79
DF – M – 7 – VP – 1	7,66
DF – M – 7 – VP – 2	8,89
DF – M – 7 – VP – 3	8,11
Média	9,17
Desvio Padrão	1,40
COV	15%

Fonte: A Autora

Tabela A.4-Resistência ao *rolling shear* em MPa (Marupá), U=12%

Nome	f_{vt} (MPa)
EX – M – 1 – RS-1	4,80
EX – M – 1 – RS-2	4,55
EX – M – 1 – RS-3	4,51
EX – M – 1 – RS-4	4,55
EX – M – 2 – RS-1	4,98
EX – M – 2 – RS-2	5,66
EX – M – 2 – RS-3	5,70
EX – M – 2 – RS-4	5,17
EX – M – 3 – RS-1	6,03
EX – M – 3 – RS-2	5,15
EX – M – 3 – RS-3	6,00
EX – M – 3 – RS-4	4,85
DF – M – 4 – RS-1	3,63
DF – M – 5 – RS-1	4,74
DF – M – 5 – RS-2	3,72
DF – M – 6 – RS-1	5,70
DF – M – 6 – RS-2	5,64
DF – M – 6 – RS-3	3,90
DF – M – 7 – RS-1	3,75
DF – M – 7 – RS-2	3,85
DF – M – 7 – RS-3	5,70
DF – M – 7 – RS-4	4,60
DF – M – 7 – RS-5	5,89
Média	4,92
Desvio Padrão	0,79
COV	16%

Fonte: A Autora

Tabela A.5-Tração normal às fibras (Marupá) em MPa, U=12%

Nome	f_{t90} (MPa)
EX – M – 1 – TN – 1	4,68
EX – M – 1 – TN – 2	3,66
EX – M – 1 – TN – 3	3,31
EX – M – 1 – TN – 4	3,53
EX – M – 2 – TN – 1	3,74
EX – M – 2 – TN – 2	2,84
EX – M – 2 – TN – 3	4,51
EX – M – 2 – TN – 4	3,82
EX – M – 3 – TN – 1	3,38
EX – M – 3 – TN – 2	2,56
EX – M – 3 – TN – 3	3,42
EX – M – 3 – TN – 4	2,98
DF – M – 4 – TN – 1	3,72
DF – M – 5 – TN – 1	3,01
DF – M – 5 – TN – 2	3,04
DF – M – 6 – TN – 1	2,23
DF – M – 6 – TN – 2	2,66
DF – M – 7 – TN – 1	2,45
DF – M – 7 – TN – 2	2,47
Média	3,26
Desvio Padrão	0,67
COV	21%

Fonte: A Autora

Tabela A.6-Densidade aparente em kg/m^3 (Piquiá), U=12%

Nome	ρ_{ap} (kg/m^3)
DF – P – 1 – UD – 1	680
DF – P – 2 – UD – 1	790
DF – P – 2 – UD – 2	790
DF – P – 3 – UD – 1	700
DF – P – 3 – UD – 2	680
DF – P – 4 – UD – 1	920
DF – P – 4 – UD – 2	940
DF – P – 5 – UD – 1	690
DF – P – 5 – UD – 2	700
Média	760
Desvio Padrão	100
COV	13%

Fonte: A Autora

Tabela A.7-Compressão e Módulo de Elasticidade Longitudinal paralelo às fibras em MPa (Piquiá),
U=12%

Nome	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
DF – P – 1 – CP – 1	46,94	11726
DF – P – 1 – CP – 2	44,23	12254
DF – P – 2 – CP – 1	60,71	18555
DF – P – 3 – CP – 1	52,77	12514
DF – P – 4 – CP – 1	75,23	17153
DF – P – 5 – CP – 1	49,83	12569
Média	54,95	14128
Desvio Padrão	11,44	2934
COV	21%	21%

Fonte: A Autora

Tabela A.8-Cisalhamento paralelo às fibras em MPa (Piquiá),U=12%

Nome	f_{v0} (MPa)
DF – P – 1 – VP – 1	14,32
DF – P – 2 – VP – 1	17,59
DF – P – 3 – VP – 1	14,13
DF – P – 4 – VP – 1	15,53
DF – P – 5 – VP – 1	14,47
Média	15,21
Desvio Padrão	1,44
COV	9%

Fonte: A Autora

Tabela A.9-Resistência ao *rolling shear* em MPa (Piquiá),U=12%

Nome	f_{vt} (MPa)
DF – P – 1 – RS – 1	9,52
DF – P – 2 – RS – 1	6,62
DF – P – 2 – RS – 2	5,77
DF – P – 3 – RS – 1	7,48
DF – P – 4 – RS – 1	9,29
DF – P – 4 – RS – 2	11,09
DF – P – 5 – RS – 1	11,03
DF – P – 5 – RS – 2	11,18
Média	9,00
Desvio Padrão	2,14
COV	24%

Fonte: A Autora

Tabela A.10-Tração normal às fibras em MPa (Piquiá),U=12%

Nome	f_{t90} (MPa)
DF – P – 1 – TN – 1	4,43
DF – P – 2 – TN – 1	2,26
DF – P – 3 – TN – 1	4,07
DF – P – 4 – TN – 1	5,01
DF – P – 5 – TN – 1	4,23
Média	4,00
Desvio Padrão	1,03
COV	26%

Fonte: A Autora

Os módulos de elasticidade longitudinal paralelo às fibras medidos na flexão (E_0) para cada um dos corpos de provas são apresentados na Tabela A.11 e Tabela A.12, para o Marupá e o Piquiá, respectivamente. Os corpos de prova foram nomeados em função da peça de origem, por exemplo, as peças retiradas da peça 1, foram nomeadas por 101.

Tabela A.11-Módulo de elasticidade medido na flexão em MPa (Marupá),U=12%

Nome	E₀ (MPa)
601	10301
602	8937
603	8065
604	9341
701	12718
702	9585
703	12718
704	10565
705	11562
706	11938
707	12157
708	11562
709	11247
710	11685
711	12339
712	10806
713	6509
714	12339
715	10950
Média	10807
Desvio Padrão	1678
COV	16%

Fonte: A Autora

Tabela A.12-Módulo de elasticidade medido na flexão (Piquiá),U=12%

Nome	E₀ (MPa)
101	23538
102	25389
103	16926
201	24167
202	24297
203	15969
301	10916
302	16615
303	21832
401	15692
402	16198
403	16374
404	14578
501	14079
502	14578
503	12181
504	14866
505	13820
Média	17334
Desvio Padrão	4460
COV	26%

Fonte: A Autora

