

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado

TAIENNE WINNI PAIZ ECKER

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE
PAINÉIS DE CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) PARA
APLICAÇÃO COMO PLACAS DE PISO

MARINGÁ
2017

TAIENNE WINNI PAIZ ECKER

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE
PAINÉIS DE CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) PARA
APLICAÇÃO COMO PLACAS DE PISO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto

MARINGÁ
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

E19p Ecker, Taienne Winni Paiz
Produção e caracterização mecânica de painéis de
Cross Laminated Timber (CLT) para aplicação como
placas de piso / Taienne Winni Paiz Ecker. --
Maringá, 2017.
157 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia. Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2017.

1. Cross Laminated Timber (CLT). 2. Cross
Laminated Timber (CLT) - Análise experimental. 3.
Cross Laminated Timber (CLT) - Elemento estrutural.
4. Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC). 5.
Estruturas de madeira. I. Miotto, José Luiz, orient.
II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de
Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDD 23.ed. 624.184

GVS-003749

TAIENNE WINNI PAIZ ECKER

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAINÉIS
DE CROSS LAMINATED TIMBER (CLT) PARA APLICAÇÃO
COMO PLACAS DE PISO.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 27 de março de 2017.



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
UTFPR - Campo Mourão

Membro



Prof. Dr. José Luiz Nunes de Góes
UTFPR - Campo Mourão

Membro



Prof. Dr. José Luiz Miotto
Universidade Estadual de Maringá

Orientador UEM

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade e por todas as oportunidades que me concedeu, sem nunca me desamparar.

A minha mãe, Gessy, por todo apoio e incentivo, pelos conceitos ensinados de respeito, honestidade e persistência, e principalmente pelo amor que me devota todos os dias.

Ao meu pai, Belmiro, por todo suporte financeiro, sem o qual não seria possível realizar este trabalho, e por se orgulhar de mim, mesmo sem saber ao certo o que estou fazendo.

Aos meus irmãos, Taliê e José, por toda contribuição e incentivo.

Ao meu namorado, Gabriel, pelo auxílio e companheirismo durante esta etapa.

Ao Professor Dr. José Luiz Miotto, pela paciência, dedicação e, principalmente, por toda inspiração transmitida através de seus conhecimentos.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes e Prof. Dr. Ronaldo Rigobello pelas sugestões que foram de grande valia para este trabalho.

Ao Professor Msc. Ramiro Faria França, Professor Dr. Gustavo Lacerda Dias e à laboratorista Cláudia Baldin por toda assistência e cooperação na realização dos ensaios nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Ao Professor Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, pela atenção e disponibilização dos *scripts* de ensaio.

Aos meus amigos e familiares, que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, em especial Henrique, Roner, Vitor, Cláudio e Danilo.

A todos os professores e funcionários da Universidade Estadual de Maringá – UEM, pelos conhecimentos repassados e por todo auxílio prestado.

À empresa Jowat Adhesives pelo fornecimento do adesivo.

À empresa Alvo Portas, pela disponibilização do equipamento para prensagem dos painéis de CLT.

À União de Ensino do Sudoeste do Paraná – UNISEP, por ceder seus laboratórios para realização dos ensaios.

Ao Centro Poliesportivo da Universidade Paranaense – UNIPAR, por disponibilizar espaço e material para prensagem dos corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola.

*Everything should be made as simple as possible,
but not simpler.*

Albert Einstein

RESUMO

O desenvolvimento sustentável na construção civil é um tema que está em ascensão, e devido esse setor ser responsável por enormes impactos ambientais, a busca por soluções que visam atenuar esses impactos é de suma importância. Com isso, apresentam-se como alternativa sustentável os painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT), um produto composto por camadas de lamelas de madeira coladas transversalmente às camadas adjacentes, que pode ser utilizado tanto como elemento de laje quanto de parede, permitindo a construção de edificações com múltiplos pavimentos. Por ser um produto recente no mercado, é primordial a realização de estudos referentes ao seu desempenho estrutural, a fim de que seu emprego na construção civil possa ser feito com economia e segurança. Com isso, neste trabalho analisou-se o desempenho de painéis de CLT para utilização como placa de piso, formados por três camadas ortogonais de lamelas de madeira de pinus, ligadas por adesivo poliuretano monocomponente, através de ensaios de flexão e cisalhamento realizados com base na norma ASTM 198:2009, conforme solicitado pela ANSI/APA PRG 320:2012. Avaliou-se, também, a eficiência da colagem das lamelas por meio da variação da quantidade de adesivo aplicado nos ensaios de flexão. Para o ensaio de cisalhamento foram produzidos 12 painéis com quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m². Já para o ensaio de flexão foram produzidos 12 painéis com diferentes quantidades de adesivos, sendo elas, 120 g/m², 160 g/m² e 200 g/m². Por meio dos resultados obtidos, pode ser observada a relação do módulo de elasticidade dos painéis com o módulo de elasticidade das lamelas utilizadas para sua produção. Além disso, evidencia-se a influência da quantidade de adesivo aplicada no desempenho mecânico dos painéis de CLT e recomenda-se um consumo de adesivo igual ou superior a 200 g/m², para melhor desempenho dos painéis. Os painéis testados à flexão, produzidos com uma quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m², exibiram valores médios de 34,21 MPa para o módulo de ruptura e 10.200 MPa para o módulo de elasticidade, similares aos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012.

Palavras-chave: *Cross Laminated Timber*. Madeira Laminada Colada Cruzada. Análise experimental. Elemento estrutural.

ABSTRACT

Sustainable development is a rising topic, and the construction industry being a great responsibility for carrying considerable environmental impacts, the pursuit for solutions aimed at mitigating these impacts is of paramount importance. As a sustainable alternative, Cross Laminated Timber (CLT) panels, a product composed of layers of lamellae glued transversely to the adjacent layers, can be used as a slab or wall element, allowing the construction of multi-floor buildings. Being a recent product on the market, it is essential to carry out studies related to its structural performance, so that its application in the construction industry can be done economically and safely. In this work, the performance of CLT panels for use as a floor plates, formed by three orthogonal layers of pine wood lamellae, bonded by one-component polyurethane adhesive, were evaluated through bending and shear tests performed based on ASTM 198:2009 standard, as requested by ANSI/APA PRG 320:2012 standard. It was also evaluated the efficiency of the lamella bonding by varying the amount of adhesive applied in the bending tests. Twelve panels with a quantity of adhesive corresponding to 200 g/m² were produced for the shear tests, while for the bending test 12 panels were produced with different quantities of adhesives, which were 120 g/m², 160 g/m² and 200 g/m². Through the obtained results, it is observed the panels modulus of elasticity compared with the modulus of elasticity of the lamellae used for its production. Furthermore, it is evident the influence of the amount of adhesive applied in the mechanical performance of the CLT panels and is recommended an adhesive consumption equal to or greater than 200 g/m² for improved performance of the panels. The bending tested panels produced with 200 g/m² of adhesive displayed average values of 34.21 MPa for the modulus of rupture and 10.200 MPa for the modulus of elasticity, similar to those required by ANSI/APA PRG 320:2012 standard.

Key-words: Cross Laminated Timber. Experimental analysis. Structural element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de Burger para o comportamento da madeira.....	22
Figura 2.2 – Área estimada de florestas plantadas de pinus por estado brasileiro	24
Figura 2.3 – Produtos feitos de tiras de madeira: (a) OSB, (b) LSL e (c) PSL	25
Figura 2.4 – Compensado	26
Figura 2.5 – Laminated veneer lumber.....	27
Figura 2.6 – Esquematização da madeira laminada colada	28
Figura 2.7 – Ponte em madeira laminada colada.....	29
Figura 2.8 – Cross laminated timber	30
Figura 2.9 – Esquematização dos painéis de CLT.....	31
Figura 2.10 – Configurações especiais de painéis de CLT.....	31
Figura 2.11 – Painéis de CLT com aberturas	32
Figura 2.12 – Montagem do painel.....	33
Figura 2.13 – Prensagem e produto acabado	34
Figura 2.14 – Possibilidade de variação na largura das lamelas	35
Figura 2.15 – Aberturas realizadas na fábrica	36
Figura 2.16 – Detalhe de ligação adesiva na madeira usando microscopia de fluorescência ..	37
Figura 2.17 – Tipos de conexões entre painéis de lajes de CLT	39
Figura 2.18 – Emendas dentadas entre painéis de CLT	39
Figura 2.19 – Tipos de conexões entre painéis de paredes de CLT	40
Figura 2.20 – Tipos de conexões entre lajes e paredes de CLT	40
Figura 2.21 – Tipos de conexões entre painéis de parede de CLT e fundação	41
Figura 2.22 – Rasgos para instalações elétricas e hidráulicas em lajes de CLT.....	41
Figura 2.23 – Rasgos para instalações elétricas e hidráulicas em paredes de CLT.....	42
Figura 2.24 – Transferência de força em uma e em duas direções.....	43
Figura 2.25 – Elemento de laje de CLT carregado perpendicularmente ao plano	43
Figura 2.26 – Rolling Shear.....	46
Figura 2.27 – Mecanismo de falha nas camadas cruzadas devido a esforços cisalhantes.....	46
Figura 2.28 – Distribuição de tensão de um elemento de CLT com as faces estreitas das lamelas não coladas	47
Figura 2.29 – Distribuição de tensão de um elemento de CLT com as faces estreitas das lamelas coladas	47

Figura 2.30 – Projeto SOFIE	50
Figura 2.31 – Detalhe da proteção da CLT da exposição à chuva	54
Figura 2.32 – Edifício Murray Grove	55
Figura 2.33 – Construção da Universidade de Norwich na Inglaterra	56
Figura 2.34 – Universidade de Norwich, Inglaterra	56
Figura 2.35 – Residência em CLT na Áustria	56
Figura 2.36 – Edifício comercial em CLT na Alemanha	57
Figura 2.37 – Distribuição da área de plantios de eucalipto e pinus por estado (2012)	58
Figura 3.1 – Lamelas de madeira de pinus para a produção de painéis	60
Figura 3.2 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowat-Faser PUR 686.60	61
Figura 3.3 – Corpos-de prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola (a) paralelo e (b) normal às fibras	64
Figura 3.4 – Gabarito para verificação dos nós	66
Figura 3.5 – Arranjo do ensaio de flexão estática	67
Figura 3.6 – (a) Limpeza e (b) umidificação da superfície	69
Figura 3.7 – (a) Aplicação do adesivo e (b) disposição das lamelas da camada adjacente	69
Figura 3.8 – Prensagem dos painéis	70
Figura 3.9 – Painéis para o ensaio de flexão	70
Figura 3.10 – Painéis para o ensaio de cisalhamento	71
Figura 3.11 – Método de carregamento de quatro pontos	71
Figura 3.12 – Arranjo do ensaio de flexão dos painéis	72
Figura 3.13 – Pórtico de ensaios.....	73
Figura 3.14 – Arranjo do ensaio de cisalhamento dos painéis	73
Figura 4.1 – Gráfico do percentual de ruptura na lâmina de cola	79
Figura 4.2 – Modo de ruptura dos corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola	79
Figura 4.3 – Gráfico da classificação visual das 156 lamelas	80
Figura 4.4 – Gráfico da quantidade de lamelas de acordo com o MOE.....	81
Figura 4.5 – Relação do MOE dos painéis com a média dos MOEs das lamelas	85
Figura 4.6 – Ruptura dos painéis com consumo de adesivo de 120 g/m ²	86
Figura 4.7 – Ruptura dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m ²	87
Figura 4.8 – Ruptura do painel P9 testado à flexão.....	87
Figura 4.9 – Ruptura do painel P10 testado à flexão.....	88
Figura 4.10 – Ruptura do painel P11 testado à flexão.....	88

Figura 4.11 – Ruptura do painel P12 testado à flexão.....	88
Figura 4.12 – Ruptura do painel P8 testado ao cisalhamento.....	91
Figura 4.13 – Ruptura do painel P10 testado ao cisalhamento.....	91
Figura 4.14 – Ruptura do painel P7 testado ao cisalhamento.....	92
Figura 4.15 – Ruptura do painel P9 testado ao cisalhamento.....	92
Figura 4.16 – Ruptura do painel P11 testado ao cisalhamento.....	92
Figura 4.17 – Ruptura na linha de cola do painel P3 testado ao cisalhamento	93
Figura 4.18 – Ruptura na linha de cola do painel P9 testado ao cisalhamento	93
Figura 4.19 – Comparação dos valores característicos do módulo de ruptura	95
Figura 4.20 – Comparação dos valores característicos da resistência ao cisalhamento	95
Figura 4.21 – Comparação do módulo de elasticidade.....	96
Figura 4.22 – Comparação dos valores médios do módulo de ruptura	98
Figura 4.23 – Comparação dos valores médios da tensão de cisalhamento máxima	99
Figura 4.24 – Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição da madeira.....	20
Tabela 2.2 – Área estimada de florestas no Brasil (2012).....	22
Tabela 2.3 – Classes de umidade.....	34
Tabela 2.4 – Valores característicos mínimos para testes de painéis de CLT (em MPa).....	45
Tabela 2.5 – Valores admissíveis para testes de painéis de CLT (em MPa).....	45
Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização da madeira.....	63
Tabela 3.2 – Ensaio de caracterização do adesivo.....	64
Tabela 3.3 – Limitações nos defeitos para cada classe.....	66
Tabela 4.1 – Valores médios das propriedades de algumas espécies de pinus	76
Tabela 4.2 – Valores médios das propriedades físicas da madeira	77
Tabela 4.3 – Valores médios das propriedades mecânicas da madeira	77
Tabela 4.4 – Valores médios da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola.....	78
Tabela 4.5 – Resultado da classificação visual.....	80
Tabela 4.6 – Resultado da classificação mecânica	80
Tabela 4.7 – Densidade dos painéis testados à flexão	82
Tabela 4.8 – Valores médios do MOE das camadas dos painéis testados à flexão (em MPa).82	
Tabela 4.9 – Consumo de adesivo dos painéis	83
Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 120 g/m ² (em MPa)	83
Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m ² (em MPa)	84
Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m ² (em MPa)	84
Tabela 4.13 – Resultado geral dos ensaios de flexão dos painéis (em MPa)	85
Tabela 4.14 – Densidade dos painéis testados ao cisalhamento.....	89
Tabela 4.15 – Valores médios do MOE das camadas dos painéis testados ao cisalhamento (em MPa)	89
Tabela 4.16 – Propriedades mecânicas dos painéis testados ao cisalhamento (em MPa).....	90
Tabela 4.17 – Resumo dos resultados dos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis.....	93
Tabela 4.18 – Valores requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012 (em MPa).....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANSI	- <i>American National Standards Institute</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CCA	- Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	- Borato de Cobre Cromatado
CLT	- <i>Cross Laminated Timber</i>
EPI	- Emulsão Polímero Isocianato
LSL	- <i>Longitudinal Strand Lumber</i>
LVL	- <i>Laminated Veneer Lumber</i>
MF	- Melamina-formaldeído
MLC	- Madeira Laminada Colada
MLCC	- Madeira Laminada Colada Cruzada
MOE	- Módulo de elasticidade
MOR	- Módulo de ruptura
MUF	- Melamina-ureia-formaldeído
NBR	- Norma Brasileira Registrada
OSB	- <i>Oriented Strand Board</i>
PRF	- Fenol-resorcinol-formaldeído
PSL	- <i>Parallel Strand Lumber</i>
PUR	- Poliuretano
RF	- Resorcinol-formaldeído
SCL	- <i>Structural Composite Lumber</i>
SPIB	- <i>Southern Pine Inspection Bureau</i>
UF	- Ureia-formaldeído
UNIPAR	- Universidade Paranaense
UNISEP	- União de Ensino do Sudoeste do Paraná
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Base da seção transversal
Δ	Deslocamento vertical máximo ou flecha
Δ_{Lb}	Deslocamento vertical no meio do vão descontando-se os deslocamentos nos pontos de aplicação das forças
ΔV	Variação volumétrica
E_{c0}	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras
ε_i	Deformação específica de inchamento
ε_r	Deformação específica de retração
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
f_v	Resistência ao cisalhamento
f_{t90}	Resistência à tração normal às fibras
G	Módulo de rigidez
h	Altura da seção transversal
I	Momento de inércia da seção transversal
L	Vão
L_i	Leitura inicial do relógio comparador
L_f	Leitura final do relógio comparador
L_b	Distância entre os dois pontos de aplicação da força
m_i	Massa inicial
m_s	Massa seca
P	Força
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima
$\rho_{ap,12\%}$	Densidade aparente correspondente a 12% de umidade
$\rho_{ap,U\%}$	Densidade aparente
ρ_{bas}	Densidade básica
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão de cisalhamento máxima
U	Teor de umidade
V	Volume
V_{sat}	Volume do corpo-de-prova saturado
V_{seco}	Volume do corpo-de-prova seco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVAS.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL.....	19
2.1.1	Anatomia e fisiologia da madeira	19
2.1.2	Tratamento da madeira	20
2.1.3	Propriedades mecânicas da madeira	21
2.1.4	Produção florestal brasileira	22
2.1.4.1	Pinus	23
2.2	PRODUTOS RESULTANTES DA INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA.....	24
2.2.1	Compensado	26
2.2.2	Laminated veneer lumber	27
2.2.3	Madeira laminada colada	28
2.3	CROSS LAMINATED TIMBER: UM NOVO CONCEITO PARA A ENGENHARIA DE ESTRUTURAS	30
2.3.1	Processo de fabricação	33
2.3.2	Adesivos	37
2.3.3	Conexões entre os painéis de CLT	38
2.3.4	Instalações elétricas e hidráulicas	41
2.3.5	Desempenho estrutural	42
2.3.6	Desempenho sob ações sísmicas	49
2.3.7	Vibração	50
2.3.8	Desempenho térmico e acústico	51
2.3.9	Desempenho ao fogo	51
2.3.10	Desempenho ambiental	52
2.3.11	Durabilidade	54
2.3.12	Aplicações	55

2.3.13	Dificuldades e potencialidades de implantação do CLT no Brasil	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	MATERIAIS	60
3.1.1	Madeira	60
3.1.2	Adesivo	61
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	62
3.2.1	Caracterização da madeira	62
3.2.2	Caracterização do adesivo	63
3.3	CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS	64
3.3.1	Classificação visual	64
3.3.2	Classificação mecânica	67
3.4	CONFECÇÃO DOS PAINÉIS	68
3.5	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PAINÉIS	71
3.5.1	Ensaio de flexão	72
3.5.2	Ensaio de cisalhamento	73
3.5.3	Determinação das propriedades de resistência e rigidez	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	76
4.1.1	Propriedades físicas e mecânicas do pinus	76
4.1.2	Caracterização da eficiência do adesivo	78
4.2	CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS.....	79
4.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PAINÉIS	81
4.3.1	Ensaio de flexão	81
4.3.1.1	Modo de ruptura dos painéis ensaiados à flexão	86
4.3.2	Ensaio de cisalhamento	88
4.3.2.1	Modo de ruptura dos painéis ensaiados ao cisalhamento.....	91
4.3.3	Comparação dos resultados com os valores especificados na norma ANSI/APA PRG 320:2012	93
4.3.4	Comparação dos resultados com os valores obtidos por outros autores	96
5	CONCLUSÃO	100
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – Caracterização dos materiais	107
	APÊNDICE B – Classificação visual e mecânica das lamelas	122

APÊNDICE C – Composição dos painéis testados à flexão.....	128
APÊNDICE D – Propriedades mecânicas dos painéis testados à flexão	141
APÊNDICE E – Composição dos painéis testados ao cisalhamento.....	143
APÊNDICE F – Propriedades mecânicas dos painéis testados ao cisalhamento	156

1 INTRODUÇÃO

Os produtos resultantes da industrialização da madeira vêm incorporando cada vez mais tecnologia em sua produção. Com isso, estruturas com alto valor agregado e maior aproveitamento da madeira vêm ganhando espaço no mercado da construção civil.

Diversos são os produtos derivados da madeira, como Compensado, *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e Madeira Laminada Colada (MLC), mas atenção especial deve ser dada à Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), ou *Cross Laminated Timber* (CLT), um produto recente no mercado e considerado por muitos pesquisadores como um novo conceito para a engenharia de estruturas, pois suas características permitem a produção de edificações de madeira a partir de painéis – tanto em paredes quanto em lajes –, constituindo-se em um sistema construtivo inovador.

Os painéis de CLT são compostos por camadas de lamelas (lâminas) de madeira coladas transversalmente às camadas adjacentes, diferenciando-se, assim, da madeira laminada colada. A laminação cruzada reduz expressivamente os efeitos de retração e inchamento do material, resultando num elemento de placa com significativas propriedades de rigidez em diferentes direções (KUILEN et al., 2011; STEIGER; GÜLZOW; GSELL, 2008).

Desse modo, a CLT fornece novos horizontes na engenharia de estruturas, trazendo diversos benefícios, como o alto nível de pré-fabricação, redução no tempo de construção, baixa relação resistência/peso, possibilidade de construções de múltiplos pavimentos e bom isolamento térmico e acústico. Além disso, por ser feita de material renovável, com baixa energia de produção, e por promover construções com menor geração de resíduos, a CLT contribui para o desenvolvimento sustentável.

Vale ressaltar que o emprego da madeira, para fins estruturais ou não, deve ser realizado com economia e segurança, por isso é de suma importância o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas.

Assim, esta pesquisa busca avaliar o comportamento mecânico de painéis de CLT para pisos de edificações, por meio de ensaios de flexão e cisalhamento, com base na norma ASTM 198:2009, conforme solicitado pela ANSI/APA PRG 320:2012, bem como analisar seus modos de ruptura. Além disso, é averiguada a eficiência da colagem das lamelas por meio da variação da quantidade de adesivo aplicado nos ensaios de flexão.

Para o ensaios de cisalhamento foram produzidos 12 painéis com quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m², já para o ensaio de flexão foram produzidos 12 painéis com diferentes quantidades de adesivos, sendo elas, 120 g/m², 160 g/m² e 200 g/m².

Para a produção dos painéis, foram utilizadas lamelas do gênero pinus, por se tratar de madeira proveniente de floresta plantada e pela sua disponibilidade comercial em diversas regiões do Estado do Paraná, com o intuito de estimular sua utilização em produtos com maior valor agregado.

Através de pesquisas que verifiquem seu desempenho, o sistema construtivo em CLT traz novas possibilidades para o emprego de estruturas de madeira.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Por promover enormes impactos ambientais, o setor da construção civil tem um papel de grande responsabilidade no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável. Sendo assim, é de fundamental importância buscar soluções que visam reduzir as emissões de poluentes na atmosfera, o elevado consumo de água e energia na fase de produção, e a geração de resíduos sólidos.

Devido às mudanças climáticas e o esgotamento das fontes de energia não-renováveis, torna-se pertinente o estudo da madeira como material estrutural, já que esta apresenta diversos requisitos para atenuar os impactos causados pela construção civil. Ademais, o Brasil apresenta extensas áreas de florestas tropicais e de reflorestamento que, se exploradas de forma adequada, tornam a madeira um material viável para ser utilizado na construção civil.

Com isso, o sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* (CLT) se apresenta como uma alternativa para o desenvolvimento sustentável. Este sistema possui alto nível de pré-fabricação, o que contribui para menor geração de resíduos, além de ser feito a partir da industrialização da madeira, um material renovável, com baixa energia de produção e que reduz significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

Todavia, por se tratar de um produto recente, é primordial a realização de estudos referentes ao seu desempenho estrutural, que considerem as características das madeiras brasileiras, especialmente aquelas produzidas em florestas plantadas, a fim de usar de forma adequada esse elemento estrutural. Análises experimentais são necessárias para auxiliar no desenvolvimento de abordagens analíticas que consigam descrever com precisão o comportamento deste elemento.

Assim, a ideia deste trabalho vem ao encontro da necessidade de estudos referentes ao comportamento mecânico do sistema *Cross Laminated Timber* (CLT), considerado por diversos pesquisadores como o sistema estrutural do século XXI.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente painéis de laje em *Cross Laminated Timber* (CLT), a partir de modelos com dimensões estruturais, formados por três camadas ortogonais de lamelas de madeira de pinus ligadas por adesivo poliuretano monocomponente.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho fosse alcançado, foram simultaneamente considerados os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar o sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* (CLT);
- Caracterizar os materiais utilizados na produção dos painéis de CLT;
- Caracterizar mecanicamente os painéis de CLT produzidos;
- Avaliar a eficiência da colagem das lamelas, em ensaios de flexão, por meio da variação da quantidade de adesivo aplicado;
- Analisar o modo de ruptura dos painéis;
- Analisar a resistência dos painéis produzidos pela comparação dos resultados experimentais com os fornecidos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012 e com os obtidos por outros autores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este primeiro capítulo traz a introdução, justificativas e objetivos da pesquisa. No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, com o intuito de apresentar o sistema construtivo *Cross Laminated Timber* (CLT), abordando seu processo de fabricação e seu desempenho como elemento estrutural. No capítulo 3 descrevem-se os materiais e métodos utilizados para a produção e caracterização dos painéis de CLT. No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, classificação visual e mecânica das lamelas, avaliação experimental dos painéis de CLT e análise dos seus modos de ruptura. Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais desta pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com o objetivo de proporcionar uma familiarização com o sistema construtivo *Cross Laminated Timber* (CLT), são abordados neste capítulo alguns conceitos indispensáveis. Inicialmente é realizada uma breve explanação da madeira como material estrutural e os produtos derivados de sua industrialização. Em seguida, é apresentado o sistema construtivo em CLT, elucidando aspectos do seu processo de fabricação e seu desempenho como elemento estrutural.

2.1 MADEIRA COMO MATERIAL ESTRUTURAL

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), a madeira é provavelmente o mais antigo dos materiais de construção, devido a sua disponibilidade na natureza e sua facilidade de manuseio. Apresenta uma excelente relação resistência/peso quando comparada com materiais de construção convencionais como aço e concreto. Possui ainda um bom desempenho térmico, baixo consumo de energia para sua produção, além de ser um material renovável.

Por outro lado, por ser um material natural, pode apresentar vários defeitos, como nós e fendas, que interferem em suas propriedades mecânicas. Além disso, a madeira está sujeita à degradação biológica e é um material combustível. Todavia, esses aspectos desfavoráveis são facilmente superados com a aplicação de tratamento adequado e adoção de detalhes construtivos que favoreçam as condições ambientais, resultando em estruturas duráveis e com características estéticas agradáveis (PFEIL; PFEIL, 2003).

O emprego da madeira para um determinado fim, seja estrutural ou não, pode ser realizado com economia e segurança, desde que suas características e suas propriedades físico-mecânicas sejam levadas em consideração (MELO; MENEZZI, 2010).

2.1.1 Anatomia e fisiologia da madeira

Se tratando da microestrutura da madeira, suas células, denominadas fibras, são como tubos de paredes finas alinhados na direção axial do tronco e colados entre si. A excelente relação resistência/peso da madeira pode ser explicada pela eficiência estrutural das células fibrosas ocas, com seção arredondada ou retangular (PFEIL; PFEIL, 2003).

A madeira é constituída principalmente por substâncias orgânicas. Os principais elementos constituintes são o carbono, oxigênio e hidrogênio. O composto orgânico

predominante é a celulose, que forma filamentos que reforçam as paredes das fibras longitudinais. Outros dois constituintes importantes são as hemiceluloses e a lignina, que contribuem para a integridade estrutural da madeira e sua elevada rigidez. Além disso, a madeira apresenta alguns extrativos presentes em quantidades relativamente pequenas, como resinas, óleos e ceras, responsáveis pela coloração e cheiro característicos de cada espécie. A estrutura da madeira apresenta ainda pequenas quantidades de sais minerais, que constituem os alimentos dos tecidos vivos e produzem as cinzas quando a madeira é queimada (DINWOODIE, 2000; PFEIL; PFEIL, 2003). A Tabela 2.1 mostra a porcentagem aproximada destes componentes em coníferas e folhosas.

Tabela 2.1 – Composição da madeira

Componente	Coníferas (%)	Folhosas (%)
Celulose	42 ± 2	45 ± 2
Hemicelulose	27 ± 2	30 ± 5
Lignina	28 ± 3	20 ± 4
Extrativos	3 ± 2	5 ± 4

Fonte: Adaptado de Dinwoodie (2000)

2.1.2 Tratamento da madeira

A preservação da madeira consiste na impregnação da mesma com substâncias tóxicas aos organismos xilófagos, para evitar que estes a utilizem como alimento para sua sobrevivência e multiplicação. O agente preservativo deve apresentar eficiência e segurança, ser tóxico a um grande número de organismos xilófagos, ter baixa toxidez aos organismos não xilófagos, possuir fixação na madeira e ação duradoura, não provocar alterações nos materiais que estejam em contato com a madeira, de preferência ser incolor, inodoro e insípido, não ser inflamável, ser econômico e de fácil obtenção no mercado. Dificilmente uma substância preservativa apresentará todas essas características. No entanto, dependendo do tipo de material a ser tratado, somente algumas dessas serão necessárias (CALIL NETO, 2011).

O método mais eficiente para aplicação de preservantes na madeira compreende o uso de pressão superior (em autoclave) à atmosférica, pois resulta em melhor distribuição e penetração do produto. Os principais preservantes para evitar a degradação biológica da madeira são o creosoto, o CCA (arseniato de cobre cromatado) e o CCB (borato de cobre cromatado), ambos preservantes hidrossolúveis (BARILLARI; FREITAS, 2002).

2.1.3 Propriedades mecânicas da madeira

Desde o final do século XVI, diversos cientistas e pesquisadores, começando por Galileu Galilei, têm se voltado ao estudo do comportamento mecânico da madeira, por ser considerado um excelente material estrutural em função de suas inúmeras vantagens, já citadas anteriormente. Todavia o estudo do seu comportamento mecânico apresenta certa complexidade, devido à sua heterogeneidade e anisotropia.

Cada material possui suas próprias características mecânicas, e na madeira essas características variam não só entre espécies, como entre indivíduos de uma mesma espécie, e em um mesmo indivíduo, dependendo da posição que é retirada a amostra (MELO; MENEZZI, 2010). Deve-se levar em conta também que fatores como teor de umidade, densidade e quantidade de defeitos influenciam diretamente nas propriedades mecânicas da madeira.

Sabe-se que na madeira, como em outros produtos naturais de origem biológica, a caracterização científica de qualquer fenômeno é extremamente difícil, já que se tratam de materiais de constituição química mutável e de arquitetura estrutural variável, o que resulta em uma enorme variação de propriedades físicas, químicas e mecânicas (SANTOS, 2007).

Dependendo da magnitude e da velocidade de aplicação das forças, durante os ensaios de caracterização, a madeira pode apresentar três diferentes respostas. A primeira é a elasticidade, que é a capacidade de recuperar a sua forma inicial após a retirada da força aplicada; a segunda é a flexibilidade, que associa elasticidade e rigidez quando solicitada a uma força instantânea; e por fim a plasticidade, que é o estado em que ocorrem deformações permanentes, podendo comprometer a resistência mecânica (MELO; MENEZZI, 2010).

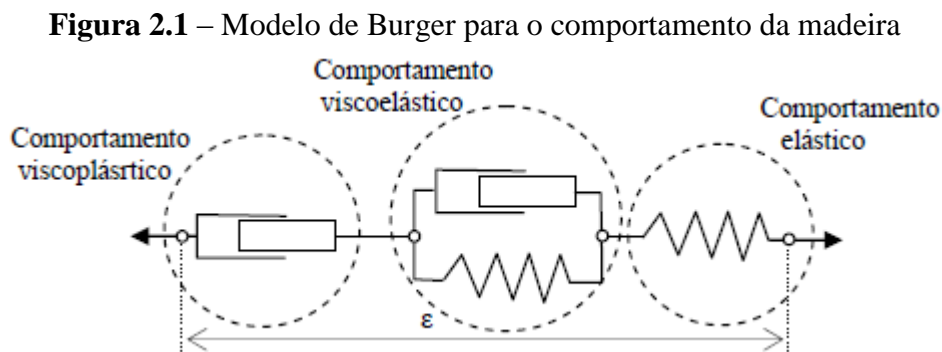
Dentro do limite de proporcionalidade, a madeira encontra-se na fase elástica e a deformação é reversível, ou seja, a madeira volta lentamente ao seu estado inicial com a retirada da ação. No entanto, como não existem materiais perfeitamente elásticos, após a suspensão da força ocorre uma mínima deformação mesmo na fase elástica (MELO; MENEZZI, 2010).

Segundo Santos (2007), embora muitas vezes admita-se que a deformação de um componente é perfeitamente reversível e que a deformação é constante após a aplicação de uma carga permanente, sabe-se que, na realidade, em ensaios e medições mais rigorosas o comportamento da madeira se mostra bastante complexo. Quando sujeita a uma carga permanente, a madeira tem uma deformação que não atinge de imediato um ponto estável, e ao ser retirada a carga há uma recuperação que não é imediata, mas que se aproxima da condição inicial em função do tempo, caracterizando o comportamento viscoelástico da madeira. Melo e Menezzi (2010) salientam que esse comportamento depende principalmente da intensidade e

da duração da ação, e que a madeira sofre alterações em sua resistência e rigidez quando submetida a carregamentos de longa duração.

Santos (2007) aponta que a madeira, assim como outros materiais em que o comportamento viscoso é bem marcado, apresenta também, em consequência, os fenômenos de relaxação de tensões e fluência. O autor ainda afirma que o caráter viscoelástico da madeira é pouco dependente da temperatura, mas muito dependente do teor de umidade.

Existem modelos que buscam representar o comportamento viscoelástico da madeira, entre eles os mais simples são o de Kelvin-Voigt, Maxwell e o *Standard Linear Solid* (SLS). Para Santos (2007), o modelo mais completo é o de Burger, representado na Figura 2.1, que leva em conta as particularidades da madeira relacionadas à fluência e relaxação.



Fonte: Santos (2007, p. 94)

2.1.4 Produção florestal brasileira

De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (2013), a área florestal total do Brasil é de 463 milhões de hectares (54,4% da área total do país), representando a segunda maior área de floresta do mundo, atrás apenas da Rússia. Dessa área florestal, em torno de 456 milhões de hectares são de florestas naturais, enquanto que aproximadamente 7 milhões de hectares são de florestas plantadas, conforme indicado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Área estimada de florestas no Brasil (2012)

Tipo de floresta	Área total (ha)	% das florestas	% da área do Brasil
Florestas naturais	456.083.955	98,45	53,56
Florestas plantadas	7.185.943	1,55	0,84
Total	463.269.898	100	54,4

Fonte: Serviço Florestal Brasileiro (2013, p. 25)

Em 2010 foram utilizados 6,4 milhões de m³ para a produção de painéis de madeira e 4,9 milhões de m³ para a produção de madeira serrada. Os principais países importadores de produtos florestais brasileiros são os Estados Unidos, China e Holanda (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2013).

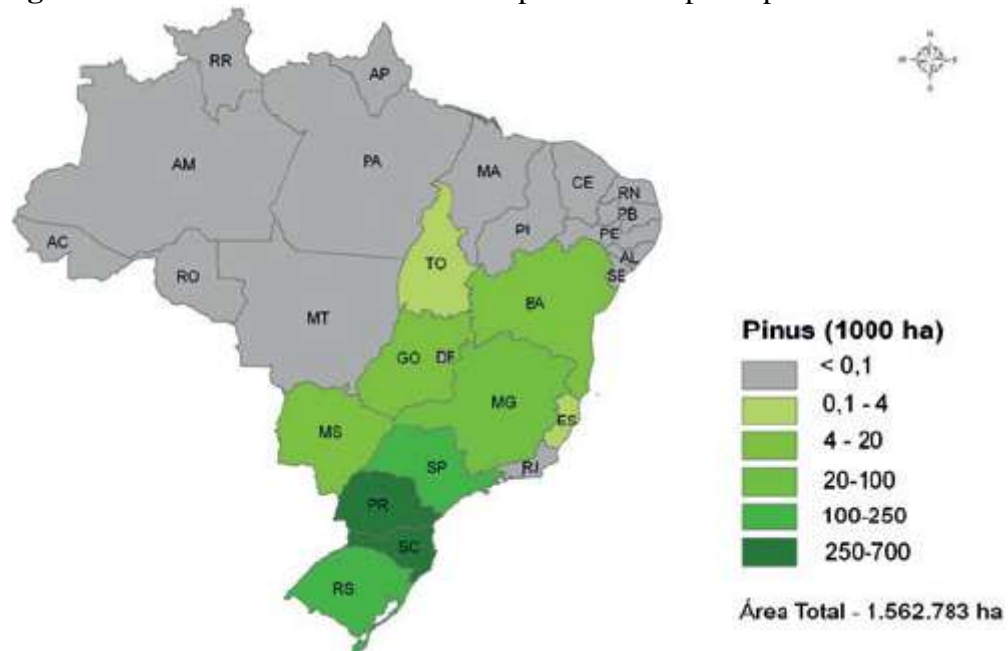
As plantações florestais realizam um papel relevante no desenvolvimento socioeconômico do país, contribuindo para a produção de bens e serviços e agregando valor aos produtos florestais (CALIL NETO, 2011). Das florestas plantadas, aproximadamente 71% são com espécies do gênero eucalipto e 22% com espécies do gênero pinus.

2.1.4.1 Pinus

Segundo Calil Neto (2011), as espécies de pinus vêm sendo introduzidas no Brasil há mais de um século. O *Pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias, foi uma das primeiras espécies de que se tem notícia a ser introduzida no país, por volta de 1880, no Rio Grande do Sul. Em 1936, foram iniciados os primeiros ensaios de introdução de pinus para fins silviculturais, com espécies europeias, mas sem sucesso, devido à má adaptação ao clima brasileiro. Ainda segundo o autor, somente em 1948, através do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, foram introduzidas as espécies americanas *Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, destacando-se as duas últimas pela facilidade nos tratamentos culturais, pelo rápido crescimento e pela reprodução intensa no Sul e Sudeste do Brasil.

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), a área plantada de pinus no Brasil é de aproximadamente 1.562.782 de hectares e está concentrada principalmente na Região Sul do país, devido às condições climáticas e à localização dos principais centros processadores deste tipo de madeira. O Estado do Paraná é o que possui a maior área plantada de pinus, com 39,7% da área total, seguido por Santa Catarina, com 34,5%. A Figura 2.2 mostra a área aproximada de florestas plantadas de pinus por estado brasileiro.

Figura 2.2 – Área estimada de florestas plantadas de pinus por estado brasileiro



Fonte: Serviço Florestal Brasileiro (2013, p. 30)

Calil Junior (2002) salienta que um fator importante para utilização da madeira de pinus está relacionado ao seu tratamento preservativo, sendo que não é indicado utilizar esse gênero sem tratamento. A ABNT NBR 7190:1997 recomenda a impregnação em autoclave como procedimento mínimo de preservação para coníferas.

2.2 PRODUTOS RESULTANTES DA INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA

A fabricação de produtos derivados de madeira não é uma prática recente. O desenvolvimento das tecnologias e recursos necessários à produção dos materiais derivados da madeira ganhou força há mais de 50 anos, trazendo para a indústria materiais capazes de substituir a madeira serrada em várias situações (GONÇALVES, 2000).

Segundo Iwakiri et al. (2007), a partir da década de 80, as indústrias de base florestal no Brasil passaram por uma ampla transformação em relação à matéria-prima, produtos e processos produtivos. A matéria-prima oriunda de florestas nativas começou a ser substituída por aquelas procedentes de florestas plantadas de rápido crescimento, sobretudo a de pinus e eucalipto, para a fabricação de produtos sólidos e reconstituídos, em face da disponibilidade e das características tecnológicas dessas essências.

Os produtos resultantes da industrialização da madeira, também chamados de produtos “engenheirados” de madeira (*engineered wood products*), são materiais que passam, em maior ou menor grau, por processos industriais que visam reduzir a madeira a frações ou componentes

convenientes, para depois associá-los por meio de cola, buscando maior desempenho estrutural (PALMA; BALLARIN, 2011).

De acordo com Gonçalves (2000), o grande destaque desses produtos está na aplicação de estudos de ciência dos materiais e de tecnologia para aproveitamento das propriedades da madeira, melhorando suas qualidades. Com isso, os produtos derivados da madeira apresentam uma estrutura mais homogênea, com melhores propriedades mecânicas e maior estabilidade dimensional, além da possibilidade de produção de peças em grandes dimensões. Outro fator positivo é um maior aproveitamento da matéria-prima, uma vez que a obtenção da madeira serrada resulta em perdas consideráveis.

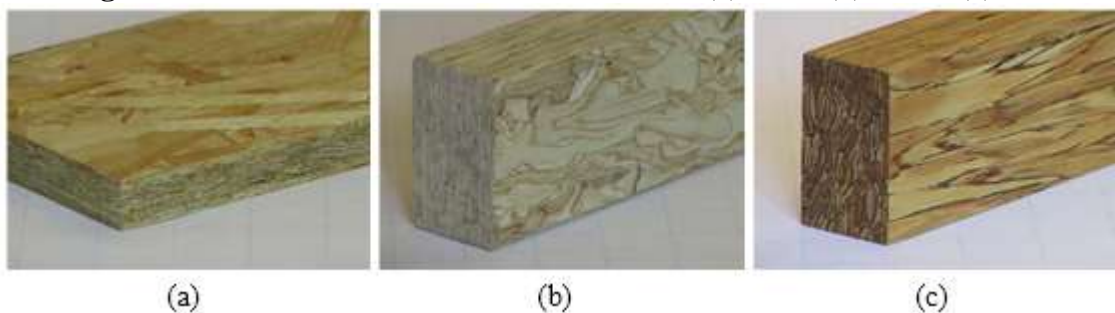
Segundo Lima et al. (2013), qualquer espécie ou combinação de espécies pode ser usada para a produção de painéis derivados de madeira, desde que as propriedades físicas e mecânicas resultantes estejam de acordo com as normas de comercialização.

Para Vieira, Brito e Gonçalves (2012), existe uma tendência de crescimento no consumo de produtos derivados da madeira, enquanto que o consumo de madeira serrada diminui gradativamente. Essa redução ocorre basicamente por alguns fatores como: a escassez de madeira de grandes diâmetros viáveis para exploração, o acelerado desenvolvimento tecnológico para a produção de produtos derivados de madeira, redução de custos, a crescente preocupação com o impacto ambiental e a busca por produtos ecologicamente corretos.

Os produtos industrializados de madeira podem ser feitos a partir de lamelas (lâminas), tiras, partículas ou fibras de madeira, com orientação paralela ou perpendicular entre as camadas adjacentes (AUGUSTIN, 2008b).

Alguns exemplos de produtos feitos a partir de tiras da madeira são o *Oriented Strand Board* (OSB), *Longitudinal Strand Lumber* (LSL) e *Parallel Strand Lumber* (PSL), apresentados na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Produtos feitos de tiras de madeira: (a) OSB, (b) LSL e (c) PSL



Fonte: Adaptado de Augustin (2008b, p. 68-69)

A seguir serão descritos alguns exemplos de produtos feitos a partir de lamelas de madeira, sendo eles: Compensado (*Plywood*), Laminados Unidirecionais (*Longitudinal Veneer Lumber*), Madeira Laminada Colada (*Glulam*) e Madeira Laminada Colada Cruzada (*Cross Laminated Timber*).

2.2.1 Compensado

De acordo com Einfeld e Berger (2012), a produção de compensado começou na década de 1940, alcançando níveis significativos a partir dos anos 70. Vieira, Brito e Gonçalves (2012) relatam que no Brasil a fabricação de compensado iniciou utilizando-se como matéria-prima a madeira de araucária, vinda das florestas nativas do sul do país. A partir de 1960, passou-se a empregar madeira de folhosas oriunda de florestas nativas da região amazônica. Em 1990, novas mudanças ocorreram, tornando as plantações de pinheiros no Sul uma importante fonte de matéria-prima para a indústria do compensado. Atualmente, o país produz compensado de pinus, proveniente de florestas plantadas nas Regiões Sul e Sudeste, e compensado tropical de madeira oriunda de florestas nativas, nas regiões Norte e Centro-Oeste, sendo um dos principais produtores mundiais de compensado.

O compensado, mostrado na Figura 2.4, é um painel derivado da madeira, constituído por lamelas coladas perpendicularmente entre si. Esse procedimento, chamado de laminação cruzada, confere a chapa maior estabilidade dimensional, rigidez e resistência mecânica (GONÇALVES, 2000).

Figura 2.4 – Compensado



Fonte: Augustin (2008b, p. 70)

De acordo com Stamato (2002), as dimensões comerciais normatizadas dos painéis compensados são 2440 mm por 1220 mm, com espessuras que podem variar de 4 mm a 21 mm.

Os painéis são compostos por um número ímpar de lamelas, geralmente 3, 5, 7 ou 9, sendo que a espessura das lamelas pode variar de 1,2 mm a 4 mm.

O processo de laminação ocorre em algumas etapas, começando com a preparação das toras, que são descascadas e passam por um banho de vapor, ou algum processo semelhante, para o amolecimento das fibras, a fim de facilitar a laminação, que é realizada por meio de corte em torno rotativo. Em seguida as lamelas são classificadas e secas em estufas. Após a secagem os painéis são montados e prensados, para então serem cortados e receberem os acabamentos nas bordas e nas superfícies (STAMATO, 2002).

Segundo Stamato (2002), as principais aplicações dos painéis compensados na construção civil são como elementos de fechamento e estruturais, tais como: paredes, coberturas, pisos, fachadas, vigas compostas, pórticos e fôrmas para concreto.

2.2.2 Laminated veneer lumber

O Painel Laminado Unidirecional, ou *Laminated Veneer Lumber* (LVL), mostrado na Figura 2.5, é um produto desenvolvido nos EUA na década de 1970. Com concepção tecnológica diferente do compensado, as lamelas de madeira são coladas paralelamente entre si com adesivos estruturais, através de altas temperaturas e pressões. Com isso, a resistência do painel na direção longitudinal é maior, o que possibilita seu uso em aplicações que exijam maior resistência à flexão (IWAKIRI et al., 2010).

É possível colocar algumas lamelas de madeira na direção perpendicular, por exemplo, a cada cinco camadas, a fim de melhorar as propriedades de resistência nessa direção (AUGUSTIN, 2008b).

Figura 2.5 – Laminated veneer lumber



Fonte: Portal da madeira (2009)

Segundo Palma e Ballarin (2011), o LVL é fabricado principalmente a partir de madeiras de coníferas, com predominância de pinus. Comparado com a madeira serrada, o LVL pode oferecer maiores dimensões, com espessuras que variam de 21 mm a 150 mm, larguras de 100 mm a 1800 mm e comprimentos de 2.500 mm a 25.000 mm.

O processo de produção de LVL é semelhante ao do compensado. As lamelas (folhas) com espessuras entre 2,5 mm e 3,5 mm são obtidas em torno desfolhador e, depois de secas, recebem a aplicação de adesivo para montagem dos painéis, que são pré-prensados a frio e, por fim, consolidados em prensa quente (PALMA; BALLARIN, 2011).

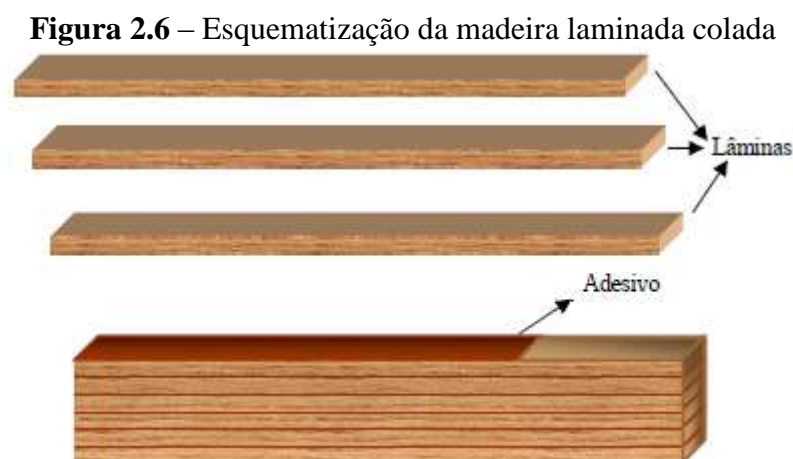
Por ser um produto de muita versatilidade, o LVL possui diversas aplicações, desde acabamentos e mobílias até o uso estrutural. Mundialmente sua principal utilização é para mesas de vigas de seção “I”, amplamente utilizadas em estruturas de pisos.

2.2.3 Madeira laminada colada

Inicialmente, o sistema construtivo de Madeira Laminada Colada (MLC) era conhecido como *Hertzer System*, devido à patente obtida por Otto Karl Frederick Hertzer, em 1906 na Alemanha.

Naquela época, boa parte das aplicações da MLC ficou limitada às condições de uso protegidas da umidade. Foi somente após a Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento dos adesivos sintéticos à prova de água, que a MLC ganhou espaço também nas estruturas sujeitas às intempéries, especialmente em pontes e passarelas (MIOTTO, 2009, p. 10).

A Madeira Laminada Colada é um produto obtido a partir da colagem de lamelas de madeira dispostas paralelamente umas às outras, como mostrado na Figura 2.6.



Fonte: Zangiácomo (2003, p. 5)

Para se obter comprimentos suficientemente grandes, podem ser realizadas emendas longitudinais nas lamelas. Além disso, as lamelas podem ser coladas face a face e borda a borda para a obtenção de diferentes alturas e larguras, podendo ainda serem arqueadas, formando peças com variadas formas (FIORELLI, 2005).

Para a produção de MLC devem ser utilizadas espécies de madeira que apresentem densidade compreendida entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$. A espessura máxima das lamelas deve ser de 50 mm, com teor de umidade entre 7% e 14%, sendo que a diferença de umidade entre as lamelas adjacentes não deve exceder 5%, a fim de reduzir os efeitos das variações dimensionais. Antes da colagem, as lamelas devem ser tratadas sob pressão e classificadas visualmente e mecanicamente (MIOTTO, 2009).

No Brasil, os adesivos comumente utilizados na fabricação de madeira laminada colada são os poliuretanos e os à base de resorcinol, com cura a temperatura ambiente, por apresentarem alta resistência à umidade, o que os torna aptos para uso exterior (CALIL NETO et al., 2014).

Segundo Zangiácomo (2003), a MLC é frequentemente utilizada em estruturas de cobertura, elementos estruturais de pontes, edifícios, embarcações, banzos de escadas e corrimão, esquadrias e móveis. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de aplicação da MLC como sistema estrutural de uma ponte.

Figura 2.7 – Ponte em madeira laminada colada



Fonte: Rewood [20--]

De acordo com Miotto (2009, p. 1), apesar de apresentar relevantes vantagens em relação à madeira serrada, especialmente no que diz respeito à possibilidade de se produzir peças com grandes dimensões e com maior resistência e rigidez, “a MLC ainda não é um material plenamente justificável para o emprego nas construções brasileiras, resultado da

pequena tradição no seu uso, elevado custo de adesivos e reduzido número de empresas envolvidas em sua fabricação.”

2.3 CROSS LAMINATED TIMBER: UM NOVO CONCEITO PARA A ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Foi na Suíça, mais precisamente nas cidades de Lausana e Zurique, no começo dos anos 90, que se iniciou o desenvolvimento da Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT). Nesse mesmo período, esse produto foi introduzido na Áustria e na Alemanha. Em 1996, pesquisas realizadas em conjunto entre as universidades e as indústrias na Áustria resultaram no desenvolvimento dos painéis de CLT modernos (BRANDNER, 2013; CRESPELL; GAGNON, 2010).

Segundo Crespell e Gagnon (2010), os países líderes no uso de CLT são: Áustria, Alemanha, Suíça, Suécia, Noruega e Reino Unido. Países como Estados Unidos, Canadá e Austrália também têm voltado sua atenção para esse novo conceito de construções em madeira.

Cross Laminated Timber (CLT), apresentado na Figura 2.8, é um produto de madeira projetado em forma de placa que pode ser utilizado tanto como elemento de parede quanto de laje (BRANDNER, 2013).

Figura 2.8 – Cross laminated timber



Fonte: Kuilen et al. (2011, p. 1623)

Os painéis de CLT são compostos por camadas de lamelas de madeira orientadas transversalmente às camadas adjacentes, como pode ser observado na Figura 2.9 (MOHAMMAD et al., 2012).

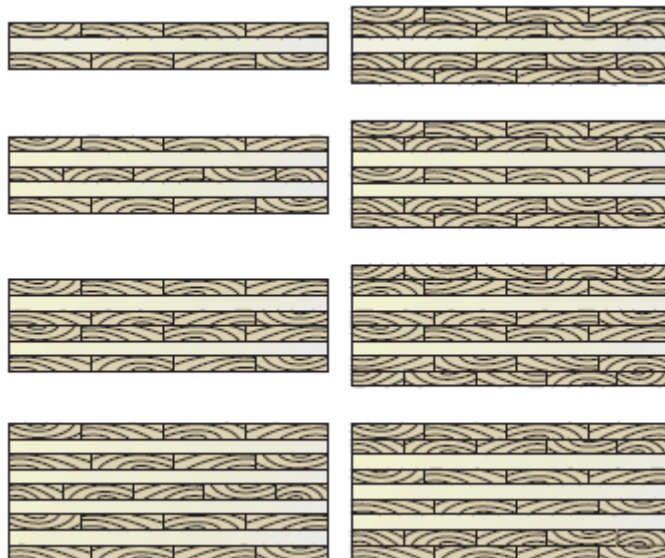
Figura 2.9 – Esquemática dos painéis de CLT



Fonte: Mohammad et al. (2012, p. 4)

Para se obter capacidades estruturais específicas, configurações especiais podem ser adotadas, em que camadas consecutivas são colocadas na mesma direção, proporcionando assim uma camada dupla (MOHAMMAD et al., 2012). Algumas configurações de painéis de CLT são ilustradas na Figura 2.10. Ressalta-se, ainda, que as camadas adjacentes também podem ser dispostas em orientações diferentes de 90 graus.

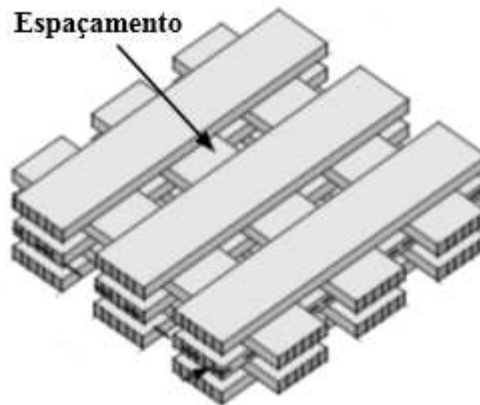
Figura 2.10 – Configurações especiais de painéis de CLT



Fonte: FPIinnovations (2011, p. 5)

Há também algumas configurações não muito comuns, que permitem a existência de espaços entre as lamelas de cada camada, como pode ser observado na Figura 2.11. Nesse caso, o comportamento mecânico de painéis de CLT varia com o tamanho das aberturas (ASHTARI, 2012).

Figura 2.11 – Painéis de CLT com aberturas



Fonte: Adaptado de Ashtari (2012, p. 7)

Predominantemente, as camadas são ligadas umas às outras por meio de adesivos, mas também se pode fazer uso de conectores mecânicos, tais como pregos, cavilhas ou parafusos, sendo que esta última opção é pouco comum na prática. As lamelas de uma mesma camada podem ou não serem coladas em suas faces estreitas (ASHTARI, 2012).

A laminação cruzada reduz significativamente os efeitos de retração e inchamento do material devido às variações de umidade e resulta num elemento de placa com expressivas propriedades de rigidez em diferentes direções (KUILEN et al., 2011; STEIGER; GÜLZOW; GSELL, 2008).

Segundo Mallo e Espinoza (2015), a *Cross Laminated Timber* (CLT) é uma tecnologia de construção promissora, pois permite utilizar madeira de baixo valor agregado para aplicações de alto valor agregado, o que contribui para uma melhor utilização dos recursos florestais.

A CLT faz parte de uma nova geração de produtos de madeira que traz diversos benefícios, como o alto nível de pré-fabricação, tempo de construção reduzido, baixa relação resistência/peso, possibilidade de construções de múltiplos pavimentos, bom isolamento térmico e acústico, além de contribuir com o desenvolvimento sustentável, por ser feita de um material renovável e por promover construções com menor geração de resíduos (FPInnovation, 2011).

Graças à sua estrutura laminar e sua versatilidade, os painéis de CLT tornam-se adequados ao uso na construção civil, fornecendo novos horizontes na engenharia de estruturas de madeira, em áreas até recentemente dominadas pelos materiais de construção minerais como o concreto armado, o aço e alvenaria (BRANDNER, 2013).

2.3.1 Processo de fabricação

As vantagens da CLT, além de grandes dimensões, estão particularmente evidentes em sua capacidade excepcional para a pré-fabricação, que fornece uma técnica de construção a seco e limpa, com elevada precisão e pequenas tolerâncias, além de rápida montagem (BRANDNER, 2013).

Basicamente, o processo de fabricação da CLT envolve as seguintes etapas: seleção da madeira serrada, classificação visual e mecânica das lamelas secas, aplainamento das lamelas, realização de cortes ou emendas dentadas (*fingerjoints*) se necessário, colagem nas faces estreitas das lamelas de uma mesma camada (opcional), organização e colagem das camadas, prensagem do painel, acabamentos, embalagem e transporte (BRANDNER, 2013; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Nas figuras a seguir podem ser observadas algumas dessas etapas. A Figura 2.12 mostra a montagem do painel, com o posicionamento e alinhamento das lamelas para aplicação do adesivo e posterior posicionamento das camadas. Na Figura 2.13 pode ser observada a prensagem do painel e o produto acabado.

Figura 2.12 – Montagem do painel



Fonte: Brandner (2013, p. 15)

Figura 2.13 – Prensagem e produto acabado

Fonte: Brandner (2013, p. 15)

Para a fabricação de painéis de CLT, a norma americana ANSI/APA PRG 320:2012 recomenda a seleção de espécies de madeira com densidade superior a $0,35 \text{ g/cm}^3$.

Para garantir um melhor desempenho do adesivo e para evitar variações dimensionais e fendas superficiais, o teor de umidade adequado para a madeira é $12\% \pm 3\%$. A madeira pode ser adquirida seca ou uma secagem adicional pode ser necessária na fábrica (MOHAMMAD et al., 2012). Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o teor de umidade de equilíbrio da madeira em 12% corresponde à classe de umidade 1, com umidade relativa do ambiente menor ou igual a 65%, como indicado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classes de umidade

Classe de umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$	$\geq 25\%$

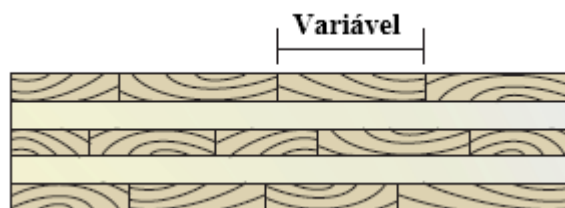
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997, p. 14)

Como a madeira é um material heterogêneo com diversos defeitos naturais, é possível, durante o processo de fabricação, eliminar grandes defeitos e distribuir os pequenos defeitos ao longo de um grande volume, resultando em uma homogeneização do material. Também é possível utilizar lamelas com melhores propriedades mecânicas nas regiões mais solicitadas, visando um melhor desempenho estrutural. Com essas técnicas, membros estruturais de alta qualidade podem ser produzidos utilizando-se madeira de qualidade estrutural não muito restritiva (GSELL et al., 2007; CRESPELL; GAGNON, 2010).

Em geral, os painéis de CLT são compostos por um número ímpar de camadas, normalmente de três a sete, e por razões técnicas possuem espessura limitada em 500 mm (KUILEN et al., 2011). Segundo Thiel e Schickhofer (2010), comumente são utilizados painéis de 3 e 5 camadas para paredes e painéis de 5 e 7 camadas para lajes. Painéis de 9 ou mais camadas são utilizados para fins especiais de elevado carregamento.

De acordo com FPInnovations (2011), a espessura das lamelas pode ser de 10 mm a 50 mm e a largura de 60 mm a 240 mm, sendo que as lamelas de uma mesma camada podem possuir larguras variáveis, como mostrado na Figura 2.14. Já, segundo a ANSI/APA PRG 320:2012, a espessura das lamelas deve estar entre 16 mm e 51 mm, sendo que a largura na direção principal deve ser maior que 1,75 vezes a espessura e na direção secundária maior que 3,5 vezes a espessura. A variação da espessura da lamela não deve exceder 0,2 mm ao longo da largura e 0,3 mm ao longo do comprimento.

Figura 2.14 – Possibilidade de variação na largura das lamelas



Fonte: Adaptado de FPInnovations (2011, p. 5)

A colagem das faces estreitas das lamelas de uma mesma camada tem vantagens no que diz respeito ao comportamento ao fogo, desempenho acústico e estanqueidade do ar. No entanto, esse procedimento pode criar restrições por causa de tensões internas devido a inchaço e retração, ocasionados pela variação climática. Assim, essas vantagens são limitadas (BRANDNER, 2013).

As dimensões dos painéis podem variar de acordo com os fabricantes, mas as larguras típicas são de 0,6 m, 1,2 m e 3 m, podendo chegar a 5 m em casos específicos, enquanto que o comprimento pode ser de até 18 m. Deve-se ressaltar que o transporte pode impor limitações ao tamanho do painel de CLT (FPInnovations, 2011).

O adesivo deve ser espalhado sobre a superfície da madeira o mais uniformemente possível. No entanto, isso pode ser difícil de controlar. Pouco adesivo leva a uma ligação ineficiente. Um pouco de excesso pode ser tolerado, mas muito resulta em desperdício e acaba escorrendo para fora do painel (CHEN, 2011).

A superfície de colagem deve estar aplainada e livre de variações que possam interferir no momento da colagem (ANSI/APA PRG 320, 2012).

Uma vez que o adesivo é aplicado, parte-se para a etapa de prensagem, em que o equipamento mais utilizado é a prensa hidráulica. Entretanto, o uso de prensas a vácuo e de ar comprimido também é possível, dependendo da espessura do painel e do adesivo utilizado (CRESPELL; GAGNON, 2010). São aplicadas pressões verticais e horizontais, sendo que se as lamelas de uma mesma camada forem coladas em suas faces estreitas só a pressão vertical já é suficiente (WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Especial ênfase tem que ser colocada na garantia de que todas as lamelas de uma mesma camada possuam a mesma espessura, para garantir que durante a prensagem toda a superfície do painel esteja exposta a uma pressão uniforme. Além disso, uma pressão mínima deve ser aplicada no painel, sendo esta dependente do tipo de adesivo utilizado. Deve-se ressaltar também que excesso de pressão provoca danos no material, por exemplo, o esmagamento da estrutura da célula da madeira (BRANDNER, 2013).

Tanto o tempo de montagem quanto o de prensagem são dependentes da temperatura e da umidade. Recomenda-se, durante a prensagem, que a temperatura ambiente seja superior a 15°C, porque alguns adesivos podem ter uma cura mais demorada a baixas temperaturas (WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Devido ao alto nível de pré-fabricação, as aberturas para portas e janelas já podem ser incluídas na fábrica, como mostrado na Figura 2.15 (KUILEN et al., 2011).

Figura 2.15 – Aberturas realizadas na fábrica



Fonte: Waugh, Weiss e Wells (2009, apud Costa 2013, p. 25)

Após estas etapas, os painéis recebem os acabamentos, ou seja, são lixados ou aplainados, para em seguida serem embalados e então transportados.

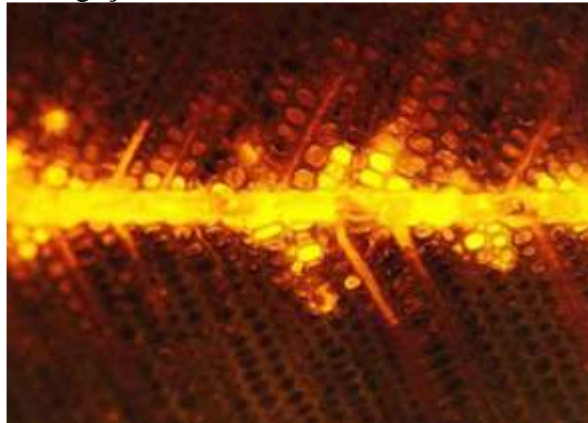
A chave para um processo de fabricação de CLT bem sucedido é o controle de parâmetros que influenciam na qualidade da madeira serrada e da ligação adesiva. Faz-se necessário a realização de testes para garantir que o produto final atenda as solicitações pretendidas (MOHAMMAD et al., 2012).

2.3.2 Adesivos

A escolha do adesivo adequado é determinada, principalmente, pelas condições do meio em que a estrutura está inserida, levando em consideração a temperatura e teor de umidade (MIOTTO, 2009). O adesivo é um material não-metálico, na maioria dos casos orgânico, que une os sólidos por meio de adesão da superfície. Esta ligação é produzida sem quaisquer elementos de fixação mecânicos (AUGUSTIN, 2008a).

Dentre as teorias que explicam o fenômeno da adesão, destacam-se a teoria da adsorção, em que a adesão é resultado do contato molecular entre os dois materiais que desenvolvem forças de atração superficiais; e a teoria do enganchamento mecânico, em que a penetração do adesivo num substrato poroso leva à formação de ganchos que se prendem nas camadas superficiais da madeira, como mostrado na Figura 2.16 (ALENCAR; MOURA, 2014).

Figura 2.16 – Detalhe de ligação adesiva na madeira usando microscopia de fluorescência



Fonte: Augustin (2008a, p. 40)

A variabilidade na densidade e porosidade entre os lenhos iniciais e tardios, cerne e alborno, e os extrativos presentes nas cavidades dos elementos anatômicos são aspectos que interferem no processo de colagem (ALENCAR; MOURA, 2014). Assim, as propriedades da madeira possuem um nítido efeito nas ligações adesivas e, comumente, as madeiras de coníferas apresentam melhor colagem que as de folhosas (CALIL NETO, 2011).

Os adesivos podem ser classificados em Tipo I, usado para edificações ao ar livre e temperaturas acima de 50°C, e Tipo II, utilizado em ambientes protegidos da chuva, sendo permitido curto tempo de exposição ao tempo ou a temperaturas acima de 50°C (AUGUSTIN, 2008a).

Os tipos de adesivos usados na indústria da madeira podem ser subgrupados em função do tipo de reação química (policondensação, poliadição ou polimerização), devendo-se indicar se é preparado a partir de um ou dois componentes (AUGUSTIN, 2008a).

Os adesivos à base de policondensação são mais econômicos, no entanto, além de emitirem formaldeído, necessitam de um tempo de prensagem e de cura mais longos. Alguns exemplos são: resorcinol-formaldeído (RF), fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), melamina-formaldeído (MF), melamina-ureia-formaldeído (MUF) e ureia-formaldeído (UF) (AUGUSTIN, 2008a).

Os adesivos à base de poliadição possuem maior eficiência, com tempo de cura mais curto, menor pressão na colagem, não emitem formaldeído e aceitam maior teor de umidade, entretanto são mais caros. Alguns exemplos desses adesivos são: emulsão polímero isocianato (EPI), poliuretano monocomponente (1C-PUR) e a resina epóxi (AUGUSTIN, 2008a).

O adesivo é o segundo material que compõe a CLT, e normalmente são utilizados os poliuretanos (PUR), embora também possam ser empregados os adesivos: MUF, PRF e EPI (CREPELL; GAGNON, 2010; WANG; PIRVU; LUM, 2011). Fabricado sem a adição de solventes ou de formaldeído, o adesivo PUR é reativo à umidade e, devido à reação química, normalmente produz ligeira formação de espuma durante o processo de cura (WANG; PIRVU; LUM, 2011).

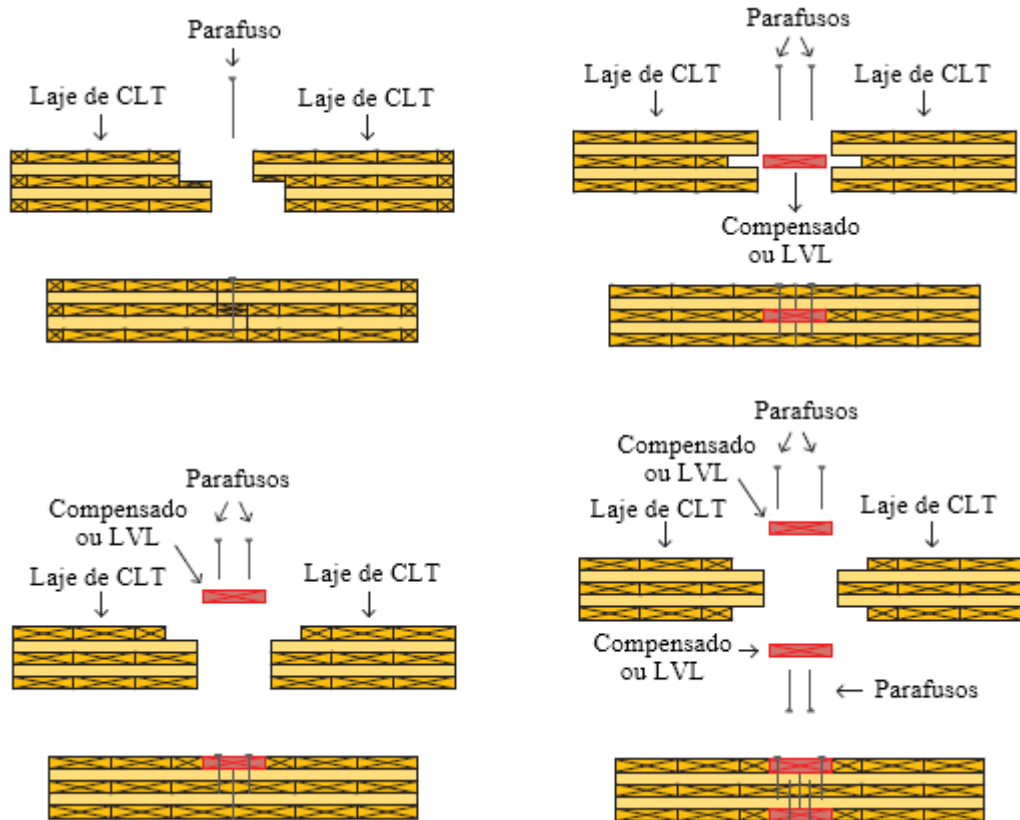
2.3.3 Conexões entre os painéis de CLT

As conexões desempenham um papel fundamental no que se refere à resistência e rigidez das estruturas. Diversas pesquisas mostram que muitas falhas ocorrem devido à concepção inadequada do sistema de conexão.

De acordo com Mallo e Espinoza (2015), as vinculações dos painéis de CLT são feitas através de ligação metálica, como parafusos e chapas, o que permite construções estruturalmente estáveis.

A Figura 2.17 mostra alguns tipos de ligação entre lajes de CLT feitas através de parafusos. Pode-se observar a possibilidade de se utilizar compensado ou LVL na conexão dos painéis.

Figura 2.17 – Tipos de conexões entre painéis de lajes de CLT



Fonte: Adaptado de Mohammad e Munoz (2011, p. 7-9)

Os painéis também podem ser ligados por emendas dentadas, como mostra a Figura 2.18.

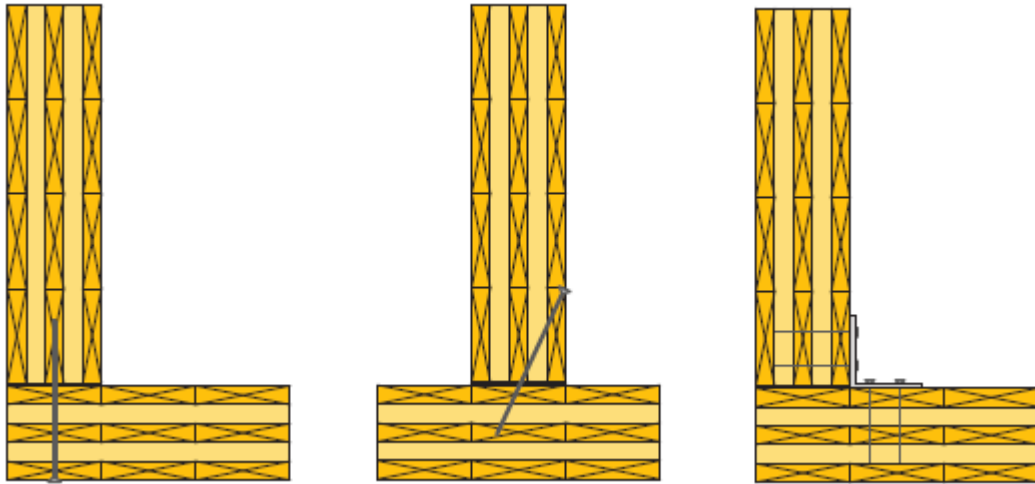
Figura 2.18 – Emendas dentadas entre painéis de CLT



Fonte: Stauder (2013, p. 8)

Na Figura 2.19 são apresentados alguns tipos de ligações entre paredes de CLT, utilizando-se parafusos e chapas metálicas.

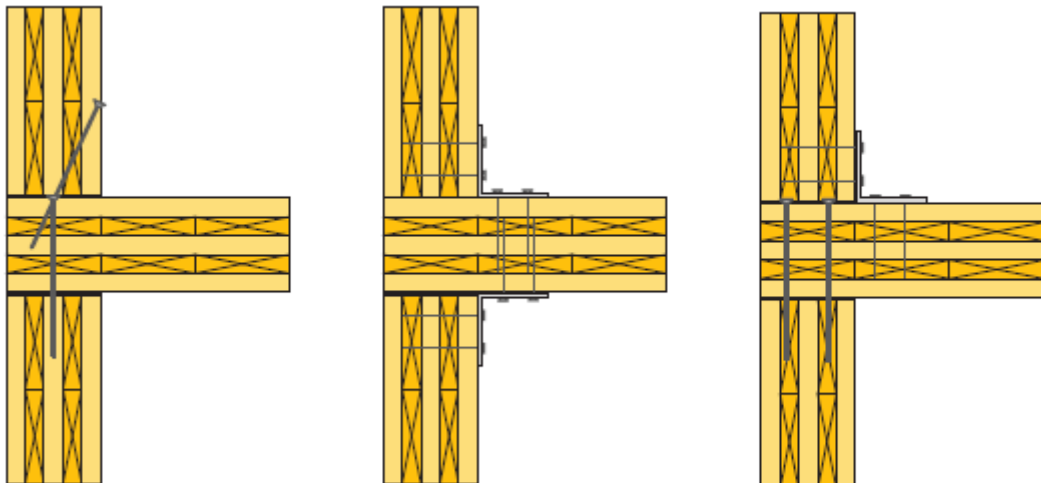
Figura 2.19 – Tipos de conexões entre painéis de paredes de CLT



Fonte: Adaptado de Mohammad e Munoz (2011, p. 11-13)

A Figura 2.20 mostra alguns exemplos de ligações entre lajes e paredes de CLT.

Figura 2.20 – Tipos de conexões entre lajes e paredes de CLT

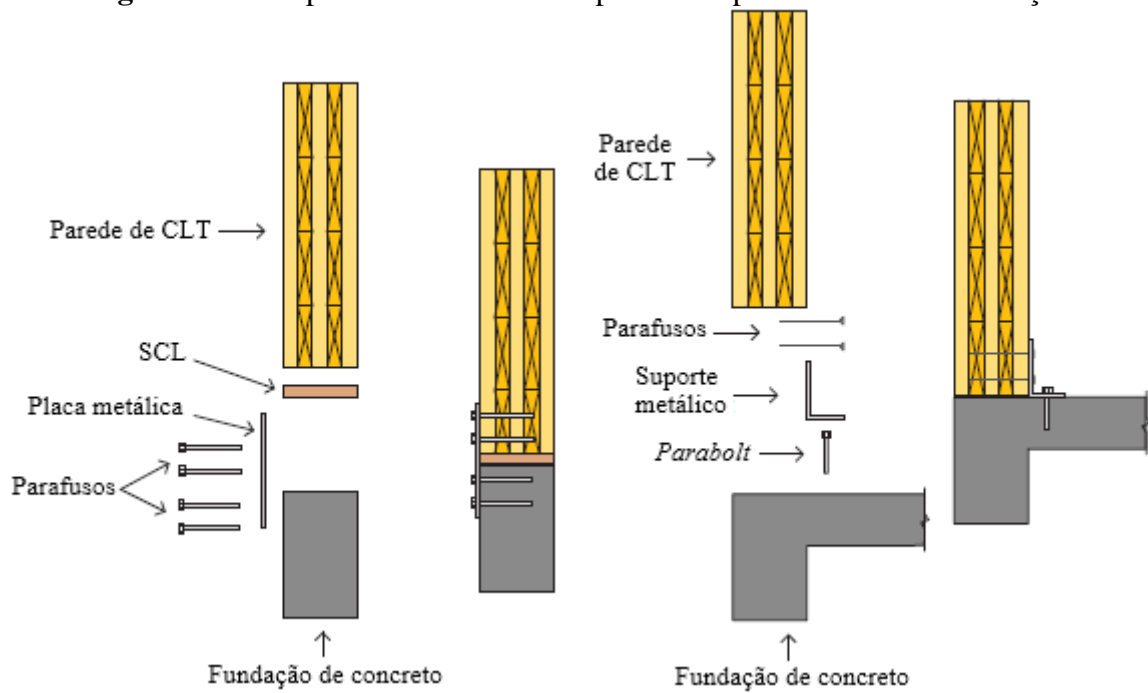


Fonte: Adaptado de Mohammad e Munoz (2011, p. 16-18)

Segundo Mohammad e Munoz (2011), a conexão entre a parede de CLT e a fundação pode ser feita através de chapas metálicas e parafusos autoatarraxantes (chumbadores, conhecidos como *parabolts*). Também pode ser colocada uma peça de *Structural Composite Lumber* (SCL) entre a parede e a fundação, como indicado na Figura 2.21.

Deve-se ressaltar a importância da utilização de materiais impermeabilizantes entre a fundação e os painéis, como, por exemplo, a manta asfáltica, a fim de contribuir com o desempenho e a durabilidade dos painéis de CLT.

Figura 2.21 – Tipos de conexões entre painéis de parede de CLT e fundação

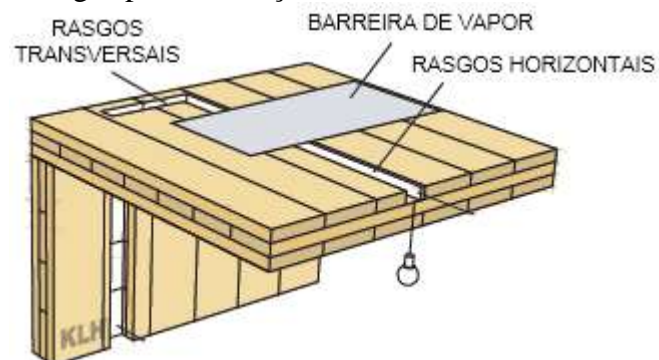


Fonte: Adaptado de Mohammad e Munoz (2011, p. 32)

2.3.4 Instalações elétricas e hidráulicas

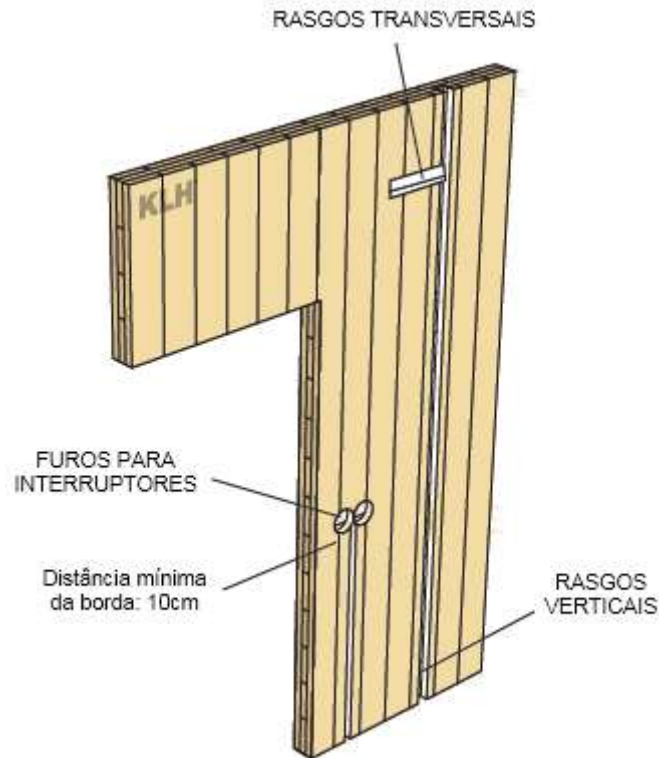
As instalações hidráulicas e elétricas podem ser feitas entre os painéis de CLT e placas de gesso acartonado ou então através de rasgos no próprio painel, como pode ser observado nas Figuras 2.22 e 2.23. Os rasgos transversais podem ser feitos com certas limitações, sendo que o desempenho estrutural deve ser analisado. De preferência, os rasgos devem ser paralelos às ações verticais em painéis de paredes e paralelos à direção principal da extensão em painéis de lajes (KLH Massivholz GmbH, 2011).

Figura 2.22 – Rasgos para instalações elétricas e hidráulicas em lajes de CLT



Fonte: Adaptado de KLH Massivholz GmbH (2011, p. 21)

Figura 2.23 – Rasgos para instalações elétricas e hidráulicas em paredes de CLT

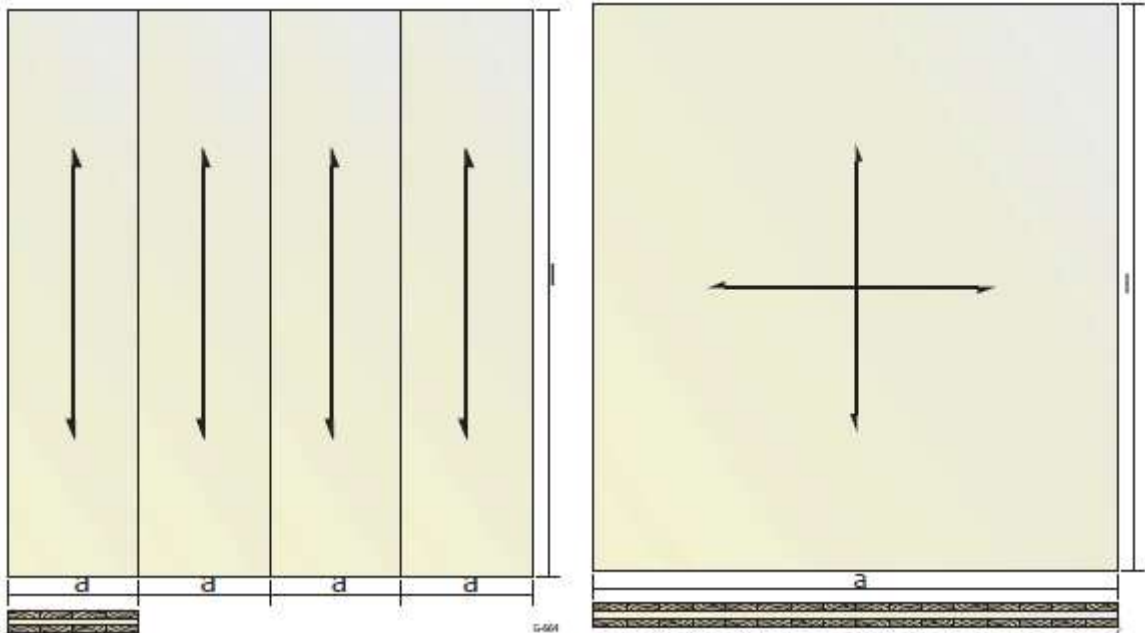


Fonte: Adaptado de KLH Massivholz GmbH (2011, p. 20)

2.3.5 Desempenho estrutural

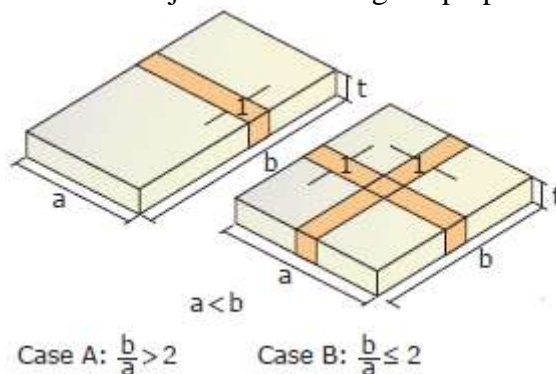
Hoje, a gama de aplicações de produtos de CLT abrange principalmente componentes planares, como elementos de parede, piso e teto. Mas o material também é adequado para elementos lineares, como vigas, pois, devido às camadas transversais, é menos suscetível a fissuras do que outros materiais sólidos de madeira, por exemplo, a madeira laminada colada (FLAIG; BLAß, 2014).

Ademais, a configuração transversal das camadas traz vantagens em termos de estabilidade dimensional, proporcionando elevadas propriedades de resistência e rigidez e promovendo transferência de forças em ambas as direções (CHEN, 2011). A Figura 2.24 ilustra duas possíveis soluções para lajes de CLT com transferência de força em uma e em duas direções

Figura 2.24 – Transferência de força em uma e em duas direções

Fonte: Gagnon e Popovski (2011, p.3)

Segundo Gagnon e Popovski (2011), em elementos de lajes de CLT carregados perpendicularmente, quando a maior dimensão for superior a duas vezes a menor dimensão, pode-se considerar uma distribuição de carga em apenas uma direção. Entretanto, quando a maior dimensão for igual ou inferior a duas vezes a menor dimensão, deve-se considerar a distribuição de carga em duas direções (Figura 2.25). É importante salientar que essas considerações dependem também da configuração da seção transversal e do tipo de suporte do painel.

Figura 2.25 – Elemento de laje de CLT carregado perpendicularmente ao plano

Fonte: Gagnon e Popovski (2011, p. 21)

Como a madeira apresenta um comportamento mecânico anisotrópico, com propriedades de resistência e rigidez significativamente maiores na direção paralela às fibras

(longitudinal) do que na direção perpendicular às fibras (radial e tangencial), as camadas transversais pouco contribuem para a resistência à flexão de elementos de laje de CLT com transferência de carga em apenas uma direção.

Visto que a madeira é um material heterogêneo podendo conter diversos defeitos naturais, como nós ou fibras inclinadas, as propriedades mecânicas sofrem grandes alterações. Para superar esta desvantagem, grandes defeitos são eliminados e os pequenos defeitos restantes são distribuídos ao longo de um grande volume, o que resulta em uma homogeneização do material e um melhor comportamento mecânico (GSELL et al., 2007).

Outra vantagem dos painéis de CLT é a possibilidade de utilizar as lamelas com melhores propriedades mecânicas nas camadas externas, que são as regiões mais solicitadas quando aplicadas sob a forma de lajes, enquanto que as lamelas com propriedades mecânicas reduzidas podem ser utilizadas no interior do painel (CRESPELL; GAGNON, 2010). Todas as lamelas de uma mesma camada devem possuir a mesma classe de resistência, caso contrário, a classe de resistência da camada deve ser determinada de acordo com a classe mais baixa das lamelas utilizadas (BRANDNER, 2013).

Segundo FPInnovations (2011), as lamelas das camadas exteriores dos painéis de CLT utilizados como paredes são normalmente orientadas paralelamente às cargas verticais para se obter um aumento na resistência. No caso de painéis utilizados como lajes, as camadas exteriores são paralelas à direção principal da extensão.

A norma ANSI/APA PRG 320:2012 estipula os valores característicos mínimos e os valores admissíveis das propriedades mecânicas dos painéis de CLT, constituídos com espécies norte-americanas, conforme mostrado nas Tabelas 2.4 e 2.5, respectivamente, em que: MOR representa a resistência à flexão, MOE o módulo de elasticidade, f_t a resistência à tração, f_c a resistência à compressão, f_v a resistência ao cisalhamento e f_s a resistência ao cisalhamento interlaminar (*rolling shear*). As designações E1, E2, E3 e E4 indicam painéis de CLT classificados visual e mecanicamente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Spruce-pine-fir*; *Douglas fir-Larch*; *Eastern Softwoods*, *Northern Species* ou *Western Woods*; e *Southern pine*. As designações V1, V2 e V3 indicam painéis classificados apenas visualmente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Douglas fir-Larch*, *Spruce-pine-fir* e *Southern pine*.

Tabela 2.4 – Valores característicos mínimos para testes de painéis de CLT (em MPa)

Classe	Direção principal da força						Direção secundária da força					
	MOR	MOE	f _t	f _c	f _v	f _s	MOR	MOE	f _t	f _c	f _v	f _s
E1	28,2	11.721	19,9	23,6	2,9	1,0	7,2	8.274	3,6	8,5	2,9	1,0
E2	23,9	10.342	14,8	22,3	3,9	1,3	7,6	9.653	4,7	10,1	3,9	1,3
E3	17,4	8.274	8,7	18,3	2,4	0,8	5,1	6.205	2,2	6,2	2,4	0,8
E4	28,2	11.721	19,9	23,6	3,8	1,2	8,3	9.653	4,7	10,8	3,8	1,2
V1	13,0	11.032	8,3	17,7	3,9	1,3	7,6	9.653	4,7	10,1	3,9	1,3
V2	12,7	9.653	6,5	15,1	2,9	1,0	7,2	8.274	3,6	8,5	2,9	1,0
V3	14,1	11.032	8,0	19,0	3,8	1,2	8,3	9.653	4,7	10,8	3,8	1,2

Fonte: Adaptado de ANSI/APA PRG 320 (2012, p. 10)

Os valores admissíveis, apresentados na Tabela 2.5, são resultado da divisão dos valores característicos por coeficientes, a fim de estipular propriedades mínimas para melhor desempenho do elemento e maior segurança do usuário.

Tabela 2.5 – Valores admissíveis para testes de painéis de CLT (em MPa)

Classe	Direção principal da força						Direção secundária da força					
	MOR	MOE	f _t	f _c	f _v	f _s	MOR	MOE	f _t	f _c	f _v	f _s
E1	13,4	11.721	9,5	12,4	0,9	0,3	3,4	8.274	1,7	4,5	0,9	0,3
E2	11,4	10.342	7,1	11,7	1,2	0,4	3,6	9.653	2,2	5,3	1,2	0,4
E3	8,3	8.274	4,1	9,6	0,8	0,3	2,4	6.205	1,1	3,3	0,8	0,3
E4	13,4	11.721	9,5	12,4	1,2	0,4	4,0	9.653	2,2	5,7	1,2	0,4
V1	6,2	11.032	4,0	9,3	1,2	0,4	3,6	9.653	2,2	5,3	1,2	0,4
V2	6,1	9.653	3,1	8,0	0,9	0,3	3,4	8.274	1,7	4,5	0,9	0,3
V3	6,7	11.032	3,8	10,0	1,2	0,4	4,0	9.653	2,2	5,7	1,2	0,4

Fonte: Adaptado de ANSI/APA PRG 320 (2012, p. 18)

Um fator que deve ser levado em conta é o efeito *rolling shear*, que ocorre quando tensões de cisalhamento levam a deformações em planos perpendiculares às fibras, como indicado na Figura 2.26. Isso se deve principalmente ao fato de que as propriedades de resistência e rigidez na direção normal às fibras são consideravelmente mais baixas do que na direção paralela às fibras (AUGUSTIN, 2008b).

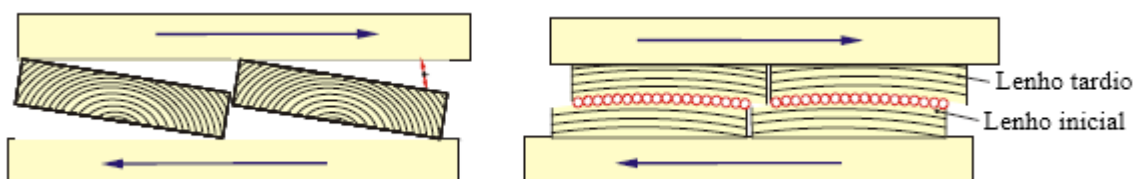
Figura 2.26 – Rolling Shear

Fonte: Adaptado de Zhou et al. (2014, p. 385)

As propriedades de resistência e rigidez perpendicular às fibras têm forte influência no desempenho estrutural dos painéis de CLT (ZHOU et al., 2014). Essas propriedades são influenciadas principalmente por fatores como espécie, densidade, espessura e teor de umidade das lamelas, configuração do painel, orientação dos anéis de crescimento, etc. (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

Alguns autores sugerem que as deformações por cisalhamento podem ser negligenciadas para painéis que apresentam uma relação vão/espessura superior a 20. Já outros ressaltam a necessidade de que essa relação seja maior que 30, até que mais pesquisas sejam realizadas nessa área. Deve-se ter cuidado quanto à essas limitações. Relações mais baixas tendem a ser pouco econômicas e ter maior influência na deformação por cisalhamento, enquanto que relações maiores podem ser controladas pelas propriedades de vibração e provável deformação por fluência (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

A partir de ensaios de flexão com painéis de CLT, com a intenção de ruptura por cisalhamento, foi observado que o mecanismo de falha é iniciado dentro das camadas cruzadas, através da combinação de duas formas de falha: a rotação das lamelas das camadas cruzadas e rolamento das zonas de lenho inicial, mostrado na Figura 2.27 (AUGUSTIN, 2008b).

Figura 2.27 – Mecanismo de falha nas camadas cruzadas devido a esforços cisalhantes

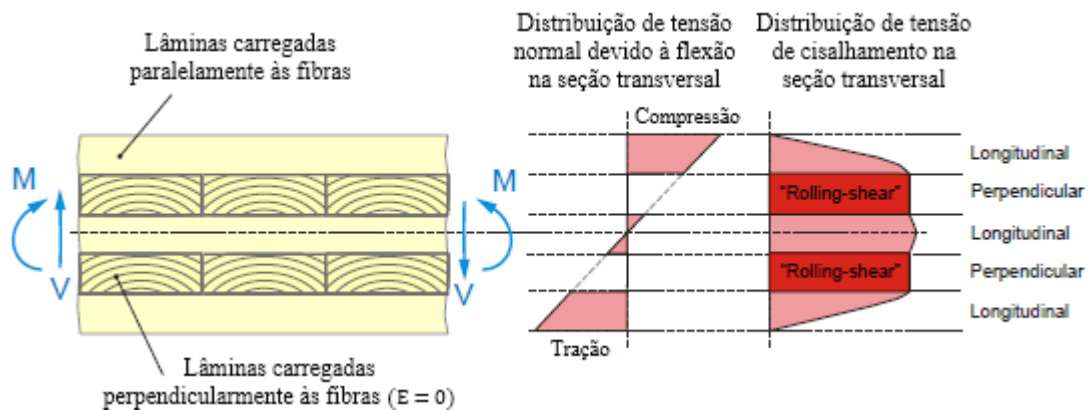
Fonte: Adaptado de Augustin (2008b, p. 79)

Devido ao efeito *rolling shear*, recomenda-se que a largura das lamelas seja maior ou igual a quatro vezes sua espessura. Caso essa recomendação não seja seguida, deve-se considerar o efeito de *rolling shear*. No entanto, inúmeras certificações técnicas para CLT permitem uma relação largura/espessura menor que quatro se as lamelas de uma mesma camada forem coladas (BRANDNER, 2013).

Segundo Augustin (2008b), quando as lamelas da camada transversal não são coladas em suas faces estreitas, o módulo de elasticidade pode ser negligenciado. Já quando elas são coladas, a camada tem uma pequena contribuição na resistência do material.

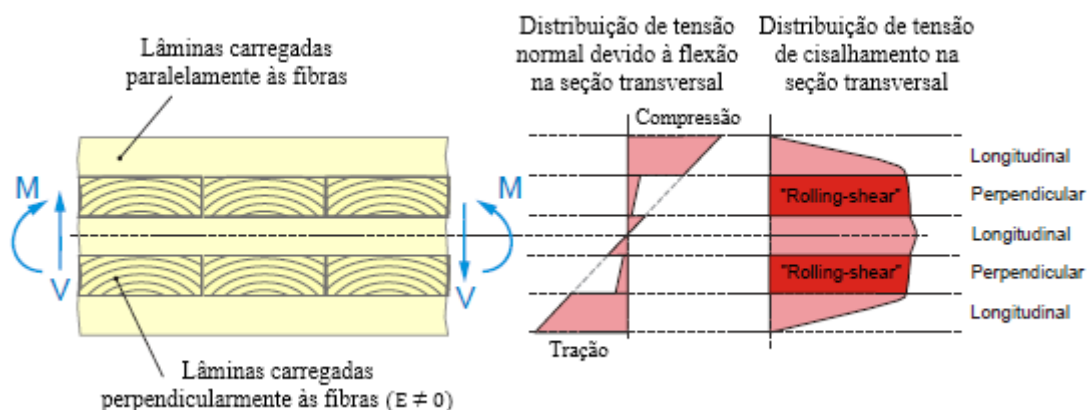
As Figuras 2.28 e 2.29 mostram a distribuição de tensão normal e de cisalhamento de um elemento de laje de CLT com as faces estreitas das lamelas não coladas e coladas, respectivamente.

Figura 2.28 – Distribuição de tensão de um elemento de CLT com as faces estreitas das lamelas não coladas



Fonte: Adaptado de Augustin (2008b, p. 81)

Figura 2.29 – Distribuição de tensão de um elemento de CLT com as faces estreitas das lamelas coladas



Fonte: Adaptado de Augustin (2008b, p. 78)

A determinação das propriedades mecânicas da CLT apresenta uma base de cálculo complexa. Diferentes métodos têm sido adotados para a determinação dessas propriedades. Alguns desses métodos são analíticos, enquanto outros são experimentais.

A avaliação experimental, para elementos de laje, envolve a determinação das propriedades de flexão, testando painéis de tamanho completo ou seções de painéis com uma razão específica vão-espessura. O problema com a abordagem experimental é que cada vez que a configuração do painel, o tipo de material ou qualquer um dos parâmetros de fabricação mudar, serão necessários novos ensaios para avaliar as propriedades de flexão de tais produtos (CRESPELL; GAGNON, 2010).

Uma abordagem analítica, uma vez verificada com os dados experimentais, oferece uma alternativa mais geral e menos onerosa. Tal abordagem pode prever as propriedades de resistência e de rigidez dos painéis CLT com base nas propriedades das lamelas que formam o painel (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

Vale ressaltar que o projeto de estruturas de madeira é muitas vezes regido por critérios de utilização como deflexão máxima, vibração e fluência. Prever o comportamento de deformação, em tais casos, exige um conhecimento preciso das propriedades elásticas dos elementos estruturais (STEIGER; GÜLZOW; GSELL, 2008).

A capacidade de carga e o comportamento em serviço de elementos de CLT são influenciados, em geral, pelo tamanho, forma e número de aberturas (portas, janelas, aberturas de escadaria e chaminés, etc.), pela composição da seção transversal (número e espessura das camadas, espécies de madeira, configuração do painel) e a qualidade da produção (AUGUSTIN, 2008b).

A abordagem analítica mais comum que foi adotada para elementos de laje em CLT, na Europa, baseia-se na Teoria de Vigas Mecanicamente Unidas (*Mechanically Jointed Beams Theory*), também chamado de Método Gama (*Gamma Method*), que está disponível no Anexo B da norma europeia EN 1995-1-1:2004. Essa teoria introduz um fator de correção para a rigidez à flexão, com o intuito de explicar a deformação de cisalhamento da camada perpendicular. No entanto, essa abordagem é válida apenas para vigas simplesmente apoiadas com distribuição de carga senoidal (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

Outra abordagem analítica para prever as propriedades de flexão da CLT é a Teoria do Compósito (*Composite Theory*), também conhecida como Método k (*k-method*). Entretanto, essa teoria não leva em conta a deformação por cisalhamento em camadas individuais (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

O método introduzido por Kreuzinger, chamado de Analogia de Cisalhamento (*Shear Analogy*), foi desenvolvido na Europa, e parece ser o mais preciso e adequado para a predição das propriedades de rigidez dos painéis de CLT. A metodologia leva em conta a deformação de cisalhamento nas camadas longitudinais e transversais e não se limita ao número de camadas do painel (GAGNON; POPOVSKI, 2011).

Entretanto, segundo Stürzenbecher, Hofstetter e Eberhardsteiner (2010), para elementos de laje com uma única direção de força, as abordagens analíticas de vigas levam a resultados razoáveis. No entanto, essas abordagens são incapazes de explicar a transferência de força bidimensional e, conseqüentemente, não conseguem refletir o mecanismo de transporte de força de uma placa. Ainda segundo os autores, as abordagens bidimensionais são convencionalmente limitadas à aplicação das teorias de placa laminada de Kirchhoff ou Mindlin, que não são capazes de reproduzir as deformações devido aos esforços cisalhantes. Para eles, a Teoria de Placa de Ren é a mais adequada, oferecendo excelentes resultados, apesar de ter custos computacionais ligeiramente mais elevados.

Portanto, o conhecimento da deformação real e o estado de tensão de elementos de CLT, bem como teorias de placa adequadas e confiáveis destinam-se a apoiar o desenvolvimento favorável deste produto de madeira de alto desempenho e reforçar a sua competitividade em relação a outros materiais de construção (STÜRZENBECHER; HOFSTETTER; EBERHARDSTEINER, 2010).

2.3.6 Desempenho sob ações sísmicas

Um grande projeto de pesquisa, chamado SOFIE, foi realizado para investigar o comportamento sob ações sísmicas, além de outras questões como durabilidade e desempenho ao fogo, de edifícios em CLT. Esse projeto foi realizado pelo Conselho Nacional Italiano de Pesquisa (*Trees and Timber Institute of the National Research Council of Italy – CNR-IVALSA*) em parceria com o Instituto Nacional de Ciências da Terra e Prevenção de Desastres no Japão (*National Institute for Earth Science and Disaster Prevention - NIED*), a Universidade de Shizuoka e o Instituto de Pesquisa de Construções (*Building Research Institute*) no Japão (CECCOTTI; SANDHAAS; YASUMURA, 2010).

Nesse projeto foram testados dois edifícios em CLT, um de três e outro de sete andares, em uma mesa de agitação (mesa vibratória) no Japão, como apresentado na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Projeto SOFIE

Fonte: Adaptado de Ceccotti, Sandhaas e Yasumura (2010, p. 4-5)

Um dos objetivos do projeto SOFIE foi avaliar o desempenho desses edifícios em situação de terremoto, com o intuito de determinar os parâmetros necessários para projetar edifícios em CLT em regiões sujeitas aos abalos sísmicos (CECCOTTI; SANDHAAS; YASUMURA, 2010).

Os edifícios tiveram um bom desempenho, sem danos graves, quando sujeitos a uma situação de terremoto com escala de magnitude 7,2 (CRESPELL; GAGNON, 2010). O edifício de três andares resistiu a 15 terremotos destrutivos sem qualquer dano grave (POPOVSKI; KARACABEYLI; CECCOTTI, 2011). No caso da construção de sete andares não houve deformação residual no final do ensaio e o desvio máximo entre andares foi de 40 mm (1,3%), enquanto que a deformação lateral máxima na parte superior do edifício foi apenas 287 mm (CRESPELL; GAGNON, 2010).

Os edifícios em CLT apresentaram comportamento dúctil e boa dissipação de energia. Tal comportamento foi influenciado principalmente pelas ligações mecânicas utilizadas (CRESPELL; GAGNON, 2010).

2.3.7 Vibração

Do ponto de vista de controle de vibração, o baixo índice de amortecimento dos pisos de CLT se torna uma desvantagem, pois deixa uma situação desconfortável aos ocupantes. Por isso, é necessário adotar medidas que aumentem a taxa de amortecimento dos pisos em CLT, para melhorar seu desempenho a vibração. Quanto maior for o amortecimento, mais fácil é de controlar as vibrações. Esse amortecimento é determinado pela concepção do projeto e pelos

detalhes de construção, incluindo elementos estruturais e não estruturais, sistemas de apoio, etc. (HU; GAGNON, 2011).

2.3.8 Desempenho térmico e acústico

Segundo Mohammad et al. (2012), o controle adequado do som em edifícios é um requisito mínimo que deve ser atendido. No que diz respeito a isso, painéis de CLT apresentam um bom desempenho acústico. Esse desempenho depende principalmente dos detalhes de construção, incluindo materiais utilizados, como revestimentos e isolamentos, a espessura e a ligação das camadas.

Em relação ao desempenho térmico, a CLT se mostra um sistema vantajoso em relação aos sistemas tradicionais, como alvenaria, pois permite a utilização de espessuras significativamente menores para os mesmos valores de coeficiente de transmissão térmica (COSTA, 2013). Como é feito de madeira, a CLT tem as mesmas propriedades térmicas fundamentais da mesma, logo, o desempenho térmico pode ser melhorado com o aumento da sua espessura (CRESPELL; GAGNON, 2010). Também se pode optar pela utilização de materiais isolantes para minimizar a perda ou ganho de calor (STAUDER, 2013).

Além disso, por apresentar esse bom desempenho térmico, a CLT contribui para a redução da energia gasta com aquecimento e refrigeração de ambientes (CRESPELL; GAGNON, 2010).

2.3.9 Desempenho ao fogo

A madeira é um material combustível que quando submetida à elevação da temperatura passa por um processo de degradação térmica e tem sua capacidade resistente reduzida, devido principalmente a diminuição gradual da seção e a redução das propriedades mecânicas de resistência e rigidez (CALIL JUNIOR; PINTO, 2006).

Vários fatores podem afetar o desempenho de painéis de CLT ao fogo, incluindo a espécie da madeira, o tipo de adesivo utilizado, a espessura do painel, a quantidade e a espessura das camadas, o tipo de exposição ao fogo e os métodos de proteção utilizados.

Em situação de incêndio, produtos de madeira maciça apresentam um bom desempenho devido a uma lenta taxa de carbonização, que gera uma camada carbonizada que funciona como isolante e assim protege o restante da madeira dos efeitos do calor elevado. Se as camadas carbonizadas caírem após a carbonização, a função de proteção contra incêndio do carvão

vegetal está perdida e tem-se um aumento da taxa de carbonização devido ao aumento da temperatura. A posição do painel (horizontal para lajes e vertical para paredes), a espessura das camadas, bem como o comportamento do adesivo de ligação à alta temperatura podem influenciar na queda das camadas carbonizadas, por isso devem ser considerados na avaliação do comportamento ao fogo dos painéis de CLT (FRANGI et al., 2008).

Segundo Frangi et al. (2008), painéis de CLT com camadas espessas apresentam um comportamento melhor ao fogo em comparação com painéis com camadas finas.

A capacidade de carga de elementos de madeira expostas ao fogo diminui com a temperatura e cai para zero a 300°C. Por isso, é crucial investigar o comportamento ao fogo de painéis de CLT para garantir padrões de segurança em construções de madeira, uma vez que a madeira é submetida à degradação quando exposta a altas temperaturas (FRAGIACOMO et al., 2012).

2.3.10 Desempenho ambiental

Sustentabilidade é toda ação destinada a manter as condições energéticas, informacionais e físico-químicas que sustentam todos os seres, a comunidade de vida e a vida humana, visando a sua continuidade e ainda a atender as necessidades da geração presente e das futuras, de tal forma que o capital natural seja mantido e enriquecido em sua capacidade de regeneração, reprodução e coevolução (MIOTTO, 2013, p. 52).

Segundo Miotto (2013), a indústria da construção civil tem um papel fundamental para o desenvolvimento sustentável e, para ser sustentável, um empreendimento deve ser ecologicamente correto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceito.

Edificação sustentável é aquela que pode manter moderadamente ou melhorar a qualidade de vida e harmonizar-se com o clima, a tradição, a cultura e o ambiente na região, ao mesmo tempo em que conserva a energia e os recursos, recicla materiais e reduz as substâncias perigosas dentro da capacidade dos ecossistemas locais e globais, ao longo do ciclo de vida do edifício (MIOTTO, 2013, p. 56).

Miotto (2013, p.58) ressalta que construção sustentável não é apenas aquela que proporciona baixo consumo de energia, mas que apresenta também “[...] preocupações referentes ao ciclo de vida e à geração de resíduos pelos materiais de construção, à conservação do solo e da água e à qualidade do ar e do ambiente interno”. Além disso, o autor salienta que

para ser sustentável, a construção deve ser durável e suprir os níveis de conforto (térmico, acústico, luminoso, etc.).

“Por se tratar de um material renovável e biodegradável, a madeira é indicada frequentemente para a composição das edificações sustentáveis” (MIOTTO, 2013, p. 104). A maioria das construções feitas em madeira requer menos energia durante a fabricação dos elementos e durante a fase de construção. Além disso, a madeira é o único material de construção com um equilíbrio negativo de gás carbônico (CO₂), ou seja, ela armazena CO₂ (KUILEN et al., 2011).

Segundo Kuilen et al. (2011), cada metro cúbico de madeira detém uma média de 0,8 a 0,9 toneladas de CO₂. Já de acordo com Green e Karsh (2012), dependendo da espécie, dos métodos de colheita e dos métodos de fabricação, um metro cúbico de madeira pode armazenar entre 1 e 1,6 toneladas de CO₂.

O sucesso do sequestro de carbono baseia-se em práticas florestais sustentáveis. Uma floresta gerida de forma adequada pode agir como um grande reservatório de carbono, reduzindo a quantidade de emissões de carbono na atmosfera. Quando uma árvore é transformada em um produto de madeira, o carbono acumulado pela árvore fica armazenado dentro desse produto durante todo seu ciclo de vida (GREEN; KARSH, 2012).

Com o esgotamento das fontes de energia não renováveis e as mudanças climáticas, torna-se pertinente o estudo da madeira como material estrutural, já que esta reduz significativamente as emissões de CO₂ na atmosfera, tem um menor consumo de combustíveis fósseis, além de ser um recurso renovável.

Os impactos das mudanças climáticas levantam a necessidade de olhar para soluções estruturais melhores que o aço e o concreto armado, sendo a madeira uma parte importante dessa solução. Isso não quer dizer que o aço e o concreto armado serão eliminados das construções. Na verdade, serão necessárias soluções híbridas de madeira, aço e concreto, cada um com um propósito, mas no final o aumento da utilização da madeira, principalmente em grandes edifícios, se tornará uma abordagem viável para a construção de estruturas neutras em carbono (GREEN; KARSH, 2012).

Com isso, a CLT se apresenta como alternativa para o desenvolvimento sustentável. Esse sistema construtivo possui alto nível de pré-fabricação, o que contribui para menor geração de resíduos. Também melhora o desempenho térmico das edificações, reduzindo a energia gasta em sistemas de refrigeração. Além disso, é feito a partir de um material renovável, que requer menos energia para sua produção e armazena dióxido de carbono, reduzindo a emissão desse poluente na atmosfera.

2.3.11 Durabilidade

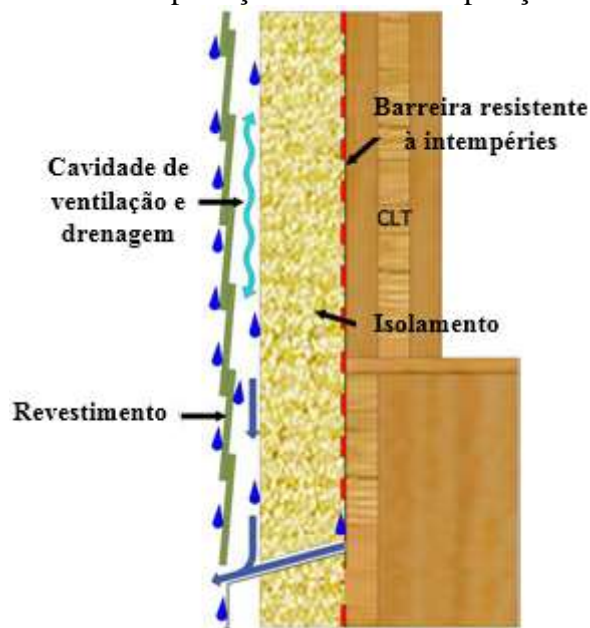
Um projeto adequado é um fator determinante na durabilidade de edifícios em CLT (STAUDER, 2013). Quando expostos à umidade excessiva, painéis de CLT podem absorver uma grande quantidade de umidade e ter uma secagem demorada, devido à espessura do produto (MOHAMMAD et al., 2012).

Além disso, essa umidade pode provocar o aparecimento de fungos que resultam na degradação da madeira. Felizmente, existem soluções que podem ajudar a garantir a durabilidade do edifício, como determinados revestimentos, barreiras de ar e tratamento da madeira (STAUDER, 2013).

Embora ocasionalmente utilizado desta forma, painéis de CLT não são materiais de revestimento e não se destinam a serem expostos ao meio ambiente exterior. Esses painéis constituem um elemento estrutural sensível à umidade e por isso devem ser protegidos contra chuva e outras fontes de umidade a partir de projetos bem concebidos (FPInnovation, 2011).

Segundo Finch et al. (2011), além de detalhes básicos de projeto – como a utilização de beirais nos telhados –, existem outras estratégias para proteger painéis de CLT da exposição à chuva. Uma dessas estratégias está indicada na Figura 2.31, que prevê a utilização de revestimentos com cavidade de ventilação e drenagem, placas de isolamento e barreira resistente às intempéries.

Figura 2.31 – Detalhe da proteção da CLT da exposição à chuva



Fonte: Adaptado de Finch et al. (2011, p. 7)

2.3.12 Aplicações

O edifício residencial Murray Grove, apresentado na Figura 2.32, é um exemplo da aplicação do sistema *Cross Laminated Timber*. Construído em 2008, em Londres, o edifício possui 9 pavimentos, sendo o térreo em concreto armado e os 8 andares superiores em CLT. O tempo de construção da estrutura foi de três dias por andar com apenas quatro carpinteiros e o consumo de CLT foi de 950 m³ (CRESPELL; GAGNON, 2010).

Figura 2.32 – Edifício Murray Grove



Fonte: Crespell e Gagnon (2010)

Outro exemplo de aplicação da CLT é na Universidade de Norwich, na Inglaterra, construída em 2010 (Figuras 2.33 e 2.34). A estrutura de três andares e 9.000 m² foi construída em 16 semanas e o volume de madeira dessa edificação foi de 3.095 m³. Essa edificação conseguiu armazenar aproximadamente 2.476 toneladas de gás carbônico (CO₂) que seriam emitidos para a atmosfera. No entanto, o transporte dos painéis emitiu aproximadamente 141 toneladas desse poluente. Com isso, foram removidos da atmosfera em média de 2.335 toneladas de CO₂ (KLH UK, [201-]).

Figura 2.33 – Construção da Universidade de Norwich na Inglaterra



Fonte: KLH UK [201-]

Figura 2.34 – Universidade de Norwich, Inglaterra



Fonte: KLH UK [201-]

Outros exemplos da aplicação do sistema CLT podem ser observados nas Figuras 2.35 e 2.36, que mostram a aplicação desse sistema em uma residência e em um edifício comercial, respectivamente.

Figura 2.35 – Residência em CLT na Áustria



Fonte: Steiger, Gülzow e Gsell (2008, p. 172)

Figura 2.36 – Edifício comercial em CLT na Alemanha



Fonte: FPInnovations (2011, p. 33)

O sistema construtivo em CLT dispõe de um enorme potencial para a construção civil, bem como para a sociedade como um todo. Ele tem sido estudado como uma nova solução para a construção de edifícios altos, além de ser ideal para reformas e modernização de edifícios existentes (BRANDNER, 2013).

2.3.13 Dificuldades e potencialidades de implantação do CLT no Brasil

Como a CLT é um produto relativamente novo, seu uso não é muito difundido no Brasil. Além disso, a utilização da madeira como material estrutural não é uma prática comum no país. São poucas as pesquisas nacionais realizadas a respeito da CLT, entre elas destacam-se as dissertações de Passareli (2013), Pereira (2014) e Alencar (2015).

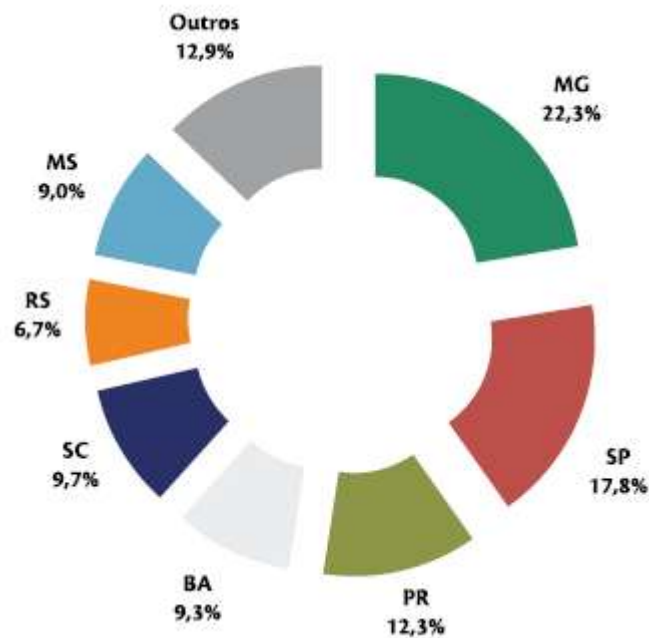
Passareli (2013) buscou estudar as diferentes possibilidades para produção de painéis que utilizam a laminação cruzada, através da relação do projeto do produto com o processo produtivo, além de analisar sua adequação no contexto nacional, mais precisamente para o Estado de São Paulo. O autor ainda sugere a utilização da madeira em programas de construção de grande escala, com impactos ambientais proporcionais, como uma forma de compensação ou amenização dos impactos ambientais da construção.

Pereira (2014) desenvolveu uma metodologia de ensaio para caracterização estrutural de painéis de CLT, visando contribuir para a normatização do produto no país. Ele produziu um painel com dimensões estruturais, utilizando madeira de *Pinus elliotti* e adesivo estrutural à base de melamina-ureia-formaldeído (MUF), realizando diversos testes para determinação das propriedades físicas e mecânicas do painel.

Alencar (2015) analisou a qualidade e desempenho estrutural de 16 painéis de CLT com três camadas e diferentes combinações das tábuas de *Pinus spp* e *Eucalyptus grandis*. Também realizou ensaios para caracterização dos adesivos MUF e UF, com orientação paralela e perpendicular às fibras e com diferentes combinações das duas espécies citadas.

O Brasil apresenta extensas áreas de plantio florestal de eucalipto e pinus, o que contribui para a produção de painéis de CLT no país. Segundo a ABRAF (2013), os estados com maior área de plantação desses gêneros são: Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Bahia, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul, como apresentado no gráfico da Figura 2.37.

Figura 2.37 – Distribuição da área de plantios de eucalipto e pinus por estado (2012)



Fonte: ABRAF (2013)

A Região Sudeste detém a maior área com plantação de eucalipto, enquanto que na Região Sul predomina a plantação de pinus. Ressalta-se que o Paraná é o estado com maior área plantada de pinus, com quase 620 mil hectares. Essa maior concentração de plantios florestais na Região Sul e Sudeste do país, aproximadamente 72%, se justifica pela localização das principais unidades industriais de celulose e papel, painéis de madeira industrializada, siderurgia a carvão vegetal e madeira mecanicamente processada (ABRAF, 2013).

Com técnicas apropriadas de manejo florestal, o Brasil apresenta boas condições para implantação da CLT no país. Calil Junior (2002) destaca a necessidade da industrialização dos processos construtivos para melhor aplicação da madeira como material estrutural de

construção, ressaltando que o desenvolvimento da indústria de estruturas de madeira na Europa do pós-guerra ocorreu, principalmente, devido à necessidade de reconstrução rápida e econômica das cidades destruídas pela guerra.

Além disso, são necessárias mais pesquisas referentes ao desempenho estrutural da CLT, que considerem as características das madeiras brasileiras, a fim de usar de forma adequada esse produto. Análises de custo e tempo de construção também são de grande importância. Com isso, a utilização da CLT reduziria os impactos causados pela construção civil, além de promover construções sustentáveis e modernização dos sistemas construtivos no país.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a verificação do comportamento mecânico de painéis de CLT, evidenciados na revisão bibliográfica, foram realizados ensaios com base na norma americana ANSI/APA PRG 320:2012. A seguir, serão descritos os materiais e métodos utilizados para a produção e caracterização mecânica de painéis de CLT com três camadas ortogonais.

3.1 MATERIAIS

Para a produção dos painéis de CLT foram utilizadas lamelas de madeira do gênero pinus e adesivo poliuretano monocomponente, especificados a seguir.

3.1.1 Madeira

A madeira utilizada para a fabricação dos painéis de CLT faz parte do grupo das gimnospermas, da ordem das coníferas e do gênero pinus. A escolha desse gênero se deu por ser madeira proveniente de florestas plantadas e pela disponibilidade comercial em diversas regiões do Estado do Paraná. Foram adquiridos aproximadamente 2 m³ de madeira.

Para a montagem dos painéis, foram adquiridas 220 lamelas de madeira de pinus, aplainadas e secas, com espessura média de 2,15 cm, larguras entre 9 cm e 11 cm e comprimentos entre 300 e 320 cm, como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Lamelas de madeira de pinus para a produção de painéis



Para a caracterização da madeira foram adquiridos 22 caibros com seção transversal de 5 cm x 5 cm e 22 vigas com seção transversal de 5 cm x 10 cm, todos com aproximadamente 300 cm de comprimento. Cabe salientar que os caibros e vigas foram adquiridos do mesmo fornecedor e eram da mesma espécie das lamelas. Como estavam úmidas, essas peças precisaram passar por um processo de secagem natural, em ambiente coberto e ventilado.

3.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado para a fabricação dos painéis foi doado pela empresa Jowat Adhesives e consiste em um poliuretano monocomponente, com a designação comercial de Jowat-Faser PUR 686.60, importado da Suíça, como mostrado na Figura 3.2. A quantidade de adesivo doada foi de 5 kg.

Figura 3.2 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowat-Faser PUR 686.60



De acordo com especificações do fabricante, devem-se utilizar luvas e vestuário de proteção, bem como proteção ocular e facial para a aplicação do adesivo. As superfícies a serem coladas devem estar limpas, livre de poeira e gorduras. Além disso, deve-se umedecer o material com névoa de borrifação e aplicar o adesivo somente de um lado.

O tempo de cura é de 45 minutos a 20°C e 50% de umidade relativa do ar, e o tempo necessário de prensagem fica entre 180 e 240 minutos. O consumo recomendado pela empresa fornecedora é de 100 g a 120 g de adesivo por metro quadrado, já segundo Calil Neto (2011), a quantidade indicada é de 200 g de adesivo por metro quadrado.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Com o intuito de se obter maiores informações a respeito dos materiais empregados para a produção dos painéis de CLT, foram realizados ensaios para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas, averiguadas por meio das prescrições do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

3.2.1 Caracterização da madeira

Os ensaios para determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizados, respectivamente, nos laboratórios da União de Ensino do Sudoeste do Paraná (UNISEP), campus Francisco Beltrão, e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Dois Vizinhos.

Foram realizados os ensaios de umidade, densidade e estabilidade dimensional tanto para os caibros e vigas utilizados para caracterização mecânica da madeira, quanto para as lamelas utilizadas para confecção dos painéis. Salienta-se que para os ensaios de densidade e estabilidade dimensional foram utilizados os mesmos corpos-de-prova do ensaio de umidade.

Para determinação das propriedades mecânicas da madeira foi utilizada a máquina universal de ensaios da EMIC, modelo DL-30000, com capacidade de carga de 300 kN. Foram realizados os ensaios de compressão paralela e normal às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento e flexão. Também foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras de corpos-de-prova retirados das lamelas de madeira, neste caso com a área da seção transversal reduzida, por se tratarem de peças delgadas. Não foi possível realizar o ensaio de tração paralela às fibras pela falta de aparatos para a realização do mesmo.

A relação dos ensaios com seus respectivos itens do Anexo B da norma ABNT NBR 7190:1997, bem como a quantidade de corpos-de-prova, estão apresentados na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 – Ensaios de caracterização da madeira

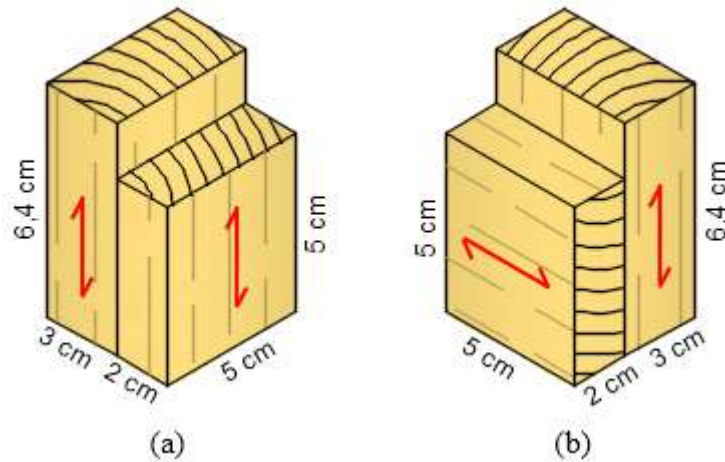
Ensaio	Item do Anexo B da NBR 7190	Quantidade de corpos-de-prova
Umidade	B.5	
Densidade	B.6	27
Estabilidade dimensional	B.7	
Umidade – lamelas	B.5	
Densidade – lamelas	B.6	15
Estabilidade dimensional – lamelas	B.7	
Compressão paralela às fibras	B.8	12
Compressão normal às fibras	B.10	10
Tração normal às fibras	B.11	15
Cisalhamento	B.12	19
Flexão	B.14	10
Compressão paralela às fibras – lamelas	B.8	15

3.2.2 Caracterização do adesivo

Para a avaliação da ligação adesiva na madeira foram realizados ensaios de cisalhamento na linha de cola com a orientação das fibras paralela e perpendicular, tanto para os caibros utilizados para caracterização da madeira, quanto para as lamelas utilizadas para confeccionar os painéis. No primeiro caso, os corpos-de-prova foram prensados no centro poliesportivo da Universidade Paranaense (UNIPAR), campus Francisco Beltrão, colocando-se anilhas metálicas em cima dos corpos-de-prova, exercendo assim a pressão de aproximadamente 0,8 MPa. No segundo caso, os corpos-de-prova foram prensados juntamente com os painéis, em uma fábrica de portas na cidade de Renascença, utilizando-se uma prensa hidráulica e aplicando-se uma pressão de 1,2 MPa. Em ambas as situações foram aplicados, com auxílio de rolo e pincel, 200 g de adesivo por metro quadrado.

Os ensaios seguiram as prescrições do item B.18 do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 e foram realizados no laboratório de tecnologia da madeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Dois Vizinhos. A Figura 3.3 esquematiza os corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela e perpendicular às fibras. Vale ressaltar que, para os corpos-de-prova confeccionados com as lamelas de madeira, não foi possível atender as dimensões solicitadas pela norma, visto que a espessura das lamelas era de aproximadamente 2,15cm.

Figura 3.3 – Corpos-de prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola (a) paralelo e (b) normal às fibras



A Tabela 3.2 mostra a relação dos ensaios com sua respectiva quantidade de corpos-de-prova.

Tabela 3.2 – Ensaio de caracterização do adesivo

Ensaio	Caibros	Lamelas
Cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras	9	15
Cisalhamento na lâmina de cola normal às fibras	9	15

Após os ensaios, os corpos-de-prova foram analisados, a fim de verificar o percentual de falha na lâmina de cola, sendo divididos em quatro grupos: entre 0% e 25%, 25% e 50%, 50% e 75%, e 75% e 100% de ruptura na linha de cola.

3.3 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA DAS LAMELAS

Na fase preliminar do processo de produção, foi realizada a classificação visual e mecânica das 220 lamelas de madeira com a intenção de realizar a disposição adequada destas nos painéis de CLT.

3.3.1 Classificação visual

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade (CARREIRA, 2003, p. 11).

Como a madeira empregada tratava-se do gênero pinus, a classificação visual das lamelas de madeira foi embasada num estudo feito por Carreira (2003), que utilizou o método norte-americano de classificação visual do *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB, 1994), com base na norma ASTM D245:1993. Esse método limita a quantidade de defeitos, como nós, fibras inclinadas e fendas, e agrupa as peças de acordo com a densidade.

A classificação visual foi realizada examinando-se as quatro faces e as extremidades de cada peça, avaliando-se as características aparentes na superfície em todo seu comprimento.

Por se tratarem de tábuas (peças com espessura inferior a 38 mm e largura entre 38 mm e 140 mm), as lamelas foram classificadas em Industrial 55 (I55), Industrial 45 (I45) ou Industrial 26 (I26), sendo que estas devem apresentar as mesmas características das peças da classe N° 1, N° 2 e N° 3 para caibros e pranchas, respectivamente.

Essas classes são determinadas em função da razão de resistência, que é uma relação hipotética entre a resistência de uma peça de madeira com defeitos que reduzem sua resistência e a resistência de um corpo-de-prova, desta mesma madeira, isento de defeitos (CARREIRA, 2003).

Em relação aos nós, foram atendidos os seguintes critérios, elucidados por Carreira (2003, p. 27):

Os nós nas tábuas são medidos pela média dos diâmetros nas duas faces opostas, sendo cada diâmetro tomado como a distância entre as linhas paralelas às bordas da tábua. Os nós não são medidos na face estreita, desde que eles apareçam também em uma ou ambas as faces largas. A soma dos diâmetros dos nós em 152 mm (6") de comprimento em qualquer posição da peça não deve exceder duas vezes a dimensão do maior nó permitido para a classe. Dois ou mais nós da máxima dimensão permitida não devem ser admitidos nos mesmos 152 mm de comprimento em uma face.

As lamelas apresentavam pequenas variações em suas dimensões, mas, para determinação dos limites de defeitos, foram consideradas com 2,15 cm de espessura, 10 cm de largura e 310 cm de comprimento.

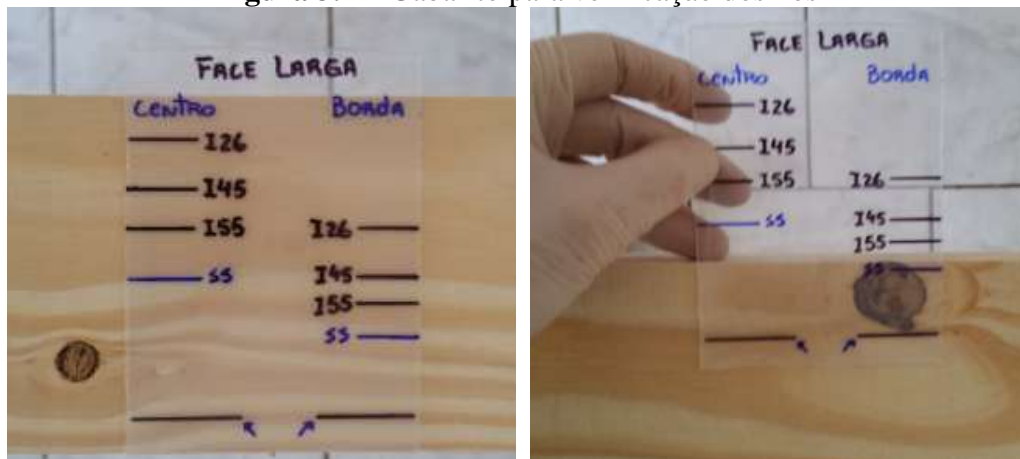
A Tabela 3.3 apresenta os limites da inclinação das fibras, dimensões dos nós na face larga, rachas e fendas para cada classe.

Tabela 3.3 – Limitações nos defeitos para cada classe

Classe	I55	I45	I26
Razão de resistência (%)	55	45	26
Inclinação das fibras	1:10	1:8	1:4
Nó no centro da face larga (cm)	5,03	6,13	7,51
Nó na borda da face larga (cm)	2,94	3,71	5,01
Racha superficial (cm)	60	90	-
Fenda (cm)	10	15	51,7

Nota: se a racha atravessa a peça em sua espessura, considerar os mesmos limites das fendas.

Para facilitar a classificação visual das lamelas, foi elaborado um gabarito para verificação dos nós como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Gabarito para verificação dos nós

Além desses defeitos, também foram limitados defeitos como encanoamento, encurvamento, arqueamento, torcimento e esmoado.

As lamelas também foram classificadas levando-se em consideração a quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm, medidos em uma linha radial representativa. Lamelas com seis ou mais anéis e um terço da seção transversal com madeira de inverno, ou lamelas com quatro ou mais anéis e metade da seção transversal com madeira de inverno, foram consideradas como densas (D), e as demais foram classificadas como não-densas (ND).

Durante a classificação, as lamelas foram numeradas e classificadas como I55-D, I55-ND, I45-D, I45-ND, I26-D ou I26-ND.

3.3.2 Classificação mecânica

Com base na ASTM 4761:2011, foram realizados ensaios de flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade à flexão (MOE) das lamelas, segundo o eixo de menor inércia.

As lamelas foram apoiadas em cavaletes metálicos distanciados em 3 m, sendo que no centro das lamelas foi posicionado um transdutor de deslocamento analógico com sensibilidade de 0,01 mm e curso de 30 mm. Foi aplicada uma força de 21,21 N no meio do vão, estimada a partir da limitação da flecha em 15 mm (vão/200) e considerando-se o MOE como 10.000 MPa. A Figura 3.5 mostra o arranjo do ensaio das lamelas para determinação do MOE por meio de flexão estática.

Figura 3.5 – Arranjo do ensaio de flexão estática



O módulo de elasticidade à flexão (MOE), segundo o eixo de menor inércia, foi determinado com base na Equação 3.1.

$$MOE = \frac{PL^3}{48\Delta I} \quad (3.1)$$

em que: MOE : módulo de elasticidade à flexão (MPa);
 P : força (N);
 L : vão (mm);
 Δ : deslocamento vertical máximo ou flecha (mm);
 I : momento de inércia da seção transversal (mm⁴).

3.4 CONFECÇÃO DOS PAINÉIS

Para caracterização mecânica dos painéis, foram realizados ensaios de flexão e cisalhamento. Segundo a norma ANSI/APA PRG 320:2012, os corpos-de-prova para o ensaio de flexão devem apresentar largura superior a 305 mm e o vão central deve ser de aproximadamente 30 vezes a espessura do elemento. Já para o ensaio de cisalhamento, o corpo-de-prova deve apresentar largura superior a 305 mm e vão central entre 5 e 6 vezes a espessura.

Sendo assim, foram confeccionados 12 painéis com três camadas ortogonais para cada ensaio, a fim de determinar seus respectivos módulos de ruptura (MOR) e módulos de elasticidade (MOE), bem como analisar seus modos de ruptura.

As lamelas classificadas visual e mecanicamente foram distribuídas de modo que resultasse em equilíbrio nos módulos de elasticidade das camadas externas dos painéis, sendo que nas camadas internas buscou-se a utilização de lamelas com módulos de elasticidade relativamente menores. Os painéis também foram confeccionados procurando-se equiparar as lamelas de uma mesma camada com base em sua classificação visual. Além disso, a fim de evitar a ocorrência de frestas relativamente grandes, buscou-se os encaixes mais adequados entre as lamelas de uma mesma camada.

A confecção dos painéis foi realizada em uma fábrica de portas na cidade de Renascença. Para o ensaio de flexão foram montados, inicialmente, seis painéis com as dimensões aproximadas de 6,5 x 70 x 220 cm. Já para o ensaio de cisalhamento foram montados três painéis com as dimensões aproximadas de 6,5 x 50 x 140 cm.

Os painéis foram montados em cima de uma lona, para evitar que colassem na máquina. Durante todo o processo de montagem, foram utilizadas luvas, óculos e máscaras de proteção. Antes da aplicação do adesivo, passava-se um jato de ar comprimido nas lamelas a fim de retirar a poeira da superfície a ser colada e, em seguida, as lamelas eram umedecidas com névoa de borrifação de água, conforme indicação do fabricante (Figura 3.6).

Com as lamelas limpas e umedecidas, foi aplicado o adesivo de poliuretano monocomponente com auxílio de um rolo e, em seguida, foram dispostas as lamelas da camada adjacente, como mostrado na Figura 3.7. Esse procedimento foi repetido para a camada seguinte. As lamelas de uma mesma camada não foram coladas entre si.

Figura 3.6 – (a) Limpeza e (b) umidificação da superfície

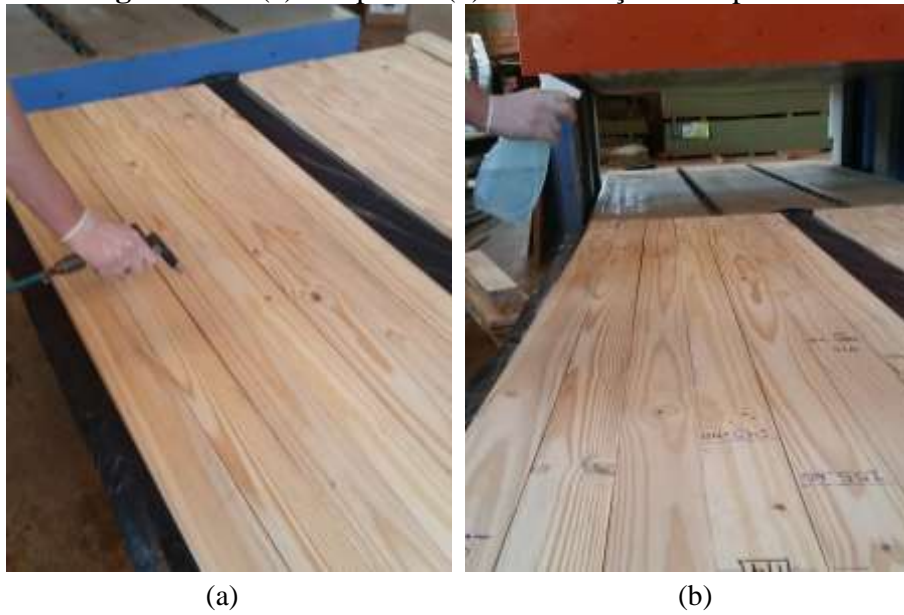


Figura 3.7 – (a) Aplicação do adesivo e (b) disposição das lamelas da camada adjacente



A fim de avaliar a eficiência da colagem das lamelas, nos ensaios de flexão, optou-se pela variação da quantidade de adesivo aplicado. Em dois painéis foi aplicada uma quantidade de adesivo correspondente a 120 g/m^2 , conforme indicação da empresa. No entanto, essa quantidade dificultava o processo de distribuição do adesivo sobre a superfície. Foi aplicada uma quantidade de adesivo de 160 g/m^2 em dois painéis e de 200 g/m^2 nos outros dois painéis restantes, sendo esta última indicada por Calil Neto (2011). Já os painéis confeccionados para o ensaio de cisalhamento, tiveram uma quantidade de adesivo equivalente a 200 g/m^2 .

Após a montagem, os painéis foram prensados utilizando-se a prensa hidráulica, apresentada na Figura 3.8, com pressão vertical de 1,2 MPa. Os painéis não foram prensados nas laterais.

Figura 3.8 – Prensagem dos painéis



Os dois primeiros painéis montados, com consumo de adesivo de 120 g/m², demoraram uma hora para serem colocados na prensa, sendo que o limite estipulado pelo fabricante é de 45 minutos. Isso ocorreu pela falta de experiência na montagem de painéis. Os demais painéis foram colocados na prensa antes desse tempo. O tempo de prensagem foi de 4h a frio, como indicado pelo fabricante.

Os painéis produzidos foram cortados e acabados, formando 12 painéis para o ensaio de flexão e 12 painéis para o ensaio de cisalhamento, mostrados na Figura 3.9 e 3.10, respectivamente. Todos os painéis tiveram seus pesos e dimensões aferidos.

Figura 3.9 – Painéis para o ensaio de flexão



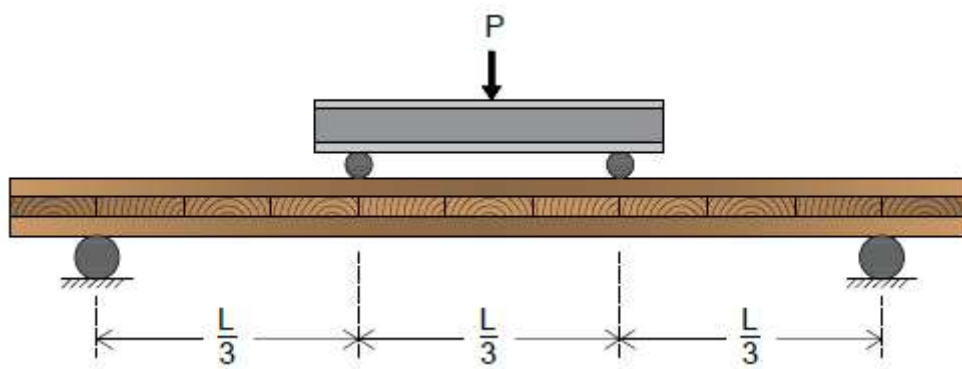
Figura 3.10 – Painéis para o ensaio de cisalhamento



3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS PAINÉIS

Os ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis de CLT foram realizados com base na norma ASTM 198:2009, conforme solicitado pela ANSI/APA PRG 320:2012, pelo método de carregamento de quatro pontos (*third-point load method*), apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Método de carregamento de quatro pontos



Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Dois Vizinhos, na máquina universal de ensaios da EMIC, modelo DL-30000, com capacidade de carga de 300 kN.

Também foi necessário utilizar o pórtico de ensaios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Pato Branco.

3.5.1 Ensaio de flexão

No ensaio de flexão, os painéis foram apoiados em cavaletes metálicos distanciados entre si por 1,95 m. Para a transferência da força nos painéis foram utilizadas vigas metálicas de seção I. Além disso, foram utilizados relógios comparadores para aferição dos deslocamentos verticais no centro dos painéis e nos pontos de aplicação das forças. O arranjo do ensaio de flexão está apresentado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Arranjo do ensaio de flexão dos painéis



O script de ensaio foi baseado no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, tendo apenas um ciclo de carga e descarga. O MOE dos corpos-de-prova em que foram utilizados relógios comparadores foi determinado pela reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos correspondente à 10% e 50% da força de ruptura prevista.

Como os cavaletes não estavam apoiados na máquina e esta, por sua vez, não estava fixada no chão, a força máxima que poderia ser aplicada era de aproximadamente 20 kN (peso da máquina), caso contrário a máquina era levantada e se apoiava nos cavaletes, sem conseguir aplicar mais força. Como quatro painéis não romperam antes dessa força, foi necessário utilizar o pórtico de ensaios, apresentado na Figura 3.13, para determinar seus respectivos módulos de ruptura (MOR).

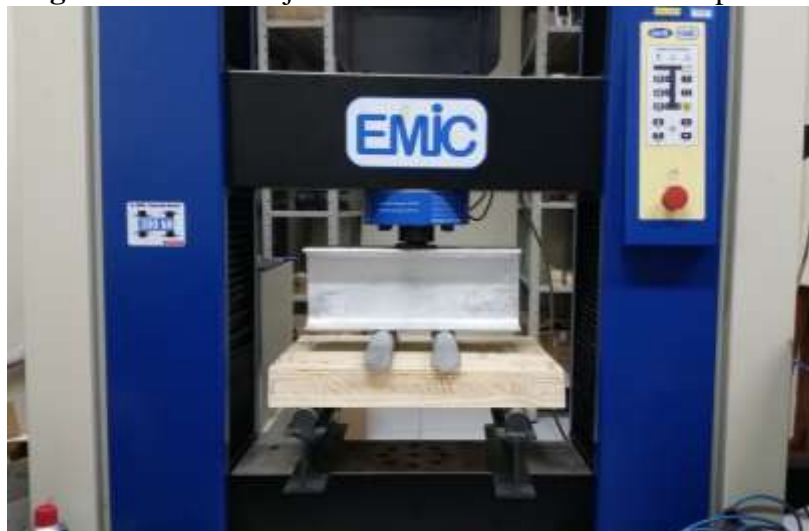
Figura 3.13 – Pórtico de ensaios



3.5.2 Ensaio de cisalhamento

No ensaio de cisalhamento, os painéis foram apoiados em cilindros soldados em vigas com seção I, distanciados entre si em 36 cm. Para transferência da força foram utilizados dois cilindros metálicos e uma viga I, como indicado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Arranjo do ensaio de cisalhamento dos painéis



O script de ensaio não teve ciclos de carga e descarga, sendo aplicado um carregamento monotônico crescente com velocidade de 10 kN/min.

3.5.3 Determinação das propriedades de resistência e rigidez

O módulo de ruptura (MOR) foi determinado pela Equação 3.2.

$$MOR = \frac{P_{m\acute{a}x}L}{bh^2} \quad (3.2)$$

em que: $P_{m\acute{a}x}$: força máxima (N);
 L : vão (mm);
 b : base da seção transversal (mm);
 h : altura da seção transversal (mm).

O módulo de elasticidade (MOE) foi determinado apenas para os painéis testados à flexão. O módulo de elasticidade à flexão aparente (MOE_1), desprezando-se a deformação por cisalhamento, foi calculado com base na Equação 3.3.

$$MOE_1 = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \quad (3.3)$$

em que: P : força (N);
 Δ : deslocamento vertical máximo (mm).

O módulo de elasticidade à flexão considerando-se a deformação por cisalhamento (MOE_2) foi calculado com base no deslocamento verificado no meio do vão, descontando-se os deslocamentos nos pontos de aplicação da força, por meio da Equação 3.4.

$$MOE_2 = \frac{PLL_b^2}{4bh^3\Delta_{Lb}} \quad (3.4)$$

em que: L_b : distância entre os dois pontos de aplicação da força (mm);
 Δ_{Lb} : deslocamento vertical no meio do vão descontando-se os deslocamentos nos pontos de aplicação das forças (mm).

Outra forma de calcular o módulo de elasticidade à flexão considerando-se a deformação por cisalhamento (MOE_3) e estimando-se o módulo de elasticidade transversal, é dada pela Equação 3.5.

$$MOE_3 = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta\left(1 - \frac{PL}{5bhG\Delta}\right)} \quad (3.5)$$

em que: G : módulo de rigidez, estimado por: $G=E/16$ (MPa), conforme indicado pela norma ANSI/APA PRG 320:2012

Também foi determinada a tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), no ensaio de cisalhamento dos painéis, em conformidade com a Equação 3.6.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3P_{m\acute{a}x}}{4bh} \quad (3.6)$$

Tanto no ensaio de flexão, quanto no ensaio de cisalhamento, foram verificados os modos de ruptura dos painéis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo a metodologia descrita anteriormente, foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas da madeira, a eficiência do adesivo, a classe visual e o módulo de elasticidade à flexão das lamelas, bem como o módulo de ruptura, a tensão cisalhante máxima e módulo de elasticidade dos painéis, exibidos a seguir.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização da madeira e do adesivo. No Apêndice A se apresentam as tabelas com os dados completos dos ensaios de caracterização dos materiais, com seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação.

4.1.1 Propriedades físicas e mecânicas do pinus

O Anexo E da ABNT NBR 7190:1997 fornece, para umidade de 12%, os valores médios das propriedades de determinadas espécies de pinus, as quais se encontram registradas na Tabela 4.1, em que $\rho_{ap,12\%}$ representa a densidade aparente correspondente a 12% de umidade, f_{c0} a resistência à compressão paralela às fibras, f_{t0} a resistência à tração paralela às fibras, f_{t90} resistência à tração normal às fibras, f_v a resistência ao cisalhamento e E_{c0} o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

Tabela 4.1 – Valores médios das propriedades de algumas espécies de pinus

Espécie	$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
<i>Pinus caribea</i>	0,58	35,4	64,8	3,2	7,8	8.431
<i>Pinus bahamensis</i>	0,54	32,6	52,7	2,4	6,8	7.110
<i>Pinus hondurensis</i>	0,54	42,3	50,3	2,6	7,8	9.868
<i>Pinus elliotti</i>	0,56	40,4	66,0	2,5	7,4	11.889
<i>Pinus oocarpa</i>	0,54	43,6	60,9	2,5	8,0	10.904
<i>Pinus taeda</i>	0,65	44,4	82,8	2,8	7,7	13.304

Fonte: ABNT NBR 7190 (1997)

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios das propriedades físicas dos caibros e vigas utilizados para caracterização mecânica da madeira e das lamelas utilizadas para confecção dos painéis.

Tabela 4.2 – Valores médios das propriedades físicas da madeira

Propriedade física	Caibros e vigas	Lamelas
Umidade (%)	15,09	16,11
Densidade aparente (g/cm ³)	0,44	0,55
Densidade aparente a 12% de umidade (g/cm ³)	0,43	0,54
Densidade básica (g/cm ³)	0,37	0,45
Deformação específica de retração axial (%)	0,55	0,50
Deformação específica de retração radial (%)	4,18	5,54
Deformação específica de retração tangencial (%)	5,87	5,17
Deformação específica de inchamento axial (%)	0,55	0,50
Deformação específica de inchamento radial (%)	4,38	5,89
Deformação específica de inchamento tangencial (%)	6,25	5,48
Variação volumétrica (%)	11,51	12,27

A densidade aparente correspondente a 12% de umidade dos caibros e vigas apresentou um valor quase 25% menor que a média dos valores indicados na Tabela 4.1 pela ABNT NBR 7190:1997, enquanto que no caso das lamelas esse valor se mostrou correlato para a maioria das espécies. A diferença da variação volumétrica dos caibros e vigas em relação à variação volumétrica das lamelas foi de 6,2%.

Os valores médios das propriedades mecânicas do lote ensaiado estão evidenciados na Tabela 4.3, os quais foram corrigidos para o teor de umidade de 12%.

Tabela 4.3 – Valores médios das propriedades mecânicas da madeira

Propriedade	Valores médios (MPa)
Resistência à compressão paralela às fibras – lamelas	42,58
Resistência à compressão paralela às fibras	36,02
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras	18.672,42
Resistência à compressão normal às fibras	6,33
Módulo de elasticidade à compressão normal às fibras	3.636,42
Resistência à tração normal às fibras	2,38
Resistência ao cisalhamento	9,58
Resistência à flexão	51,12
Módulo de elasticidade à flexão	13.066,85

As propriedades mecânicas obtidas nos ensaios se mostraram similares às apresentadas na Tabela 4.1, com exceção da resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras que foram relativamente superiores.

4.1.2 Caracterização da eficiência do adesivo

A Tabela 4.4 mostra os valores médios, corrigidos para o teor de umidade de 12%, da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola nas direções paralela e normal às fibras para os corpos-de-prova produzidos a partir dos caibros utilizados para caracterização mecânica da madeira e das lamelas usadas para confecção dos painéis.

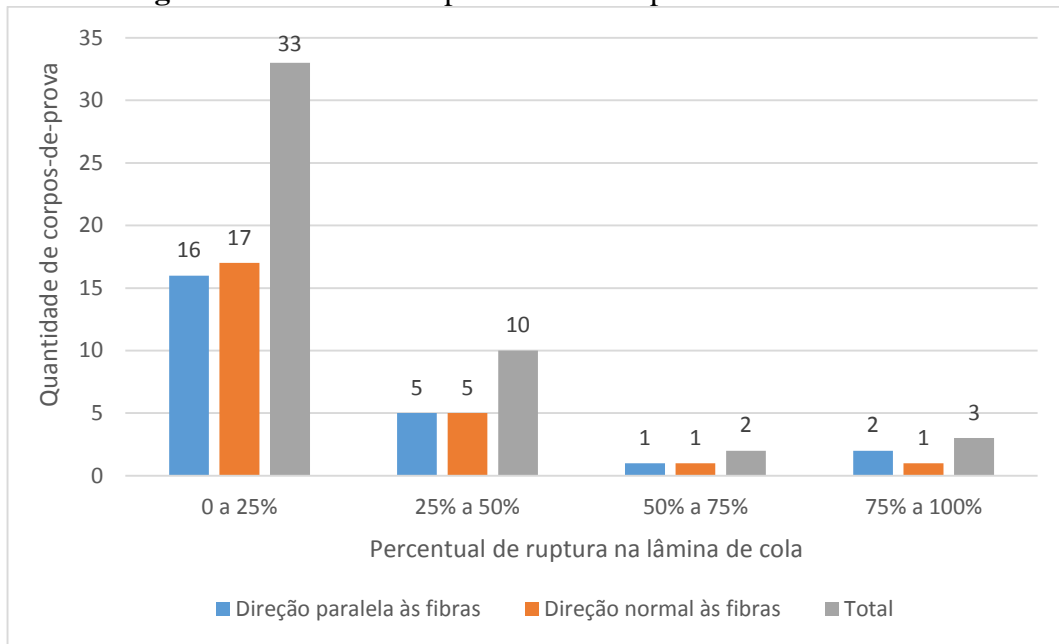
Tabela 4.4 – Valores médios da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola

Propriedade	Caibros	Lamelas
Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela às fibras (MPa)	8,20	8,42
Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção normal às fibras (MPa)	3,69	3,02

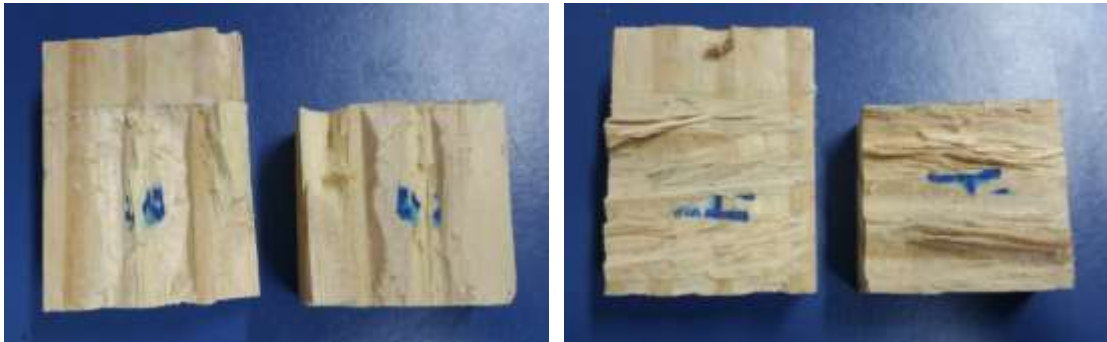
Observa-se que os valores médios da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela às fibras se mostraram similares para os caibros e para as lamelas, com diferença inferior a 3%. Já na direção normal às fibras, essa diferença ficou em torno de 22%.

Em ambos os casos, a resistência média ao cisalhamento na lâmina de cola se apresentou maior na direção paralela às fibras do que na direção normal às fibras, sendo 2,22 vezes maior no caso dos caibros e 2,79 no caso das lamelas.

O gráfico da Figura 4.1 mostra a quantidade de corpos-de-prova com ruptura na lâmina de cola entre 0 e 25%, 25% e 50%, 50% e 75%, e 75% e 100% da área de cisalhamento. Verifica-se que 68,75% dos corpos-de-prova ensaiados apresentaram menos de 25% de ruptura na lâmina de cola, o que reflete o bom desempenho do adesivo utilizado. Além disso, apenas 10,42% dos corpos-de-prova apresentaram mais de 50% de ruptura na lâmina de cola.

Figura 4.1 – Gráfico do percentual de ruptura na lâmina de cola

A Figura 4.2 demonstra o modo de ruptura dos corpos-de-prova após os ensaios de cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela e normal às fibras.

Figura 4.2 – Modo de ruptura dos corpos-de-prova dos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola

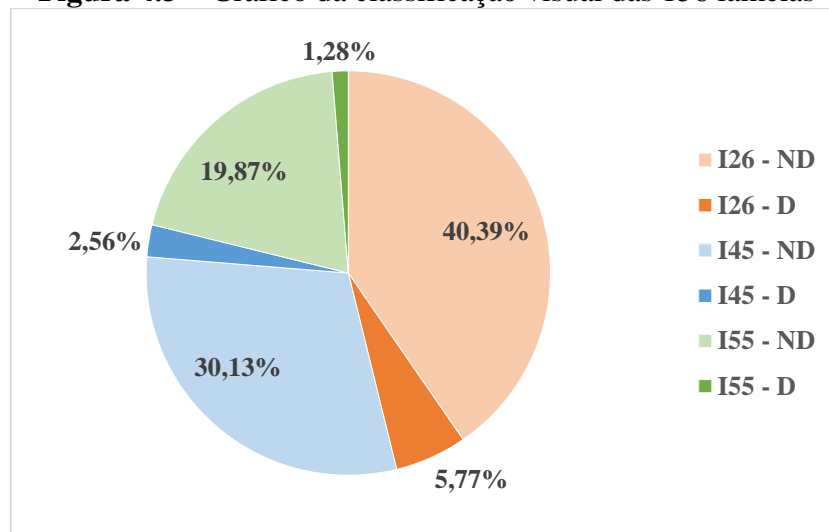
4.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂMICA DAS LAMELAS

Durante a classificação visual, foi possível observar que os defeitos com maior ocorrência foram nós, arqueamento, torcimento e esmoado. Aproximadamente 30% das 220 lamelas analisadas foram eliminadas por não respeitarem os limites de defeitos estipulados. A Tabela 4.5 mostra o resultado da classificação visual.

Tabela 4.5 – Resultado da classificação visual

Classe visual	Quantidade
I26-ND	63
I26-D	9
I45-ND	47
I45-D	4
I55-ND	31
I55-D	2
Sem classe	64
TOTAL	220

Por meio do gráfico da Figura 4.3, é possível observar que, das 156 lamelas com classe visual, menos de 10% foram classificadas como densas. Além disso, aproximadamente 46% foram classificadas como I26.

Figura 4.3 – Gráfico da classificação visual das 156 lamelas

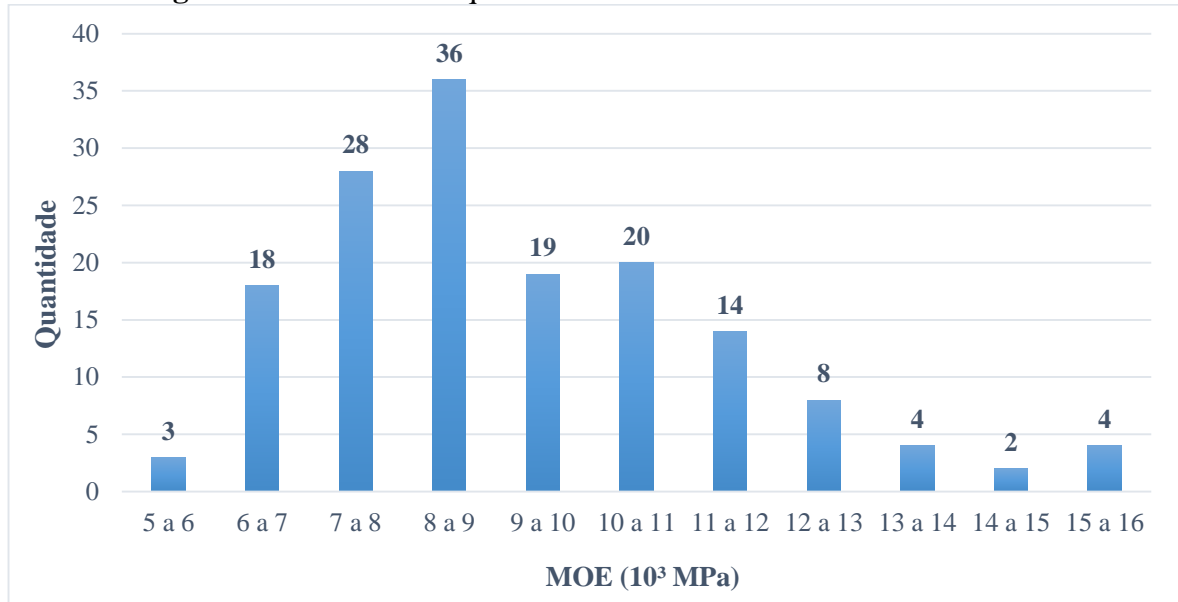
A partir do ensaio de flexão estática no eixo de menor inércia das 156 lamelas, obteve-se um valor médio do MOE de 9.275,17 MPa, corrigido para o teor de umidade de 12%, com coeficiente de variação de 23,44%, como apresentado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultado da classificação mecânica

MOE	9.275,17 MPa
Desvio-padrão	2.174,31 MPa
Coeficiente de variação	23,44 %
Valor máximo	15.860,95 MPa
Valor mínimo	5.518,25 MPa

As lamelas foram agrupadas de acordo com seus respectivos MOEs, como ilustrado no gráfico da Figura 4.4, em que é possível se observar que mais de 40% delas apresentaram MOE entre 7.000 MPa e 9.000 MPa.

Figura 4.4 – Gráfico da quantidade de lamelas de acordo com o MOE



No Apêndice B são apresentados os resultados da classificação visual e mecânica das 156 lamelas.

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS PAINÉIS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis produzidos conforme metodologia descrita no item 3.5.

4.3.1 Ensaio de flexão

As dimensões, peso e densidade aparente dos 12 painéis produzidos para os ensaios de flexão estão apresentados na Tabela 4.7. Observa-se que a densidade aparente média dos painéis foi de aproximadamente 0,5 g/cm³, com desvio-padrão de 0,03 g/cm³ e coeficiente de variação de 5,56%.

Tabela 4.7 – Densidade dos painéis testados à flexão

Painel	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)	Massa (kg)	Densidade (g/cm³)
P1	34,3	6,54	215,1	22,6	0,47
P2	34,8	6,56	215,1	22,9	0,47
P3	34,4	6,55	214,8	22,9	0,47
P4	34,9	6,57	214,9	23,8	0,48
P5	34,3	6,53	214,8	25,3	0,53
P6	34,2	6,53	215,1	25,3	0,53
P7	33,3	6,54	214,8	23,5	0,50
P8	34,2	6,53	214,8	25,5	0,53
P9	34,4	6,53	215,1	22,5	0,47
P10	34,0	6,53	215,1	23,1	0,48
P11	34,6	6,53	214,8	25,0	0,52
P12	34,0	6,53	214,7	26,0	0,55
				Média	0,50
				Desvio-padrão	0,03
				Coeficiente de variação (%)	5,56

As composições dos painéis testados à flexão estão ilustradas no Apêndice C. A Tabela 4.8 mostra os valores médios do módulo de elasticidade, corrigidos para o teor de umidade de 12%, de cada camada dos painéis testados à flexão. Os valores médios dos módulos de elasticidade dos painéis ficaram entre 7.834,8 MPa e 11.768,5 MPa. Observa-se que esses valores estão diretamente relacionados à densidade aparente dos painéis.

Tabela 4.8 – Valores médios do MOE das camadas dos painéis testados à flexão (em MPa)

Painel	Camada			Média
	Superior	Intermediária	Inferior	
P1	8.585,3	8.361,7	8.431,2	8.459,4
P2	8.820,2	8.361,7	8.721,2	8.634,3
P3	9.978,1	9.111,0	9.607,0	9.565,3
P4	9.302,5	9.111,0	8.922,2	9.111,9
P5	11.038,2	8.196,8	11.477,6	10.237,5
P6	11.622,3	8.196,8	12.431,3	10.750,1
P7	10.132,4	6.681,0	11.220,4	9.344,6
P8	10.847,2	6.681,0	12.076,4	9.868,2
P9	8.273,4	7.381,8	7.849,2	7.834,8
P10	10.179,6	7.381,8	10.172,2	9.244,5
P11	12.996,0	6.681,0	11.538,8	10.405,3
P12	13.922,6	6.681,0	14.701,8	11.768,5

O consumo de adesivo foi de 120 g/m² para os painéis P1, P2, P3 e P4; 160 g/m² para os painéis P5, P6, P7 e P8; e 200 g/m² para os painéis P9, P10, P11 e P12, como indicado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Consumo de adesivo dos painéis

Painéis	Consumo de adesivo
P1, P2, P3 e P4	120 g/m ²
P5, P6, P7 e P8	160 g/m ²
P9, P10, P11 e P12	200 g/m ²

Os valores do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) dos painéis, corrigidos para o teor de umidade de 12%, foram determinados com base nas equações citadas no item 3.5.3 e estão apresentados separadamente, de acordo com o consumo de adesivo, nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, em que são exibidos também os valores médios e característicos, desvio-padrão e coeficiente de variação. O valor característico foi considerado como 70% do valor médio para o módulo de ruptura, como indicado na ABNT NBR 7190:1997. Os dados completos dos ensaios encontram-se no Apêndice D. Não foi possível determinar o módulo de elasticidade dos painéis P1, P4 e P6 devido a problemas ocorridos durante os ensaios com o armazenamento de dados.

Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 120 g/m² (em MPa)

PAINEL	MOR	MOE ₁	MOE ₂	MOE ₃
P1	2,86	-	-	-
P2	3,23	6.395,70	7.563,61	6.506,34
P3	3,95	6.351,85	6.149,32	6.461,39
P4	4,61	-	-	-
Média	3,66	6.373,77	6.856,47	6.483,86
Valor característico	2,56	-	-	-
Desvio-padrão	0,67	21,93	707,14	22,47
Coeficiente de variação (%)	18,40	0,34	10,31	0,35

Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² (em MPa)

PAINEL	MOR	MOE ₁	MOE ₂	MOE ₃
P5	19,77	9.913,72	11.817,90	10.083,63
P6	15,83	-	-	-
P7	11,24	9.457,33	8.863,39	9.619,92
P8	13,61	9.622,84	11.852,45	9.787,76
Média	15,11	9.664,63	10.844,58	9.830,44
Valor característico	10,58	-	-	-
Desvio-padrão	3,14	188,65	1.400,99	191,70
Coefficiente de variação (%)	20,78	1,95	12,92	1,95

Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² (em MPa)

PAINEL	MOR	MOE ₁	MOE ₂	MOE ₃
P9	38,33	7.698,92	8.619,44	7.830,87
P10	36,29	9.186,85	8.802,35	9.344,30
P11	30,46	11.156,67	13.221,70	11.347,89
P12	31,75	12.757,71	14.270,48	12.976,36
Média	34,21	10.200,04	11.228,49	10.374,86
Valor característico	23,95	-	-	-
Desvio-padrão	3,22	1.919,57	2.545,58	1.952,47
Coefficiente de variação (%)	9,40	18,82	22,67	18,82

Observa-se uma proximidade dos valores do MOE₁ e MOE₃, com diferença inferior a 2%. Já quando relaciona-se o MOE₁ com o MOE₂ essa diferença varia de 3% a 19%. O coeficiente de variação dos resultados se mostrou inferior a 23%.

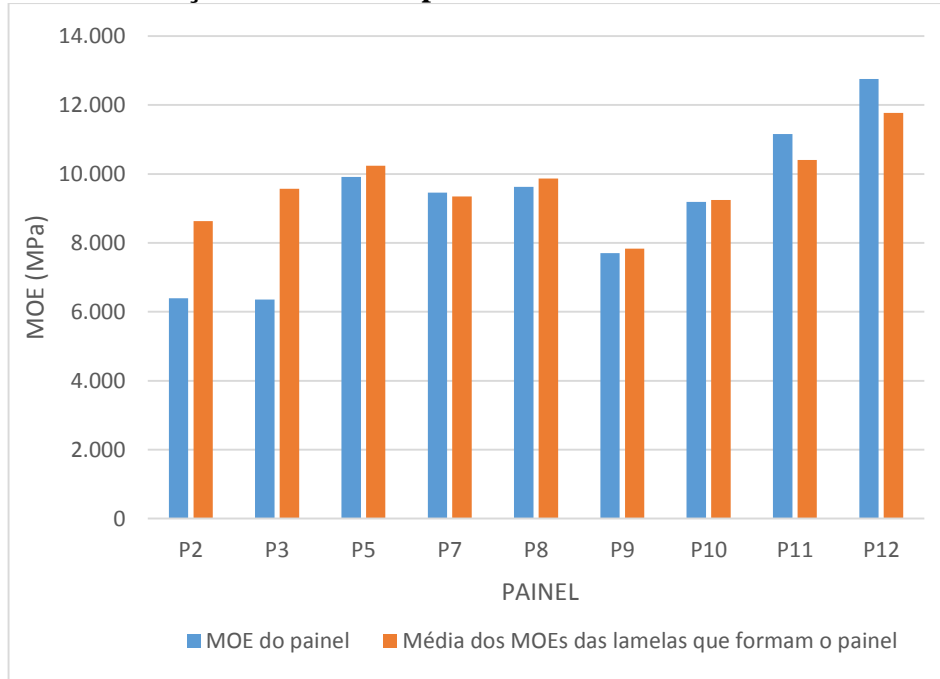
Os painéis com o consumo de adesivo de 120 g/m² apresentaram as menores propriedades de resistência e rigidez, o que pode ser explicado pelo fato de que baixa quantidade de adesivo provoca uma ligação ineficiente. Cabe ressaltar que apenas os painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² romperam na madeira, sendo que os demais tiveram rompimento na linha de cola. Os modos de ruptura serão descritos a seguir, no item 4.3.1.1.

Os painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² apresentaram valores médios do módulo de ruptura 2,3 vezes maiores que os painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² e 9,3 vezes maiores que os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m².

Destaca-se ainda que, apesar do painel P9 ter a menor média dos módulos de elasticidade das lamelas, indicado na Tabela 4.8, este apresentou o maior módulo de ruptura entre os 12 painéis.

Observou-se, para os painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² e 200 g/m², que a média dos módulos de elasticidade das lamelas que formam o painel, apresentadas na Tabela 4.8, está diretamente relacionada ao módulo de elasticidade do painel, como apresentado no gráfico da Figura 4.5. Os painéis P1, P4 e P6 não estão apresentados no gráfico, pois não tiveram seus respectivos módulos de elasticidade aferidos.

Figura 4.5 – Relação do MOE dos painéis com a média dos MOEs das lamelas



Os valores médios e característicos, bem como os desvios-padrão e coeficientes de variação total dos ensaios (considerando-se os resultados dos 12 corpos-de-prova), estão apresentados na Tabela 4.13. O valor característico foi determinado de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 4.13 – Resultado geral dos ensaios de flexão dos painéis (em MPa)

	MOR	MOE ₁	MOE ₂	MOE ₃
Média	17,66	9.171,29	10.128,96	9.328,72
Valor característico	12,36	-	-	-
Desvio-padrão	12,87	1.985,01	2.594,84	2.018,77
Coeficiente de variação (%)	72,88	21,64	25,62	21,64
Valor máximo	38,33	12.757,71	14.270,48	12.976,36
Valor mínimo	2,86	6.351,85	6.149,32	6.461,39

Observa-se que o coeficiente de variação do módulo de ruptura é de aproximadamente 73%, um valor efetivamente elevado. No entanto, em relação aos módulos de elasticidade, esse valor se mostra inferior a 26%.

A diferença do MOE_1 , que despreza a deformação por cisalhamento, em relação ao MOE_2 e MOE_3 , que consideram a deformação por cisalhamento, foi inferior a 10% e 2%, respectivamente.

4.3.1.1 Modo de ruptura dos painéis ensaiados à flexão

Os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m^2 romperam na linha de cola, como mostrado na Figura 4.6. Foi observado ruptura em apenas uma das linhas de cola, ora na camada superior, ora na inferior, mas não nas duas.

Figura 4.6 – Ruptura dos painéis com consumo de adesivo de 120 g/m^2



Foi observado nos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m^2 ruptura na linha de cola tanto camada inferior, quanto na superior, como apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Ruptura dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m²



Nos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² foi possível observar rompimento na madeira. Os painéis P9 e P10 romperam na camada inferior na parte central, como apresentado nas Figuras 4.8 e 4.9. Já os painéis P11 e P12 tiveram ruptura nas suas extremidades, tanto na madeira quanto na linha de cola, como apresentado nas Figuras 4.10 e 4.11.

Figura 4.8 – Ruptura do painel P9 testado à flexão



Figura 4.9 – Ruptura do painel P10 testado à flexão



Figura 4.10 – Ruptura do painel P11 testado à flexão



Figura 4.11 – Ruptura do painel P12 testado à flexão



4.3.2 Ensaio de cisalhamento

As dimensões, peso e densidade aparente dos 12 painéis produzidos para os ensaios de cisalhamento estão apresentados na Tabela 4.14. Observa-se que a densidade aparente média dos painéis foi de aproximadamente $0,49 \text{ g/cm}^3$, com coeficiente de variação de 5,99%.

Tabela 4.14 – Densidade dos painéis testados ao cisalhamento

Painel	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)	Massa (kg)	Densidade (g/cm³)
P1	34,3	6,54	49,6	5,8	0,52
P2	34,5	6,52	49,7	5,4	0,48
P3	34,7	6,55	49,9	5,8	0,51
P4	34,1	6,51	49,3	5,3	0,48
P5	35,1	6,53	49,4	5,1	0,45
P6	34,5	6,54	49,3	5,2	0,47
P7	35,1	6,56	49,4	5,4	0,48
P8	34,0	6,52	49,4	5,1	0,47
P9	34,9	6,52	49,5	6,1	0,54
P10	35,0	6,53	49,5	6,1	0,54
P11	34,9	6,53	49,4	5,5	0,49
P12	34,8	6,52	49,8	5,2	0,46
				Média	0,49
				Desvio-padrão	0,03
				Coefficiente de variação (%)	5,99

As composições dos painéis testados ao cisalhamento estão ilustradas no Apêndice E. A Tabela 4.15 mostra os valores médios do módulo de elasticidade, corrigidos para o teor de umidade de 12%, de cada camada dos painéis testados ao cisalhamento. Os valores médios dos módulos de elasticidade dos painéis ficaram entre 7.951,4 MPa e 11.861 MPa.

Tabela 4.15 – Valores médios do MOE das camadas dos painéis testados ao cisalhamento (em MPa)

Painel	Camada			Média
	Superior	Intermediária	Inferior	
P1	13.922,6	6.959,2	14.701,8	11.861,2
P2	12.996,0	6.959,2	11.538,8	10.498,0
P3	10.847,2	6.959,2	12.076,4	9.960,9
P4	10.132,4	6.959,2	11.220,4	9.437,4
P5	8.585,3	7.479,2	8.431,2	8.165,2
P6	8.820,2	7.479,2	8.721,2	8.340,2
P7	9.302,5	7.479,2	8.922,2	8.567,9
P8	9.978,1	7.479,2	9.607,0	9.021,4
P9	12.431,3	7.731,5	11.622,3	10.595,0
P10	11.477,6	7.731,5	11.038,2	10.082,4
P11	10.179,6	7.731,5	10.172,2	9.361,1
P12	8.273,4	7.731,5	7.849,2	7.951,4

Os valores do módulo de ruptura (MOR) e da tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{\text{máx}}$) dos painéis, corrigidos para o teor de umidade de 12%, foram determinados com base nas equações citadas no item 3.5.3 e estão apresentados na Tabelas 4.16. O valor médio do módulo de ruptura foi de 23,20 MPa e da tensão de cisalhamento máxima foi de 3,16 MPa, com coeficiente de variação de aproximadamente 20% para ambas situações. O valor característico foi calculado com base na ABNT NBR 7190:1997. Os dados completos dos ensaios encontram-se no Apêndice F.

Tabela 4.16 – Propriedades mecânicas dos painéis testados ao cisalhamento (em MPa)

Painel	MOR	$\tau_{\text{máx}}$
P1	28,24	3,85
P2	27,57	3,74
P3	25,64	3,50
P4	23,57	3,20
P5	12,88	1,75
P6	17,49	2,38
P7	21,72	2,97
P8	24,00	3,26
P9	26,05	3,54
P10	29,02	3,95
P11	17,94	2,44
P12	24,35	3,31
Média	23,20	3,16
Valor característico	16,24	2,21
Desvio-padrão	4,68	0,64
Coeficiente de variação (%)	20,19	20,16
Valor máximo	29,02	3,95
Valor mínimo	12,88	1,75

Observa-se que a tensão de cisalhamento máxima corresponde a 13,6% do módulo de ruptura. Em comparação com os ensaios de flexão dos painéis, o MOR se mostrou 32,2% inferior à média dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² (34,21 MPa), mas 53,5% superior à média dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² (15,11 MPa).

O valor médio da tensão de cisalhamento máxima (3,16 MPa) se mostrou correlato aos valores médios obtidos nos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola na direção normal às fibras dos caibros (3,69 MPa) e das lamelas (3,02 MPa), com diferenças de 14,4% e 4,6%, respectivamente.

4.3.2.1 Modo de ruptura dos painéis ensaiados ao cisalhamento

O modo de ruptura dos painéis está especificado no Quadro 4.1, em que é possível observar que 75% dos painéis apresentaram ruptura por cisalhamento na camada intermediária.

Quadro 4.1 – Modo de ruptura dos painéis testados ao cisalhamento

PAINEL	DESCRIÇÃO DO MODO DE RUPTURA
P1 e P8	Rompimento na madeira da camada inferior
P2, P4, P5, P6 e P12	Cisalhamento na camada intermediária
P3 e P11	Cisalhamento na camada intermediária, rompimento na madeira e ruptura na linha de cola na camada inferior
P7	Cisalhamento na camada intermediária e ruptura na linha de cola na camada superior
P9	Cisalhamento na camada intermediária e ruptura na linha de cola na camada superior e inferior
P10	Rompimento na madeira na camada inferior e ruptura na linha de cola na camada superior

Os painéis P1, P3, P8, P10 e P11 apresentaram ruptura da madeira na camada inferior como apresentado nas Figuras 4.12 e 4.13.

Figura 4.12 – Ruptura do painel P8 testado ao cisalhamento



Figura 4.13 – Ruptura do painel P10 testado ao cisalhamento



As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 mostram a ruptura por cisalhamento na camada intermediária dos painéis P7, P9 e P11, respectivamente. Ressalta-se que 75% dos painéis apresentaram esse tipo de ruptura.

Figura 4.14 – Ruptura do painel P7 testado ao cisalhamento



Figura 4.15 – Ruptura do painel P9 testado ao cisalhamento



Figura 4.16 – Ruptura do painel P11 testado ao cisalhamento



Também foram observadas rupturas na linha de cola em aproximadamente 42% dos painéis, como apresentado nas Figuras 4.17 e 4.18.

Figura 4.17 – Ruptura na linha de cola do painel P3 testado ao cisalhamento



Figura 4.18 – Ruptura na linha de cola do painel P9 testado ao cisalhamento



4.3.3 Comparação dos resultados com os valores especificados na norma ANSI/APA PRG 320:2012

A Tabela 4.17 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis, com os valores médios e característicos da resistência à flexão (MOR), tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{\text{máx}}$) e módulo de elasticidade (MOE).

Tabela 4.17 – Resumo dos resultados dos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis

Ensaio	Consumo de adesivo (g/m ²)	Valores médios (MPa)			Valores característicos (MPa)	
		MOR	$\tau_{\text{máx}}$	MOE	MOR	$\tau_{\text{máx}}$
Flexão	120	3,66	-	6.373,8	2,56	-
	160	15,11	-	9.664,6	10,58	-
	200	34,21	-	10.200,0	23,95	-
Cisalhamento	200	23,2	3,16	-	16,24	2,21

A Tabela 4.18 mostra os valores admissíveis e característicos mínimos requeridos pela ANSI/APA PRG 320:2012 para a resistência à flexão (MOR), resistência ao cisalhamento (f_v) e módulo de elasticidade (MOE) de painéis com lamelas classificadas visual e mecanicamente

(classe E) e painéis com lamelas classificadas visualmente apenas (classe V). Os números que aparecem nas classes se referem às espécies utilizadas para fabricação dos painéis, como citado na revisão de literatura.

Tabela 4.18 – Valores requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012 (em MPa)

Classe	MOE	Valores admissíveis		Valores característicos	
		MOR	f_v	MOR	f_v
E1	11.721	13,43	0,92	28,2	2,9
E2	10.342	11,38	1,24	23,9	3,9
E3	8.274	8,29	0,76	17,4	2,4
E4	11.721	13,43	1,21	28,2	3,8
V1	11.032	6,19	1,24	13	3,9
V2	9.653	6,05	0,92	12,7	2,9
V3	11.032	6,71	1,21	14,1	3,8

Fonte: Adaptado de ANSI/APA PRG 320 (2012)

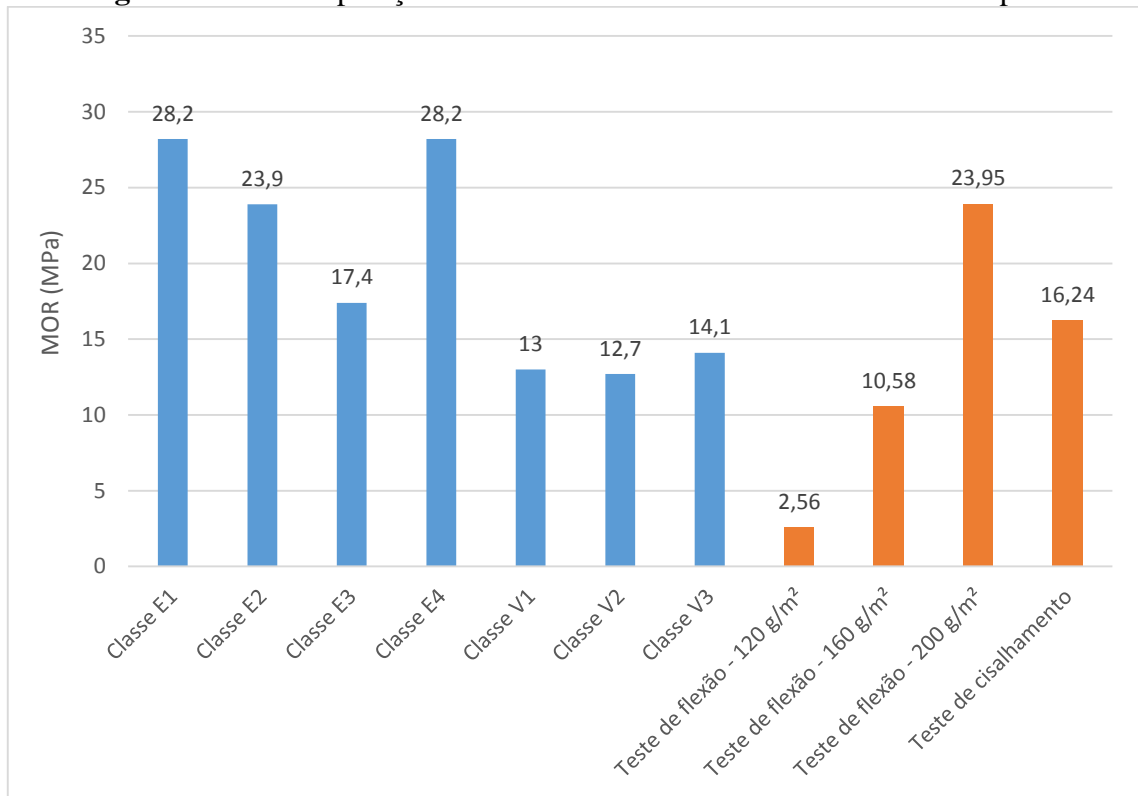
Confrontando-se as Tabelas 4.17 e 4.18, percebe-se que o valor característico do módulo de ruptura obtido no ensaio de flexão para os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m² são muito inferiores em relação aos valores característicos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012, com diferenças superiores a 80%.

Quanto aos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m², o valor característico do módulo de ruptura se mostrou 62,5% inferior ao maior valor característico (28,2 MPa) e 16,7% inferior ao menor valor característico (12,7 MPa) requeridos pela norma.

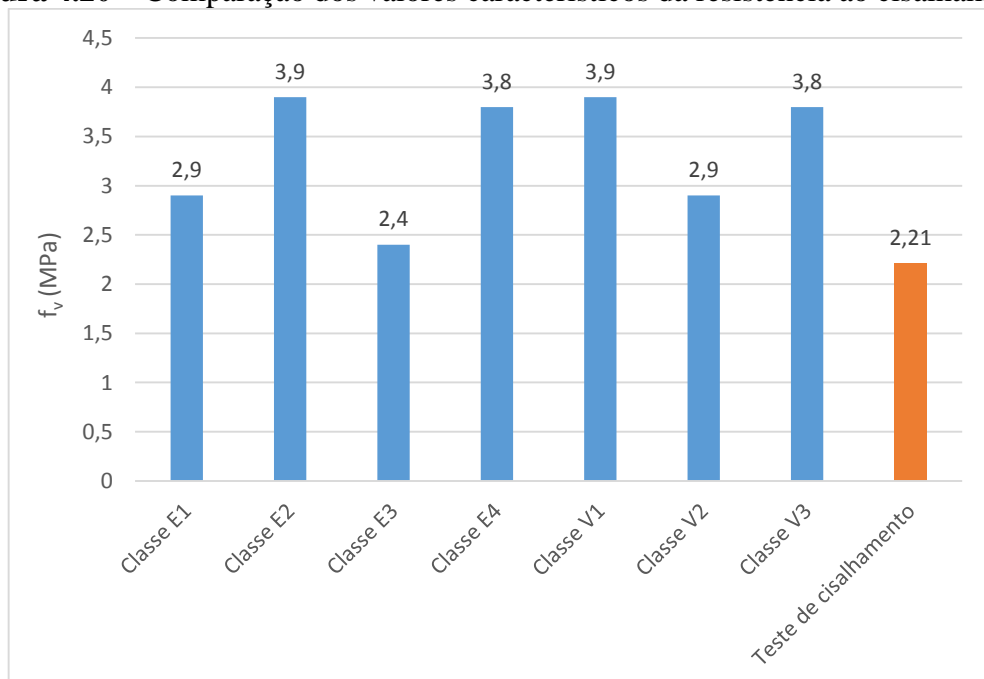
Já os painéis testados à flexão, com consumo de adesivo de 200 g/m², apresentaram um valor característico do módulo de ruptura de 23,95 MPa, inferior apenas aos valores característicos das classes E1 e E4, com diferença de aproximadamente 15,1%.

Em relação aos painéis testados ao cisalhamento, estes exibiram um valor característico do módulo de ruptura (16,24 MPa) inferior aos valores característicos da classe E (com classificação visual e mecânica), mas superior aos valores característicos da classe V (com classificação visual apenas).

O gráfico da Figura 4.19 compara os valores característicos do módulo de ruptura requeridos pela norma com os valores obtidos nos ensaios.

Figura 4.19 – Comparação dos valores característicos do módulo de ruptura

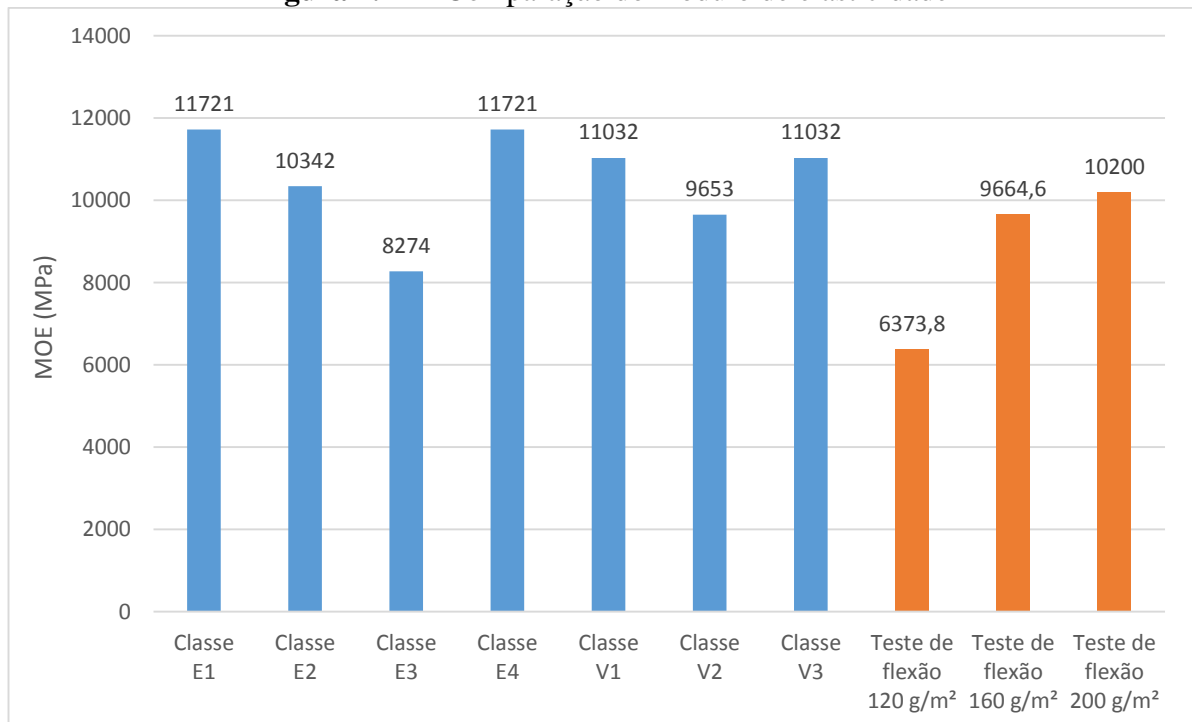
O valor característico da tensão de cisalhamento máxima obtido no ensaio de cisalhamento apresentou uma diferença de 7,9% em relação ao menor valor característico da resistência ao cisalhamento requerido pela norma, como apresentado no gráfico da Figura 4.20.

Figura 4.20 – Comparação dos valores característicos da resistência ao cisalhamento

Como citado anteriormente, os valores característicos dos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis foram determinados com base na norma ABNT NBR 7190:1997, por isso, cabe ressaltar que embora estejam sendo comparados valores característicos, os modelos de ensaio e cálculo da resistência característica são diferentes nas duas normas, e, portanto, pode ocorrer distorção nos resultados.

O módulo de elasticidade médio dos painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 120 g/m², desprezando-se a deformação por cisalhamento, foi de 6.373,8 MPa, com diferenças entre 23% e 46% em relação aos valores requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012. Já o módulo de elasticidade médio dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² e 200 g/m² se mostraram similares aos requeridos pela norma, com diferenças inferiores a 23,3%, como observado no gráfico da Figura 4.21.

Figura 4.21 – Comparação do módulo de elasticidade



4.3.4 Comparação dos resultados com os valores obtidos por outros autores

Czaderski et al. (2007, apud STÜRZENBECHER; HOFSTETTER; EBERHARDSTEINER, 2010) testaram à flexão 24 painéis de CLT com três camadas de madeira conífera, espessura total de 70 mm, com diferentes configurações e tipos de carregamentos e obtiveram um valor médio do MOR de 27,3 MPa, com coeficiente de variação de 8,9%. Esse valor se mostra 1,8 vezes superior à média do MOR dos painéis com consumo

de adesivo de 160 g/m² (15,11 MPa), mas 20,2% menor que a média do MOR dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² (34,21 MPa) testados a flexão. O valor do MOR obtido pelos autores se mostrou equivalente a 17,7% do valor médio obtido no ensaio de cisalhamento (23,2 MPa).

Alencar (2015) produziu 16 painéis de CLT com três camadas e diferentes combinações de lamelas de pinus e eucalipto, sendo que 4 deles foram fabricados apenas com madeira de pinus e apresentaram densidade média de 0,53 g/cm³, MOR de 48,3 MPa e MOE de 13.622 MPa. Os valores da densidade dos painéis se mostraram similares, entretanto, os valores do MOR e o MOE determinados pela autora foram efetivamente superiores aos obtidos neste trabalho. Destaca-se que Alencar (2015) utilizou o adesivo MUF para a fabricação dos painéis.

Zhou et al. (2014), produziram 45 painéis de CLT com três camadas de madeira conífera (*Picea mariana*), com diferentes larguras, utilizando 300 g/m² de adesivo poliuretano bicomponente. Os autores obtiveram um resultado médio do módulo de elasticidade equivalente a 9.537 MPa, similar aos valores médios do módulo de elasticidade encontrados para os painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 160 g/m² e 200 g/m².

Sigrist e Lehmann (2014) ensaiaram 70 painéis de CLT de *Pinus radiata* com diferentes configurações, utilizando o adesivo poliuretano monocomponente. Os painéis com três camadas e espessura total de 90 mm, sem classificação visual ou mecânica, apresentaram os valores médios de 25,5 MPa para o módulo de ruptura, 2,7 MPa para a tensão de cisalhamento máxima e 6.251 MPa para o módulo de elasticidade. Já os painéis com essa mesma configuração e com classificação visual apresentaram os valores médios de 35,4 MPa para o módulo de ruptura, 2,7 MPa para a tensão de cisalhamento máxima e 8.066 MPa para o módulo de elasticidade. Também foram testados painéis com essa mesma configuração, com classificação visual e mecânica, obtendo-se os valores médios de 53,1 MPa para o módulo de ruptura, 3,5 MPa para a tensão de cisalhamento máxima e 12.567 MPa para o módulo de elasticidade.

O valor médio do MOR dos painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 200 g/m² (34,21 MPa) se mostrou 35,6% inferior ao valor obtido por Sigrist e Lehmann (2014) para os painéis com classificação visual e mecânica (53,1 MPa), mas se aproximou do valor obtido para os painéis com classificação visual apenas (35,4 MPa).

Quando se compara o valor médio da tensão cisalhante máxima obtido no ensaio de cisalhamento (3,16 MPa) com o valor determinado pelos autores para os painéis com classificação visual e mecânica (3,5 MPa), é possível observar uma diferença inferior a 10%.

Quanto ao MOE, os painéis com classificação visual e mecânica testados por Sigrist e Lehmann (2014) apresentaram um valor 23% superior aos painéis testados à flexão, nesta pesquisa, com consumo de adesivo de 200 g/m² (10.200 MPa) e 30% superior aos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² (9.664,6 MPa).

Os gráficos das Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam, respectivamente, os valores médios do módulo de ruptura, tensão de cisalhamento máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis, em comparação com os obtidos por outros pesquisadores.

Figura 4.22 – Comparação dos valores médios do módulo de ruptura

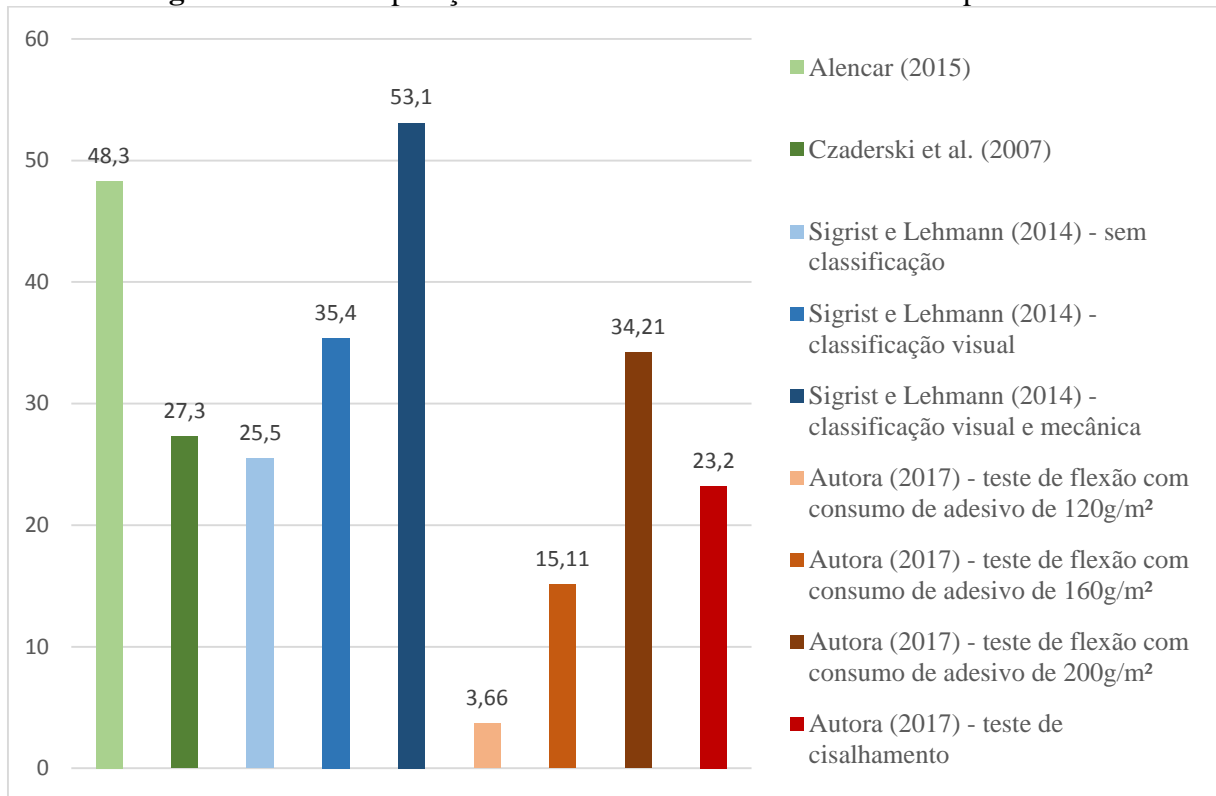


Figura 4.23 – Comparação dos valores médios da tensão de cisalhamento máxima

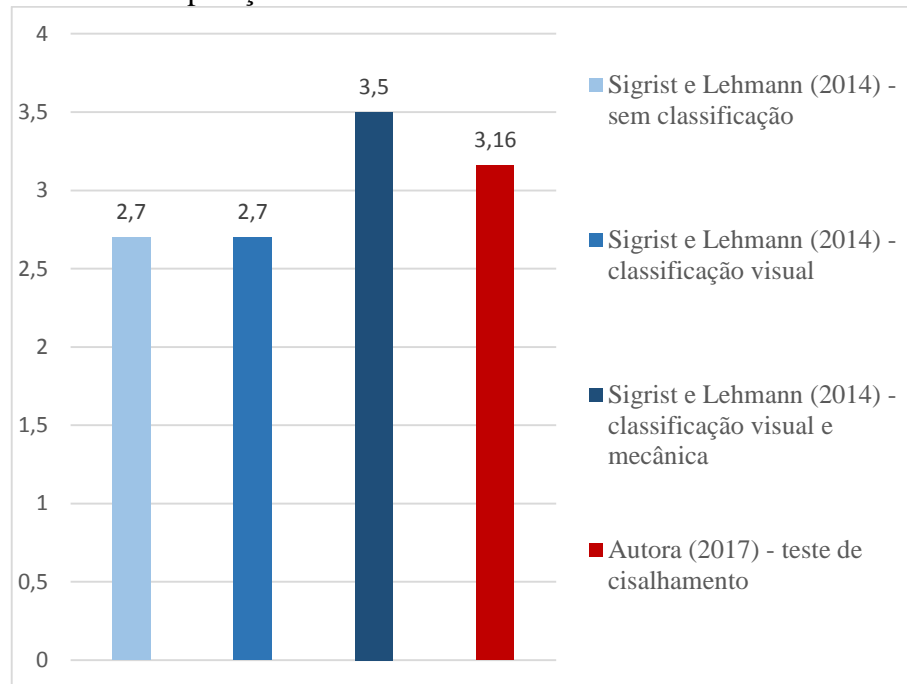
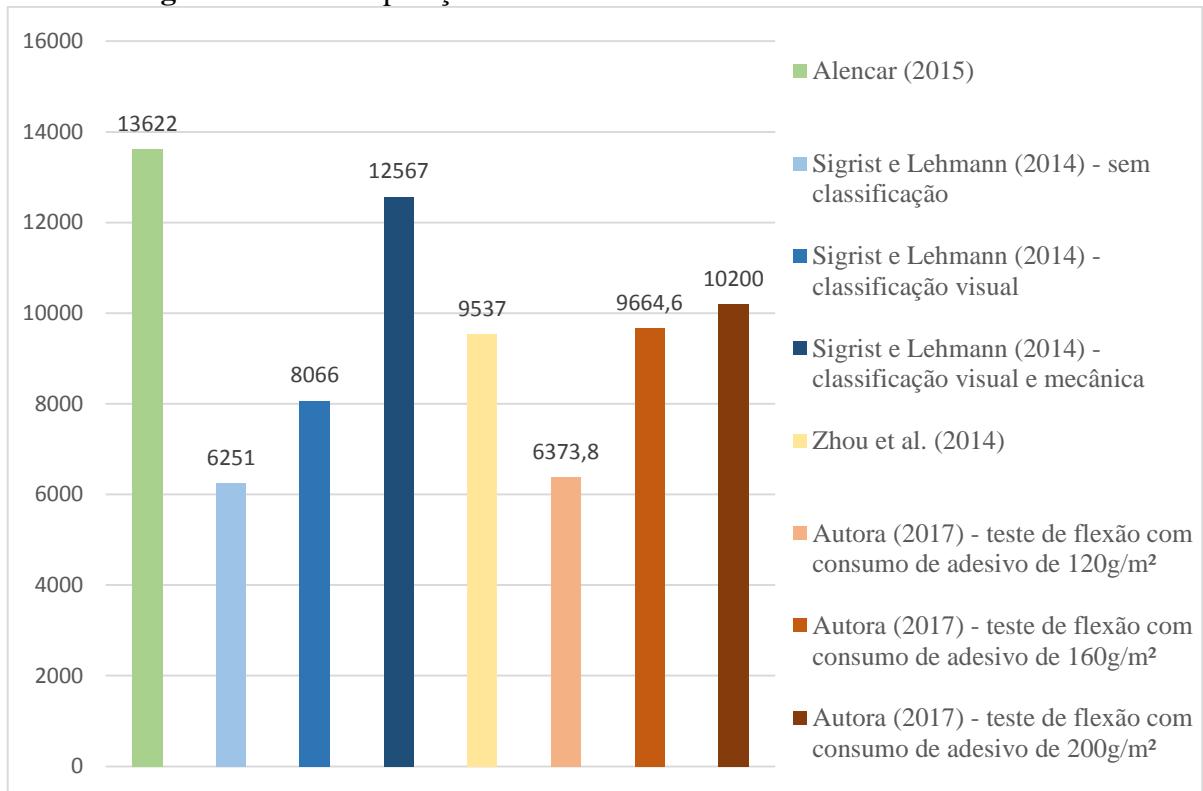


Figura 4.24 – Comparação dos valores médios do módulo de elasticidade



5 CONCLUSÃO

Visto como um novo conceito para a engenharia de estruturas, o sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* (CLT) é considerado por muitos pesquisadores como o sistema estrutural do século XXI, devido ao seu alto nível de pré-fabricação, redução no tempo de construção e possibilidade de construções de múltiplos pavimentos. Além disso, a CLT apresenta diversos requisitos para atenuar os impactos causados pela construção civil, pois é feita de material renovável, que auxilia na redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, e promove construções com menor geração de resíduos, contribuindo, assim, para o desenvolvimento sustentável.

Por apresentar extensas áreas de plantio florestal de eucalipto e pinus, o Brasil se mostra um mercado promissor para a implantação deste sistema, estimulando o uso de madeira proveniente de florestas plantadas em produtos com alto valor agregado.

Entretanto, por ser um produto recente, são necessárias mais pesquisas referentes ao seu desempenho estrutural, a fim de que o emprego da CLT na construção civil possa ser feito com economia e segurança.

O presente estudo, buscou analisar o desempenho de painéis CLT, para utilização como placas de piso, formados por três camadas ortogonais de lamelas de madeira de pinus ligadas por adesivo poliuretano monocomponente, por meio de ensaios de flexão e cisalhamento.

Para os testes de flexão, foram produzidos painéis com diferentes quantidades de adesivo aplicadas, a fim de avaliar a eficiência da ligação adesiva. Os painéis produzidos com quantidade de adesivo correspondente a 120 g/m² apresentaram propriedades mecânicas muito baixas e ruptura na linha de cola, o que pode ser explicado pelo fato de que baixa quantidade de adesivo provoca uma ligação pouco eficiente. Além disso, durante a produção destes painéis, observou-se que essa quantidade de adesivo não era suficiente, pela dificuldade na sua distribuição sobre a superfície.

Os painéis produzidos com uma quantidade de adesivo de 160 g/m² também romperam-se na linha de cola, mas apresentaram propriedades mecânicas superiores aos produzidos com 120 g/m². O valor médio do módulo de ruptura desses painéis foi de 15,11 MPa, enquanto que para os produzidos com 120 g/m² foi de 3,66 MPa. Os valores característicos do módulo de ruptura dos painéis produzidos com a quantidade de adesivo de 120 g/m² (2,56 MPa) e 160 g/m² (10,58 MPa) não atenderam os valores característicos mínimos estipulados pela norma americana ANSI/APA PRG:320 (2012).

Já os painéis testados à flexão, produzidos com quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m², exibiram valores médios de 34,21 MPa para o módulo de ruptura e 10.200 MPa para o módulo de elasticidade, similares aos requeridos pela norma, e apresentaram ruptura na madeira.

Os painéis testados ao cisalhamento foram produzidos com quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m², e apresentaram valores médios de 23,20 MPa para o módulo de ruptura e 3,16 MPa para a tensão de cisalhamento máxima, sendo este último correlato aos valores obtidos nos ensaios de cisalhamento da lâmina de cola na direção normal às fibras dos caibros (3,69 MPa) e das lamelas (3,02 MPa). Esses painéis romperam-se, em sua maioria, por cisalhamento da madeira da camada intermediária.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa, evidencia-se a influência da quantidade de adesivo aplicada no desempenho mecânico dos painéis de CLT e recomenda-se um consumo de adesivo igual ou superior a 200 g/m². Além disso, observa-se que o módulo de elasticidade dos painéis está diretamente relacionado ao módulo de elasticidade das lamelas utilizadas para sua produção.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos que deem continuidade ao presente estudo, sugere-se a realização de testes de flexão e cisalhamento com painéis de CLT, para utilização como placas de piso, com cinco camadas e diferentes configurações. Propõe-se a produção e caracterização mecânica de painéis de CLT com ligação de emendas dentadas. Outra possibilidade, é analisar o desempenho mecânico de painéis de CLT para utilização como placas de parede.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, J. B. M.; MOURA, J. D. M. Qualidade da adesão da madeira de pinus e eucalipto para produção de painéis estruturais cross laminated timber (CLT). In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais...** Maceió: ENTAC, 2014. p. 3388-3397.

ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT):** Análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado. 2015. 103f. Dissertação (Mestrado em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/APA PRG 320:** Standard for performance-rated cross-laminated timber. Tacoma, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013:** ano base 2012. Brasília, 2013.

ASHTARI, S. **In-plane stiffness of cross-laminated timber floors.** 2012. 132f. Thesis (Master of Applied Science) – University of British Columbia, Vancouver, 2012.

AUGUSTIN, M. Wood adhesives. In: LEONARDO DA VINCI. **Handbook 1: timber structures.** Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMTIS). [S.l.], 2008a. cap. 4.

_____. Wood based panels. In: LEONARDO DA VINCI. **Handbook 1: timber structures.** Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures (TEMTIS). [S.l.], 2008b. cap. 6.

BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. P. Preservação. **Revista da Madeira**, [S.l.], n.68, dez. 2002. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=264&subject=Preserva%EA%E3o&title=Pr>. Acesso em: 13 jul. 2016.

BRANDNER, R. **Production and technology of cross laminated timber (CLT):** a state-of-the-art report. Relatório – Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, 2013.

CALIL JUNIOR, C. O potencial do uso da madeira de pinus na construção civil. **PINI**, Rio de Janeiro, abr. 2002. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/o-potencial-do-uso-da-madeira-de-pinus-na-construcao-81480-1.aspx>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

CALIL JUNIOR, C; PINTO, E. M. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de *Eucalyptus* de uso estrutural exposta ao fogo. **Minerva**, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 131-140, jul./dez. 2006.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações de espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 989-996, out./dez. 2014.

CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp.** 2003. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CECCOTTI, A.; SANDHAAS, C.; YASUMURA, M. Seismic behaviour of multistory cross-laminated timber buildings. In: INTERNATIONAL CONVENTION OF SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 53., 2010, Geneva. **Proceedings...** Geneva: SWST, 2010.

CHEN, Y. **Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications**. 2011. 237f. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of British Columbia, Vancouver, 2011.

COSTA, A. A. **Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)**. 2013. 109f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2013.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. (Ed.). **Cross laminated timber: a primer**. [S.l.]: FPInnovations, 2010.

DINWOODIE, J. M. **Timber: its nature and behavior**. 2. ed. London: E & FN Spon, 2000.

EISFELD, C. L.; BERGER, R. Análise das estruturas de mercado das indústrias de painéis de madeira (compensado, MDF e OSB) no estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 21-34, jan./mar. 2012.

FINCH, G.; RICKETTS, D.; WANG, J.; CONSTANCE, T.; MORRIS, P. Building enclosure design of cross-laminated timber construction. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Mario D. Gonçalves et al. Québec: Canadian, 2011. cap. 10.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FPInnovations. Introduction to cross-laminated timber. In: _____. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Québec: Canadian, 2011. cap. 1.

FLAIG, M.; BLAß, H. J. Bending strength of cross laminated timber beams loaded in plane. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 13., 2014, Quebec. **Proceedings...** Quebec: WCTE, 2014. Não paginado.

FRAGIACOMO, M.; MENIS, A.; CLEMENTE, I.; BOCHICCHIO, G.; TESSADRI, B. Experimental and numerical behaviour of cross-laminated timber floors in fire conditions. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 12., 2012, Auckland. **Proceedings...** Auckland: WCTE, 2012. Não paginado.

FRANGI, A.; FONTANA, M.; KNOBLOCH, M.; BOCHICCHIO, G. Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 9., 2008, [Karlsruhe]. **Proceedings...** [Karlsruhe]: International Association for Fire Safety Science, 2008. p. 1279-1290.

GAGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Kevin D. Below, Robert Malczyk e David Moses. Québec: Canadian, 2011. cap. 3.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: [s.n.], 2000.

GREEN, M.; KARSH, J. E. **The case for tall wood buildings**. [S.l.]: mgb, 2012.

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

HU, L.; GAGNON, S. Vibration performance of cross-laminated timber floors. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Thomas Orskaug et al. Québec: Canadian, 2011. cap. 7.

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; PRATA, J. G.; ROSSO, S. Produção de painel compensado estrutural de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, p. 363-367, set./dez. 2007.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PINTO, J. A.; VIANA, L. C.; SOUZA, M. M.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Produção de painéis laminados unidirecionais – LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 557-563, out./dez. 2010.

KLH Massivholz GmbH. **Component catalogue for cross laminated timber structures**. [S.l.]: KLH, 2011.

KLH UK. **Norwich Open Academy**. Portfolio: Education [201-]. Disponível em: <<http://www.klhuk.com/portfolio/education/open-academy,-norwich.aspx>>. Acesso em: 22 jun. 2016.

KUILEN, J. W. G. V.; CECCOTTI, A.; XIA, Z.; HE, M. Very tall wooden buildings with cross laminated timber. In: EAST ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING AND CONSTRUCTION, 12., 2011, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Elsevier, 2011. p. 1621-1628.

LIMA, N. N.; MENDES, L. M.; SÁ, V. A.; BUFALINO, L. Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 407-413, jul./set. 2013.

MALLO, M. F. L.; ESPINOZA, O. Awareness, perceptions and willingness to adopt cross-laminated timber by the architecture community in the United States. **Cleaner Production**, [S.l.], v. 94, p. 198-210, 2015.

MELO, R. R.; MENEZZI, C. H. S. D. Comportamento reológico da madeira e derivados. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 01, p. 25-40, maio 2010.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

_____. **Princípios para o projeto e produção das construções sustentáveis**. Ponta Grossa: UEPG/NUTEAD, 2013.

MOHAMMAD, M.; GAGNON, S.; DOUGLAS, B. K.; PODESTO, L. Introduction to cross laminated timber. **Wood Design Focus**, [S.l.], v. 22, n. 2, p. 3-12, verão 2012.

MOHAMMAD, M.; MUNOZ, W. Connections in cross-laminated timber buildings. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Pierre Quenneville e David Moses. Québec: Canadian, 2011. cap. 5.

PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 559-566, jul./set. 2011.

PASSARELI, R. N. **Cross Laminated Timber: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. 2013. 174f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

POPOVSKI, M.; KARACABEYLI, E.; CECCOTTI, A. Seismic performance of cross-laminated timber buildings. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Don Anderson et al. Québec: Canadian, 2011. cap. 4.

PORTAL DA MADEIRA. **LVL – Laminated Veneer Lumber**. 2009. Disponível em: <<http://portaldamadeira.blogspot.com.br/2009/11/lvl-laminated-venner-lumber.html>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

REWOOD Soluções Estruturais em Madeira. **Pontes e Passarelas**. [20--]. Disponível em: <<http://www.brarewood.com.br/aplicacao/pontes-e-passarelas/>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

SANTOS, J. A. **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. 2007. 273f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo – 2013: dados de 2007-2012**. Brasília: SFB, 2013.

SIGRIST, C.; LEHMANN, M. Potential of CLT produced from non-structural grade australian *Pinus radiata*. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 13., 2014, Quebec. **Proceedings...** Quebec: WCTE, 2014. Não paginado.

STAMATO, G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. 2002. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlo, 2002.

STAUDER, C. **Cross-laminated timber: an analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America**. 2013. 31f. Research (Austrian Marshall Plan Foundation Scholarship) – Fachhochschule Salzburg, University of Applied Sciences, [Puch bei Hallein], 2013.

STEIGER, R.; GÜLZOW, A.; GSELL, D. Non destructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber (CLT). In: Conference COST E53, 2008, Delft. **Proceedings...** Delft: TUDelft, 2008.

STÜRZENBECHER, R.; HOFSTETTER, K.; EBERHARDSTEINER, J. Cross laminated timber: a multi-layer, shear compliant plate and its mechanical behavior. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 11., 2010, [Riva del Garda]. **Proceedings...** [Riva del Garda]: WCTE, 2010. Não paginado.

THIEL, A.; SCHICKHOFER, G. CLTdesigner – a software tool for designing cross laminated timber elements: 1d-plate-design. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 11., 2010, [Riva del Garda]. **Proceedings...** [Riva del Garda]: WCTE, 2010. Não paginado.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução econômica do painel compensado no Brasil e no mundo. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 277-285, jul./set. 2012.

WANG, B.; PIRVU, C.; LUM, C. Cross-laminated timber manufacturing. In: FPInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Romulo C. Casilla, Y. H. Chui e Bob Knudson. Québec: Canadian, 2011. cap. 2.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlo, 2003.

ZHOU, Q.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; MOHAMMAD, M. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 379-386, 2014.

APÊNDICE A – Caracterização dos materiais

Tabela A.1 – Umidade e densidades do pinus

C.P.	V (cm ³)	V _{sat} (cm ³)	m _i (g)	m _s (g)	U (%)	ρ _{pap,U%} (g/cm ³)	ρ _{pap,12%} (g/cm ³)	ρ _{bas} (g/cm ³)
1	32,69	34,29	16,42	14,22	15,47	0,50	0,49	0,41
2	32,77	33,31	13,05	11,37	14,78	0,40	0,39	0,34
3	35,43	36,70	15,05	13,09	14,97	0,42	0,41	0,36
4	35,82	37,08	15,91	13,76	15,63	0,44	0,43	0,37
5	38,04	39,61	15,76	13,68	15,20	0,41	0,40	0,35
6	37,14	39,39	15,07	13,12	14,86	0,41	0,40	0,33
7	31,37	33,00	13,80	12,05	14,52	0,44	0,43	0,37
8	33,48	34,66	13,31	11,59	14,84	0,40	0,39	0,33
9	34,08	35,61	14,28	12,42	14,98	0,42	0,41	0,35
10	35,11	36,97	16,50	14,38	14,74	0,47	0,46	0,39
11	34,92	35,83	15,16	13,16	15,20	0,43	0,42	0,37
12	30,78	31,95	14,07	12,20	15,33	0,46	0,45	0,38
13	34,86	36,25	17,03	14,82	14,91	0,49	0,48	0,41
14	33,89	35,00	16,99	14,66	15,89	0,50	0,48	0,42
15	33,76	34,56	13,51	11,72	15,27	0,40	0,39	0,34
16	33,05	34,64	13,81	11,98	15,28	0,42	0,41	0,35
17	34,41	35,75	18,41	15,94	15,50	0,54	0,53	0,45
18	33,34	34,76	14,48	12,55	15,38	0,43	0,42	0,36
19	35,10	36,44	14,63	12,74	14,84	0,42	0,41	0,35
20	33,26	34,39	15,00	13,12	14,33	0,45	0,44	0,38
21	33,14	34,91	12,64	11,00	14,91	0,38	0,37	0,32
22	36,29	37,58	14,23	12,39	14,85	0,39	0,38	0,33
23	33,22	34,44	16,56	14,42	14,84	0,50	0,49	0,42
24	33,33	34,22	17,10	14,81	15,46	0,51	0,50	0,43
25	37,71	38,72	14,39	12,51	15,03	0,38	0,37	0,32
26	32,92	34,42	13,86	12,04	15,12	0,42	0,41	0,35
27	35,88	37,09	14,94	12,95	15,37	0,42	0,41	0,35
			Média	15,09	0,44	0,43	0,37	
			Desvio-padrão	0,34	0,04	0,04	0,03	
			Coefficiente de variação	2,28	9,59	9,77	9,49	
			Valor máximo	15,89	0,54	0,53	0,45	
			Valor mínimo	14,33	0,38	0,37	0,32	

Nota: pap,12% calculada por Kollmann

Tabela A.2 – Estabilidade dimensional do pinus

C.P.	V_{sat} (cm³)	V_{seco} (cm³)	ε_{r,1} (%)	ε_{r,2} (%)	ε_{r,3} (%)	ε_{i,1} (%)	ε_{i,2} (%)	ε_{i,3} (%)	ΔV (%)
1	34,29	30,35	0,62	5,09	6,17	0,62	5,37	6,58	12,99
2	33,31	30,86	0,24	4,43	2,83	0,24	4,64	2,91	7,94
3	36,70	32,91	0,61	3,64	6,37	0,61	3,78	6,80	11,51
4	37,08	33,01	0,41	5,29	5,62	0,41	5,59	5,95	12,33
5	39,61	35,21	0,63	3,57	7,25	0,63	3,70	7,81	12,52
6	39,39	34,85	0,54	3,90	7,42	0,55	4,05	8,01	13,01
7	33,00	29,82	0,43	4,18	5,29	0,43	4,37	5,59	10,67
8	34,66	30,82	0,51	5,47	5,44	0,51	5,79	5,75	12,45
9	35,61	31,86	0,60	3,20	7,03	0,60	3,31	7,56	11,79
10	36,97	32,83	0,53	4,77	6,26	0,53	5,00	6,68	12,62
11	35,83	32,54	0,86	3,32	5,25	0,87	3,44	5,54	10,11
12	31,95	28,52	1,27	3,07	6,72	1,29	3,16	7,20	12,01
13	36,25	32,52	0,43	3,94	6,21	0,43	4,10	6,62	11,47
14	35,00	31,60	0,39	4,48	5,11	0,39	4,69	5,39	10,77
15	34,56	32,18	0,62	3,19	3,20	0,63	3,30	3,31	7,38
16	34,64	30,82	0,57	4,05	6,75	0,57	4,22	7,24	12,41
17	35,75	31,94	0,42	5,34	5,21	0,42	5,65	5,49	11,92
18	34,76	31,07	0,52	3,97	6,41	0,53	4,13	6,85	11,85
19	36,44	33,01	0,48	3,34	5,82	0,48	3,45	6,18	10,38
20	34,39	31,29	0,43	2,61	6,20	0,43	2,68	6,60	9,93
21	34,91	31,00	0,51	5,18	5,87	0,51	5,46	6,23	12,61
22	37,58	33,91	0,44	2,74	6,81	0,44	2,82	7,31	10,82
23	34,44	30,48	0,88	4,09	6,90	0,89	4,27	7,41	13,00
24	34,22	30,34	0,40	4,67	6,62	0,40	4,90	7,09	12,78
25	38,72	35,02	0,55	3,06	6,19	0,55	3,15	6,60	10,58
26	34,42	30,50	0,27	6,28	5,17	0,28	6,70	5,46	12,83
27	37,09	33,08	0,63	6,02	4,49	0,63	6,40	4,70	12,10
		Média	0,55	4,18	5,87	0,55	4,38	6,25	11,51
		Desvio-padrão	0,20	0,98	1,08	0,20	1,07	1,20	1,43
		Coefficiente de variação	36,47	23,41	18,39	36,77	24,47	19,25	12,39
		Valor máximo	1,27	6,28	7,42	1,29	6,70	8,01	13,01
		Valor mínimo	0,24	2,61	2,83	0,24	2,68	2,91	7,38

Tabela A.3 – Umidade e densidades do pinus – lamelas

C.P.	V (cm³)	V_{sat} (cm³)	m_i (g)	m_s (g)	U (%)	ρ_{pap,U%} (g/cm³)	ρ_{pap,12%} (g/cm³)	ρ_{bas} (g/cm³)
1	31,99	34,40	23,23	19,95	16,44	0,73	0,71	0,58
2	33,95	35,47	18,74	16,16	15,97	0,55	0,54	0,46
3	34,46	37,26	24,5	21,11	16,06	0,71	0,69	0,57
4	33,58	34,61	16,17	13,97	15,75	0,48	0,47	0,40
5	31,20	32,37	14,83	12,71	16,68	0,48	0,46	0,39
6	32,83	34,30	17,35	14,88	16,60	0,53	0,52	0,43
7	34,91	36,66	16,6	14,31	16,00	0,48	0,47	0,39
8	32,32	35,08	22,56	19,4	16,29	0,70	0,69	0,55
9	31,97	33,56	14,92	12,92	15,48	0,47	0,46	0,38
10	33,51	34,93	14,45	12,46	15,97	0,43	0,42	0,36
11	32,04	33,85	13,88	11,97	15,96	0,43	0,42	0,35
12	35,84	37,49	19,84	17,07	16,23	0,55	0,54	0,46
13	35,55	38,01	25,79	22,17	16,33	0,73	0,72	0,58
14	33,88	35,73	18,88	16,23	16,33	0,56	0,55	0,45
15	34,05	35,99	15,9	13,75	15,64	0,47	0,46	0,38
				Média	16,11	0,55	0,54	0,45
				Desvio-padrão	0,33	0,11	0,10	0,08
				Coefficiente de variação	2,05	19,13	19,35	17,70
				Valor máximo	16,68	0,73	0,72	0,58
				Valor mínimo	15,48	0,43	0,42	0,35

Nota: pap,12% calculada por Kollmann

Tabela A.4 – Estabilidade dimensional do pinus – lamelas

C.P.	V_{sat} (cm³)	V_{seco} (cm³)	ε_{r,1} (%)	ε_{r,2} (%)	ε_{r,3} (%)	ε_{i,1} (%)	ε_{i,2} (%)	ε_{i,3} (%)	ΔV (%)
1	34,40	29,51	0,47	6,72	7,59	0,47	7,21	8,22	16,56
2	35,47	31,91	0,33	4,14	5,86	0,33	4,31	6,22	11,17
3	37,26	32,07	0,19	6,45	7,81	0,19	6,90	8,48	16,19
4	34,61	32,20	0,71	3,10	3,32	0,72	3,20	3,44	7,52
5	32,37	29,79	0,53	4,06	3,58	0,53	4,23	3,71	8,68
6	34,30	31,23	1,04	3,29	4,88	1,05	3,40	5,14	9,85
7	36,66	33,12	0,51	3,66	5,74	0,51	3,80	6,09	10,69
8	35,08	30,10	0,69	6,98	7,09	0,70	7,51	7,63	16,52
9	33,56	30,00	0,47	6,17	4,30	0,47	6,58	4,49	11,89
10	34,93	31,63	0,44	6,38	2,87	0,45	6,82	2,95	10,46
11	33,85	30,47	0,41	6,08	3,77	0,41	6,48	3,92	11,10
12	37,49	33,63	0,46	6,15	3,95	0,46	6,56	4,11	11,45
13	38,01	32,73	0,39	6,79	7,27	0,39	7,29	7,84	16,15
14	35,73	31,72	0,25	5,79	5,53	0,25	6,15	5,85	12,64
15	35,99	31,81	0,59	7,38	4,00	0,60	7,97	4,17	13,13
	Média	0,50	5,54	5,17	0,50	5,89	5,48	12,27	
	Desvio-padrão	0,20	1,41	1,61	0,20	1,57	1,80	2,81	
	Coefficiente de variação	39,99	25,44	31,09	40,24	26,60	32,80	22,89	
	Valor máximo	1,04	7,38	7,81	1,05	7,97	8,48	16,56	
	Valor mínimo	0,19	3,10	2,87	0,19	3,20	2,95	7,52	

Tabela A.5 – Resistência à compressão paralela às fibras do pinus – lamelas

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)
1	21,8	22,0	19.423,8	40,50
2	21,2	21,9	15.303,6	32,96
3	21,6	23,2	15.107,4	30,15
4	21,7	22,6	19.031,4	38,81
5	21,5	22,9	20.404,8	41,44
6	21,6	21,7	13.145,4	28,05
7	21,4	21,8	13.734,0	29,44
8	21,6	23,9	21.189,6	41,05
9	21,9	23,1	20.306,7	40,14
10	21,5	23,9	21.091,5	41,05
11	21,9	22,4	20.601,0	41,99
12	21,6	21,6	15.794,1	33,85
13	21,6	22,1	20.502,9	42,95
14	21,5	21,6	16.382,7	35,28
15	21,8	22,9	25.407,9	50,90
Média				37,90
Desvio-padrão				5,96
Coeficiente de variação (%)				15,72
Valor característico				28,05
Valor máximo				50,90
Valor mínimo				28,05
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				42,58
Valor característico				31,51

Tabela A.6 – Resistência à compressão paralela às fibras do pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)
1	49,3	50,7	73.841	29,54	-
2	47,6	52,1	79.742	32,15	16.279,83
3	50,1	52,1	71.230	27,29	11.516,31
4	45,9	51,7	73.821	31,11	18.276,81
5	49,0	52,1	88.528	34,68	26.340,41
6	48,4	52,4	80.238	31,64	13.536,78
7	50,9	52,1	75.957	28,64	20.856,48
8	49,2	51,3	95.351	37,78	13.611,26
9	47,2	51,4	90.765	37,41	14.948,67
10	46,2	51,0	87.081	36,96	16.636,96
11	47,3	52,2	83.447	33,80	16.265,30
12	48,1	52,3	86.858	34,53	25.173,14
Média				32,96	17585,63
Desvio-padrão				3,33	4529,90
Coeficiente de variação (%)				10,12	25,76
Valor característico				29,85	-
Valor máximo				37,78	26340,41
Valor mínimo				27,29	11516,31
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:					
Média				36,02	18672,42
Valor característico				32,61	-

Tabela A.7 – Resistência à compressão normal às fibras do pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência à compressão normal às fibras (MPa)	Módulo de elasticidade normal às fibras (MPa)
1	51,8	51,3	16.884	6,35	3.705,27
2	51,9	51,7	15.436	5,75	1.403,05
3	47,6	49,3	15.173	6,47	3.659,41
4	48,8	52,0	15.801	6,23	3.940,73
5	50,9	52,0	23.008	8,69	-
6	52,0	50,6	21.429	8,14	7.601,09
7	50,5	50,4	8.513	3,34	2.027,85
8	50,5	50,2	9.221	3,64	-
9	48,9	50,0	10.952	4,48	1.635,99
10	50,7	50,3	12.359	4,85	-
Média				5,79	3.424,77
Desvio-padrão				1,68	1.966,87
Coeficiente de variação (%)				28,96	57,43
Valor característico				4,06	-
Valor máximo				8,69	7.601,09
Valor mínimo				3,34	1.403,05
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:					
Média				6,33	3.636,42
Valor característico				4,44	-

Tabela A.8 – Resistência à tração normal às fibras do pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência à tração normal às fibras (MPa)
1	51,1	24,6	2.596	2,07
2	52,0	22,9	2.939	2,47
3	52,2	23,9	3.020	2,42
4	52,1	24,5	1.596	1,25
5	51,1	23,2	3.414	2,88
6	49,6	24,8	2.697	2,19
7	51,6	24,8	3.172	2,48
8	52,9	24,5	2.505	1,93
9	52,4	25,6	3.343	2,49
10	51,8	24,3	4.010	3,19
11	52,7	24,7	2.212	1,70
12	52,9	26,5	3.323	2,37
13	51,7	24,0	1.667	1,34
14	53,1	24,7	2.677	2,04
15	50,9	24,8	2.263	1,79
Média				2,17
Desvio-padrão				0,51
Coeficiente de variação (%)				23,44
Valor característico				1,52
Valor máximo				3,19
Valor mínimo				1,25
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				2,38
Valor característico				1,66

Tabela A.9 – Resistência ao cisalhamento do pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência ao cisalhamento (MPa)
1	50,5	50,5	18.331	7,19
2	53,0	50,0	21.287	8,03
3	50,8	50,9	22.421	8,67
4	51,4	51,8	22.532	8,46
5	51,0	51,2	24.597	9,42
6	50,3	50,3	22.785	9,01
7	49,6	52,2	20.993	8,11
8	49,5	51,5	24.283	9,53
9	51,6	51,9	24.263	9,06
10	49,6	50,6	18.908	7,53
11	52,0	52,0	23.200	8,58
12	51,0	51,9	21.641	8,18
13	51,0	51,6	26.682	10,14
14	48,5	49,2	22.016	9,23
15	48,2	48,2	19.283	8,30
16	48,2	48,9	18.453	7,83
17	50,6	52,0	23.554	8,95
18	48,8	51,0	22.714	9,13
19	52,9	51,7	30.619	11,20
Média				8,76
Desvio-padrão				0,91
Coeficiente de variação (%)				10,43
Valor característico				8,06
Valor máximo				11,20
Valor mínimo				7,19
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				9,58
Valor característico				8,81

Tabela A.10 – Resistência à flexão do pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade à flexão (MPa)
1	50,0	50,0	2.945,63	37,11	-
2	52,9	48,2	1.923,25	24,65	17.265,70
3	49,7	51,4	2.743,21	32,90	9.503,53
4	46,4	50,3	4.140,12	55,54	14.455,41
5	52,1	50,0	3.664,39	44,31	8.407,89
6	45,4	51,6	4.281,83	55,79	13.189,25
7	47,0	52,5	4.210,93	51,20	-
8	50,2	51,7	5.040,99	59,17	14.169,25
9	50,0	52,9	4.646,26	52,30	9.497,18
10	48,9	52,3	4.656,36	54,83	11.962,36
			Média	46,78	12.306,32
			Desvio-padrão	10,99	2.840,05
			Coeficiente de variação (%)	23,50	23,08
			Valor característico	32,75	-
			Valor máximo	59,17	17.265,70
			Valor mínimo	24,65	8.407,89
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:					
			Média	51,12	13.066,85
			Valor característico	35,79	-

Tabela A.11 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela às fibras dos caibros de pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
1	44,5	48,7	22.056	10,18
2	43,5	48,7	23.969	11,31
3	47,2	47,3	10.335	4,63
4	43,7	49,5	19.455	8,99
5	47,4	47,1	14.505	6,50
6	44,1	48,1	11.651	5,49
7	46,6	51,3	14.626	6,12
8	47,0	48,9	17.734	7,72
9	45,0	48,3	14.323	6,59
Média				7,50
Desvio-padrão				2,11
Coeficiente de variação (%)				28,10
Valor característico				5,25
Valor máximo				11,31
Valor mínimo				4,63
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				8,20
Valor característico				5,74

Tabela A.12 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção normal às fibras dos caibros de pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência ao cisalhamento normal às fibras (MPa)
1	48,5	46,5	5.780	2,56
2	47,8	44,8	5.183	2,42
3	46,0	47,1	10.598	4,89
4	46,8	47,3	7.318	3,31
5	47,1	46,7	7.258	3,30
6	48,9	46,0	12.278	5,46
7	47,2	47,3	7.733	3,46
8	46,5	47,4	4.595	2,08
9	48,3	47,6	6.670	2,90
Média				3,38
Desvio-padrão				1,06
Coeficiente de variação (%)				31,40
Valor característico				2,36
Valor máximo				5,46
Valor mínimo				2,08
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				3,69
Valor característico				2,58

Tabela A.13 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção paralela às fibras das lamelas de pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
1	48,1	47,3	16.317	7,17
2	48,2	48,4	22.279	9,55
3	47,7	48,3	13.533	5,87
4	49,1	48,3	10.072	4,25
5	47,6	47,8	15.710	6,90
6	48,0	50,1	16.783	6,98
7	46,3	47,1	20.265	9,29
8	46,9	47,6	14.586	6,53
9	47,0	48,9	20.204	8,79
10	46,7	49,0	18.149	7,93
11	47,2	49,2	14.981	6,45
12	47,9	50,1	15.457	6,44
13	47,5	48,2	16.793	7,33
14	44,8	48,7	21.115	9,68
15	47,2	47,0	20.548	9,26
Média				7,50
Desvio-padrão				1,51
Coeficiente de variação (%)				20,16
Valor característico				5,69
Valor máximo				9,68
Valor mínimo				4,25
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				8,42
Valor característico				6,39

Tabela A.14 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola na direção normal às fibras das lamelas de pinus

C.P.	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	Resistência ao cisalhamento normal às fibras (MPa)
1	48,2	47,1	6.640	2,92
2	48,6	47,5	7.156	3,10
3	48,7	48,5	8.098	3,43
4	48,6	48,5	6.073	2,58
5	48,9	48,2	4.950	2,10
6	47,4	48,4	6.407	2,79
7	48,6	47,5	5.051	2,19
8	47,9	48,1	8.816	3,83
9	48,2	47,4	5.486	2,40
10	47,2	47,0	4.808	2,17
11	47,2	48,0	6.569	2,90
12	48,9	47,4	5.314	2,29
13	49,5	48,9	6.336	2,62
14	46,5	47,3	4.747	2,16
15	48,1	47,0	6.367	2,82
Média				2,69
Desvio-padrão				0,49
Coeficiente de variação (%)				18,10
Valor característico				2,10
Valor máximo				3,83
Valor mínimo				2,10
<hr/>				
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:				
Média				3,02
Valor característico				2,36

APÊNDICE B – Classificação visual e mecânica das lamelas

Tabela B.1 – Classificação visual e mecânica das lamelas

Lamela	Classe visual	b (mm)	h (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE_{12%} (MPa)
1	I26-D	102,4	21,7	0,04	15,87	15,83	8.643,08	9.354,23
2	I26-D	96,7	21,5	0,56	18,58	18,02	8.266,69	8.946,88
3	I26-ND	96,1	21,5	1,26	20,28	19,02	7.880,96	8.529,41
4	I26-ND	101,4	21,5	0,39	18,98	18,59	7.641,80	8.270,57
5	I26-ND	97,3	21,5	1,26	15,36	14,10	10.499,80	11.363,73
6	I26-ND	102,0	21,5	0,43	13,85	13,42	10.523,50	11.389,38
7	I26-ND	99,4	21,6	0,92	25,27	24,35	5.869,24	6.352,16
8	I26-ND	101,4	21,4	0,65	14,27	13,62	10.577,23	11.447,53
9	I26-ND	97,4	21,5	0,56	13,56	13,00	11.376,56	12.312,62
10	I26-ND	99,6	21,6	1,29	16,46	15,17	9.402,04	10.175,64
11	I26-ND	103,6	21,5	0,83	20,86	20,03	6.941,80	7.512,98
12	I26-ND	101,3	21,5	0,9	15,42	14,52	9.793,48	10.599,29
13	I26-ND	99,8	21,6	1,89	20,95	19,06	7.468,16	8.082,64
14	I26-ND	104,0	21,5	1,23	20,20	18,97	7.301,51	7.902,27
15	I26-D	102,5	21,5	1,51	16,04	14,53	9.672,16	10.467,99
16	I26-ND	101,2	21,5	1,69	14,13	12,44	11.442,27	12.383,74
17	I26-ND	100,7	21,5	0,92	25,40	24,48	5.843,49	6.324,29
18	I26-ND	100,0	21,5	1,72	23,80	22,08	6.524,00	7.060,80
19	I26-ND	99,7	21,4	0,9	21,16	20,26	7.231,90	7.826,94
20	I26-ND	101,2	21,5	0,54	15,98	15,44	9.219,03	9.977,57
21	I26-ND	101,8	21,5	0,36	17,27	16,91	8.368,00	9.056,52
22	I26-ND	98,3	21,5	1,36	26,33	24,97	5.868,69	6.351,56
23	I26-ND	101,4	21,5	1,06	22,92	21,86	6.498,68	7.033,39
24	I26-ND	98,2	21,5	1,72	21,28	19,56	7.499,51	8.116,57
25	I26-ND	101,6	21,5	0,19	13,23	13,04	10.872,81	11.767,42
26	I26-ND	100,5	21,6	1,38	14,98	13,60	10.393,51	11.248,69
27	I26-ND	101,8	21,4	0,41	15,76	15,35	9.348,26	10.117,44
28	I26-ND	102,6	21,5	0,93	14,65	13,72	10.233,20	11.075,19
29	I26-ND	103,1	21,6	1,66	20,03	18,37	7.500,66	8.117,81
30	I26-ND	102,9	21,5	0,72	23,37	22,65	6.180,58	6.689,12
31	I26-ND	99,9	21,6	1,82	19,73	17,91	7.939,74	8.593,02
32	I26-ND	102,8	21,5	0,92	23,71	22,79	6.148,59	6.654,50
33	I26-ND	101,6	21,5	1,84	21,05	19,21	7.380,61	7.987,88
34	I26-ND	98,3	21,5	1,43	17,22	15,79	9.280,63	10.044,24
35	I26-ND	99,8	21,5	0,91	19,68	18,77	7.689,86	8.322,58
36	I26-ND	99,9	21,5	2,01	24,53	22,52	6.402,94	6.929,77
37	I26-ND	102,2	21,5	0,28	18,67	18,39	7.664,44	8.295,07
38	I26-ND	99,0	21,5	0,79	18,81	18,02	8.074,64	8.739,02

Tabela B.1 – Classificação visual e mecânica das lamelas – continuação

Lamela	Classe visual	b (mm)	h (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE_{12%} (MPa)
39	I26-ND	101,8	21,5	0,49	15,01	14,52	9.745,38	10.547,23
40	I26-D	96,4	21,5	1,19	14,85	13,66	10.939,19	11.839,27
41	I26-ND	101,8	21,3	0,43	16,98	16,55	8.793,14	9.516,64
42	I26-ND	99,4	21,5	0,76	21,96	21,20	6.835,82	7.398,28
43	I26-ND	98,2	21,4	0,73	16,38	15,65	9.505,20	10.287,29
44	I26-ND	100,2	21,6	1,39	19,86	18,47	7.675,96	8.307,54
45	I26-ND	100,3	21,5	0,8	19,19	18,39	7.809,63	8.452,21
46	I26-D	102,4	21,5	1,1	28,69	27,59	5.098,72	5.518,25
47	I26-ND	97,3	21,5	2,03	18,86	16,83	8.796,63	9.520,41
48	I26-ND	103,6	21,4	2,16	21,92	19,76	7.135,76	7.722,89
49	I26-D	101,3	21,4	0,58	14,93	14,35	10.049,07	10.875,91
50	I26-ND	97,3	21,6	1,64	20,43	18,79	7.770,12	8.409,44
51	I26-D	98,0	21,5	0,96	25,04	24,08	6.104,22	6.606,48
52	I26-ND	99,1	21,4	1,16	22,68	21,52	6.849,69	7.413,29
53	I26-ND	99,7	21,5	1,96	22,43	20,47	7.058,30	7.639,06
54	I26-ND	98,4	21,5	1,27	18,17	16,90	8.662,26	9.374,99
55	I26-ND	102,9	21,5	1,16	22,91	21,75	6.436,33	6.965,91
56	I26-ND	101,6	21,6	1,67	20,60	18,93	7.386,23	7.993,97
57	I26-ND	98,2	21,5	1,42	20,64	19,22	7.632,17	8.260,15
58	I26-ND	102,1	21,5	0,49	14,19	13,70	10.298,33	11.145,68
59	I26-ND	103,2	21,5	1,49	15,84	14,35	9.727,06	10.527,40
60	I26-ND	98,5	21,6	0,7	14,49	13,79	10.458,44	11.318,96
61	I26-ND	103,0	21,6	1,34	19,27	17,93	7.692,18	8.325,10
62	I26-ND	98,6	21,5	1,71	13,78	12,07	12.104,00	13.099,92
63	I26-ND	103,4	21,6	0,93	19,92	18,99	7.234,72	7.829,99
64	I26-ND	99,8	21,5	1,89	22,34	20,45	7.058,12	7.638,87
65	I26-ND	98,1	21,6	2,15	18,83	16,68	8.681,65	9.395,97
66	I45-ND	96,4	21,4	1,58	11,92	10,34	14.655,13	15.860,95
67	I45-ND	101,3	21,5	1,72	21,83	20,11	7.071,17	7.652,99
68	I26-ND	99,9	21,6	0,33	22,57	22,24	6.393,92	6.920,01
69	I26-ND	98,1	21,5	0,88	24,21	23,33	6.294,04	6.811,91
70	I45-ND	96,9	21,4	0,91	12,01	11,10	13.581,27	14.698,74
71	I45-ND	101,9	21,5	0,04	12,31	12,27	11.521,11	12.469,07
72	I45-ND	102,5	21,5	0,52	19,44	18,92	7.427,93	8.039,11
73	I45-ND	101,9	21,5	1,27	16,72	15,45	9.149,78	9.902,62
74	I45-ND	101,4	21,6	1,16	13,76	12,60	11.118,82	12.033,68
75	I45-ND	98,7	21,5	0,33	16,11	15,78	9.248,88	10.009,87
76	I45-ND	98,9	21,6	0,99	23,21	22,22	6.464,38	6.996,27

Tabela B.1 – Classificação visual e mecânica das lamelas – continuação

Lamela	Classe visual	b (mm)	h (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE_{12%} (MPa)
77	I45-ND	102,9	21,5	1,63	19,15	17,52	7.990,31	8.647,75
78	I45-D	98,3	21,5	0,97	16,83	15,86	9.239,67	9.999,91
79	I26-ND	103,5	21,5	1,3	23,56	22,26	6.252,41	6.766,86
80	I45-ND	102,6	21,6	0,37	17,92	17,55	7.889,38	8.538,52
81	I45-ND	102,7	21,5	1,46	21,65	20,19	6.947,14	7.518,76
82	I45-ND	102,7	21,6	0,21	17,65	17,44	7.931,41	8.584,00
83	I45-ND	98,9	21,5	0,61	16,58	15,97	9.120,36	9.870,78
84	I45-ND	101,6	21,6	1,1	19,18	18,08	7.733,48	8.369,79
85	I45-ND	98,5	21,6	1,82	24,01	22,19	6.499,41	7.034,18
86	I45-ND	97,6	21,5	0,43	10,62	10,19	14.484,02	15.675,76
87	I26-ND	101,9	21,5	1,58	22,43	20,85	6.780,05	7.337,91
88	I45-ND	99,2	21,3	1,81	22,66	20,85	7.162,62	7.751,96
89	I45-ND	98,5	21,5	0,63	16,92	16,29	8.977,51	9.716,18
90	I45-ND	99,5	21,6	1,59	25,55	23,96	5.958,78	6.449,07
91	I45-ND	101,4	21,4	1,03	16,18	15,15	9.509,04	10.291,44
92	I45-ND	98,9	21,5	0,4	16,64	16,24	8.968,73	9.706,67
93	I45-ND	98,2	21,5	1,83	14,34	12,51	11.725,85	12.690,65
94	I45-ND	97,5	21,4	1,66	17,36	15,7	9.542,96	10.328,15
95	I45-ND	99,1	21,5	0,88	19,09	18,21	7.982,33	8.639,11
96	I45-ND	99,0	21,6	1,33	18,82	17,49	8.204,31	8.879,36
97	I45-ND	99,2	21,5	0,49	21,17	20,68	7.021,84	7.599,60
98	I45-ND	97,5	21,5	1,31	13,44	12,13	12.180,01	13.182,18
99	I45-ND	99,4	21,5	1,54	21,29	19,75	7.337,69	7.941,44
100	I45-ND	103,3	21,5	1,27	23,22	21,95	6.352,99	6.875,72
101	I45-ND	101,6	21,6	0,31	18,43	18,12	7.716,41	8.351,32
102	I45-ND	100,0	21,5	1,96	20,93	18,97	7.593,57	8.218,36
103	I45-D	100,6	21,6	1,32	11,26	9,94	14.206,36	15.375,26
104	I45-ND	103,4	21,6	1,41	17,76	16,35	8.402,89	9.094,28
105	I45-ND	102,5	21,6	1,43	23,32	21,89	6.331,37	6.852,31
106	I45-ND	102,3	21,6	0,49	13,38	12,89	10.773,05	11.659,46
107	I45-ND	97,8	21,6	1,52	13,06	11,54	12.587,01	13.622,67
108	I45-ND	99,6	21,6	0,41	17,37	16,96	8.409,73	9.101,68
109	I45-ND	97,7	21,5	0,69	18,91	18,22	8.092,27	8.758,10
110	I45-ND	97,9	21,6	0,43	15,06	14,63	9.918,37	10.734,45
111	I26-ND	97,8	21,5	0,49	13,92	13,43	10.967,26	11.869,65
112	I45-ND	101,4	21,5	0,43	20,81	20,38	6.970,61	7.544,15
113	I45-D	101,6	21,6	0,87	15,89	15,02	9.309,01	10.074,96
114	I45-ND	97,0	21,5	1,38	16,13	14,75	10.068,14	10.896,55

Tabela B.1 – Classificação visual e mecânica das lamelas – continuação

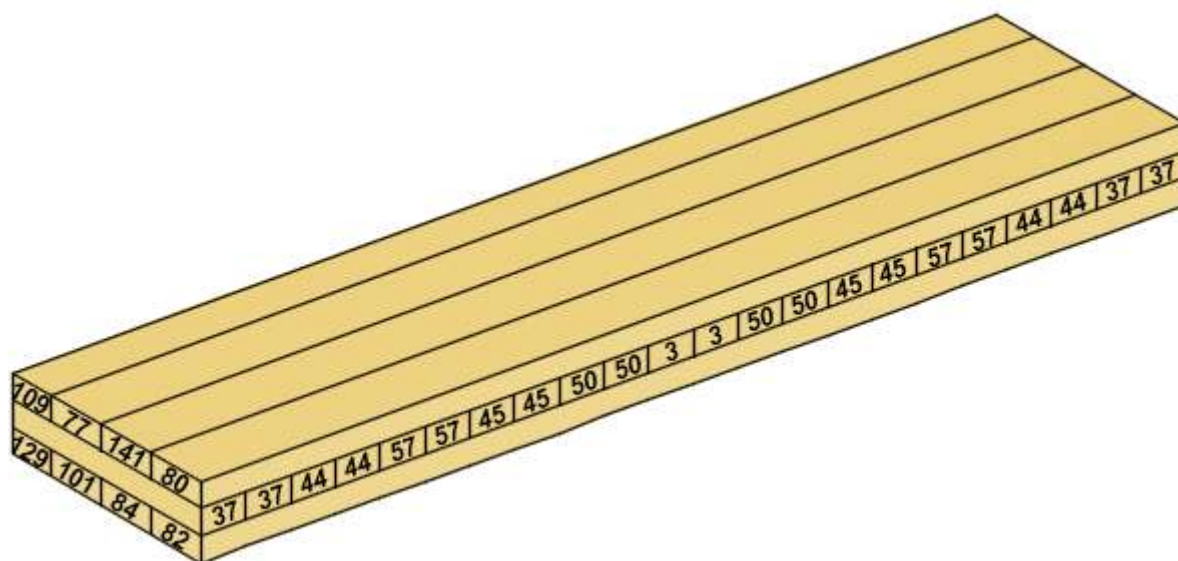
Lamela	Classe visual	b (mm)	h (mm)	Li (mm)	Lf (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE_{12%} (MPa)
115	I55-ND	103,0	21,5	1,22	18,57	17,35	8.060,77	8.724,01
116	I55-ND	101,5	21,5	0,09	13,66	13,57	10.458,45	11.318,97
117	I55-ND	102,9	21,5	1,09	14,81	13,72	10.203,37	11.042,90
118	I45-ND	102,8	21,6	0,56	17,94	17,38	7.951,05	8.605,26
119	I55-ND	102,8	21,5	0,44	25,37	24,93	5.620,79	6.083,27
120	I55-ND	102,5	21,4	1,39	28,18	26,79	5.319,74	5.757,45
121	I55-ND	97,4	21,6	1,19	21,64	20,45	7.132,06	7.718,89
122	I55-D	98,0	21,6	1,2	18,63	17,43	8.316,56	9.000,85
123	I55-ND	97,7	21,6	1,68	21,06	19,38	7.502,72	8.120,05
124	I55-ND	99,5	21,5	1,29	20,39	19,10	7.579,78	8.203,45
125	I45-ND	103,1	21,5	1,19	18,26	17,07	8.185,04	8.858,51
126	I55-ND	100,0	21,7	2,04	21,92	19,88	7.047,46	7.627,33
127	I55-ND	100,2	21,5	1,97	24,17	22,20	6.475,78	7.008,61
128	I55-ND	100,4	21,5	1,03	17,12	16,09	8.917,09	9.650,79
129	I55-ND	99,7	21,6	0,09	18,43	18,34	7.769,14	8.408,38
130	I55-ND	102,4	21,6	0,56	14,26	13,70	10.126,20	10.959,39
131	I55-D	102,1	21,6	0,01	12,06	12,05	11.546,61	12.496,66
132	I55-ND	103,9	21,5	0,79	21,46	20,67	6.707,44	7.259,33
133	I55-ND	97,1	21,5	1,78	14,24	12,46	11.906,27	12.885,92
134	I55-ND	97,7	21,7	1,05	15,61	14,56	9.849,03	10.659,40
135	I55-ND	99,4	21,6	0,05	17,72	17,67	8.088,06	8.753,54
136	I55-ND	97,3	21,5	0,73	17,22	16,49	8.978,00	9.716,71
137	I55-ND	99,7	21,6	1,28	18,64	17,36	8.207,72	8.883,05
138	I55-ND	100,7	21,6	2,03	17,63	15,60	9.043,01	9.787,07
139	I45-D	98,0	21,6	1,62	16,24	14,62	9.915,02	10.730,83
140	I55-ND	99,4	21,5	1,08	16,38	15,30	9.471,86	10.251,20
141	I55-ND	103,5	21,7	1,79	19,06	17,27	7.838,20	8.483,13
142	I55-ND	97,8	21,6	1,38	29,76	28,38	5.118,18	5.539,31
143	I45-ND	97,3	21,5	1,81	15,02	13,21	11.207,21	12.129,34
144	I55-ND	96,6	21,5	0,79	24,28	23,49	6.348,23	6.870,57
145	I55-ND	102,1	21,5	0,02	21,79	21,77	6.480,80	7.014,05
146	I26-D	103,0	21,6	0,04	13,95	13,91	9.915,23	10.731,06
147	I45-ND	101,5	21,5	0,26	10,19	9,93	14.292,16	15.468,12
148	I45-ND	103,4	21,5	1,49	18,18	16,69	8.347,11	9.033,91
149	I55-ND	98,8	21,5	1,14	18,96	17,82	8.181,79	8.854,99
150	I26-D	97,6	21,6	0,14	23,92	23,78	6.120,76	6.624,38
151	I55-ND	98,9	21,6	1,81	19,72	17,91	8.020,02	8.679,90
152	I45-ND	100,5	21,6	1,19	22,74	21,55	6.559,25	7.098,94

Tabela B.1 – Classificação visual e mecânica das lamelas – continuação

Lamela	Classe visual	b (mm)	h (mm)	L_i (mm)	L_f (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE_{12%} (MPa)
153	I55-ND	98,0	21,6	1,26	12,34	11,08	13.082,82	14.159,27
154	I55-ND	102,4	21,6	1,56	21,98	20,42	6.793,78	7.352,77
155	I55-ND	96,6	21,6	1,33	13,02	11,69	12.579,85	13.614,92
156	I55-ND	102,1	21,5	0,84	14,16	13,32	10.592,13	11.463,65
Média							8.570,02	9.275,17
Desvio-padrão							2.009,00	2.174,31
Coeficiente de variação (%)							23,44	23,44
Valor máximo							14.655,13	15.860,95
Valor mínimo							5.098,72	5.518,25

APÊNDICE C – Composição dos painéis testados à flexão

PAINEL P1

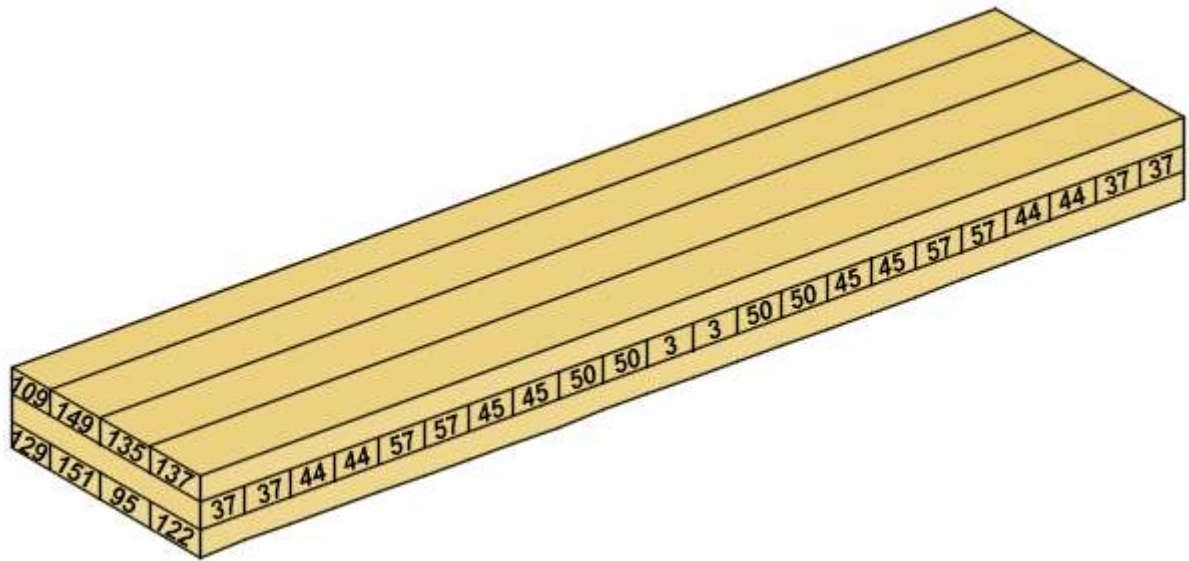


Obs: lâminas 109 e 129 com metade da largura.

Tabela C.1 – Composição do painel P1

Lâmina	Classe visual	MOE_{12%} (MPa)
Camada superior		
80	I45-ND	8.538,52
141	I55-ND	8.483,13
77	I45-ND	8.647,75
109	I45-ND	8.758,10
Média:		8.585,27
Camada intermediária		
37	I26-ND	8.295,07
44	I26-ND	8.307,54
57	I26-ND	8.260,15
45	I26-ND	8.452,21
50	I26-ND	8.409,44
3	I26-ND	8.529,41
Média:		8.361,66
Camada inferior		
82	I45-ND	8.584,00
84	I45-ND	8.369,79
101	I45-ND	8.351,32
129	I55-ND	8.408,38
Média:		8.431,23

PAINEL P2

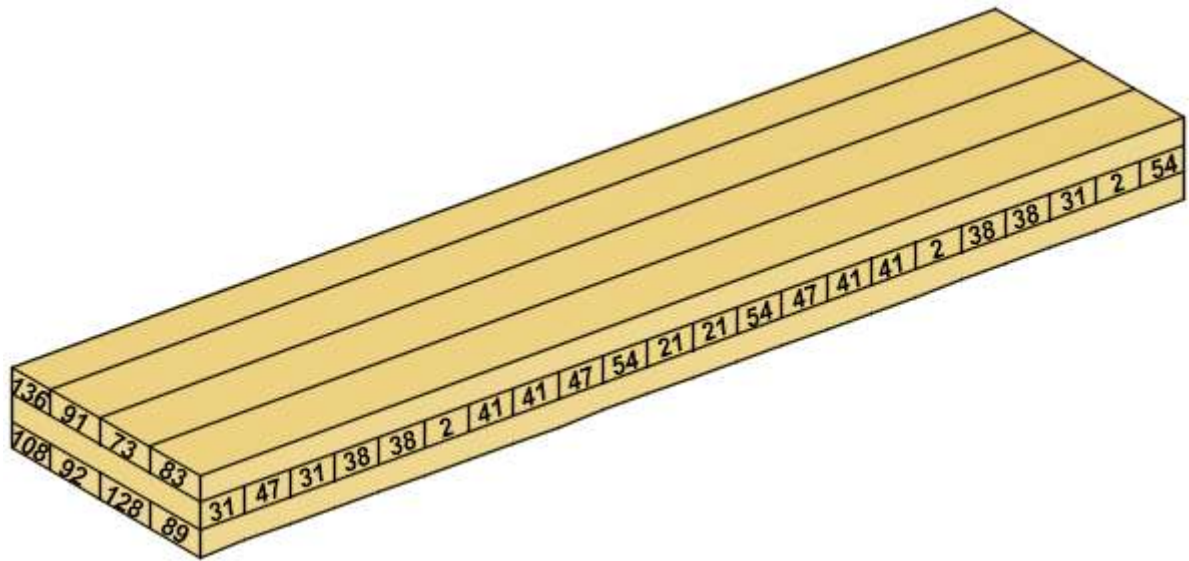


Obs: lamelas 109 e 129 com metade da largura.

Tabela C.2 – Composição do painel P2

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
137	I55-ND	8.883,05
135	I55-ND	8.753,54
149	I55-ND	8.854,99
109	I45-ND	8.758,10
Média:		8.820,18
Camada intermediária		
37	I26-ND	8.295,07
44	I26-ND	8.307,54
57	I26-ND	8.260,15
45	I26-ND	8.452,21
50	I26-ND	8.409,44
3	I26-ND	8.529,41
Média:		8.361,66
Camada inferior		
122	I55-D	9.000,85
95	I45-ND	8.639,11
151	I55-ND	8.679,90
129	I55-ND	8.408,38
Média:		8.721,16

PAINEL P3

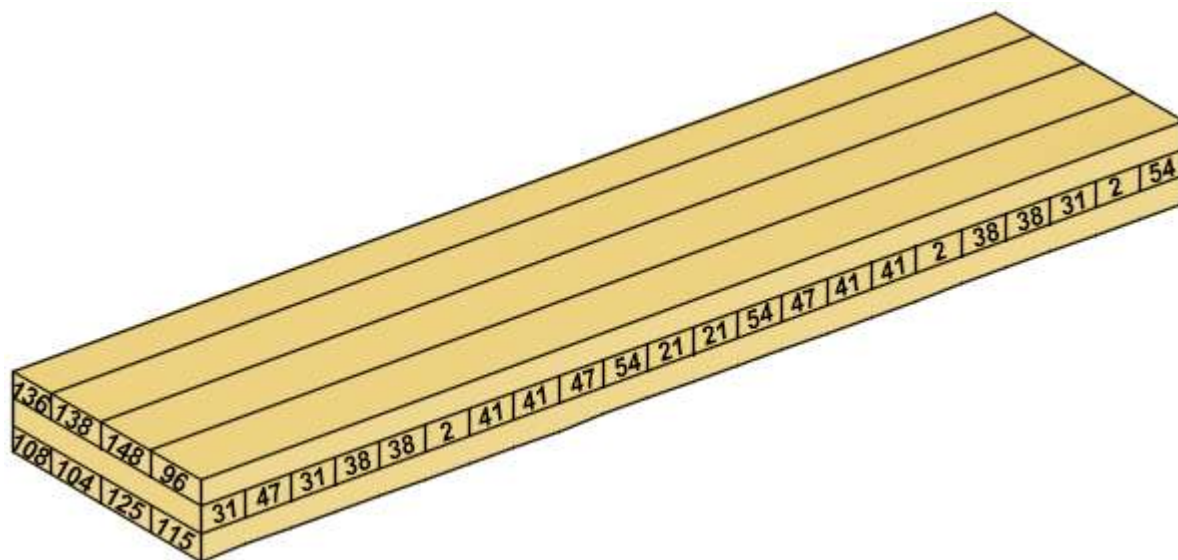


Obs: lamelas 136 e 108 com metade da largura.

Tabela C.3 – Composição do painel P3

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
83	I45-ND	9.870,78
73	I45-ND	9.902,62
91	I45-ND	10.291,44
136	I55-ND	9.716,71
Média:		9.978,06
Camada intermediária		
54	I26-ND	9.374,99
2	I26-D	8.946,88
31	I26-ND	8.593,02
38	I26-ND	8.739,02
41	I26-ND	9.516,64
47	I26-ND	9.520,41
21	I26-ND	9.056,52
Média:		9.110,98
Camada inferior		
89	I45-ND	9.716,18
128	I55-ND	9.650,79
92	I45-ND	9.706,67
108	I45-ND	9.101,68
Média:		9.606,99

PAINEL P4

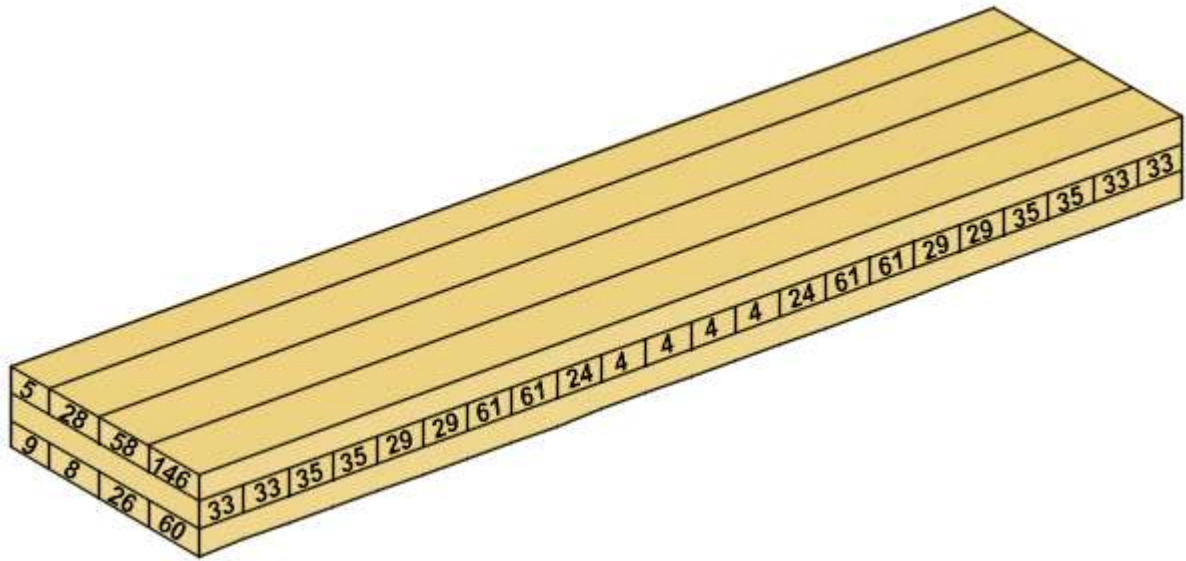


Obs: lamelas 136 e 108 com metade da largura.

Tabela C.4 – Composição do painel P4

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
96	I45-ND	8.879,36
148	I45-ND	9.033,91
138	I55-ND	9.787,07
136	I55-ND	9.716,71
Média:		9.302,48
Camada intermediária		
54	I26-ND	9.374,99
2	I26-D	8.946,88
31	I26-ND	8.593,02
38	I26-ND	8.739,02
41	I26-ND	9.516,64
47	I26-ND	9.520,41
21	I26-ND	9.056,52
Média:		9.110,98
Camada inferior		
115	I55-ND	8.724,01
125	I45-ND	8.858,51
104	I45-ND	9.094,28
108	I45-ND	9.101,68
Média:		8.922,18

PAINEL P5

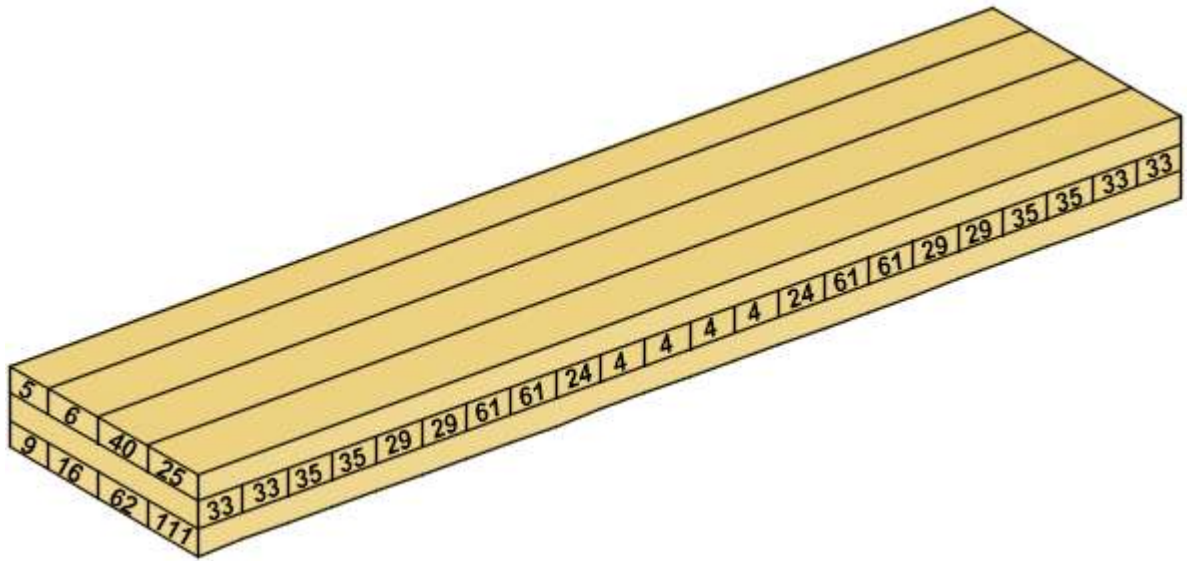


Obs: lâminas 5 e 9 com metade da largura.

Tabela C.5 – Composição do painel P5

Lâmina	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
146	I26-D	10.731,06
58	I26-ND	11.145,68
28	I26-ND	11.075,19
5	I26-ND	11.363,73
Média:		11.038,23
Camada intermediária		
33	I26-ND	7.987,88
35	I26-ND	8.322,58
29	I26-ND	8.117,81
61	I26-ND	8.325,10
24	I26-ND	8.116,57
4	I26-ND	8.270,57
Média:		8.196,77
Camada inferior		
60	I26-ND	11.318,96
26	I26-ND	11.248,69
8	I26-ND	11.447,53
9	I26-ND	12.312,62
Média:		11.477,57

PAINEL P6

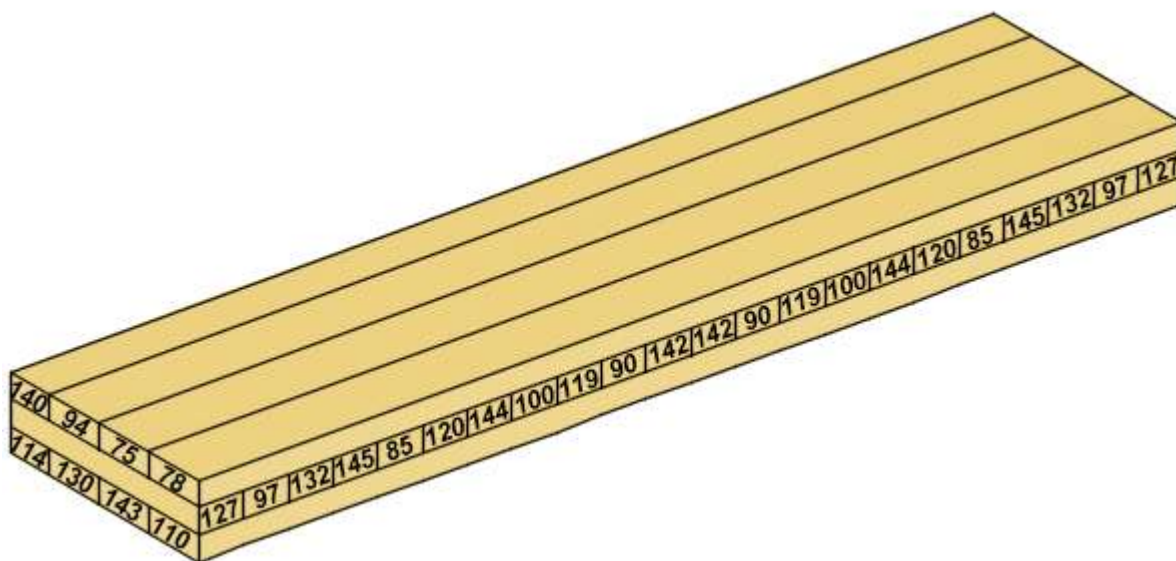


Obs: lâminas 5 e 9 com metade da largura.

Tabela C.6 – Composição do painel P6

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
25	I26-ND	11.767,42
40	I26-D	11.839,27
6	I26-ND	11.389,38
5	I26-ND	11.363,73
Média:		11.622,27
Camada intermediária		
33	I26-ND	7.987,88
35	I26-ND	8.322,58
29	I26-ND	8.117,81
61	I26-ND	8.325,10
24	I26-ND	8.116,57
4	I26-ND	8.270,57
Média:		8.196,77
Camada inferior		
111	I26-ND	11.869,65
62	I26-ND	13.099,92
16	I26-ND	12.383,74
9	I26-ND	12.312,62
Média:		12.431,32

PAINEL P7

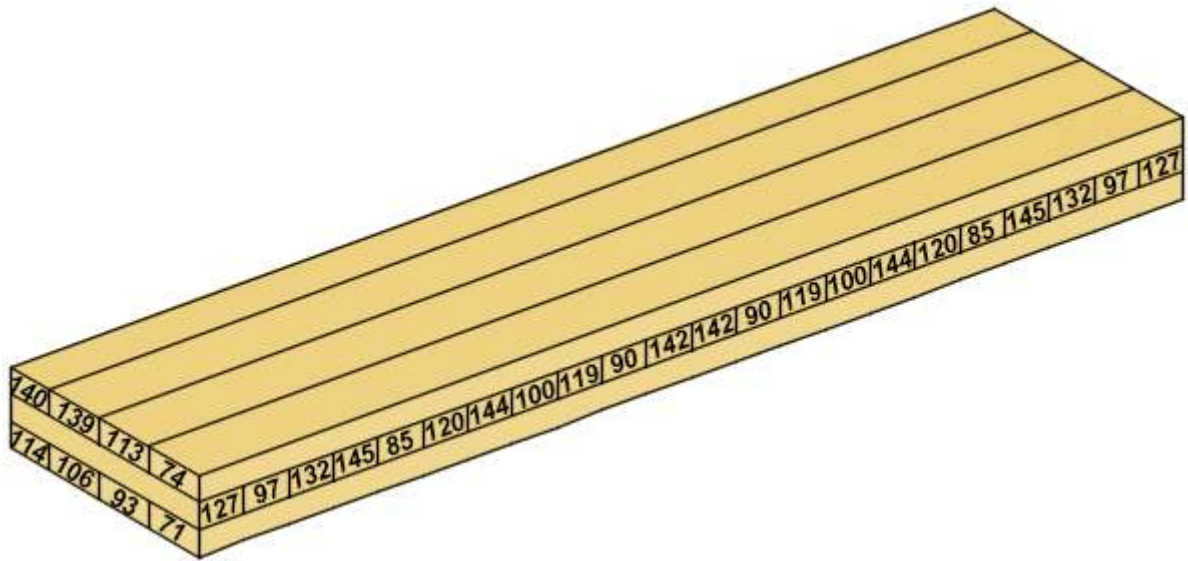


Obs: lamelas 140 e 114 com metade da largura.

Tabela C.7 – Composição do painel P7

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
78	I45-D	9.999,91
75	I45-ND	10.009,87
94	I45-ND	10.328,15
140	I55-ND	10.251,20
Média:		10.132,44
Camada intermediária		
127	I55-ND	7.008,61
97	I45-ND	7.599,60
132	I55-ND	7.259,33
145	I55-ND	7.014,05
85	I45-ND	7.034,18
120	I55-ND	5.757,45
144	I55-ND	6.870,57
100	I45-ND	6.875,72
119	I55-ND	6.083,27
90	I45-ND	6.449,07
142	I55-ND	5.539,31
Média:		6.681,01
Camada inferior		
110	I45-ND	10.734,45
143	I45-ND	12.129,34
130	I55-ND	10.959,39
114	I45-ND	10.896,55
Média:		11.220,42

PAINEL P8

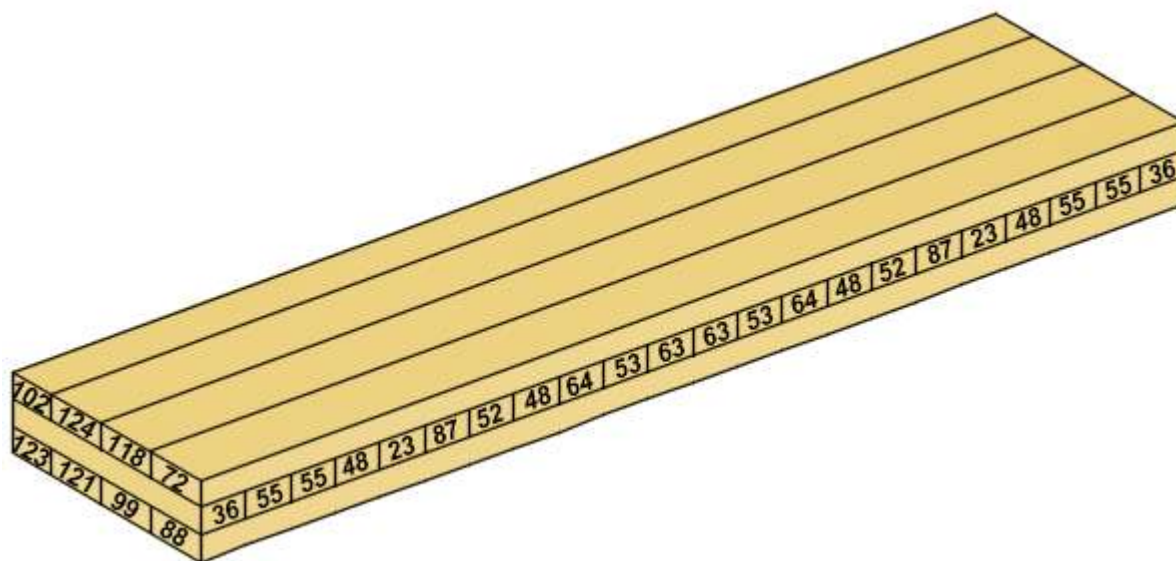


Obs: lâminas 140 e 114 com metade da largura.

Tabela C.8 – Composição do painel P8

Lâmina	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
74	I45-ND	12.033,68
113	I45-D	10.074,96
139	I45-D	10.730,83
140	I55-ND	10.251,20
Média:		10.847,16
Camada intermediária		
127	I55-ND	7.008,61
97	I45-ND	7.599,60
132	I55-ND	7.259,33
145	I55-ND	7.014,05
85	I45-ND	7.034,18
120	I55-ND	5.757,45
144	I55-ND	6.870,57
100	I45-ND	6.875,72
119	I55-ND	6.083,27
90	I45-ND	6.449,07
142	I55-ND	5.539,31
Média:		6.681,01
Camada inferior		
71	I45-ND	12.469,07
93	I45-ND	12.690,65
106	I45-ND	11.659,46
114	I45-ND	10.896,55
Média:		12.076,42

PAINEL P9

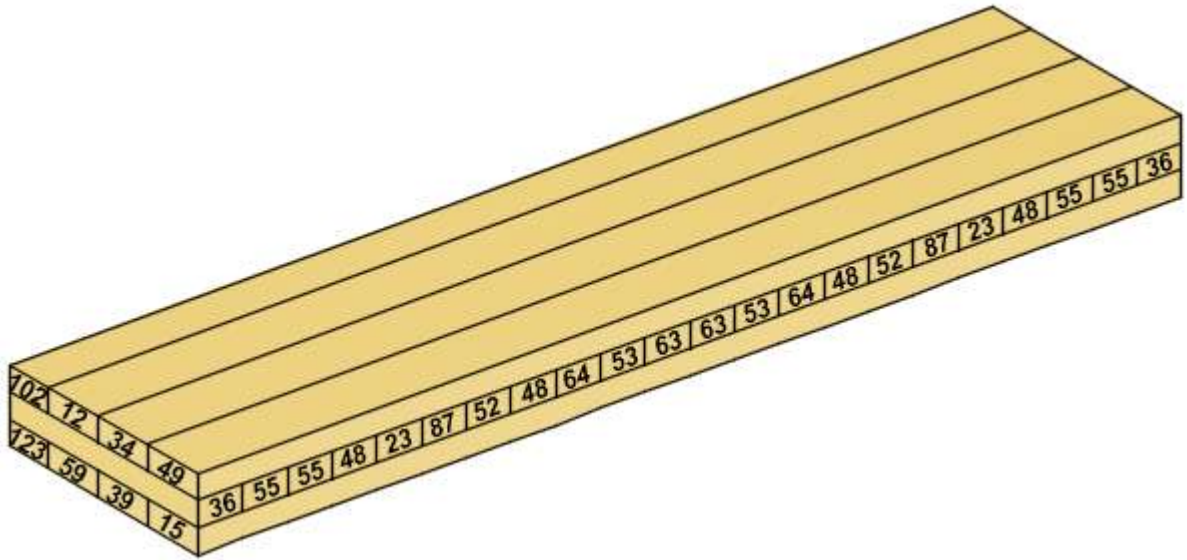


Obs: lamelas 102 e 123 com metade da largura.

Tabela C.9 – Composição do painel P9

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
72	I45-ND	8.039,11
118	I45-ND	8.605,26
124	I55-ND	8.203,45
102	I45-ND	8.218,36
Média:		8.273,43
Camada intermediária		
36	I26-ND	6.929,77
55	I26-ND	6.965,91
48	I26-ND	7.722,89
23	I26-ND	7.033,39
87	I26-ND	7.337,91
52	I26-ND	7.413,29
64	I26-ND	7.638,87
53	I26-ND	7.639,06
63	I26-ND	7.829,99
Média:		7.381,81
Camada inferior		
88	I45-ND	7.751,96
99	I45-ND	7.941,44
121	I55-ND	7.718,89
123	I55-ND	8.120,05
Média:		7.849,23

PAINEL 10

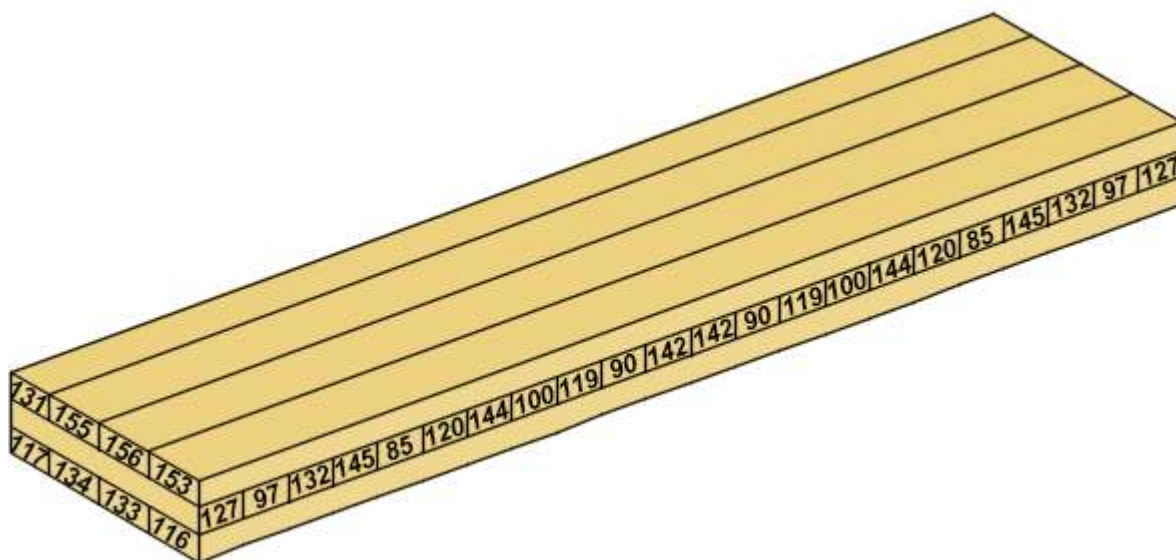


Obs: lâminas 102 e 123 com metade da largura.

Tabela C.10 – Composição do painel P10

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
49	I26-D	10.875,91
34	I26-ND	10.044,24
12	I26-ND	10.599,29
102	I45-ND	8.218,36
Média:		10.179,61
Camada intermediária		
36	I26-ND	6.929,77
55	I26-ND	6.965,91
48	I26-ND	7.722,89
23	I26-ND	7.033,39
87	I26-ND	7.337,91
52	I26-ND	7.413,29
64	I26-ND	7.638,87
53	I26-ND	7.639,06
63	I26-ND	7.829,99
Média:		7381,81
Camada inferior		
15	I26-D	10.467,99
39	I26-ND	10.547,23
59	I26-ND	10.527,40
123	I55-ND	8.120,05
Média:		10.172,18

PAINEL P11

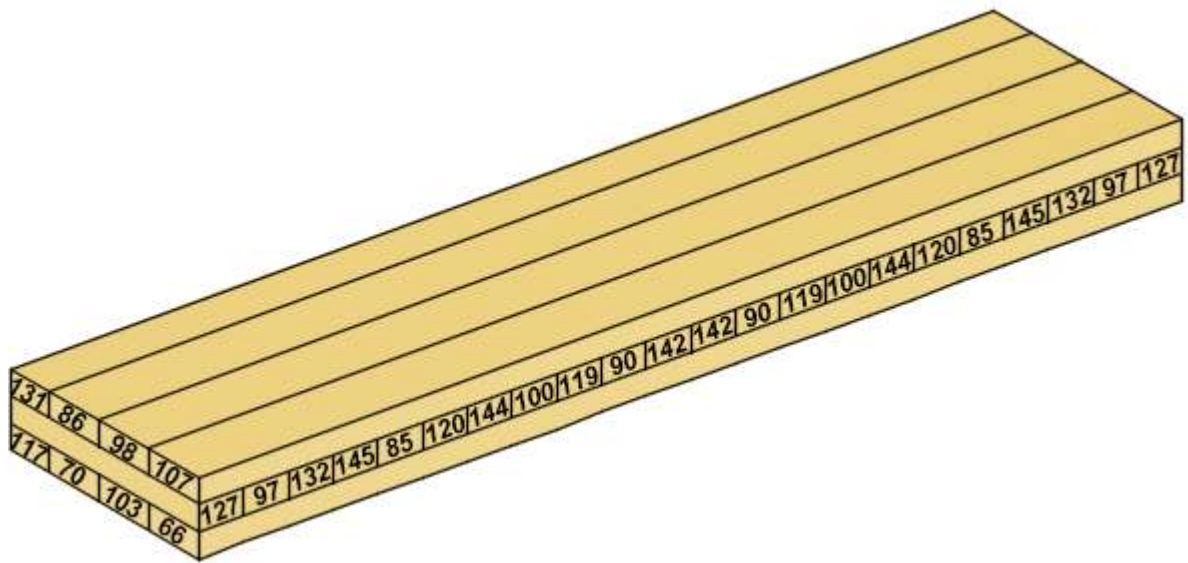


Obs: lamelas 131 e 117 com metade da largura.

Tabela C.11 – Composição do painel P11

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
153	I55-ND	14.159,27
156	I55-ND	11.463,65
155	I55-ND	13.614,92
131	I55-D	12.496,66
Média:		12.996,05
Camada intermediária		
127	I55-ND	7.008,61
97	I45-ND	7.599,60
132	I55-ND	7.259,33
145	I55-ND	7.014,05
85	I45-ND	7.034,18
120	I55-ND	5.757,45
144	I55-ND	6.870,57
100	I45-ND	6.875,72
119	I55-ND	6.083,27
90	I45-ND	6.449,07
142	I55-ND	5.539,31
Média:		6.681,01
Camada inferior		
116	I55-ND	11.318,97
133	I55-ND	12.885,92
134	I55-ND	10.659,40
117	I55-ND	11.042,90
Média:		11.538,78

PAINEL P12



Obs: lâminas 131 e 117 com metade da largura.

Tabela C.12 – Composição do painel P12

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
107	I45-ND	13.622,67
98	I45-ND	13.182,18
86	I45-ND	15.675,76
131	I55-D	12.496,66
Média:		13.922,55
Camada intermediária		
127	I55-ND	7.008,61
97	I45-ND	7.599,60
132	I55-ND	7.259,33
145	I55-ND	7.014,05
85	I45-ND	7.034,18
120	I55-ND	5.757,45
144	I55-ND	6.870,57
100	I45-ND	6.875,72
119	I55-ND	6.083,27
90	I45-ND	6.449,07
142	I55-ND	5.539,31
Média:		6.681,01
Camada inferior		
66	I45-ND	15.860,95
103	I45-D	15.375,26
70	I45-ND	14.698,74
117	I55-ND	11.042,90
Média:		14.701,83

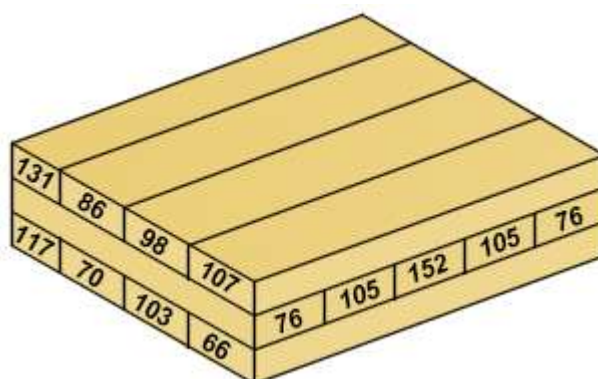
APÊNDICE D – Propriedades mecânicas dos painéis testados à flexão

Tabela D.1 – Propriedades mecânicas dos painéis testados à flexão

Painel	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	MOR (MPa)	MOE₁ (MPa)	MOE₂ (MPa)	MOE₃ (MPa)
P1	343	65,4	1.912,95	2,54	-	-	-
P2	348	65,6	2.206,45	2,87	5.909,47	6.988,59	6.011,70
P3	344	65,5	2.661,94	3,52	5.868,95	5.681,82	5.970,16
P4	349	65,7	3.168,02	4,10	-	-	-
P5	343	65,3	13.198,48	17,60	9.160,03	10.919,45	9.317,03
P6	342	65,3	10.536,45	14,09	-	-	-
P7	333	65,4	7.307,73	10,01	8.738,34	8.189,55	8.888,57
P8	342	65,3	9.058,78	12,11	8.891,26	10.951,37	9.043,65
P9	344	65,3	25.664,90	34,12	7.113,61	7.964,15	7.235,53
P10	340	65,3	24.016,30	32,30	8.488,42	8.133,16	8.633,90
P11	346	65,3	20.517,20	27,12	10.308,49	12.216,52	10.485,17
P12	340	65,3	21.012,30	28,26	11.787,81	13.185,57	11.989,84
Média				15,72	8.474,04	9.358,91	8.619,50
Desvio-padrão				11,46	1.834,10	2.397,57	1.865,29
Coeficiente de variação				72,88	21,64	25,62	21,64
Valor característico				11,00	-	-	-
Valor máximo				34,12	11.787,81	13.185,57	11.989,84
Valor mínimo				2,54	5.868,95	5.681,82	5.970,16
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:							
Média				17,66	9.171,29	10.128,96	9.328,72
Valor característico				12,36	-	-	-
Valor máximo				38,33	12.757,71	14.270,48	12.976,36
Valor mínimo				2,86	6.351,85	6.149,32	6.461,39

APÊNDICE E – Composição dos painéis testados ao cisalhamento

PAINEL P1

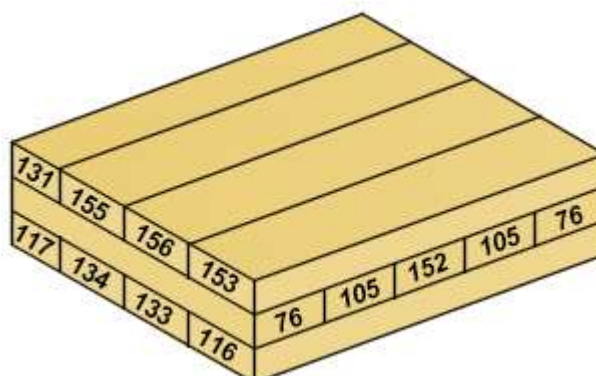


Obs: lamelas 131 e 117 com metade da largura.

Tabela E.1 – Composição do painel P1

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
107	I45-ND	13.622,67
98	I45-ND	13.182,18
86	I45-ND	15.675,76
131	I55-D	12.496,66
Média:		13.922,55
Camada intermediária		
76	I45-ND	6.996,27
105	I45-ND	6.852,31
152	I45-ND	7.098,94
Média:		6.959,22
Camada inferior		
66	I45-ND	15.860,95
103	I45-D	15.375,26
70	I45-ND	14.698,74
117	I55-ND	11.042,90
Média:		14.701,83

PAINEL P2

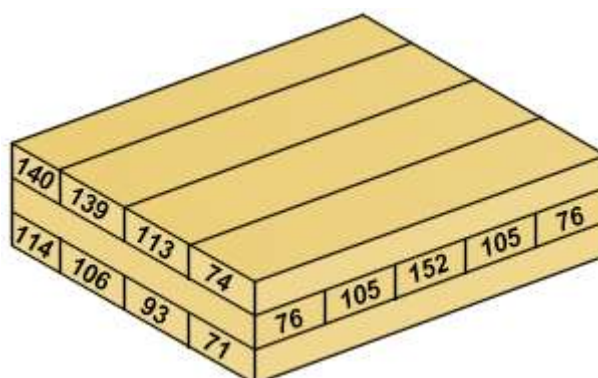


Obs: lamelas 131 e 117 com metade da largura.

Tabela E.2 – Composição dos painel P2

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
153	I55-ND	14.159,27
156	I55-ND	11.463,65
155	I55-ND	13.614,92
131	I55-D	12.496,66
Média:		12.996,05
Camada intermediária		
76	I45-ND	6.996,27
105	I45-ND	6.852,31
152	I45-ND	7.098,94
Média:		6.959,22
Camada inferior		
116	I55-ND	11.318,97
133	I55-ND	12.885,92
134	I55-ND	10.659,40
117	I55-ND	11.042,90
Média:		11.538,78

PAINEL P3

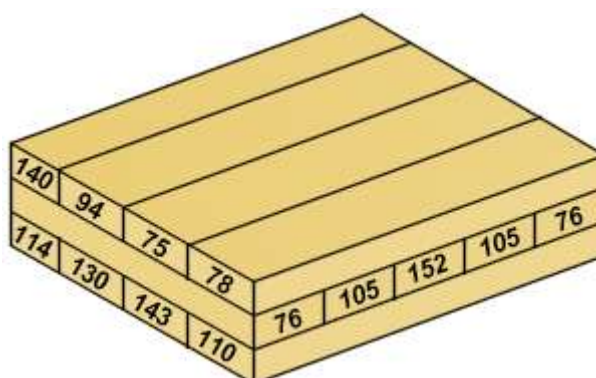


Obs: lamelas 140 e 114 com metade da largura.

Tabela E.3 – Composição do painel P3

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
74	I45-ND	12.033,68
113	I45-D	10.074,96
139	I45-D	10.730,83
140	I55-ND	10.251,20
Média:		10.847,16
Camada intermediária		
76	I45-ND	6.996,27
105	I45-ND	6.852,31
152	I45-ND	7.098,94
Média:		6.959,22
Camada inferior		
71	I45-ND	12.469,07
93	I45-ND	12.690,65
106	I45-ND	11.659,46
114	I45-ND	10.896,55
Média:		12.076,42

PAINEL P4

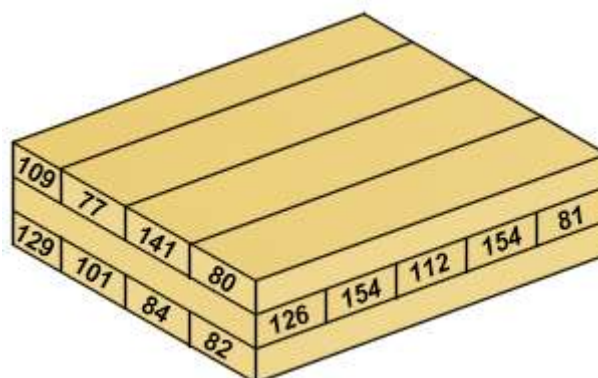


Obs: lamelas 140 e 114 com metade da largura.

Tabela E.4 – Composição do painel P4

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
78	I45-D	9.999,91
75	I45-ND	10.009,87
94	I45-ND	10.328,15
140	I55-ND	10.251,20
Média:		10.132,44
Camada intermediária		
76	I45-ND	6.996,27
105	I45-ND	6.852,31
152	I45-ND	7.098,94
Média:		6.959,22
Camada inferior		
110	I45-ND	10.734,45
143	I45-ND	12.129,34
130	I55-ND	10.959,39
114	I45-ND	10.896,55
Média:		11.220,42

PAINEL P5

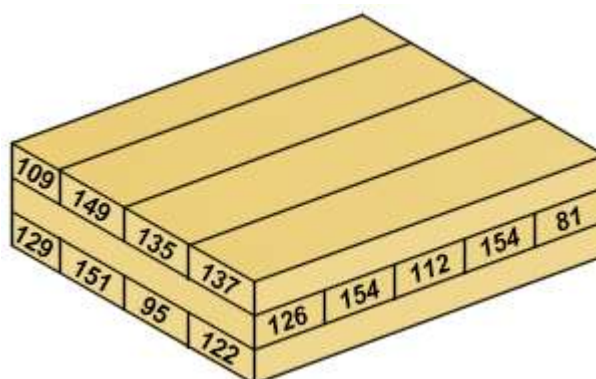


Obs: lamelas 109 e 129 com metade da largura.

Tabela E.5 – Composição do painel P5

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
80	I45-ND	8.538,52
141	I55-ND	8.483,13
77	I45-ND	8.647,75
109	I45-ND	8.758,10
Média:		8.585,27
Camada intermediária		
81	I45-ND	7.518,76
154	I55-ND	7.352,77
112	I45-ND	7.544,15
126	I55-ND	7.627,33
Média:		7.479,16
Camada inferior		
82	I45-ND	8.584,00
84	I45-ND	8.369,79
101	I45-ND	8.351,32
129	I55-ND	8.408,38
Média:		8.431,23

PAINEL P6

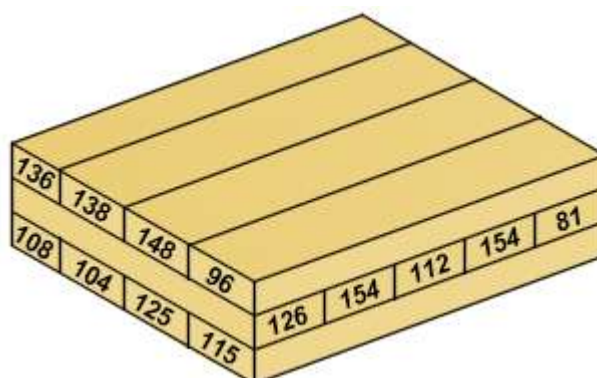


Obs: lamelas 109 e 129 com metade da largura.

Tabela E.6 – Composição do painel P6

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
137	I55-ND	8.883,05
135	I55-ND	8.753,54
149	I55-ND	8.854,99
109	I45-ND	8.758,10
Média:		8.820,18
Camada intermediária		
81	I45-ND	7.518,76
154	I55-ND	7.352,77
112	I45-ND	7.544,15
126	I55-ND	7.627,33
Média:		7.479,16
Camada inferior		
122	I55-D	9.000,85
95	I45-ND	8.639,11
151	I55-ND	8.679,90
129	I55-ND	8.408,38
Média:		8.721,16

PAINEL P7

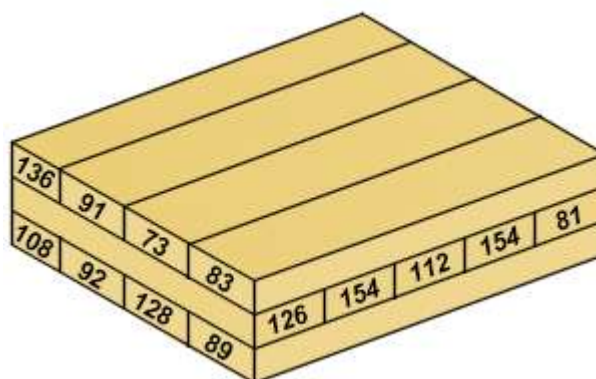


Obs: lamelas 136 e 108 com metade da largura.

Tabela E.7 – Composição do painel P7

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
96	I45-ND	8.879,36
148	I45-ND	9.033,91
138	I55-ND	9.787,07
136	I55-ND	9.716,71
Média:		9.302,48
Camada intermediária		
81	I45-ND	7.518,76
154	I55-ND	7.352,77
112	I45-ND	7.544,15
126	I55-ND	7.627,33
Média:		7.479,16
Camada inferior		
115	I55-ND	8.724,01
125	I45-ND	8.858,51
104	I45-ND	9.094,28
108	I45-ND	9.101,68
Média:		8.922,18

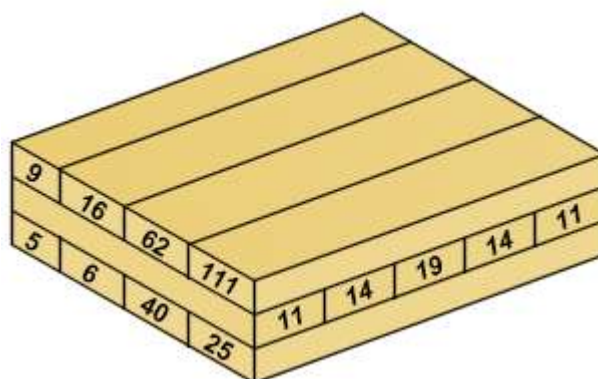
PAINEL P8



Obs: lamelas 136 e 108 com metade da largura.

Tabela E.8 – Composição do painel P8

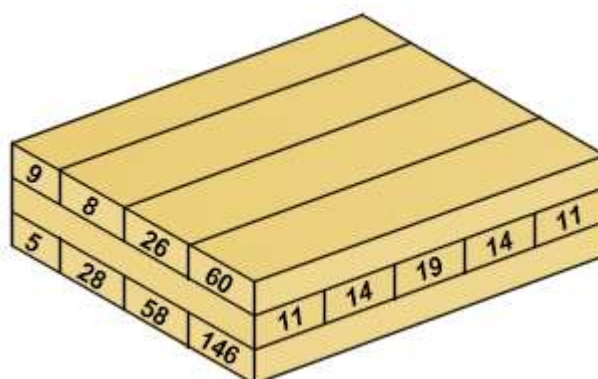
Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
83	I45-ND	9.870,78
73	I45-ND	9.902,62
91	I45-ND	10.291,44
136	I55-ND	9.716,71
Média:		9.978,06
Camada intermediária		
81	I45-ND	7.518,76
154	I55-ND	7.352,77
112	I45-ND	7.544,15
126	I55-ND	7.627,33
Média:		7.479,16
Camada inferior		
89	I45-ND	9.716,18
128	I55-ND	9.650,79
92	I45-ND	9.706,67
108	I45-ND	9.101,68
Média:		9.606,99

PAINEL P9

Obs: lâminas 9 e 5 com metade da largura.

Tabela E.9 – Composição do painel P9

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
111	I26-ND	11.869,65
62	I26-ND	13.099,92
16	I26-ND	12.383,74
9	I26-ND	12.312,62
Média:		12.431,32
Camada intermediária		
11	I26-ND	7.512,98
14	I26-ND	7.902,27
19	I26-ND	7.826,94
Média:		7.731,49
Camada inferior		
25	I26-ND	11.767,42
40	I26-D	11.839,27
6	I26-ND	11.389,38
5	I26-ND	11.363,73
Média:		11.622,27

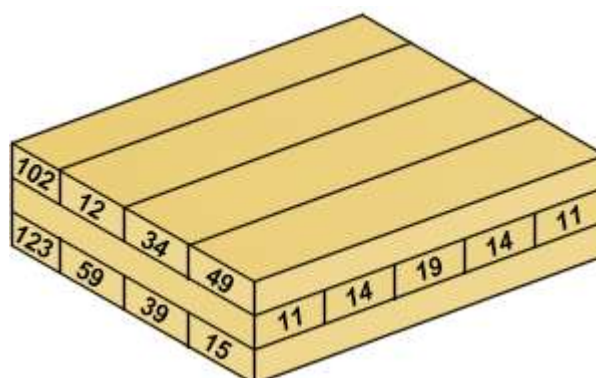
PAINEL P10

Obs: lamelas 9 e 5 com metade da largura.

Tabela E.10 – Composição do painel P10

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
60	I26-ND	11.318,96
26	I26-ND	11.248,69
8	I26-ND	11.447,53
9	I26-ND	12.312,62
Média:		11.477,57
Camada intermediária		
11	I26-ND	7.512,98
14	I26-ND	7.902,27
19	I26-ND	7.826,94
Média:		7.731,49
Camada inferior		
146	I26-D	10.731,06
58	I26-ND	11.145,68
28	I26-ND	11.075,19
5	I26-ND	11.363,73
Média:		11.038,23

PAINEL P11

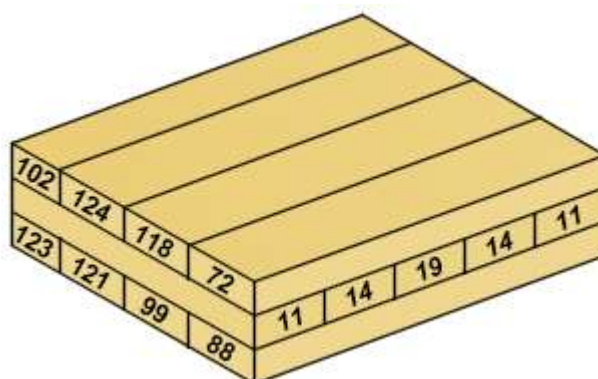


Obs: lamelas 102 e 123 com metade da largura.

Tabela E.11 – Composição do painel P11

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
49	I26-D	10.875,91
34	I26-ND	10.044,24
12	I26-ND	10.599,29
102	I45-ND	8.218,36
Média:		10.179,61
Camada intermediária		
11	I26-ND	7.512,98
14	I26-ND	7.902,27
19	I26-ND	7.826,94
Média:		7.731,49
Camada inferior		
15	I26-D	10.467,99
39	I26-ND	10.547,23
59	I26-ND	10.527,40
123	I55-ND	8.120,05
Média:		10.172,18

PAINEL P12



Obs: lamelas 102 e 123 com metade da largura.

Tabela E.12 – Composição do painel P12

Lamela	Classe visual	MOE _{12%} (MPa)
Camada superior		
72	I45-ND	8.039,11
118	I45-ND	8.605,26
124	I55-ND	8.203,45
102	I45-ND	8.218,36
Média:		8.273,43
Camada intermediária		
11	I26-ND	7.512,98
14	I26-ND	7.902,27
19	I26-ND	7.826,94
Média:		7.731,49
Camada inferior		
88	I45-ND	7.751,96
99	I45-ND	7.941,44
121	I55-ND	7.718,89
123	I55-ND	8.120,05
Média:		7.849,23

**APÊNDICE F – Propriedades mecânicas dos painéis testados ao
cisalhamento**

Tabela F.1 – Propriedades mecânicas dos painéis testados ao cisalhamento

Painel	b (mm)	h (mm)	Força de ruptura (N)	MOR (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)
1	343	65,4	102.429,7	25,13	3,42
2	345	65,2	99.970,1	24,54	3,33
3	347	65,5	94.372,9	22,82	3,11
4	341	65,1	84.231,2	20,98	2,85
5	351	65,3	47.682,5	11,47	1,56
6	345	65,4	63.826,3	15,57	2,12
7	351	65,6	81.103,7	19,33	2,64
8	340	65,2	85.759,5	21,36	2,90
9	349	65,2	95.547,0	23,18	3,15
10	350	65,3	107.085,5	25,83	3,51
11	349	65,3	66.002,3	15,97	2,17
12	348	65,2	89.059,2	21,67	2,94
Média				20,66	2,81
Desvio-padrão				4,17	0,57
Coeficiente de variação (%)				20,19	20,16
Valor característico				14,46	1,97
Valor máximo				25,83	3,51
Valor mínimo				11,47	1,56
Valores corrigidos para o teor de umidade de 12%:					
Média				23,20	3,16
Valor característico				16,24	2,21
Valor máximo				29,02	3,95
Valor mínimo				12,88	1,75