

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

BRUNA BERNARDI MAIA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DE PINOS METÁLICOS
EM PAINÉIS DE *CROSS LAMINATED TIMBER* CONFECCIONADOS EM PINUS**

Maringá

2019

BRUNA BERNARDI MAIA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DE PINOS METÁLICOS
EM PAINÉIS DE *CROSS LAMINATED TIMBER* CONFECCIONADOS EM PINUS**

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.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas
Orientador: Prof. Dr. José Luiz Miotto
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

Maringá

2019

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

M217a Maia, Bruna Bernardi
Avaliação da resistência ao embutimentos de pinos metálicos em painéis *Cross Laminated Timber* confeccionados em pinus. -- Bruna Bernardi Maia -- Maringá, 2019.
194 f. : il., color., figs., tabs.

Orientador(a): Prof. Dr. José Luiz Miotto.
Co-orientador(a): Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil - Área de Concentração: Engenharia de Estruturas, 2019.

1. Madeira laminada colada cruzada. 2. Ligações com pinos metálicos. 3. Avaliação experimental. 4. Resistência ao embutimento. 5. Efluentes. I. Miotto, José Luiz, orient. II. Góes, Jorge Luís Nunes de, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil - Área de Concentração: Engenharia de Estruturas. IV. Título.

CDD 21.ed. 624.184

AHS-CRB-9/1065

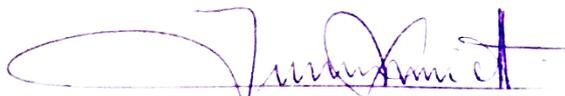
BRUNA BERNARDI MAIA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DE PINOS METÁLICOS
EM PAINÉIS DE *CROSS LAMINATED TIMBER* CONFECCIONADOS EM PINUS**

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Maringá, como requisito parcial para
a obtenção do título de mestre.

Aprovada em: 26/03/2019

BANCA EXAMINADORA



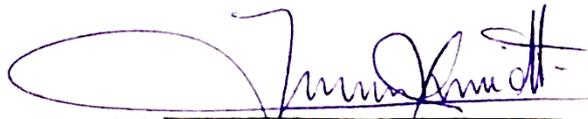
Prof. Dr. José Luiz Miotto
Universidade Estadual de Maringá



Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
Universidade Estadual de Maringá



PI Prof. Dr. Antonio Alves Dias
Escola de Engenharia de São Carlos

Aos meus pais, Luiz e Sandra.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos dons concedidos, por me dar força, coragem e perseverança, por não me deixar desanimar, nem mesmo nos dias em que tudo pareceu sair errado. Obrigada, Pai, por cuidar de cada detalhe em minha vida!

Ao Professor Dr. José Luiz Miotto, pela orientação, apoio, confiança e amizade. Obrigada por compartilhar comigo seus conhecimentos.

Ao Professor Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, pela orientação, apoio e auxílio nesta pesquisa. Obrigada pela amizade, pelos ensinamentos transmitidos, por ser exemplo para mim.

Ao técnico do laboratório de estruturas da UTFPR-CM, Eng. Maiko Cristian Sedoski, pela amizade e pelo auxílio na realização dos ensaios.

À minha família, pai, mãe, Gabi e Dionisio, por toda paciência, amparo, apoio e amor. Obrigada por sempre me incentivarem a lutar por meus objetivos, por estarem sempre comigo, por serem fonte de inspiração!

À empresa Jowat pelo fornecimento do adesivo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001, pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Frente à crescente necessidade de construções sustentáveis, o sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* (CLT) se apresenta como uma solução inovadora e promissora, principalmente pela possibilidade de construção de edifícios de múltiplos pavimentos e pelo uso de madeiras provenientes de florestas plantadas. Os painéis de CLT são compostos por lamelas de madeira serrada coladas em camadas comumente ortogonais, que podem ser utilizados estruturalmente como elementos de lajes e paredes. As ligações entre painéis geralmente são feitas com pinos metálicos, como pregos e parafusos. Os principais parâmetros no dimensionamento deste tipo de ligação são a resistência ao embutimento da madeira e a flexão do pino metálico. O fenômeno do embutimento é complexo por sofrer influência de diversos fatores e não está suficientemente investigado em CLT. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a resistência ao embutimento de pinos metálicos em CLT, por meio de ensaios experimentais em painéis produzidos com três camadas de lamelas de pinus, considerando-se as direções paralela e perpendicular às fibras da camada externa dos painéis e pinos com diâmetros de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm. Além disso, os resultados obtidos experimentalmente são comparados com aqueles obtidos a partir de equações analíticas contidas em normas e literatura especializada. Foi verificado que a resistência ao embutimento da CLT é influenciada pelo diâmetro do pino metálico nas duas direções consideradas. Em análise das curvas de tensão de embutimento versus deslocamento, observou-se que a resistência ao embutimento da CLT foi até 8% menor à resistência da madeira serrada na direção paralela às fibras, sendo a maior diferença evidenciada nos resultados médios referentes ao diâmetro de 12 mm. Com relação a direção perpendicular às fibras, a resistência ao embutimento da CLT foi até 26% superior à resistência da madeira serrada, sendo a maior diferença evidenciada nos resultados médios referentes ao diâmetro de 16 mm. Contudo, a análise de variância (ANOVA) não apontou diferença significativa entre as médias de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, com exceção das médias referentes ao carregamento perpendicular às fibras com diâmetro de 16 mm. Com relação às comparações entre resultados analíticos e experimentais da CLT, conclui-se que a equação proposta por Kennedy et al. (2014a) foi a que apresentou melhor concordância entre os resultados.

Palavras-chave: Madeira Laminada Colada Cruzada. Ligações com pinos metálicos. Avaliação Experimental. Resistência ao embutimento.

ABSTRACT

Cross Laminated Timber (CLT) is an innovative and promising building system owing to the growing need of sustainable buildings, the possibility of multi-storey buildings and the use of reforestation lumber. The CLT panels are composed of graded sawn lumber glued together on the wide side, in commonly orthogonal layers, that can be used structurally like walls and floor elements. The connection between panels are often made with metal dowel-type fasteners, like nails and screws. The main parameters in the design of this type of connection are the embedment strength and the fastener yield moment. The embedment behavior of timber is complex because it is influenced by several factors, and until now has not been enough investigated in CLT. Therefore, this research aims to analyze the embedment strength of CLT, by carrying out experimental tests on CLT panels produced with three layers of pine lamellas, considering loads parallel and perpendicular to the grain direction of outer layers, with diameters of 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm and 16 mm. Besides, the experimental results are compared with those obtained from analytical models included in standards and technical literature. The experimental results show that the embedment strength is influenced by the fastener diameter in both grain directions considered. Analysing the embedding strength versus displacement curves, it was observed that the mean CLT embedment strength values were until 3% lower than sawn lumber loaded parallel to grain, wherein the most evident difference is on mean results for the 12 mm diameter. Considering loads perpendicular to the grain direction, the mean CLT embedment strength values were until 26% higher than sawn lumber, wherein the most evident difference is on mean results for the 16 mm diameter. Although, the analysis of variance (ANOVA) indicated that there is no significant difference between CLT and sawn lumber mean embedment strength values, except for loading perpendicular to the grain direction with 16 mm diameter series. About the analytical models, it was concluded that the model proposed by Kennedy et al. (2014a) exhibited the best agreement with experimental results.

Key-words: Cross Laminated Timber. Dowelled connection. Experimental Tests. Embedment Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – <i>Cross laminated timber</i>	21
Figura 2.2 – Configurações de painéis de CLT	23
Figura 2.3 – Residência unifamiliar sendo construída em CLT em Klagenfut, Áustria	23
Figura 2.4 – Residencial Estudantil <i>Brock Commons</i> : (a) em construção e (b) concluído	24
Figura 2.5 – Painéis de CLT com revestimentos	25
Figura 2.6 – Pannel com recortes de porta, janela e instalações	25
Figura 2.7 – Dimensões das lamelas de acordo com BS EN 16.351:2015	28
Figura 2.8 – Emendas dentadas na (a) vertical e (b) horizontal	28
Figura 2.9 – Geometria admissível de espaçamentos e sulcos	29
Figura 2.10 – Prensa a vácuo	30
Figura 2.11 – Prensa hidráulica	31
Figura 2.12 – Corte de painel de CLT em máquina CNC	31
Figura 2.13 – Conectores para CLT	32
Figura 2.14 – Conexões entre painéis perpendiculares	33
Figura 2.15 – Conexões entre painéis de CLT na mesma direção	34
Figura 2.16 – Conexões entre painéis inclinados	35
Figura 2.17 – Conexões entre painéis de laje	35
Figura 2.18 – Conexões entre painéis de paredes e pisos	36
Figura 2.19 - Conexões entre painéis de parede e fundações	36
Figura 2.20 – Conexões entre painéis de parede e fundações através de chapas metálicas	37
Figura 3.1 – Embutimento de pino na madeira	39
Figura 3.2 – Embutimento em ligações com pinos metálicos (a) geometria da ligação de corte duplo, (b) pino metálico sujeito a tensões de flexão e (c) madeira sujeita a tensões localizadas de compressão (tensão de embutimento)	40
Figura 3.3 – Curvas de deslocamento-tensão de embutimento em função da direção das fibras	42
Figura 3.4 – Deformação por embutimento (a) paralelo às fibras e (b) perpendicular às fibras	42
Figura 3.5 – Hipótese de comportamento de acordo com a teoria de Johansen para (a) madeira e (b) pino metálico	43
Figura 3.6 – Determinação da espessura t em ligações (a) de corte simples e (b) de corte duplo	46

Figura 3.7 – Ligações entre madeira e elemento metálico	47
Figura 3.8 – Modos de falha em ligações de corte simples entre elementos de madeira	48
Figura 3.9 – Modos de falha em ligações de corte duplo entre elementos de madeira	49
Figura 3.10 – Modos de falha em ligações de corte simples entre madeira e elementos de aço	50
Figura 3.11 - Modos de falha em ligações de corte duplo entre madeira e elemento central de aço.....	51
Figura 3.12 – Modos de falha em ligações de corte duplo entre madeira e elementos externos de aço.....	52
Figura 3.13 – Diagrama de carregamento para ensaios de embutimento	54
Figura 3.14 – Diagrama tensão-deformação específica de embutimento.....	55
Figura 3.15 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras.....	55
Figura 3.16 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento	57
Figura 3.17– Dimensões mínimas dos corpos de prova para ensaios de embutimento (a) paralelo às fibras e (b) perpendicular às fibras	58
Figura 3.18 – Definição da força de embutimento a partir da curva força-deslocamento	60
Figura 3.19 – Modelo e dimensões mínimas do corpo de prova.....	61
Figura 3.20 – Esquema de ensaio	61
Figura 3.21 – Seção transversal de painéis de CLT (a) sem espaços entre as lamelas e (b) com espaço entre as bordas das lamelas.....	69
Figura 3.22 – Configurações dos corpos de prova de Blass e Uibel	70
Figura 3.23 – Explicação sobre $t_{0,i}$ e $t_{90,j}$ considerados na Equação 3.44	72
Figura 3.24 – Modelo e dimensões dos corpos de prova	74
Figura 3.25 – Gráfico de resistência característica ao embutimento por densidade da madeira	76
Figura 3.26 – Modos de falha para carregamentos a 0° , 30° , 60° e 90°	77
Figura 4.1 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowat-Faser PUR 686.60	84
Figura 4.2 – Gabarito para verificação dos nós	86
Figura 4.3 – Configuração do ensaio de flexão estática	87
Figura 4.4 – Configuração do ensaio de embutimento.....	89
Figura 4.5 – Modelo dos corpos de prova de CLT nas direções (a) paralela e (b) perpendicular às fibras; e madeira serrada nas direções (c) paralela e (d) perpendicular às fibras	90

Figura 4.6 – Processo de colagem das lamelas do corpos de prova de CLT.....	91
Figura 4.7 – Realização do furo nos corpos de prova de embutimento	91
Figura 4.8 – Corpos de prova para ensaios de embutimento.....	92
Figura 5.1 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico para CLT: (a) na direção paralela às fibras e (b) na direção perpendicular às fibras	101
Figura 5.2 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico para madeira serrada: (a) na direção paralela às fibras e (b) na direção perpendicular às fibras ...	102
Figura 5.3 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico	103
Figura 5.4 – Razão entre resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras ($f_{e,0}/f_{e,90}$) para CLT e madeira serrada para cada diâmetro.....	104
Figura 5.5 – Curvas típicas de tensão de embutimento – deslocamento para a direção paralela e perpendicular às fibras para: (a) CLT e (b) madeira serrada	105
Figura 5.6 – Valores médios de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para as direções: (a) paralela e (b) perpendicular às fibras.....	107
Figura 5.7 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,CLT}$	112
Figura 5.8 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,CLT}$	113
Figura 5.9 – Resultados experimentais ($f_{e,0,CLT}$) e calculados de $f_{e,0,ms}$	116
Figura 5.10 – Resultados experimentais ($f_{e,90,CLT}$) e calculados de $f_{e,90,ms}$	117
Figura 5.11 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,ms}$	118
Figura 5.12 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,ms}$	119
Figura 5.13 – Comparação entre o método de <i>off-set</i> de 5%d e deslocamento de 5 mm para as direções: (a) paralela e (b) perpendicular às fibras.....	121
Figura 5.14 – Modos de falha de madeira serrada na direção paralela às fibras: (a) modo 1, (b) modo 2 e (c) modo 3.....	121
Figura 5.15 – Modos de falha de madeira serrada na direção perpendicular às fibras: (a) modo 4, (b) modo 5 e (c) modo 6.....	122
Figura 5.16 – Modos de falha de CLT na direção paralela às fibras.....	123
Figura 5.17 – Modos de falha para CLT na direção perpendicular às fibras	124
Figura 5.18 – Modo de falha da camada interna do painel de CLT com carregamento aplicado na direção perpendicular às fibras da camada externa	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensões de painéis de CLT por fabricantes	27
Tabela 3.1 - Valores de α_e para diferentes diâmetros de pino (d)	56
Tabela 3.2 – Dimensões mínimas dos corpos de prova para ensaios de embutimento	58
Tabela 3.3 – Resumo dos experimentos de Santos et al. (2010)	66
Tabela 3.4 – Resultados de densidade e umidade para os painéis de CLT	70
Tabela 3.5 – Visão geral dos ensaios de embutimento de Blass e Uibel (2007)	71
Tabela 3.6 – Resultados obtidos por Ottenhaus et al. (2018)	78
Tabela 4.1 – Limitação dos defeitos em caibros e pranchas e tábuas	86
Tabela 5.1 – Resumo das propriedades físicas e mecânicas – valores médios	95
Tabela 5.2 – Classificação visual das peças de caibros e pranchas	96
Tabela 5.3 – Classificação visual e mecânica das tábuas	96
Tabela 5.4 – Resistência ao embutimento da CLT na direção paralela às fibras ($f_{e,0,CLT}$), em MPa.....	98
Tabela 5.5 – Resistência ao embutimento da CLT na direção perpendicular às fibras ($f_{e,90,CLT}$), em MPa.....	99
Tabela 5.6 – Resistência ao embutimento da madeira serrada na direção paralela às fibras ($f_{e,0,ms}$), em MPa.....	99
Tabela 5.7– Resistência ao embutimento da madeira serrada na direção perpendicular às fibras ($f_{e,90,ms}$), em MPa	100
Tabela 5.8 – Resumo dos valores médios de resistência ao embutimento	100
Tabela 5.9 – Razão entre a resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras	104
Tabela 5.10 – Razão entre a resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada, para as direções paralela e perpendicular às fibras	106
Tabela 5.11 – Resumo dos resultados da ANOVA para comparação entre CLT e madeira serrada.....	108
Tabela 5.12 – Resistência ao embutimento calculada: Blass e Uibel (2007)	109
Tabela 5.13 – Resistência ao embutimento calculada: Kennedy et al. (2014a)	109
Tabela 5.14 – Resistência ao embutimento calculada: ABNT NBR 7190:1997.....	110
Tabela 5.15 – Resistência ao embutimento calculada: CEN EN 1995 1-1:2004	110
Tabela 5.16 – Resistência ao embutimento calculada: ANSI/AWC NDS:2015	111
Tabela 5.17 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,CLT}$	112

Tabela 5.18 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,CLT}$	113
Tabela 5.19 – Comparação entre resultados experimentais ($f_{e,0,CLT}$) e calculados de $f_{e,0,ms}$...	116
Tabela 5.20 – Comparação entre resultados experimentais ($f_{e,90,CLT}$) e calculados de $f_{e,90,ms}$	117
Tabela 5.21 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,ms}$	119
Tabela 5.22 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,ms}$	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing And Materials</i>
APA	<i>The Engineered Wood Association (American Plywood Association)</i>
AWC	<i>American Wood Council</i>
BS	<i>British Standards</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPs	Corpos de Prova
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
EN	<i>European Standard</i>
EPDM	Etileno Propileno-Dieno-Monômero
EPI	Adesivo de Polímero em Emulsão de Isocianato
EYM	<i>European Yield Model</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MLC	Madeira Laminada Colada
MLCC	Madeira Laminada Colada Cruzada
MOE	Módulo de Elasticidade
MUF	Melanina-Ureia-Formoldeído
NBR	Norma Técnica Brasileira
NDS	<i>National Design Specification</i>
PUR	Poliuretanos
PRF	Phenol-Resorcinol-Formoldeído
SPIB	<i>Southern Pine Inspection Bureau</i>
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
m	Metro
cm	Centímetro
t_l	Espessura da lamela
f_e	Resistência ao embutimento
F	Força
F_e	Força de embutimento
t	Espessura convencional
d	Diâmetro do pino metálico
MPa	Megapascal
R_d	Resistência de cálculo da ligação correspondente a uma seção de corte
$f_{e,d}$	Resistência ao embutimento de cálculo
$f_{y,d}$	Resistência ao escoamento do pino metálico
$F_{v,Rk}$	Resistência característica da ligação correspondente a uma seção de corte
F_{ax}	Resistência ao arracamento
$M_{y,k}$	Momento característico resistente à flexão do pino
$F_{e,2\%}$	Força de embutimento que provoca uma deformação residual de 2%
A	Área
$f_{e,0}$	Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras
$f_{e,0,ms}$	Resistência ao embutimento de madeira serrada na direção paralela às fibras
$f_{e,0,CLT}$	Resistência ao embutimento de CLT na direção paralela às fibras
$f_{c,0}$	Resistência à compressão na direção paralela às fibras
$f_{e,90}$	Resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras
$f_{e,90,ms}$	Resistência ao embutimento de madeira serrada na direção perpendicular às fibras
$f_{e,90,CLT}$	Resistência ao embutimento de CLT na direção perpendicular às fibras
α	Ângulo de inclinação entre as fibras da madeira e aplicação de força
f_h	Resistência ao embutimento
$F_{h,máx}$	Força de embutimento máxima
$F_{h,5mm}$	Força de embutimento que provoca um deslocamento relativo de 5 mm

F_{est}	Força estimada
$f_{h,0}$	Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras
ρ_k	Densidade característica da madeira
t_0	Lamela paralela à direção de aplicação de força
t_{90}	Lamela perpendicular à direção de aplicação de força
$F_{c, 5\%}$	Força de embutimento que causa um deslocamento residual de 5% do diâmetro
kg	Quilograma
G	Densidade relativa
°C	Grau Celsius
g	Gramma
ρ_{ap}	Densidade aparente
ρ_{12}	Densidade da madeira corrigida a umidade de 12%
$\rho_{médio}$	Densidade média
kN	Quilo Newton
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira
L	Vão
Δ	Deslocamento vertical máximo ou flecha
I	Momento de inércia da seção transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVA	19
2	<i>CROSS LAMINATED TIMBER</i>	21
2.1	O SISTEMA CONSTRUTIVO	21
2.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO	26
2.3	LIGAÇÕES.....	32
3	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO.....	38
3.1	O FENÔMENO DO EMBUTIMENTO NA MADEIRA	38
3.2	DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES.....	43
3.2.1	Dimensionamento de Ligações segundo a ABNT NBR 7190:1997.....	45
3.2.2	Dimensionamento de Ligações segundo a CEN EN 1995 1-1:2004.....	47
3.3	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO EM MADEIRA SERRADA	53
3.3.1	Resistência ao Embutimento de acordo com ABNT NBR 7190:1997.....	53
3.3.2	Resistência ao Embutimento de acordo com a CEN EN 1995 1-1:2004.....	56
3.3.3	Resistência ao Embutimento de acordo com ANSI/AWC NDS:2015.....	60
3.3.4	Trabalhos Técnicos-Científicos Acerca da Resistência ao Embutimento da Madeira Serrada	62
3.4	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO EM PAINÉIS DE CLT	68
3.4.1	Equações Propostas por Blass e Uibel (2007).....	69
3.4.2	Equação Proposta por Kennedy et al. (2014a).....	73
3.4.3	Trabalhos Técnicos-Científicos Acerca da Resistência ao Embutimento da CLT75	
3.5	DISCUSSÕES RELATIVAS À RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	80
4	MATERIAIS E MÉTODOS	83
4.1	MATERIAIS.....	83
4.2	PROCEDIMENTOS	84
4.2.1	Caracterização da Madeira Serrada.....	84
4.2.2	Classificação Visual	85
4.2.3	Classificação Mecânica.....	87

4.2.4	Ensaio de Embutimento	88
4.2.4.1	Preparação dos corpos de prova de embutimento.....	89
4.2.5	Determinação Analítica da Resistência ao Embutimento	92
4.2.6	Comparação entre os resultados	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	95
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA SERRADA.....	95
5.2	CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA.....	95
5.3	RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO	97
5.3.1	Resultados Experimentais	98
5.3.2	Comparação entre Resultados Experimentais	101
5.3.2.1	Análise da Influência do Diâmetro	101
5.3.2.2	Comparação entre as Resistências ao Embutimento da CLT e da Madeira Serrada com Enfoque na Influência da Direção do Carregamento em Relação às Fibras.....	103
5.3.2.3	Comparação entre a Resistência ao Embutimento da CLT e Madeira Serrada.....	106
5.3.3	Resultados Analíticos.....	109
5.3.4	Comparação entre Resultados Analíticos e Experimentais	111
5.3.5	Modos de falha	121
6	CONCLUSÃO	126
6.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	128
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	135
	APÊNDICE B – CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DAS LAMELAS	141
	APÊNDICE C – CURVAS DE FORÇA DE EMBUTIMENTO – DESLOCAMENTO E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	142

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos que mais agride o meio ambiente, por ser o setor que mais consome energia e recursos naturais, além de gerar grande quantidade de resíduos. Segundo Hoornweg e Bhada (2012), em algumas cidades, os resíduos sólidos da construção civil representam até 40% do fluxo total de resíduos. Assim, a necessidade de construções sustentáveis é crescente, sendo que para isto é importante o investimento em materiais e tecnologias de construção com menores impactos ambientais, desde o processo de fabricação até o fim da vida útil da edificação.

A madeira se apresenta como uma solução promissora para o desenvolvimento sustentável, por ser um material renovável, reciclável, biodegradável, com baixa energia de produção, além de ser um eficiente fixador de carbono, contribuindo assim na redução dos níveis de gás carbônico na atmosfera.

Estruturalmente a madeira possui excelente relação peso/resistência, e diferentemente da crença popular, as peças de madeira possuem boa resistência ao fogo. A camada de carvão proveniente da combustão da madeira e a própria madeira são isolantes térmicos, que retardam a degradação térmica e mantêm um núcleo na peça estrutural com propriedades mecânicas inalteradas. Embora seja passível de sofrer deterioração por agentes biológicos, dependendo das condições ambientais a que seja exposta, a madeira tem sua durabilidade aumentada quando devidamente tratada com substâncias preservativas e utilizada de acordo com técnicas adequadas.

Nas últimas décadas, os produtos resultantes da industrialização da madeira, como o Compensado, *Laminated Veneer Lumber* (LVL), Madeira Laminada Colada (MLC) e *Cross Laminated Timber* (CLT) têm criado novas perspectivas para o uso da madeira na construção civil. Esses geralmente são produzidos a partir de madeiras de reflorestamento e o processo de produção proporciona um melhor aproveitamento das toras de madeira e de suas propriedades, possibilitam a produção de peças com grandes dimensões e formas esteticamente atraentes, além de agregarem valor à madeira.

O produto *Cross Laminated Timber* (CLT), também chamado de madeira laminada colada cruzada (MLCC), tornou realidade a construção de edifícios de múltiplos pavimentos em madeira. O sistema construtivo em CLT consiste basicamente em painéis que são utilizados estruturalmente como lajes e paredes, constituídos por lamelas de madeiras

classificadas e coladas, geralmente perpendicular à camada adjacente, formando um painel maciço de madeira.

As ligações com pinos metálicos, como pregos e parafusos, são as mais utilizadas nas estruturas de madeira. O comportamento das ligações rege o comportamento global das estruturas, fazendo com que estas sejam consideradas pontos críticos. Portanto, é necessário que haja domínio sobre cada um dos fatores que influenciam no desempenho das ligações, a fim de proporcionarem resistência, segurança e durabilidade às estruturas.

Para o dimensionamento das ligações com pinos metálicos, diversos modelos contidos em documentos normativos se baseiam no *European Yield Model* (EYM). Este modelo apresenta equações para cada modo de falha da ligação, que são caracterizados pela combinação dos fenômenos de embutimento da madeira e flexão do pino metálico.

O embutimento pode ser descrito como o esmagamento da madeira na interface de contato com os pinos metálicos. A resistência da madeira ao embutimento depende fundamentalmente de vários fatores, como diâmetro do pino metálico, densidade da madeira e inclinação entre a força aplicada e as fibras da madeira.

Há divergência entre os modelos apresentados nas normas brasileira, europeia e americana a respeito da influência do diâmetro do pino metálico na determinação da resistência ao embutimento, além de que esses documentos normativos ainda não contemplam especificações para determinação deste parâmetro em CLT.

Assim sendo, este trabalho busca avaliar a resistência ao embutimento de pinos metálicos em painéis de CLT, por meio da realização de ensaios de embutimento com pinos de diferentes diâmetros, nas direções paralela e perpendicular às fibras da madeira (para a CLT, a direção refere-se às camadas externas). Essa análise se completa por meio da comparação entre os resultados experimentais e os resultados analíticos obtidos de acordo com equações propostas na literatura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a resistência ao embutimento de pinos metálicos em painéis de *Cross Laminated Timber* produzidos a partir da colagem de três camadas de lamelas de pinus, com a mesma espessura, dispostas de forma ortogonal entre si.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, pressupõe-se que sejam atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os materiais utilizados na produção dos corpos de prova, a fim de obter os parâmetros necessários para alimentar as equações analíticas e validar as comparações com resultados obtidos por outros autores;
- Analisar a influência do diâmetro do pino metálico na resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, considerando as direções paralela e perpendicular às fibras;
- Determinar experimentalmente a resistência ao embutimento de pinos metálicos nos painéis de CLT e na madeira serrada, comparando os resultados;
- Determinar analiticamente a resistência ao embutimento de pinos metálicos na CLT e na madeira serrada, de acordo com equações empíricas propostas na literatura, para comparar com os resultados experimentais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há uma crescente demanda por construções que busquem viabilizar o desenvolvimento sustentável. Diante disto, as construções em madeira são uma possibilidade promissora, principalmente aquelas que utilizem madeira proveniente de florestas plantadas. O sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* é uma alternativa que se alinha com os requisitos das construções sustentáveis e tem ganhado cada vez mais espaço nos Estados

Unidos, Canadá, Austrália e países da Comunidade Europeia, devido aos seus diversos benefícios como o alto nível de pré-fabricação, que possibilita construções limpas e com velocidade, possibilidade de construções de múltiplos pavimentos, bom desempenho em abalos sísmicos e comportamento controlável em situações de incêndios.

Por ser um produto recente, é necessária a realização de estudos a fim de aprimorar seu uso. De acordo com uma pesquisa realizada por Espinoza et al. (2016a), na qual engenheiros europeus foram entrevistados, as pesquisas mais urgentes necessárias para o avanço do uso da CLT como material de construção são nas áreas de desempenho estrutural e conexões.

As ligações em estruturas de madeira, incluindo sistemas em CLT, são feitas normalmente com pinos metálicos, como pregos e parafusos. O *European Yield Model* (EYM) é o modelo mais utilizado para o dimensionamento deste tipo de ligação, e apresenta equações cujos parâmetros principais são os fenômenos de embutimento da madeira e flexão do pino metálico. Desse modo, para realizar um dimensionamento adequado das ligações é importante que haja domínio sobre cada um destes fatores e que eles sejam mensurados de maneira precisa e segura.

A norma brasileira, a norma europeia e a norma americana apresentam divergências sobre a influência do diâmetro do pino metálico na resistência ao embutimento, trazendo diferentes modelos analíticos e experimentais para a determinação deste parâmetro em madeira serrada e em outros produtos à base de madeira.

O fenômeno do embutimento em CLT ainda não está suficientemente investigado, sendo que até o momento apenas a Áustria incluiu recomendações a respeito deste parâmetro em seu anexo nacional ao CEN EN 1995 1-1:2004.

Portanto, é oportuno o estudo acerca da resistência ao embutimento de pinos metálicos em painéis de CLT e na madeira serrada, com o objetivo de analisar a influência do diâmetro do pino metálico, avaliar a eficácia das equações propostas na literatura e constatar as relações entre a resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, tendo em vista que a laminação cruzada dos painéis interfere na resistência ao embutimento, uma vez que a madeira apresenta um comportamento diferente nas direções paralela e perpendicular às fibras.

2 CROSS LAMINATED TIMBER

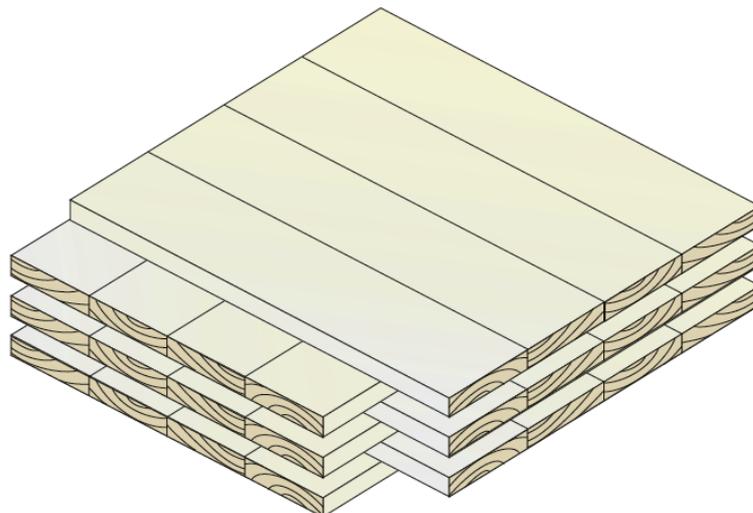
Com o objetivo de apresentar a CLT, este capítulo inicia-se pela explicação relativa ao produto e como funciona este sistema construtivo. Em seguida, são apresentadas as etapas de fabricação e os modelos de ligações mais usuais entre os painéis de CLT.

2.1 O SISTEMA CONSTRUTIVO

A ideia da *Cross Laminated Timber* (CLT), ou Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), ou ainda *X-Lam* – alcunha empregada no idioma inglês, surgiu nas décadas de 70 e 80, e seu desenvolvimento ocorreu na década de 90, na Suíça, Áustria e Alemanha, quando pioneiros e inovadores envolvidos na pesquisa e desenvolvimento reconheceram o potencial técnico e econômico deste produto (BRANDNER et al., 2016).

De acordo com a norma ANSI/APA PRG 320:2018, a *Cross Laminated Timber* (CLT) é definida como um painel pré-fabricado de madeira, composto por pelo menos três camadas ortogonais de madeira serrada ou compósitos de madeira estrutural, que são laminados por meio da colagem de camadas longitudinais e transversais, com adesivos estruturais. Os painéis de CLT são destinados a aplicações em telhados, lajes ou paredes. O esquema de um painel de CLT é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – *Cross laminated timber*



Fonte: FPInnovations (2011)

A produção da CLT está expandindo-se mundialmente. Segundo Plackner¹ (2015 apud UNECE/FAO, 2017), a produção ainda está concentrada na Europa, sendo que Áustria, Alemanha e Suíça juntas contabilizam 80% da produção mundial, 60% somente na Áustria. A produção global de CLT foi estimada entre 650.000 e 700.000 m³ em 2015. Em 2016 a produção na Europa foi de 680.000 m³, e a previsão é que este volume aumente para 1,25 milhões de m³ até 2020 (UNECE/FAO, 2017). De acordo com Espinoza et al. (2016b), na América do Norte existem cinco produtores de CLT, sendo dois produtores no Canadá, com uma capacidade de produção combinada de 110.000 m³ por ano, e três fabricantes nos Estados Unidos, sendo que apenas um deles é certificado para produzir painéis de CLT para construção.

A CLT incorpora tecnologia à construção, apresentando diversas vantagens. Por ser um material que possui um excelente nível de pré-fabricação, contribui para obras secas, limpas e com tempo de construção reduzido, além de apresentar bom isolamento térmico, acústico, e bom desempenho em situações de incêndio; seu peso reduzido, rigidez, capacidade de resistência e estabilidade resultante da laminação cruzada, possibilitam a construção de edifícios com múltiplos pavimentos. A experiência europeia tem mostrado que este sistema pode ser competitivo, principalmente para edifícios médios e altos (BRANDNER, 2014; POPOVSKI; SCHNEIDER; SCHWEINSTEIGER, 2010).

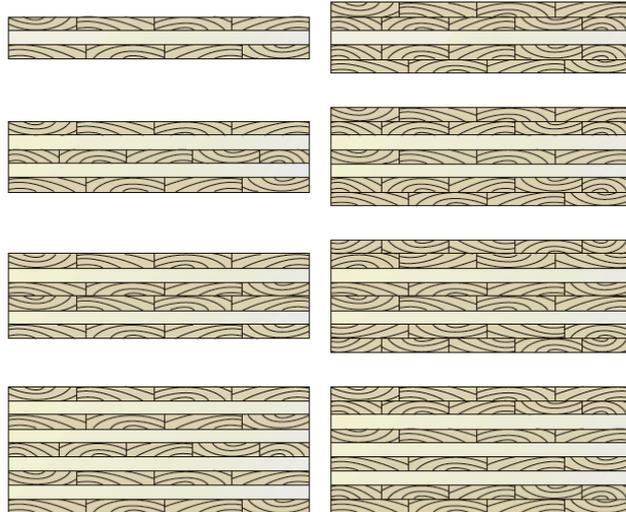
De acordo com Brandner (2014), para a fabricação da CLT são utilizadas principalmente madeiras coníferas, como diferentes espécies de pinus. O processo de laminação cruzada promove uma homogeneização do material, que resulta em painéis com melhorias nas propriedades mecânicas em diferentes direções, com melhor estabilidade dimensional, e ainda reduz os efeitos de retração e inchamento da madeira devido às variações de umidade (HASSANIEH; VALIPOUR; BRADFORD, 2016; MOOSBRUGGER; GUGGENBERGER; BOGENSPERGER, 2006; VAN DE KUILEN et al., 2011).

Segundo Mohammad et al. (2012), várias configurações podem ser utilizadas a fim de se obter capacidades estruturais específicas. É possível que sejam adotadas camadas adjacentes paralelas ou camadas orientadas em ângulos diferentes de 90°. Uma pesquisa realizada por Buck et al. (2016), com CLT de diferentes configurações, mostrou que para painéis montados com camadas a 45° houve um aumento de 35% da resistência à flexão em comparação com painéis de camadas a 90°.

¹ PLACKNER, H. Potenzial ist Riesig. Agrarverlag, 14 pp. 2015

É mais comum a produção de painéis com um número ímpar de camadas dispostas simetricamente à camada intermediária. Normalmente são utilizadas três, cinco ou sete camadas perpendiculares (BRANDNER et al., 2016; WIERUSZEWSKI; MAZELA, 2017). Algumas configurações de painéis de CLT podem ser observadas na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Configurações de painéis de CLT



Fonte: FPInnovations (2011)

Os painéis de CLT possuem relativamente alta resistência e rigidez na direção transversal e longitudinal. Por essa virtude, o sistema construtivo consiste na utilização da CLT tanto em paredes como em pisos. Geralmente os painéis são entregues na obra com as dimensões finais de projeto, exceto quando a dimensão do painel é limitada pelos meios de transporte. Um exemplo de construção em CLT é apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Residência unifamiliar sendo construída em CLT em Klagenfut, Áustria



Fonte: FPInnovations (2011)

A CLT pode ser utilizada também em sistemas mistos, como no Residencial Estudantil *Brock Commons* da Universidade de *British Columbia*, em Vancouver, no Canadá. Com 53 metros de altura, neste momento é o prédio em madeira mais alto do mundo. O prédio possui a superestrutura de madeira maciça, que utiliza painéis de CLT nas lajes e pilares de MLC, sobre uma base e duas torres centrais em concreto armado (*UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA*, 2016). A Figura 2.4 mostra o edifício em fase de construção e após concluído.

Figura 2.4 – Residencial Estudantil *Brock Commons*: (a) em construção e (b) concluído



(a)

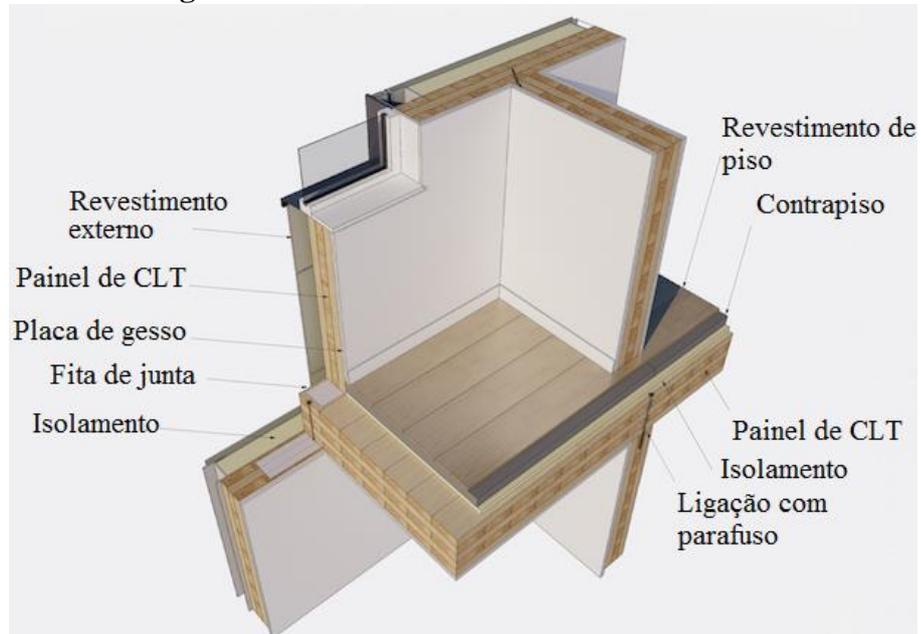
(b)

Fonte: <http://cirs.ubc.ca/research/brock-commons-tallwood-house/>

Nas construções em CLT os acabamentos internos são opcionais, no entanto o exterior necessita de revestimento para proteger os painéis dos agentes externos, como água e radiação solar. Assim como outros tipos de construções em madeira, são necessários projetos e aplicações apropriadas de materiais de isolamento e estratégias de controle de ar e vapor, para evitar que a umidade seja retida e acumulada dentro dos painéis, assegurando o desempenho e a durabilidade da edificação.

Segundo Jorge (2013), nas juntas entre painéis pode ser colocada uma fita betuminosa, a fim de melhorar o comportamento térmico, acústico e a estanqueidade do ar. A Figura 2.5 ilustra painéis de CLT com revestimentos e a utilização de fita nas juntas entre parede e piso.

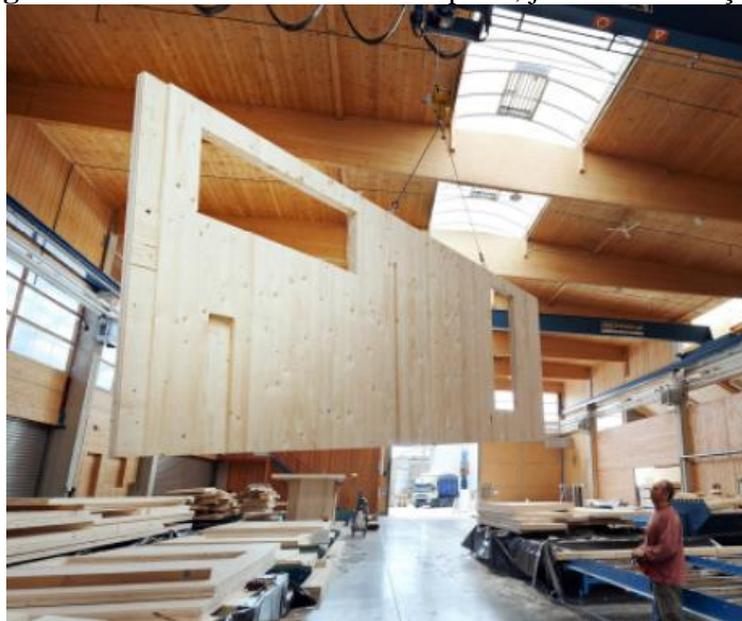
Figura 2.5 – Painéis de CLT com revestimentos



Fonte: <http://fatpencilstudio.com/clt-construction/>

As aberturas para portas, janelas, recortes para instalações elétricas e hidráulicas e outros vãos são executados em fábrica, restando para a obra apenas pequenas furações e as ligações entre os painéis. A Figura 2.6 ilustra um painel com os recortes de porta, janela e instalações elétricas.

Figura 2.6 – Painel com recortes de porta, janela e instalações



Fonte: MINDA Industrieanlagenc GmbH (2014)

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação dos painéis de CLT pode ser resumido nas seguintes etapas: seleção da madeira serrada; classificação das lamelas; realização de emendas dentadas (*fingerjoints*), se necessário; aplainamento e corte das lamelas; aplicação do adesivo; montagem e prensagem dos painéis; acabamentos e embalagem do produto (MOHAMMAD et al., 2012; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Na América do Norte as indicações acerca dos painéis de CLT são apresentadas na norma ANSI/APA PRG 320:2018 - *Standard for performance-rated cross-laminated timber*, enquanto na Europa a norma vigente com os requisitos para a CLT é a BS EN 16.351:2015 - *Timber structures — Cross laminated timber — Requirements*.

Para a produção da CLT, a norma ANSI/APA PRG 320:2018 recomenda que sejam utilizadas madeiras de densidade superior a 350 kg/m³, já a norma europeia apresenta uma lista de espécies de madeiras recomendadas, não fazendo recomendação específica acerca da densidade mínima da madeira a ser utilizada nos painéis. Ambos os documentos normativos permitem que diferentes espécies de madeira sejam utilizadas para compor um mesmo painel de CLT, em que cada camada pode ser composta por uma mesma espécie ou por uma mistura de espécies, desde que possuam propriedades técnicas semelhantes, especialmente em relação ao inchamento e retração.

As lamelas devem passar por classificação visual e mecânica. É recomendado que as lamelas com melhores propriedades sejam posicionadas nas camadas mais solicitadas, para proporcionar um melhor desempenho estrutural (BRANDNER, 2014). Como a madeira é um material que frequentemente pode apresentar alguns defeitos naturais, tais como nós e fibras inclinadas, é possível distribuir esses defeitos ao longo do volume, a fim de homogeneizar as propriedades mecânicas dos painéis (GSELL et al., 2007).

De acordo com a ANSI/APA PRG 320:2018, o teor de umidade da madeira recomendado para a fabricação dos painéis de CLT é de 12% ± 3%. É importante que a madeira seja empregada com o teor de umidade adequado, para evitar variações dimensionais, possíveis fendilamentos superficiais e garantir a eficiência do adesivo (MOHAMMAD et al., 2012; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Segundo Gagnon e Popovski (2011), os painéis de CLT são usualmente compostos de 3 a 11 camadas. A BS EN 16.351:2015 especifica que a espessura total não deve exceder 500

mm. Geralmente são utilizados painéis de 3 a 5 camadas para paredes e de 5 a 7 camadas para pisos (THIEL; SCHICKHOFER, 2010).

As dimensões dos painéis variam de acordo com os fabricantes. Segundo FPInnovations (2011), as larguras típicas são de 0,6 m, 1,2 m e 3 m, e o comprimento pode ser de até 18 m, sendo que essas dimensões podem ser maiores ou menores devido a limitações impostas pelo transporte. A Tabela 2.1 reúne informações relativas às máximas dimensões produzidas de painéis de CLT por algumas empresas europeias.

Tabela 2.1 – Dimensões de painéis de CLT por fabricantes

Fabricante	Dimensões máximas dos painéis (m)		
	Comprimento máximo	Largura máxima	Espessura total máxima
KLH (Áustria, Reino Unido, Suécia)	16,5	2,95	0,500
Binderholz (Áustria)	24,0	3,50	0,340
Martinsons (Suécia)	6,0	1,20	0,259
Stora Enso (Áustria)	16,0	2,95	0,320
Thoma Holz GmbH (Áustria)	8,0	3,00	0,800
Finnforest Merk (Alemanha/Reino Unido)	20,0	4,80	0,297
HMS (Alemanha)	16,0	3,90	0,320
NORDPAN SPA AG (Itália)	5,0	2,05	0,270
Züblin Timber Bauelemente (Alemanha)	7,0	3,00	0,310
LIGNOTREND AG (Alemanha, Suíça)	18,0	0,625	0,247

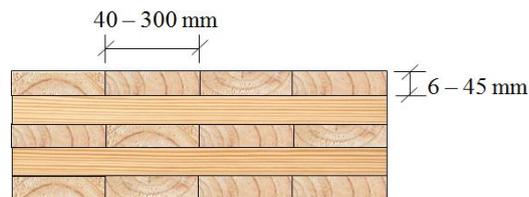
Fonte: Adaptado de Wieruszewski e Mazela (2017)

As recomendações de espessura e largura das lamelas possuem algumas variações. A ANSI/APA PRG 320:2018 sugere que a espessura das lamelas deve ser entre 16 mm e 51 mm, que a largura no sentido de maior solicitação deve ser maior que 1,75 vezes a espessura (entre 28 mm e 89 mm) e no sentido de menor solicitação maior que 3,5 vezes a espessura (entre 56 mm e 178 mm), e recomenda ainda a variação da espessura da lamela não deve exceder 0,2 mm na largura, e 0,3 mm no comprimento.

Já segundo a BS EN 16.351:2015, a espessura das lamelas pode ser entre 6 mm e 45 mm, com exceção de painéis de 3 camadas, em que a camada central pode ter até 60 mm e a

largura das lamelas deve estar entre 40 mm e 300 mm. A recomendação é que a espessura real da seção transversal do painel não deve desviar-se da espessura nominal em ± 2 mm ou 2%, o que for maior, e que a espessura individual das lamelas não deve afastar-se da espessura nominal em ± 1 mm. A Figura 2.7 ilustra as dimensões das lamelas sugeridas pela norma europeia.

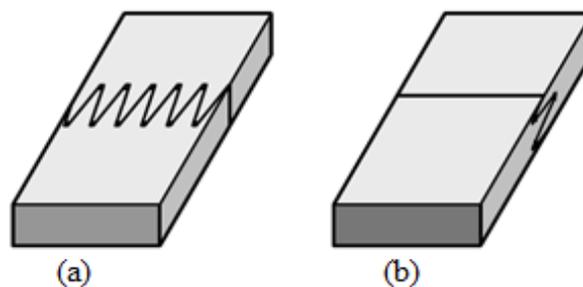
Figura 2.7 – Dimensões das lamelas de acordo com BS EN 16.351:2015



Fonte: O autor

As lamelas possuem comprimentos variados e para se adequarem ao tamanho do painel são ligadas geralmente através de emendas dentadas (*fingerjoints*), as quais podem ser feitas verticalmente ou horizontalmente, como é mostrado na Figura 2.8. As emendas dentadas feitas na horizontal apresentam vantagens como melhor estanqueidade do ar e melhor acabamento estético, uma vez que são menos visíveis no painel de CLT acabado (BRANDNER, 2014).

Figura 2.8 – Emendas dentadas na (a) vertical e (b) horizontal



Fonte: Brandner (2014)

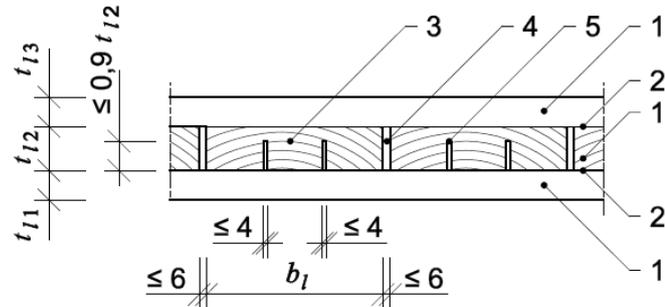
As faces laterais de cada lamela podem estar em contato, sendo coladas ou não, ou ainda estarem dispostas com um pequeno espaçamento entre si (MOOSBRUGGER; GUGGENBERGER; BOGENSPERGER, 2006). A BS EN 16.351:2015 limita os espaçamentos entre lamelas adjacentes a uma distância máxima de 6 mm, e permite ainda que sejam feitos sulcos nas lamelas, com espessura máxima de 4 mm e uma profundidade de até

90% da espessura da lamela, com o objetivo de diminuir possíveis encanoamentos e fendilhamentos. A Figura 2.9 ilustra a geometria admissível segundo a norma europeia para espaçamentos e sulcos nas lamelas.

Figura 2.9 – Geometria admissível de espaçamentos e sulcos

Legenda

- 1 camadas de madeira
- 2 cola entre as camadas
- 3 lamela
- 4 espaços entre lamelas adjacentes
- 5 sulcos nas lamelas



Fonte: Adaptado da BS EN 16.351:2015

A colagem das faces laterais apresenta vantagens como melhor desempenho ao fogo, estanqueidade à passagem de ar, e desvantagens no que diz respeito a esforços internos causados por retração e inchamento provenientes das variações climáticas (BRANDNER, 2014).

Wang, Pirvu e Lum (2011) recomendam que o processo de colagem seja realizado dentro de 24 horas após o aplainamento das lamelas para algumas espécies de madeira, de modo que sejam evitados problemas com a oxidação da superfície, que pode fechar os poros e dificultar a colagem.

Antes de iniciar o processo de colagem, as camadas devem ser limpas com um jato de ar comprimido para remover quaisquer detritos. A superfície deve estar limpa, livre de poeiras e substâncias repelentes ao adesivo, como graxas, óleos e exsudação que podem prejudicar a aderência da ligação (ANSI/APA PRG 320, 2018; BS EN 16.351, 2015; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

A temperatura do ambiente e umidade da madeira influenciam na qualidade da colagem e conseqüentemente na escolha do adesivo. Os adesivos utilizados com maior frequência são à base de poliuretanos (PUR), que reagem com a umidade presente na madeira e iniciam o processo de reação; entretanto, podem ser utilizados também adesivos fenólicos e aminoplásticos, como phenol-resorcinol-formoldeído (PRF) e melanina-ureia-formoldeído (MUF), ou ainda adesivos de polímero em emulsão de isocianato (EPI) (BS EN 16.351, 2015; CRESPELL; GAGNON, 2010; WIERUSZEWSKI; MAZELA, 2017).

O adesivo deve ser espalhado de maneira uniforme e a quantidade a ser aplicada é variável de acordo com as características da madeira e do sistema de aplicação, devendo ser seguidas as recomendações dos fabricantes (BS EN 16.351, 2015; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Contudo, na pesquisa realizada por Ecker, Miotto e Turmina (2017), foi observado que a quantidade de adesivo por metro quadrado recomendada pelo fabricante pode ser insuficiente, dificultando o processo de distribuição do adesivo na superfície e resultar em uma colagem ineficiente. A norma ANSI/APA PRG 320:2018 determina que a área de colagem efetiva deve ser de pelo menos 80%.

Após a aplicação do adesivo e a montagem do painel, parte-se para a prensagem. Segundo Brandner (2014), é importante garantir que todas as lamelas de uma mesma camada possuam espessura uniforme, a fim de garantir que a prensagem seja uniforme por toda a superfície. A pressão a ser aplicada sobre os painéis depende do tipo, da quantidade e do sistema de aplicação do adesivo, da espécie de madeira utilizada e das características de rugosidade e planicidade da superfície.

No processo de produção industrial, dois tipos de prensas podem ser utilizados: as prensas a vácuo e as prensas hidráulicas. As prensas a vácuo possuem uma pressão máxima teórica de 0,1 MPa, que geralmente não é suficiente para cumprir a pressão mínima especificada pelos fabricantes de adesivos. Assim sendo, as prensas hidráulicas são as mais recomendadas por possuírem maior capacidade de carga. Quando as lamelas não são coladas lateralmente, é recomendado a aplicação de prensagem lateral, a fim de evitar a abertura de lacunas entre as lamelas durante a prensagem vertical (WANG; PIRVU; LUM, 2011). A Figura 2.10 ilustra uma prensa a vácuo, e a Figura 2.11 uma prensa hidráulica.

Figura 2.10 – Prensa a vácuo



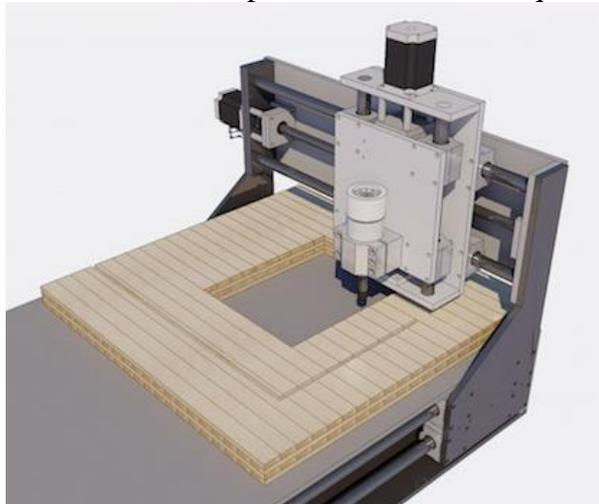
Fonte: <http://www.woodtec.ch/vacuumpress>

Figura 2.11 – Prensa hidráulica

Fonte: <http://www.oregon4biz.com/News-&-Media/CLT/>

De acordo com Wang, Pirvu e Lum (2011), o tempo de montagem e prensagem depende da temperatura ambiente e da umidade do ar. É recomendado que durante a prensagem a temperatura seja superior a 15°C, pois o tempo de cura de alguns adesivos pode ser maior em baixas temperaturas.

Na próxima etapa, os painéis recebem acabamentos, são lixados, aplainados e podem ser feitas as aberturas para portas e janelas ainda na fábrica. As indústrias de CLT utilizam máquinas sofisticadas de Comando Numérico Computadorizado (CNC), conforme ilustra a Figura 2.12, capazes de realizar cortes com alta precisão.

Figura 2.12 – Corte de painel de CLT em máquina CNC

Fonte: <http://fatpencilstudio.com/clt-construction/>

Por fim, os painéis passam por um controle de qualidade, e em seguida são embalados e transportados. Segundo Mohammad et al. (2012), um processo de fabricação de CLT bem sucedido depende da qualidade das lamelas de madeira serrada e do controle sobre o processo de colagem.

2.3 LIGAÇÕES

No sistema construtivo em CLT, as ligações entre painéis de pisos e de paredes são feitas geralmente utilizando chapas metálicas dobradas, ligadas à madeira através pregos, parafusos passantes e parafusos autoatarraxantes (FRAGIACOMO; DUJIC; SUSTERSIC, 2011). A Figura 2.13 apresenta alguns modelos de conectores utilizados em CLT.

Figura 2.13 – Conectores para CLT



Fonte: Adaptado de Rothoblaas (2017)

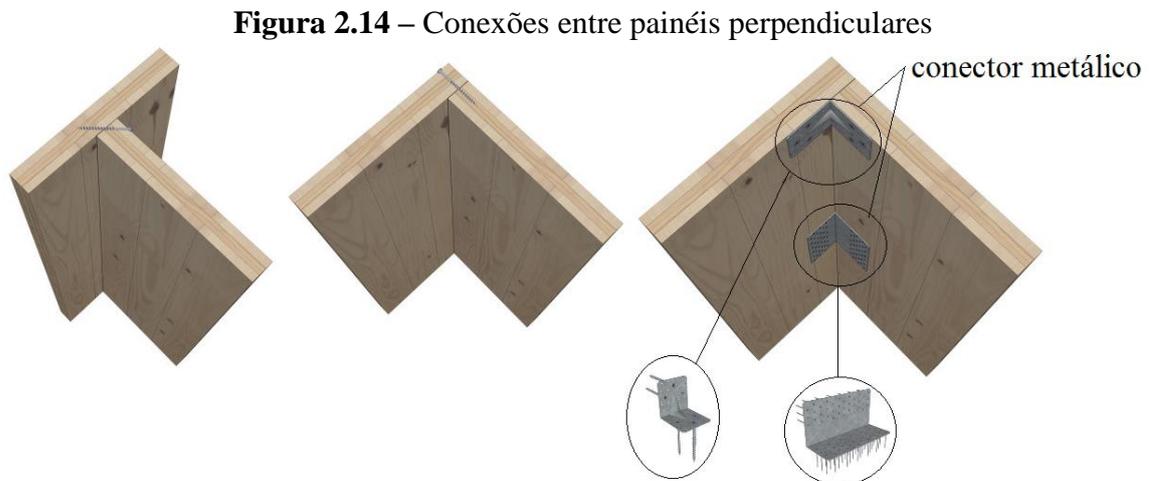
O desempenho estrutural do sistema é consideravelmente influenciado pelas propriedades mecânicas da CLT, assim como pela rigidez e resistência das ligações. Na última década, diversos estudos teóricos e experimentais focaram no comportamento de ligações entre painéis de CLT. Uibel e Blass (2006, 2010, 2014) conduziram pesquisas acerca da capacidade de carga e comportamento de ligações em CLT com pinos metálicos, analisando os modos de ruptura e os fenômenos de embutimento e de arrancamento.

Com o foco de estudar o comportamento das ligações em CLT em termos de resistência, rigidez, dissipação de energia e ductilidade, em pesquisas como de Sandhaas et al.

(2009); Popovski, Schneider e Schweinsteiger (2010); Gavric, Fragiaco e Ceccotti (2012, 2015); Hossain, Danzig e Tannert (2016); Izzi et al. (2016); e Izzi, Polastri e Fragiaco (2018) foram realizadas análises teóricas e experimentais que simulam ligações entre painéis de parede, painéis de parede e piso, e ligações entre parede e fundação, quando submetidas à carregamentos monotônicos e cíclicos. Os resultados dos testes cíclicos realizados por diferentes pesquisadores demonstraram um bom desempenho sísmico das estruturas de CLT com conectores mecânicos, como pregos e parafusos.

Existem diversas possibilidades de configurações de ligações entre painéis de CLT. Neste trabalho são apresentadas algumas formas mais comuns de ligações entre paredes, paredes e pisos, e paredes e fundações.

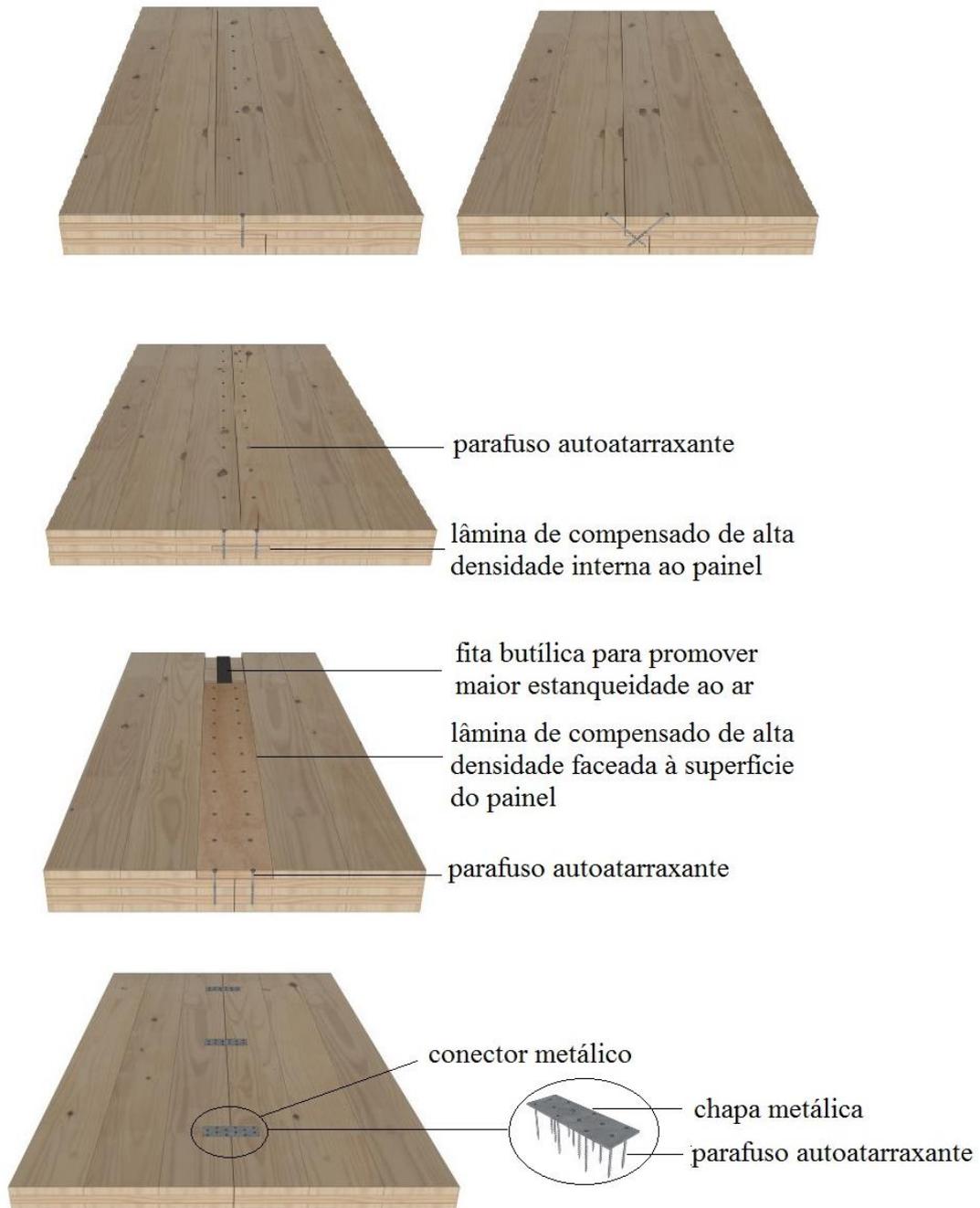
Possíveis ligações entre dois painéis perpendiculares entre si são ilustradas na Figura 2.14. Essas conexões podem ser realizadas empregando apenas parafusos, fixados de maneira ortogonal ao painel ou com um ângulo de 45°, como também é possível que sejam utilizadas cantoneiras metálicas, fixadas aos painéis com parafusos.



Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

Na Figura 2.15 são apresentados alguns tipos de ligações entre painéis de CLT em uma mesma direção, como ligações parede-parede ou piso-piso. Nota-se que este tipo de conexão normalmente é feito com parafusos, fixados de modo perpendicular ao painel ou com um ângulo de 45°, e cortes nos painéis de CLT, a fim de que se encaixem. Existe também a possibilidade de utilizar compensados ou *Laminated Vanner Lumber* (LVL) na conexão.

Figura 2.15 – Conexões entre painéis de CLT na mesma direção



Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

Para conexão entre painéis que formam um ângulo entre si diferente de 90°, normalmente são utilizados apenas parafusos. Os painéis podem ser chanfrados de modo simétrico, ou cortados de modo que um painel faceie o outro. A Figura 2.16 mostra algumas possibilidades de ligações entre painéis inclinados.

Figura 2.16 – Conexões entre painéis inclinados



Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

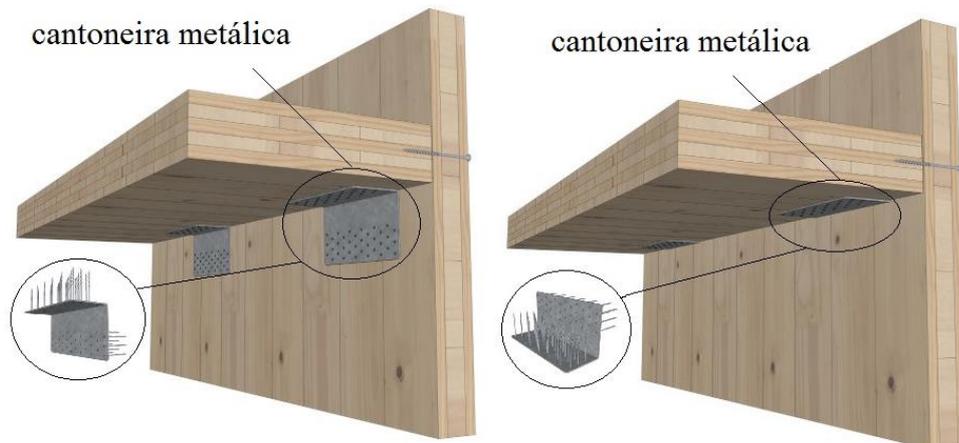
A Figura 2.17 e a Figura 2.18 ilustram ligações entre painéis de paredes e pisos. No caso de dois painéis de piso se apoiando sobre um único painel de parede, a conexão pode ser feita com parafusos fixados a 45°, ou através de encaixes nos pisos e parafusos fixados perpendicularmente, conforme ilustra a Figura 2.17.

Figura 2.17 – Conexões entre painéis de laje



Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

Nas situações em que um painel de piso se apoia em um painel de parede, normalmente são utilizados parafusos e cantoneiras metálicas, que podem ser fixadas abaixo do piso, ficando aparentes, ou podem ser fixadas de maneira invertida, de modo que parte da cantoneira fica escondida, como exemplifica a Figura 2.18.

Figura 2.18 – Conexões entre painéis de paredes e pisos

Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

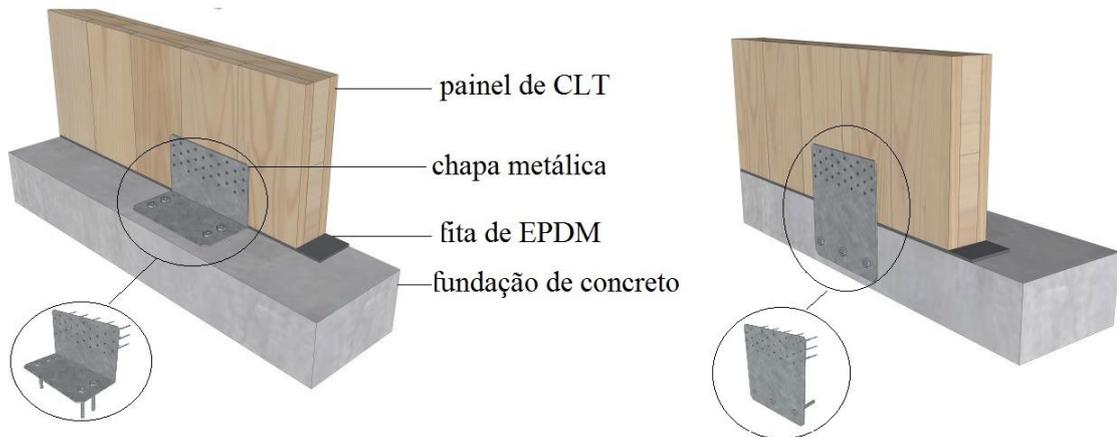
As conexões entre fundações de concreto e painéis de parede em CLT podem ser realizadas por meio de um barrote de madeira tratada ou outro material, objetivando auxiliar no nivelamento do piso. É importante a utilização de materiais impermeabilizantes entre a fundação e o painel de CLT, para garantir o desempenho e durabilidade dos painéis. A ligação pode ser feita através de chapas metálicas fixadas com parafusos, ou em situações que utilizem o barrote de madeira, existe a possibilidade de utilizar apenas parafusos fixados com um ângulo de 45°. A Figura 2.19 ilustra exemplos de ligações entre a fundação de concreto e a parede de CLT, utilizando barrote de madeira e fitas de EPDM (etileno propileno-dieno-monômero) com função de isolante.

Figura 2.19 - Conexões entre painéis de parede e fundações

Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

A Figura 2.20 exemplifica ligações entre a fundação de concreto e a parede de CLT através de chapas metálicas.

Figura 2.20 – Conexões entre painéis de parede e fundações através de chapas metálicas



Fonte: Adaptado de Crosslam (2017)

Perante ao exposto, a CLT constitui um sistema construtivo que oferece uma nova perspectiva quanto ao uso da madeira nas edificações, sobretudo no processo de industrialização na construção civil, necessário para que as obras sejam limpas, gerem menor quantidade de resíduos e tenham o tempo de construção reduzido.

Os painéis de CLT chegam prontos ao canteiro de obras, restando apenas a realização das conexões, as quais regem o comportamento global da estrutura. Portanto, é necessário conhecer o comportamento mecânico das ligações, de modo que sejam dimensionadas para proporcionar segurança e resistência à estrutura.

Assim, o próximo capítulo aborda o embutimento de pinos metálicos, fenômeno que tem influência direta no dimensionamento das ligações utilizadas entre painéis de CLT.

3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

Este capítulo tem como objetivo explicar o que é o embutimento, discutir a importância deste fenômeno e apresentar os métodos de determinação da resistência ao embutimento em madeira serrada e painéis de CLT.

Por ser um parâmetro fundamental na determinação da capacidade resistente de ligações de peças de madeira que empregam pinos metálicos, após a explicação do fenômeno do embutimento são apresentados os equacionamentos das normas brasileira e europeia para dimensionamento de ligações com pinos metálicos, e posteriormente são apresentados os métodos segundo a norma brasileira (ABNT NBR 7190:1997), as normas europeias (CEN EN 1995 1-1:2004 e BS EN 383:2007) e as normas americanas (ANSI/AWC NDS:2015 e ASTM D5764-97a:2018), para a determinação da resistência ao embutimento em madeira serrada e produtos à base de madeira, dentre os quais a CLT ainda não está incluída. Em seguida, são apresentados trabalhos técnico-científicos que estudaram a resistência ao embutimento.

Posteriormente são apresentadas duas pesquisas relativas ao embutimento em painéis de CLT: de Blass e Uibel (2007) e Kennedy et al. (2014a), que propõem equações para obtenção analítica da resistência ao embutimento. Logo após são expostos outros trabalhos técnico-científicos que pesquisaram o embutimento em CLT.

Por fim, é feita uma discussão acerca da resistência ao embutimento na madeira serrada e na CLT, através de comparações entre as equações apresentadas e os métodos de ensaio.

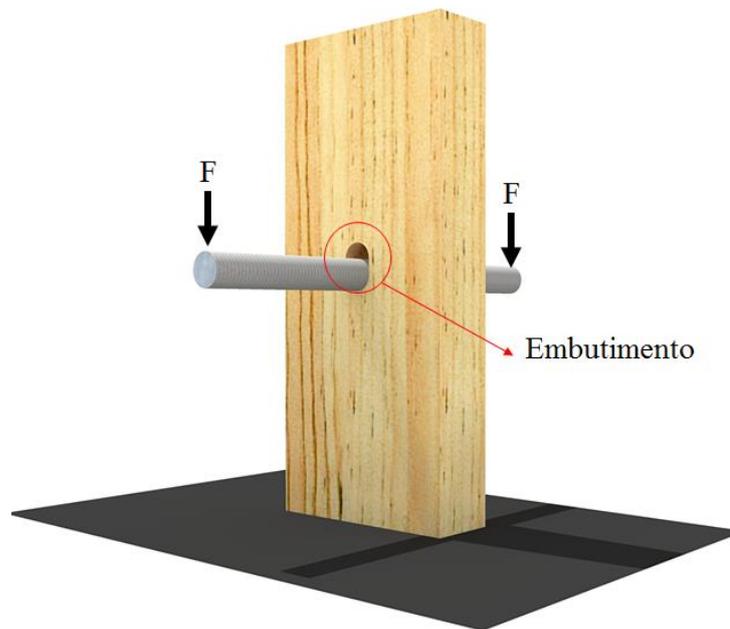
3.1 O FENÔMENO DO EMBUTIMENTO NA MADEIRA

O embutimento pode ser entendido como o esmagamento localizado que acontece na madeira devido a tensões de compressão provenientes do contato da madeira com pinos, o que ocorre comumente em ligações. A Figura 3.1 ilustra o embutimento em uma peça de madeira serrada.

A norma BS EN 383:2007 define a resistência ao embutimento (f_e) como sendo a tensão de compressão média em uma peça de madeira, ou produto à base de madeira, submetida a ação de um pino linear e rígido carregado perpendicularmente ao seu eixo e à

superfície da madeira. Este valor de resistência é definido em documentos normativos como a relação entre a força que provoca o embutimento (F) e a área de embutimento do pino, ou seja, considera uma distribuição de tensões uniforme. A força de embutimento (F_e) é identificada em ensaios por uma deformação limite, que varia de acordo com o documento normativo.

Figura 3.1 – Embutimento de pino na madeira

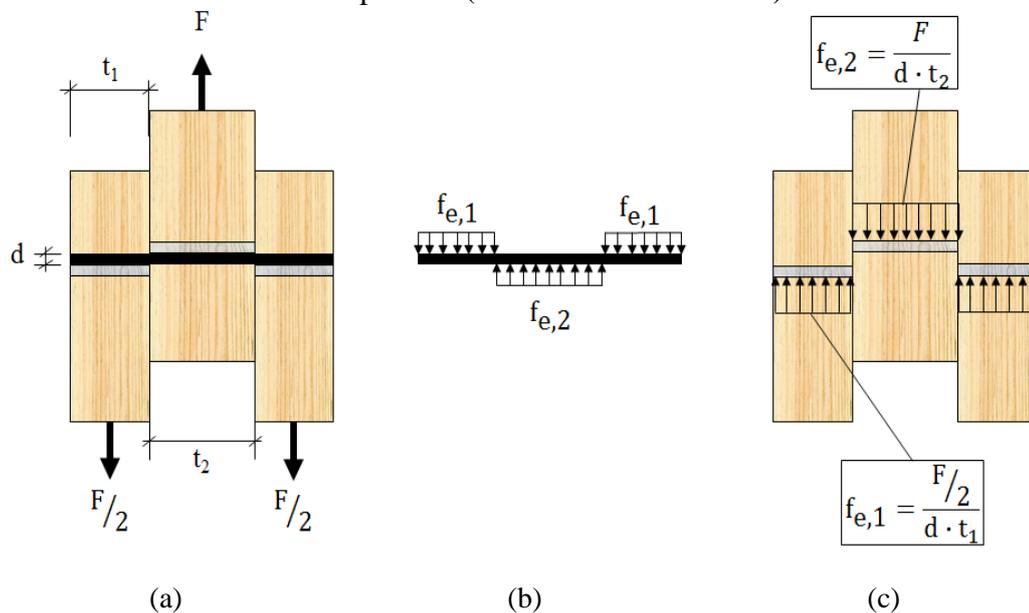


Fonte: O autor

A Figura 3.2 exemplifica uma ligação entre peças de madeira, na qual o pino metálico está sujeito à flexão e a madeira submetida a tensões de compressão localizada (tensão de embutimento).

A adoção de uma distribuição de tensões uniforme nas proximidades do furo na realidade é uma simplificação de uma distribuição de tensões complexa, que ocorre na região do contato madeira-pino. Segundo Valle (1999), a resistência ao embutimento obtida como a relação entre força e área é um valor convencional e não uma propriedade do material. Esta resistência depende de vários parâmetros, como diâmetro, dureza e rugosidade do pino, modo de introdução do pino na madeira (com ou sem pré-furação), densidade e umidade da madeira e inclinação da força em relação às fibras da madeira.

Figura 3.2 – Embutimento em ligações com pinos metálicos (a) geometria da ligação de corte duplo, (b) pino metálico sujeito a tensões de flexão e (c) madeira sujeita a tensões localizadas de compressão (tensão de embutimento)



Fonte: O autor

Há divergência nos documentos normativos em relação à influência do diâmetro do pino na resistência ao embutimento paralelo às fibras. A norma brasileira e a americana, por exemplo, apresentam relações com a resistência à compressão e densidade da madeira para determinar este valor. A norma europeia, por sua vez, considera um pequeno decréscimo na resistência quanto maior o diâmetro. Para a direção perpendicular às fibras, as equações apresentadas nos documentos normativos brasileiro, americano e europeu concordam que há uma relação inversa entre diâmetro e resistência, indicando que quanto maior for o diâmetro do pino metálico, menor será a resistência ao embutimento da madeira.

Pesquisas realizadas por Whale, Smith e Larsen (1987), Ehlbeck e Werner (1992) e Terrin, Góes e Pletz (2018) mostram que há uma influência significativa do diâmetro na resistência ao embutimento, em ambas as direções. Já as pesquisas realizadas por Wilkinson (1991) e Sawata e Yasumura (2002) relatam uma maior influência do diâmetro para o embutimento na direção perpendicular às fibras, e que para a direção paralela a influência do diâmetro acontece em menor proporção.

No que se refere à influência da resistência mecânica do pino metálico na resistência ao embutimento, na pesquisa realizada por Sandhaas et al. (2013), utilizando parafusos de duas diferentes classes de resistência em ensaios de embutimento, foi observado que os

parafusos de altíssima resistência (resistência média acima de 700 MPa) resultaram em maiores valores de resistência ao embutimento quando comparado com parafusos de alta resistência (resistência média entre 400 MPa e 600 MPa).

Sjödin, Serrano e Enquist (2008) estudaram a influência da rugosidade do pino metálico na resistência ao embutimento, utilizando pinos lisos e rugosos, com coeficiente de atrito estimado de 0,1 e 0,4, respectivamente, por meio de experimentos utilizando o sistema ARAMIS™ – que mede a deformação da superfície durante os ensaios – e por meio de análises em elementos finitos. Os autores concluíram que a distribuição de deformações ao redor do pino sofre influência da rugosidade da superfície, sendo que os pinos com superfícies rugosas resultaram em uma capacidade de carga aproximadamente 44% maior que os pinos com superfícies lisas.

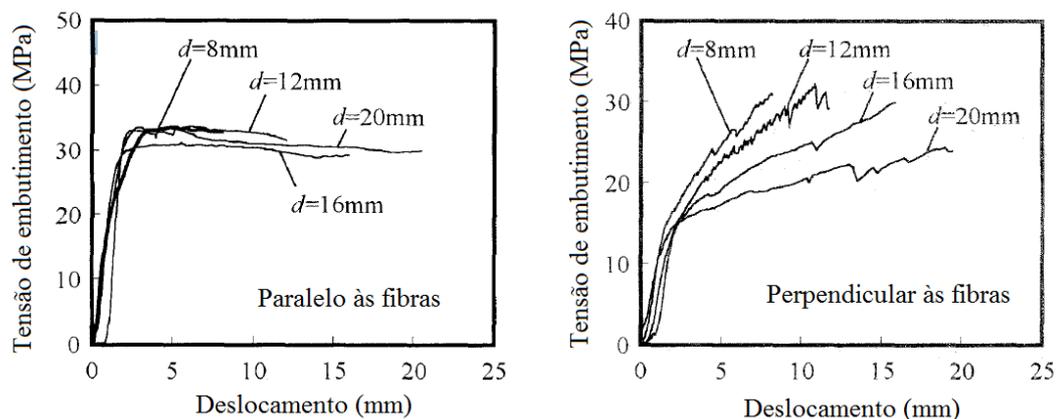
Com relação à influência do modo de introdução do pino na madeira, a CEN EN 1995 1-1:2004 considera uma diminuição da resistência ao embutimento para pregos e parafusos autoatarraxantes inseridos sem pré-furação, porém Zitto, Köhler e Piter (2012), ao realizarem ensaios de embutimento com pregos inseridos com e sem pré-furação, não encontraram uma diferença significativa entre os resultados.

Assim como em outras propriedades da madeira, a resistência ao embutimento também é influenciada pelo teor de umidade. Rammer e Winistorfer (2001), por meio de ensaios com diferentes espécies de coníferas, com teores de umidade em 4%, 6%, 12%, 19% e 20%, concluíram que a resistência ao embutimento aumenta conforme o teor de umidade diminui. A pesquisa realizada por Hübner, Bogensperger e Schickhofer (2008) com espécies de folhosas, com teores médios de umidade de 4,4%, 16,3% e 18,9%, apontou a diminuição da resistência ao embutimento entre 3% e 4% para cada 1% de aumento do teor de umidade.

Wilkinson (1991), Ehlbeck e Werner (1992) e Sawata e Yasumura (2002) observaram uma importante relação entre a densidade e a resistência ao embutimento. Wilkinson (1991) e Ehlbeck e Werner (1992) indicam uma relação linear e diretamente proporcional da densidade da madeira com a resistência ao embutimento. Em concordância com ambos os autores, os resultados obtidos por Terrin, Góes e Pletz (2018), para quatro espécies diferentes, mostraram que quanto maior a densidade da madeira, maior a resistência ao embutimento. Uma observação interessante feita por Ehlbeck e Werner (1992) foi que em madeiras folhosas e coníferas de mesma densidade, a resistência ao embutimento em folhosas foi 10% superior em relação às coníferas.

Devido à natureza anisotrópica da madeira, a deformação por embutimento depende da inclinação das forças de compressão em relação às fibras. Os resultados de Ehlbeck e Werner (1992) e Bleron e Duchanois (2006) mostram que quanto maior o ângulo entre a força de embutimento e as fibras da madeira, menor a resistência ao embutimento. Analisando os gráficos apresentados na Figura 3.3, provenientes da pesquisa acerca do embutimento conduzida por Sawata e Yasumura (2002), é possível observar o comportamento plástico da madeira quando carregada paralelamente às fibras, em que a resistência ao embutimento tem um aumento linear até a plastificação e posteriormente apresenta grande deslocamento sem incremento de resistência (patamar plástico); já quando o carregamento é perpendicular às fibras, a resistência ao embutimento é menor e tem um aumento contínuo até a ruptura.

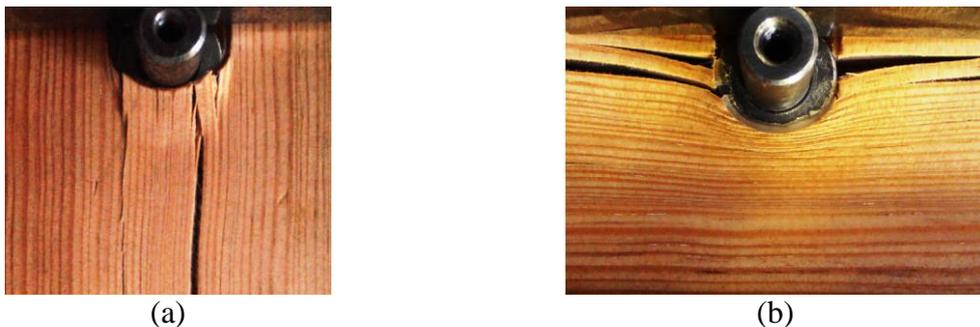
Figura 3.3 – Curvas de deslocamento-tensão de embutimento em função da direção das fibras



Fonte: Adaptado de Sawata e Yasumura (2002)

A Figura 3.4 ilustra a diferença de comportamento de deformação da madeira quando submetida a tensões de compressão na direção paralela e perpendicular às fibras.

Figura 3.4 – Deformação por embutimento (a) paralelo às fibras e (b) perpendicular às fibras



Fonte: Santos et al. (2013)

A determinação da resistência ao embutimento em painéis de CLT é relativamente mais difícil de ser obtida em comparação com a da madeira serrada ou de outros compósitos de madeira, devido a diferentes orientações das fibras em cada camada, presença de cola e de possíveis espaços entre as lamelas (GAVRIC; FRAGIACOMO; CECCOTTI, 2015).

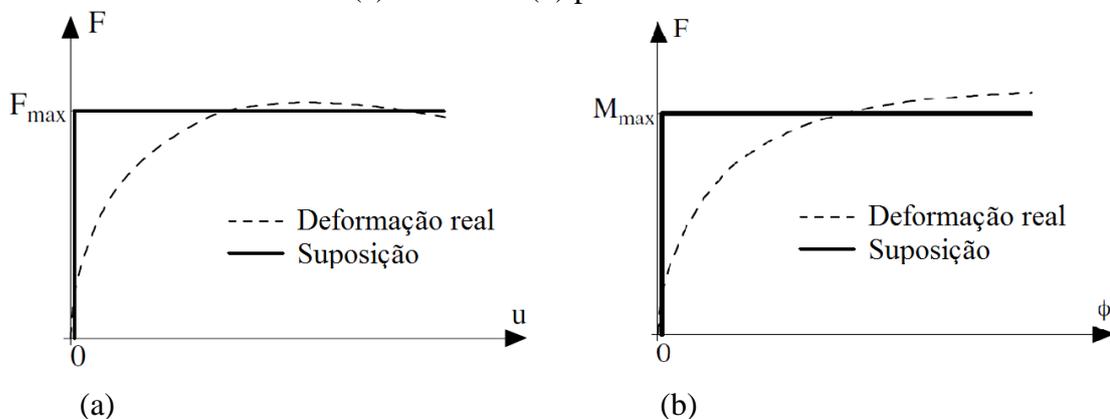
A resistência ao embutimento é um parâmetro fundamental na determinação da capacidade de carga de ligações com pinos metálicos, como pregos e parafusos. Este valor de resistência é responsável por expressar a resposta da madeira nas equações de dimensionamento de ligações. Nos itens seguintes serão apresentados os modelos de dimensionamento de ligações por pinos metálicos, segundo a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 e norma europeia CEN EN 1995 1-1:2004.

3.2 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES

Documentos normativos como o brasileiro, europeu, canadense e americano adotam o *European Yield Model* (EYM) para o dimensionamento de ligações por pinos metálicos. Este modelo é baseado na pesquisa de Johansen (1949), complementado por estudos posteriores.

Johansen (1949) desenvolveu sua teoria sobre ligações por pinos metálicos adotando um comportamento perfeitamente plástico tanto para a madeira quanto para o pino, como mostra a Figura 3.5. Essa abordagem considera a resistência ao embutimento como propriedade do material, embora esta seja influenciada por uma combinação de fatores geométricos e composição dos materiais.

Figura 3.5 – Hipótese de comportamento de acordo com a teoria de Johansen para (a) madeira e (b) pino metálico



Fonte: Adaptado de Blass e Schädle (2011)

Por meio de diversos ensaios, Johansen (1949) verificou a existência de diferentes modos de falha nas ligações por meio de pinos metálicos em estruturas de madeira e a partir disso, baseou-se no princípio do equilíbrio de forças e momentos para desenvolver equações para cada modo de ruptura.

As equações resultam na resistência individual de cada pino e são dadas em função da espessura entre as peças de madeira ligadas ou penetração do pino, do diâmetro do pino metálico, das propriedades mecânicas do aço (tensão de escoamento ou momento de plastificação do pino) e da resistência da madeira ao embutimento.

Os modos de falha são caracterizados pela combinação dos fenômenos de embutimento da madeira e flexão do pino metálico. A norma europeia considera seis modos de falhas para ligações de corte simples, e quatro modos de falha para ligações de corte duplo, propostos por Johansen (1949), e considera ainda efeitos adicionais como atrito entre as peças de madeira e a resistência ao arrancamento dos pinos. Já a norma brasileira adota uma simplificação das equações de Johansen, considerando apenas dois modos de falha, por embutimento do pino na madeira ou falha por flexão do pino, e não faz diferenciação das equações para corte simples ou corte duplo.

O modelo de dimensionamento baseado no EYM é comumente utilizado para ligações em madeira serrada, madeira laminada colada (MLC), madeira compensada (*plywood*), *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e *Oriented Strand Board* (OSB). Para esses painéis, a CEN EN 1995 1-1:2004 apresenta fórmulas específicas para determinação analítica de resistência ao embutimento.

Em relação a ligações em painéis de CLT, até o momento apenas a Áustria incluiu em seu Anexo nacional à CEN EN 1995 1-1:2004 regras específicas para ligações em CLT, derivadas dos trabalhos de Blass e seus colaboradores. Pesquisadores de ligações em painéis de CLT têm utilizado as equações apresentadas pela CEN EN 1995 1-1:2004 para determinação da resistência de ligações, com o valor da resistência ao embutimento obtido segundo as equações propostas por Blass e Uibel (2007) (IZZI et al., 2016; SANDHAAS et al., 2009; POZZA et al., 2018).

Segundo Muñoz, Mohammad e Gagnon (2010), uma vez determinada a resistência ao embutimento em painéis de CLT, a capacidade da carga da ligação pode ser calculada de acordo com a teoria de Johansen.

3.2.1 Dimensionamento de Ligações segundo a ABNT NBR 7190:1997

O equacionamento apresentado pela norma brasileira para dimensionamento de ligações é uma simplificação da teoria de Johansen. A ABNT NBR 7190:1997 considera apenas dois modos de falha, e, além disso, não faz diferenciação de equações para ligações de cisalhamento simples e duplo e não considera ligações entre peças de madeira com diferentes resistências ao embutimento.

A ABNT NBR 7190:1997 não permite que sejam consideradas no dimensionamento de ligações as forças de atrito das superfícies em contato, assim como esforços transmitidos por grampos, braçadeiras ou estribos, que também devem ser desprezados.

Os modos de falha considerados na norma brasileira são: falha por embutimento da madeira ou falha por flexão do pino metálico. A determinação do modo de falha da ligação é feita por meio dos parâmetros β e β_{lim} , conforme as Equações 3.1 e 3.2.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (3.1)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (3.2)$$

Se $\beta \leq \beta_{lim}$ a resistência da ligação é dada pela Equação 3.3, que considera falha por embutimento da madeira.

$$R_d = 0,4 \cdot t \cdot d \cdot f_{e,d} \quad (3.3)$$

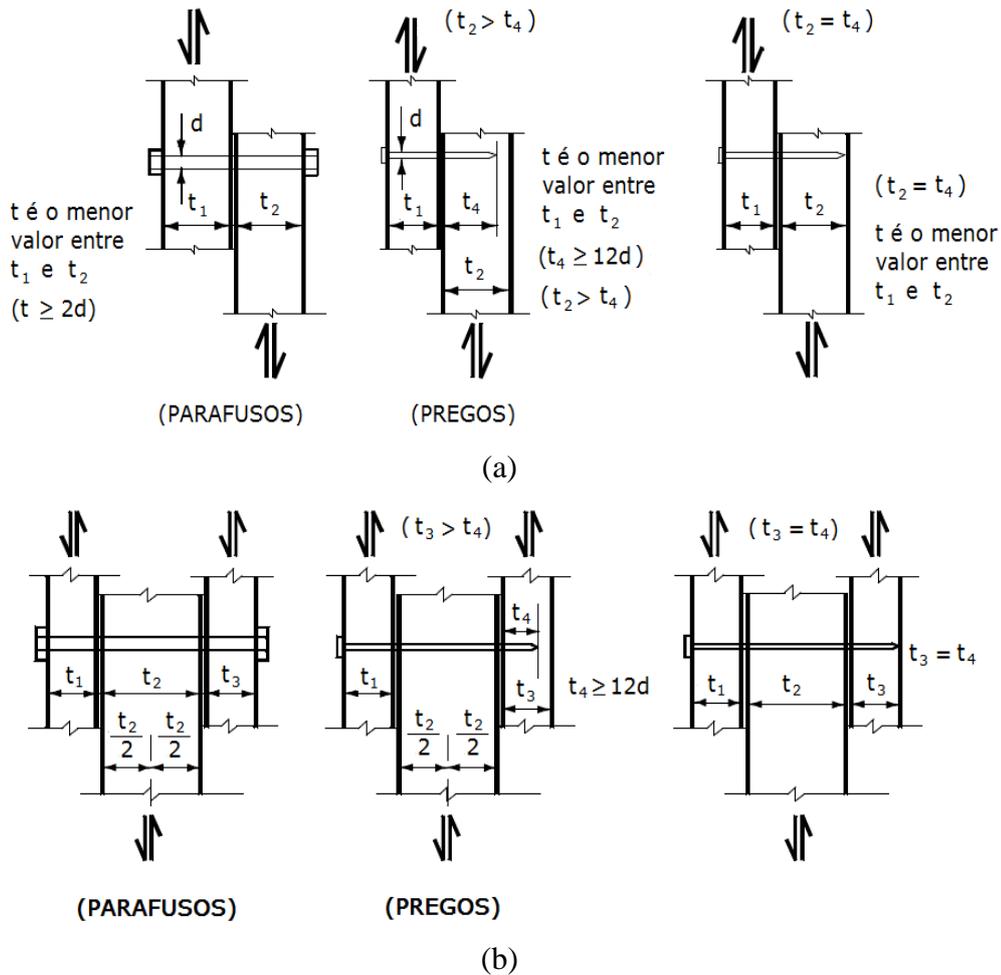
Se $\beta > \beta_{lim}$ a resistência da ligação é dada pela Equação 3.4, que considera falha por flexão do pino metálico.

$$R_d = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,d} \quad (3.4)$$

Nas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, d é o diâmetro do pino; t é uma espessura convencional, sendo o menor entre t_1 e t_2 , como exposto na Figura 3.6 para ligações de corte

simples e corte duplo; $f_{e,d}$ é resistência de cálculo ao embutimento das duas madeiras interligadas; $f_{y,d}$ é a resistência de cálculo ao escoamento do pino metálico e R_d é a resistência da ligação correspondente a uma seção de corte.

Figura 3.6 – Determinação da espessura t em ligações (a) de corte simples e (b) de corte duplo



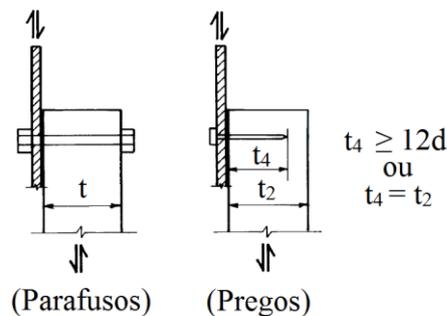
Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Em ligações entre madeira e elementos de aço, a ABNT NBR 7190:1997 determina que sejam verificadas duas resistências, uma referente à ligação do pino com a madeira e outra referente à ligação do pino com o elemento metálico, e que seja tomada como a resistência da ligação o menor valor de resistência.

A norma brasileira indica que a resistência referente à ligação do pino com o elemento de aço seja calculada seguindo os critérios da norma brasileira de estruturas de aço. Neste momento, o documento normativo válido é a ABNT NBR 8800:2008. A resistência referente

à ligação do pino com a madeira pode ser calculada seguindo os mesmos critérios estabelecidos para ligações entre duas peças de madeira. Neste caso, a espessura t que aparece nas equações é determinada conforme a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Ligações entre madeira e elemento metálico



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Em ligações parafusadas com função estrutural, a norma brasileira recomenda que não sejam utilizados parafusos com diâmetros menor que 10 mm e pregos com diâmetro inferior a 3 mm. A ABNT NBR 7190:1997 estabelece também que em ligações parafusadas, o diâmetro do parafuso deve ser menor ou igual à metade da espessura convencional t ($d \leq t/2$), e em ligações pregadas, o diâmetro do prego deve ser menor ou igual a um quinto da espessura convencional t ($d \leq t/5$).

3.2.2 Dimensionamento de Ligações segundo a CEN EN 1995 1-1:2004

As ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira podem ocorrer diretamente entre elementos de madeira ou podem contar com chapas metálicas para auxiliar na conexão entre os elementos, como é comumente empregado em estruturas de CLT. A CEN EN 1995 1-1:2004 apresenta formulações para dimensionamento de ligações entre elementos de madeira ou painéis de madeira, e equações para ligações entre peças de madeira e elementos de aço.

Tais equações levam em consideração se são conexões em cisalhamento simples ou cisalhamento duplo, ou seja, se o pino metálico está sujeito a um ou dois planos de corte. As equações para cisalhamento duplo aplicam-se apenas a conjuntos simétricos. Se arranjos não simétricos forem utilizados, a norma europeia determina que novas equações devem ser desenvolvidas ou soluções aproximadas podem ser utilizadas.

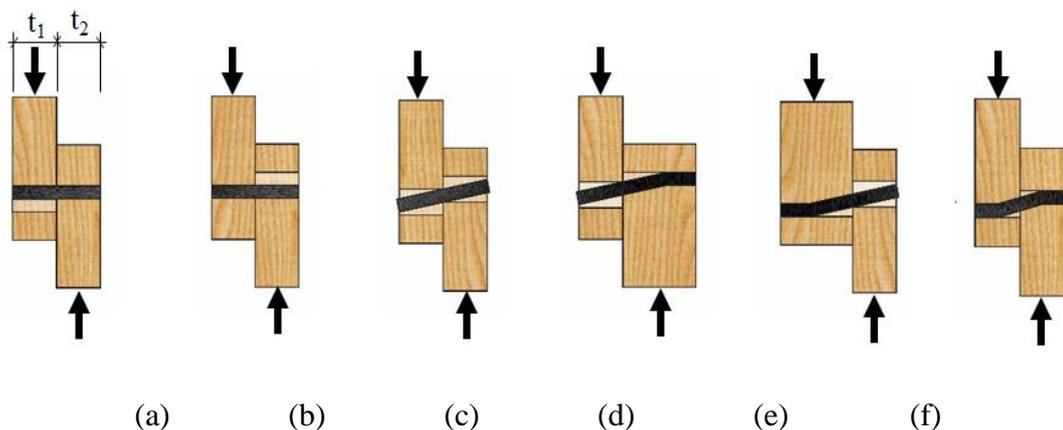
A resistência característica da ligação corresponde ao menor valor obtido de um conjunto de equações, em que cada equação corresponde a um modo de falha. Em ligações de corte duplo, o valor da resistência característica obtida nas equações deve ser multiplicado por dois.

Nas Equações 3.6 a 3.27, $F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte por pino metálico; $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$ são os valores de resistência característica ao embutimento da madeira da peça 1 e 2, respectivamente; t_1 e t_2 são as espessuras das peças de madeira ou da penetração pino; d é o diâmetro do pino metálico; $M_{y,Rk}$ é o momento resistente plástico característico à flexão do pino; $F_{ax,Rk}$ é a resistência ao arrancamento característica e β é a relação entre as resistências ao embutimento dos elementos 1 e 2, conforme a Equação 3.5.

$$\beta = \frac{f_{h,k,2}}{f_{h,k,1}} \quad (3.5)$$

A Figura 3.8 ilustra os modos de falha em ligações de corte simples entre elementos de madeira, nomeados de (a) a (f), e em seguida está apresentado o conjunto de equações (3.6 a 3.11), para os respectivos modos de falha.

Figura 3.8 – Modos de falha em ligações de corte simples entre elementos de madeira



Fonte: Adaptado de CEN EN 1995 1-1:2004

(a) $F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.6)$

$$(b) \quad F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (3.7)$$

$$(c) \quad F_{v,Rk} = \frac{f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.8)$$

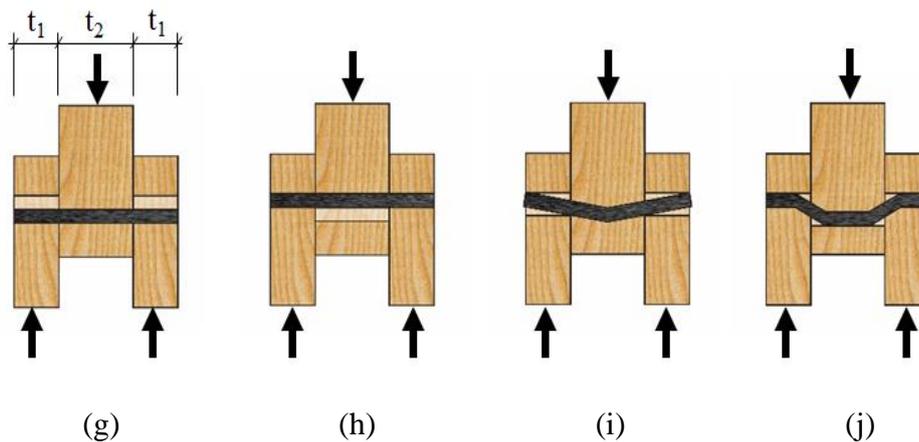
$$(d) \quad F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2+\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2+\beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.9)$$

$$(e) \quad F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1+\beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1+2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.10)$$

$$(f) \quad F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1+\beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.11)$$

A Figura 3.9 ilustra os modos de falha em ligações de corte duplo entre elementos de madeira, nomeados de (g) a (j), e em seguida o conjunto de equações (3.12 a 3.15) para os respectivos modos de falha.

Figura 3.9 – Modos de falha em ligações de corte duplo entre elementos de madeira



Fonte: Adaptado de CEN EN 1995 1-1:2004

$$(g) \quad F_{v,Rk} = f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.12)$$

$$(h) \quad F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (3.13)$$

$$(i) \quad F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,d}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.14)$$

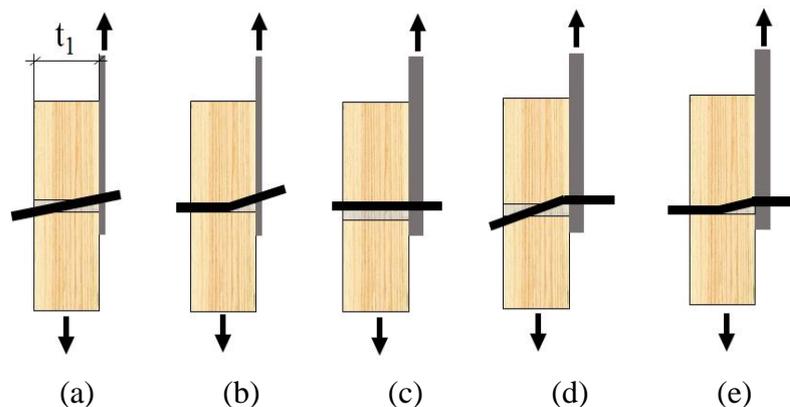
$$(j) \quad F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,1,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad (3.15)$$

Nas equações 3.9 a 3.11, 3.14 e 3.15, o primeiro termo corresponde à parcela de Johansen multiplicada por um fator, para a consideração da resistência ao atrito entre as peças de madeira, e o segundo termo é a contribuição da resistência ao arrancamento do pino metálico.

Para o dimensionamento de ligações entre madeira e elementos de aço, as equações dependem da espessura da placa de aço. A CEN EN 1995 1-1:2004 classifica como placas finas aquelas que possuem espessura menor ou igual a $0,5 \cdot d$, sendo d o diâmetro do pino metálico da ligação, e como placas grossas aquelas que possuem espessura maior ou igual d , com uma tolerância de $0,1 \cdot d$. Para ligações com chapas entre o intervalo de placas finas e grossas, a norma europeia recomenda que seja calculada a capacidade de carga da ligação por meio de interpolação linear. Nas ligações entre madeira e elementos de aço, a CEN EN 1995 1-1:2004 prescreve que deve ser verificada também a resistência das chapas de aço.

A Figura 3.10 ilustra os possíveis modos de falha para ligações entre madeira e aço, com seus respectivos modos de falha, nomeados de (a) a (e). Os modos de falha (a) e (b) são correspondentes a ligações com placas classificadas como finas, e os modos de falha de (c) a (e) correspondem a ligações com placas classificadas como grossas.

Figura 3.10 – Modos de falha em ligações de corte simples entre madeira e elementos de aço



Fonte: Adaptado de CEN EN 1995 1-1:2004

As Equações 3.16 e 3.17 são para ligações em corte simples entre madeira e placas de aço classificadas como finas.

$$(a) \quad F_{v,Rk} = 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.16)$$

$$(b) \quad F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}} \quad (3.17)$$

As Equações 3.18 a 3.20 são para ligações em corte simples entre madeira e placas de aço classificadas como grossas.

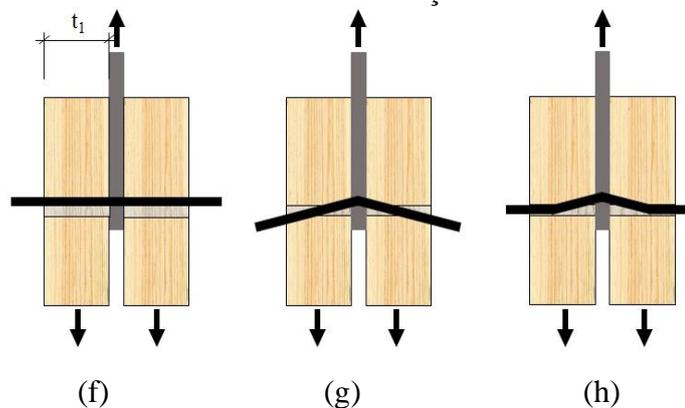
$$(c) \quad F_{v,Rk} = f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.18)$$

$$(d) \quad F_{v,Rk} = f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.19)$$

$$(e) \quad F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}} \quad (3.20)$$

A Figura 3.11 ilustra os possíveis modos de falha para ligações em corte duplo, com um elemento de aço posicionado entre as peças de madeira, nomeados de (f) a (h). Em seguida é apresentado o conjunto de equações (3.21 a 3.23) para os respectivos modos de falha.

Figura 3.11 - Modos de falha em ligações de corte duplo entre madeira e elemento central de aço



Fonte: Adaptado de CEN EN 1995 1-1:2004

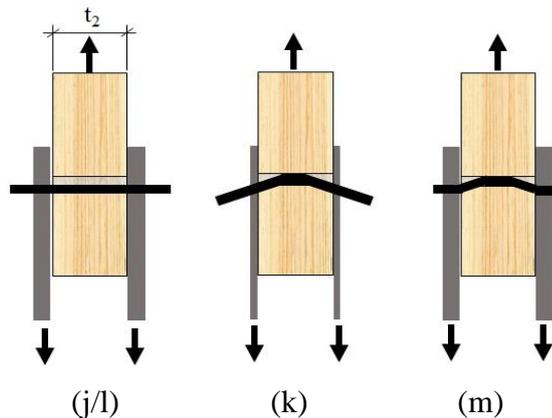
$$(f) \quad F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (3.21)$$

$$(g) \quad F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.22)$$

$$(h) \quad F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.23)$$

A Figura 3.12 ilustra os modos de falha para ligações em corte duplo, entre elementos de madeira e placas de aço posicionadas em ambos os lados, nomeados de (j) a (m). Os modos de falha (j) e (k) correspondem a ligações com placas de aço finas, e os modos de falha (l) e (m) correspondem a ligações com placas de aço grossas. Em seguida são apresentadas as respectivas equações para cada modo de falha.

Figura 3.12 – Modos de falha em ligações de corte duplo entre madeira e elementos externos de aço



Fonte: Adaptado de CEN EN 1995 1-1:2004

As Equações 3.24 e 3.25 são para ligações com placas de aço finas nas extremidades e pinos com dupla seção de corte.

$$(j) \quad F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (3.24)$$

$$(k) \quad F_{v,Rk} = 1,15 \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3.25)$$

As Equações 3.26 e 3.27 são para ligações com placas de aço grossas nas extremidades e pinos com dupla seção de corte.

$$(l) \quad F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (3.26)$$

$$(m) \quad F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad (3.27)$$

A resistência ao arrancamento ($F_{ax,Rk}$) deve ter seu valor limitado como uma porcentagem da parcela de Johansen. A CEN EN 1995 1-1:2004 apresenta equações empíricas para a determinação da resistência ao arrancamento de alguns tipos de pregos e parafusos, e recomenda que esta parcela deve ser tomada como nula quando não comprovada experimentalmente.

É interessante observar que em ligações, seja entre elementos de madeira ou entre madeira e aço, cujo modo de falha inclui a existência de uma rótula plástica no pino metálico, o embutimento na peça que possui a rótula sucede próximo à borda, ou seja, em ligações deste tipo em painéis de CLT, dependendo da espessura das camadas do painel, a camada externa será a mais solicitada por embutimento.

3.3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO EM MADEIRA SERRADA

Os modelos propostos pelas normas brasileira, europeia e americana para determinação da resistência ao embutimento da madeira, tanto experimentalmente quanto analiticamente, são diferentes. A principal diferença entre os modelos experimentais está nos limites de ensaio. Em relação aos modelos analíticos, no modelo brasileiro a obtenção da resistência ao embutimento é a partir de relações com a resistência à compressão, já as normas europeia e americana apresentam equações empíricas. A seguir são apresentados os critérios das normas ABNT NBR 7190:1997, CEN EN 1995 1-1:2004 e BS EN 383:2007, ANSI/AWC NDS:2015 e ASTM D5764-97a:2018 para obtenção da resistência ao embutimento experimental e analiticamente.

3.3.1 Resistência ao Embutimento de acordo com ABNT NBR 7190:1997

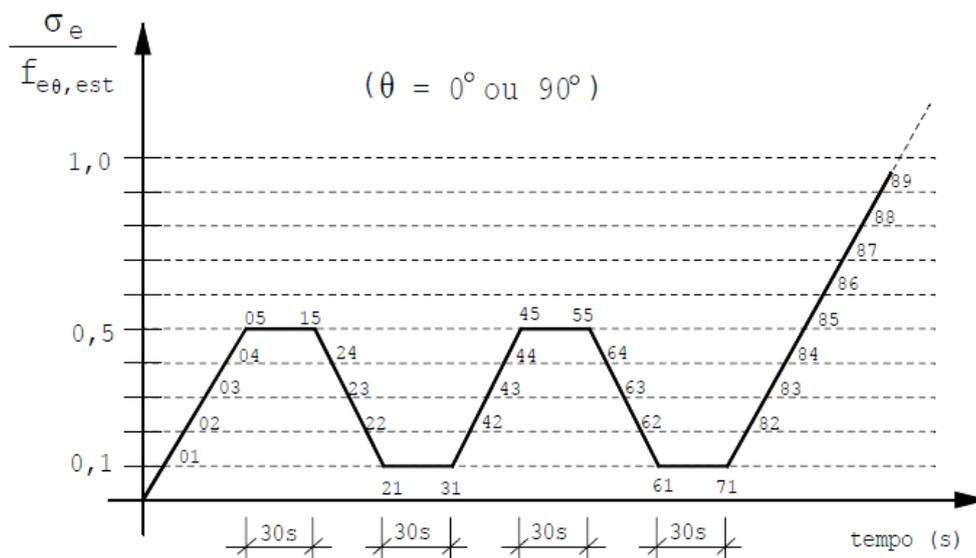
A norma brasileira para o projeto de estruturas de madeira, ABNT NBR 7190:1997, define a resistência ao embutimento da madeira (f_e) como a relação entre a força que causa

deformação específica residual de 2‰ ($F_{e,2‰}$) e a área de embutimento do pino (A), conforme a Equação 3.28, em que t é a espessura da peça de madeira e d é o diâmetro do pino.

$$f_e = \frac{F_{e,2‰}}{A} = \frac{F_{e,2‰}}{t \cdot d} \quad (3.28)$$

De acordo com o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, os corpos de prova para a determinação experimental da resistência ao embutimento devem ser sujeitos a dois ciclos de carga e descarga, até 50% da força de ruptura estimada, e posterior carregamento até a ruptura, segundo o diagrama apresentado na Figura 3.13. A força de ruptura estimada corresponde à força máxima de ensaio de um corpo de prova gêmeo.

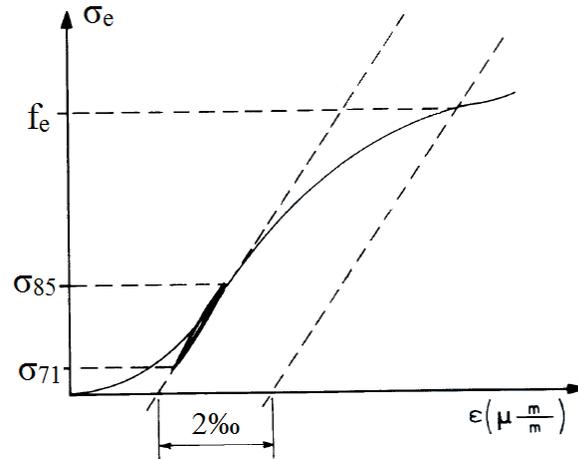
Figura 3.13 – Diagrama de carregamento para ensaios de embutimento



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Segundo a norma brasileira, a resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras é dada a partir do diagrama de tensão-deformação específica, como mostra a Figura 3.14, obtido a partir do último ciclo de carregamento, ou seja, a tensão correspondente aos pontos 71 e 85 do diagrama da Figura 3.13. A deformação específica, ϵ , é o deslocamento relativo entre o pino metálico e a base não carregada, que deve estar distanciada em pelo menos 14d.

Figura 3.14 – Diagrama tensão-deformação específica de embutimento

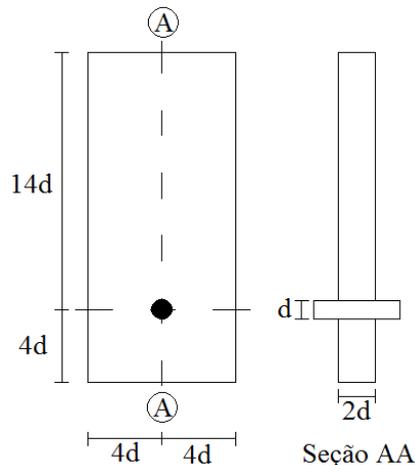


Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190:1997

Os corpos de prova para ensaio de embutimento paralelo às fibras devem ter seção prismática, com comprimento ao longo das fibras de $18d$, largura de $8d$ e espessura de $2d$, respeitando a relação $\beta=t/d=2$. No caso de ensaio perpendicular às fibras, as dimensões do corpo de prova permanecem as mesmas, tornando-se o eixo maior na direção perpendicular às fibras da madeira, como ilustra a Figura 3.15.

Segundo Valle (1999), a norma brasileira limita a relação entre a espessura do corpo de prova e o diâmetro do pino metálico com o objetivo de atribuir à ligação pino-madeira um comportamento rígido, de modo que o pino permaneça indeformável e os deslocamentos observados sejam apenas referentes ao embutimento da madeira.

Figura 3.15 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190:1997

Na ausência de realização de ensaios, a norma brasileira recomenda que sejam utilizadas as relações expressas nas Equações 3.29 e 3.30 para a determinação da resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, sendo $f_{c,0}$ a resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{e,0} = f_{c,0} \quad (3.29)$$

$$f_{e,90} = 0,25 \cdot f_{c,0} \cdot \alpha_e \quad (3.30)$$

O coeficiente α_e é dado em função do diâmetro do pino, conforme a Tabela 3.1. É possível observar que α_e considera que quanto maior o diâmetro do pino, menor a resistência ao embutimento da madeira.

Tabela 3.1 - Valores de α_e para diferentes diâmetros de pino (d)

d (cm)	≤0,62	0,95	1,25	1,60	1,90	2,20	2,50	3,10	3,80	4,40	5,00	≥7,50
α_e	2,50	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,10	1,07	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Em situações de carregamento inclinado em um ângulo α qualquer, a ABNT NBR 7190:1997 determina que deve ser utilizada a fórmula de Hankinson para a determinação da resistência ao embutimento, expressa na Equação 3.31.

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{c,0} \cdot f_{c,90}}{f_{c,0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (3.31)$$

3.3.2 Resistência ao Embutimento de acordo com a CEN EN 1995 1-1:2004

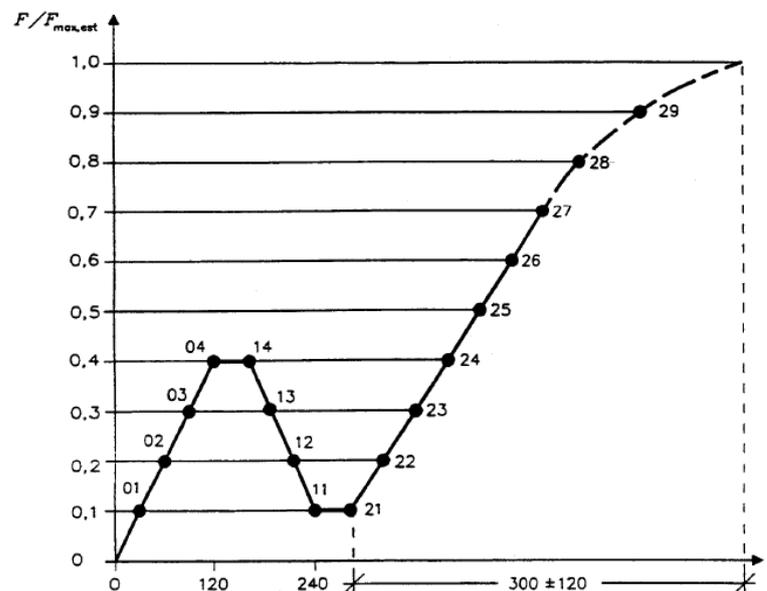
Para a determinação experimental da resistência ao embutimento, a CEN EN 1995 1-1:2004 indica que devem ser seguidas as recomendações da norma BS EN 383:2007 - *Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*. Essa norma determina que a resistência ao embutimento (f_h) é a relação entre a força máxima aplicada no corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) e o produto entre a espessura da peça de madeira (t) e o diâmetro do pino (d), como mostra a Equação 3.32. A força máxima

corresponde à força de ruptura do corpo de prova ou à força que provoca um deslocamento relativo de 5 mm, o que ocorrer primeiro.

$$f_h = \frac{F_{h, \text{máx}}}{t \cdot d} \text{ ou } f_h = \frac{F_{h, 5\text{mm}}}{t \cdot d} \quad (3.32)$$

O procedimento para a aplicação do carregamento durante o ensaio, de acordo com a BS EN 383:2007, é o mesmo para ensaios nas direções paralela e perpendicular às fibras. A Figura 3.16 apresenta o diagrama de carregamentos a ser adotado, em que F_{est} é a força estimada de ensaio, que pode ser obtida com base na experiência, cálculos ou através de ensaios preliminares. A aplicação da força de ensaio consiste em um incremento de força de $0,4F_{\text{est}}$ por minuto, e ao atingir 40% de F_{est} , a força deve ser mantida por 30 segundos. Após esse período, procede-se à descarga, mantendo o valor do incremento de força anterior, agora negativo, até aos 10% de F_{est} , os quais devem mantidos por mais 30 segundos. Posteriormente segue-se o carregamento até a força máxima ser atingida ou a deformação atingir 5 mm.

Figura 3.16 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento

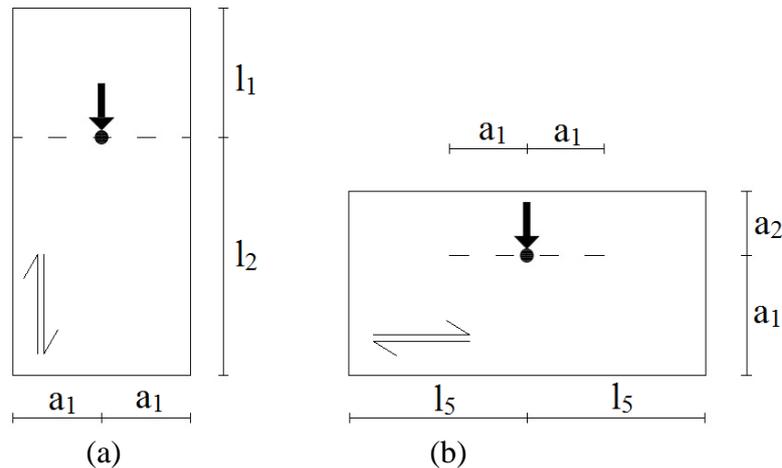


Fonte: BS EN 383:2007

As dimensões dos corpos de prova para ensaios de embutimento variam de acordo com o tipo de pino metálico e com a direção de aplicação da força, segundo a BS EN

383:2007. As dimensões mínimas para os corpos de prova na direção paralela e perpendicular às fibras são apresentadas na Figura 3.17 e na Tabela 3.2.

Figura 3.17 – Dimensões mínimas dos corpos de prova para ensaios de embutimento (a) paralelo às fibras e (b) perpendicular às fibras



Fonte: Adaptado da BS EN 383:2007

A norma europeia recomenda que a espessura dos corpos de prova seja maior que $1,5d$ e menor que $4d$, com o objetivo de evitar que ocorram deformações excessivas por flexão nos pinos.

Tabela 3.2 – Dimensões mínimas dos corpos de prova para ensaios de embutimento

Dimensões ^a	Pregos sem pré-furação	Pregos com pré-furação	Parafusos e pinos	Direção das fibras
a_1	5d	5d	3d	
l_1	20d	12d	7d	
l_2	20d	12d	7d	Paralelo às fibras
l_3	20d	12d	7d	
l_4	40d	40d	30d	
a_1	5d	5d	5d	
a_2	5d	5d	5d	Perpendicular às fibras
l_5	20d	20d	20d	

^aDimensões apresentadas na Figura 3.17

Fonte: Adaptado da BS EN 383:2007

A determinação da resistência ao embutimento de forma analítica, segundo a CEN EN 1995 1-1:2004, pode ser feita de acordo com a Equação 3.33, proposta para resistência característica ao embutimento na direção paralela às fibras ($f_{h,0,k}$), em que ρ_k é a densidade aparente característica da madeira, em kg/m^3 , e d é o diâmetro do pino, em mm.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (3.33)$$

A Equação 3.33 é limitada para o caso de ligações em madeira serrada, MLC ou LVL, com parafusos passantes ou autoatarraxantes de diâmetro menor que 30 mm, ou com pregos inseridos com pré-furação. Para pregos, a Equação 3.33 pode ser utilizada independente da direção das fibras.

Para ligações em madeira serrada, MLC ou LVL, com pregos de até 8 mm de diâmetro, ou parafusos autoatarraxantes de até 6 mm de diâmetro, inseridos sem pré-furação, a resistência ao embutimento pode ser obtida de acordo com a Equação 3.34, independente da direção das fibras.

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (3.34)$$

Para a obtenção da resistência ao embutimento perpendicular às fibras, ou em casos de forças aplicadas formando um ângulo α em relação às fibras da madeira, a CEN EN 1995 1-1:2004 apresenta a Equação 3.35, uma versão modificada da fórmula de Hankinson.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (3.35)$$

O parâmetro k_{90} é apresentado nas Equações 3.36 e 3.37, para as folhosas (*hardwoods*) e para as coníferas (*softwoods*), respectivamente, em função do diâmetro do pino metálico, em mm.

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (3.36)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (3.37)$$

3.3.3 Resistência ao Embutimento de acordo com ANSI/AWC NDS:2015

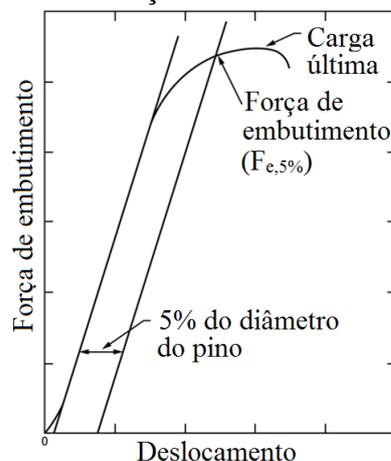
A norma norte-americana de estruturas de madeira, ANSI/AWC NDS:2015, indica que para a determinação experimental da resistência ao embutimento devem ser seguidas as recomendações da norma ASTM D5764-97a:2018 - *Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products*.

O método de ensaio norte-americano utiliza o modo gráfico, em que a resistência ao embutimento (f_e) é determinada por meio da relação entre a força aplicada no corpo de prova, que provoca um deslocamento residual de 5% do diâmetro do pino metálico ($F_{e,5\%}$), e o produto entre a espessura da peça de madeira (t) e o diâmetro do pino (d), como mostra a Equação 3.38.

$$f_e = \frac{F_{e,5\%}}{t \cdot d} \quad (3.38)$$

A norma ASTM D5764-97a:2018 não descreve um procedimento de carregamentos a ser seguido e não prevê a estimativa de força de ruptura do corpo de prova, sugerindo apenas que seja aplicada uma taxa de carregamento de tal modo que a ruptura do corpo de prova aconteça entre 1 e 10 minutos. A Figura 3.18 ilustra a obtenção da força de embutimento a partir da curva de força-deslocamento, cujo método consiste em traçar uma linha paralela ao primeiro trecho linear, deslocada a uma distância de 5% do diâmetro do pino metálico.

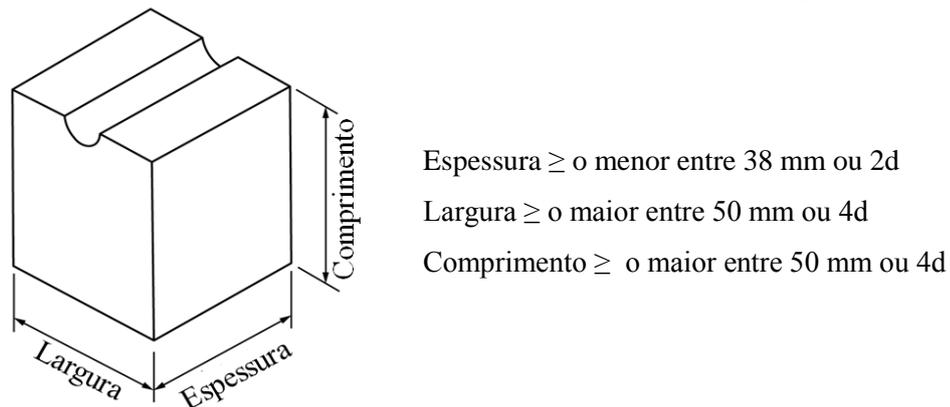
Figura 3.18 – Definição da força de embutimento a partir da curva força-deslocamento



Fonte: Adaptado de ASTM D5764-97a:2018

O modelo dos corpos de prova não se diferencia para as direções paralela e perpendicular às fibras da madeira. Eles devem possuir o formato de um paralelepípedo retangular, com metade de um furo em uma face, onde será apoiado o pino metálico. A Figura 3.19 ilustra o modelo do corpo de prova e as dimensões mínimas estabelecidas pela ASTM D5764-97a:2018, sendo d o diâmetro do pino metálico.

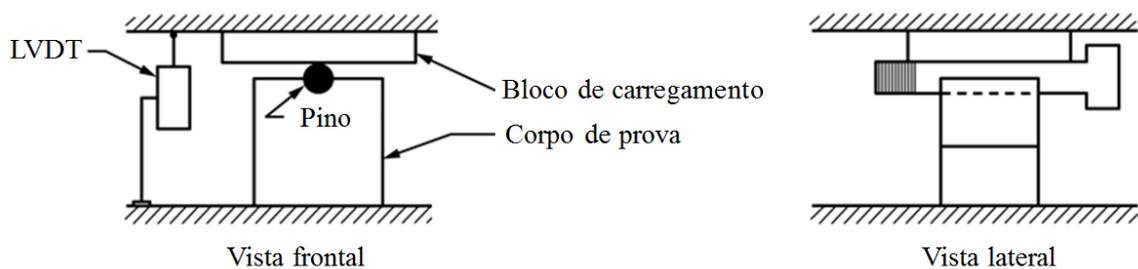
Figura 3.19 – Modelo e dimensões mínimas do corpo de prova



Fonte: Adaptado de ASTM D5764-97a:2018

A ASTM D5764-97a:2018 estabelece a realização de ensaios de embutimento apenas com carregamento de compressão, que neste modelo de corpo de prova deve ser aplicado de maneira uniforme ao longo de todo o comprimento do pino metálico, como mostra o esquema da Figura 3.20.

Figura 3.20 – Esquema de ensaio



Fonte: Adaptado de ASTM D5764-97a:2018

Para a determinação analítica da resistência ao embutimento, a norma ANSI/AWC NDS:2015 apresenta equações em função do diâmetro do pino metálico (d) e da densidade relativa da madeira (G). Esta é dada pela razão entre a massa de uma amostra de madeira seca

ao forno e a massa de um volume de água igual ao volume da madeira, sendo então G um parâmetro adimensional.

Para pinos metálicos com diâmetro menor que 6,35 mm (1/4”), a norma norte-americana apresenta apenas uma equação para obtenção da resistência ao embutimento, independente da direção do carregamento em relação às fibras da madeira, conforme a Equação 3.39, sendo f_e dado em MPa.

$$f_e = 114 \cdot G^{1,84} \quad (3.39)$$

Para pinos metálicos com diâmetro entre 6,35 mm (1/4”) e 25,4 mm (1”), a resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras pode ser calculada por meio das Equações 3.40 e 3.41, respectivamente, em que G é adimensional, o diâmetro (d) deve ser inserido em mm, e a resistência (f_e) é dada em MPa.

$$f_{e,0} = 77 \cdot G \quad (3.40)$$

$$f_{e,90} = 212 \cdot G^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (3.41)$$

Para as situações em que o carregamento ocorre em ângulos diferentes de 0° e 90° , a ANSI/AWC NDS:2015 propõe que a resistência ao embutimento seja calculada pela fórmula de Hankinson, expressa na Equação 3.42.

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0} \cdot f_{e,90}}{f_{e,0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{e,90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (3.42)$$

3.3.4 Trabalhos Técnicos-Científicos Acerca da Resistência ao Embutimento da Madeira Serrada

O embutimento de pinos metálicos na madeira é um fenômeno complexo, por sofrer influência de vários fatores como a espessura da peça e densidade da madeira, diâmetro do pino metálico, método de inserção do pino (com ou sem pré-furação) e direção de aplicação da força em relação às fibras da madeira. Como a resistência ao embutimento é um parâmetro

imprescindível no dimensionamento de ligações com pinos metálicos, ao longo dos anos diversos pesquisadores têm investigado este fenômeno, buscando um melhor entendimento dos parâmetros influentes, assim como um melhor equacionamento e métodos de ensaio para a determinação do valor da resistência ao embutimento da madeira e de produtos derivados.

Uma abrangente pesquisa foi realizada por Whale, Smith e Larsen (1987) e Whale e Smith (1989) acerca do embutimento em madeiras folhosas, coníferas, madeira compensada (*plywood*) e *tapered hardboard*, com pregos e parafusos, enquanto Ehlbeck e Werner (1992) estudaram o embutimento em madeiras com diferentes espécies de folhosas e coníferas carregadas em diferentes ângulos. Esses estudos deram origem às equações de embutimento da CEN EN 1995 1-1:2004 e ao método de ensaio proposto na BS EN 383:2007, que consideram como fatores principais na determinação da resistência ao embutimento o diâmetro do pino metálico e a densidade da madeira, tanto para a direção paralela quanto para a direção perpendicular às fibras.

O desenvolvimento da abordagem norte-americana para determinação experimental e analítica da resistência ao embutimento é baseado no trabalho de Wilkinson (1991), que realizou um total de 379 ensaios, utilizando cinco diâmetros de parafusos, três diâmetros de pregos e sete espécies de coníferas. A pesquisa de Wilkinson (1991) resultou em resultados contraditórios com as pesquisas europeias, no que diz respeito à influência do diâmetro para a direção paralela às fibras, pois na concepção do autor, a influência do diâmetro nessa direção foi tão pequena que pode ser negligenciada, considerando assim uma diminuição da resistência ao embutimento em função do diâmetro do pino metálico apenas para carregamentos perpendiculares às fibras da madeira.

Posteriormente, houve importantes trabalhos com o objetivo de validar os métodos de ensaio propostos, bem como as equações analíticas e criar uma base de dados com resultados de ensaios de embutimento utilizando madeiras de diferentes espécies e diversos pinos metálicos de diferentes diâmetros.

Sawata e Yasumura (2002) realizaram ensaios de compressão e ensaios de embutimento segundo versões preliminares da EN 383, com madeiras coníferas das espécies *Picea jezoensis* Carriere e *Abies sachalinensis*, com densidades entre 359 kg/m³ e 460 kg/m³, para as direções paralela e perpendicular às fibras da madeira, com pinos metálicos de 8 mm, 12 mm, 16 mm e 20 mm de diâmetro, totalizando aproximadamente 1000 corpos de prova de embutimento e 500 de compressão. Diferentemente de outros trabalhos, Sawata e Yasumura

(2002) mantiveram uma espessura fixa nos corpos de prova de embutimento em 32 mm, de modo que atendesse à exigência da norma europeia para todos os diâmetros utilizados (espessura entre 1,5d e 4d). O procedimento de ensaio foi realizado seguindo as prescrições da EN 383, porém além da força de embutimento que corresponde à força máxima de até 5 mm de deslocamento, também foi avaliada a força que provoca um deslocamento residual correspondente a 5% do diâmetro.

Analisando a resistência ao embutimento, tanto pelo método de 5% do diâmetro quanto pela força máxima que provoca um deslocamento de 5 mm, Sawata e Yasumura (2002) observaram que o diâmetro teve pouca influência na resistência ao embutimento na direção paralela às fibras. Na direção perpendicular às fibras, utilizando o método de 5% do diâmetro, observaram que a resistência ao embutimento sofre pouca influência do diâmetro do pino metálico, porém utilizando o método de 5 mm de deslocamento, a resistência diminui com o aumento do diâmetro do pino. Independentemente do método de obtenção da força de embutimento utilizado, a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras foi superior à resistência perpendicular às fibras.

Com base nos ensaios de compressão, Sawata e Yasumura (2002) observaram uma correspondência entre a resistência ao embutimento e a compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$). Assim sendo, os autores propuseram uma relação entre as resistências para obtenção da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ($f_{e,0,5\%} = f_{e,0,5mm} = 0,9.f_{c,0}$), e equações para determinação da resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras, uma em função apenas da resistência à compressão para o método de 5% do diâmetro ($f_{e,90,5\%} = 0,4.f_{c,0}$), e outra em função do diâmetro do pino metálico (d) e da resistência à compressão paralela às fibras para o método de 5 mm de deslocamento ($f_{e,90,5mm} = [0,745 - 0,016.d].f_{c,0}$).

Além disso, Sawata e Yasumura (2002) constataram uma grande relação da resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras com a densidade da madeira e propuseram relações para a determinar estas resistências por meio da densidade ($f_{c,0} = 0,0973\rho$; $f_{c,90} = 0,00932\rho$).

Sandhaas et al. (2013) realizaram ensaios de embutimento na direção paralela às fibras, segundo o método da EN 383, utilizando duas espécies de madeiras coníferas: *Picea Abies*, *Fagus sylvaticak*, e três espécies de folhosas de regiões tropicais: *Lophira alata* (Azobé) da África, *Peltogyne sp.* (Coração Púrpuro) e *Dipteryx odorata* (Cumarú) da América do Sul, utilizando parafusos de 12 mm e 24 mm de diâmetro. Os autores compararam os

resultados experimentais com resultados analíticos obtidos com as equações propostas na CEN EN 1995 1-1:2004, e observaram que a influência do diâmetro do pino metálico na resistência ao embutimento na direção paralela às fibras é menor do que aquela considerada pela CEN EN 1995 1-1:2004. Devido a esta pequena influência do diâmetro, Sandhaas et al. (2013) propuseram uma equação para embutimento paralelo às fibras baseada apenas na densidade da madeira ($f_{h,0}=0,082\rho$). Os autores ainda concluíram que para madeiras de baixa densidade, a norma europeia superestima os valores de resistência ao embutimento.

Notam-se conclusões semelhantes nas pesquisas de Sawata e Yasumura (2002) e Sandhaas et al. (2013), tendo em vista que ambas propõem equações para obtenção analítica da resistência ao embutimento paralelo às fibras, desconsiderando a influência do diâmetro do pino metálico, resultando apenas em relações com a densidade da madeira.

Em contrapartida, a pesquisa experimental realizada por Terrin, Góes e Pletz (2018), também seguindo o método de ensaio da EN 383, utilizando quatro espécies diferentes de madeiras brasileiras: *Tabebuia cassinoides* (Caixeta), *Erisma uncinatum* (Cedrinho), *Apuleia leiocarpa* (Garapeira) e *Mezilaurus itauba* (Itaúba), com pinos de 3 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm de diâmetro, mostrou que a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras decresce conforme maior o diâmetro do pino metálico.

Schoenmakers, Jorissen e Leijten (2010) estudaram a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras. Os autores realizaram ensaios segundo a EN 383, com madeira da espécie *Picea Abies* ($\rho_m= 450 \text{ kg/m}^3$) e parafusos de 8 mm e 16 mm de diâmetro, e também variaram a distância entre o parafuso e a borda carregada para avaliar se este parâmetro tem influência na determinação da resistência ao embutimento. Com os resultados obtidos, Schoenmakers, Jorissen e Leijten (2010) concluíram que o embutimento é um fenômeno local, que não depende da distância da borda carregada, e assim como Sawata e Yasumura (2002), observaram que quanto maior o diâmetro do pino metálico, menor a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras.

Vale observar que a conclusão de Sawata e Yasumura (2002) e Schoenmakers, Jorissen e Leijten (2010), para a direção perpendicular às fibras, está de acordo com as equações analíticas apresentadas pelas normas brasileira, europeia e americana, que consideram diminuição da resistência ao embutimento quanto maior o diâmetro do pino metálico.

Santos et al. (2010) compararam os métodos de ensaio da EN 383 e da ASTM D5764-97a por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas. Os experimentos foram realizados para as direções paralela e perpendicular às fibras, com madeira da espécie *Pinus Pinaster*, com densidade entre 550,1 kg/m³ e 615,5 kg/m³, e pino metálico com diâmetro de 14 mm. A espessura escolhida para os corpos de prova foi de 30 mm, de modo que foram atendidas as recomendações de ambas as normas. Foram ensaiados 48 corpos de prova segundo o método europeu, e 52 corpos de prova segundo o método americano. Como a ASTM D5764-97a não prescreve a realização de ciclos de ensaio, foi aplicado um carregamento monotônico até a ruptura do corpo de prova. Um resumo dos ensaios experimentais é apresentado na Tabela 3.3. Comparando os resultados obtidos por ambas as normas, Santos et al. (2010) observaram que os resultados foram bem próximos para a direção paralela às fibras, já para a direção perpendicular os resultados de acordo a ASTM D5764-97a foram 36% maior. Os autores citam que parte dessa discrepância dos resultados pode ser justificada pela maior densidade média dos corpos de prova utilizados nos experimentos segundo a norma americana.

Tabela 3.3 – Resumo dos experimentos de Santos et al. (2010)

Norma	Direção do carregamento em relação às fibras	Densidade média - ρ_m (kg/m³)	Resistência ao embutimento média - $f_{h,m}$ (MPa)
EN 383	Paralelo	570,1	46,4
	Perpendicular	550,1	21,1
ASTM D5764-97a	Paralelo	584,0	46,2
	Perpendicular	615,5	28,6

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2010)

Em concordância com Sawata e Yasumura (2002), os resultados de Santos et al. (2010) também mostram que a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras é superior à resistência na direção perpendicular às fibras.

Devido às diferenças entre a norma brasileira, europeia e americana, seja no procedimento de ensaio ou nas equações analíticas para a determinação da resistência ao embutimento, pesquisas como de Almeida (2014) e Molina et al. (2017a, 2017b) foram

conduzidas no Brasil, com o principal objetivo de comparar resultados obtidos segundo os três métodos.

Almeida (2014) realizou ensaios de compressão segundo a norma brasileira, ensaios de embutimento na direção paralela às fibras de acordo a norma brasileira, europeia e americana, e na direção perpendicular às fibras de acordo com a norma europeia e americana, utilizando madeiras das espécies: *Schizolobium amazonicum* (Paricá), *Pinus elliottii*, *Pinus oocarpa*, *Hymenaea spp.* (Jatobá), Lyptus® (híbrido de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*) e *Goupia glabra* (Cupiúba), com pinos metálicos de 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm. Para todas as espécies de madeira e diâmetros de pinos metálicos utilizados, segundo os critérios de cálculo e ensaio da ABNT NBR 7190:1997, a resistência analítica foi superior à resistência experimental. Comparando os resultados obtidos experimentalmente, o procedimento da norma europeia resultou em valores superiores de resistência ao embutimento, seguido pelos valores obtidos através dos métodos da norma americana e brasileira, nesta ordem. Desta maneira, o autor concluiu que o critério para determinação da resistência ao embutimento, proposto pela BS EN 383:2007, é mais adequado que o critério proposto pela ABNT NBR 7190:1997.

Em Molina et al. (2017a) e Molina et al. (2017b) foram conduzidos ensaios de compressão na direção paralela às fibras, segundo a norma brasileira, e ensaios de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras, seguindo as prescrições da norma brasileira, da norma europeia e da norma americana, com madeiras das espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*, utilizando um pino metálico de 6,35 mm (1/4") de diâmetro. Em concordância com os resultados de Almeida (2014), seguindo os critérios da ABNT NBR 7190:1997, os resultados experimentais foram inferiores aos analíticos. Já segundo o método da BS EN 383:2007, os resultados experimentais foram superiores aos analíticos, tanto na direção paralela quando na direção perpendicular às fibras da madeira, para as duas espécies ensaiadas. Comparando os resultados experimentais, para todos os casos estudados, os resultados obtidos de acordo com as normas europeia e americana foram superiores aos resultados segundo a norma brasileira. Por consequência, Molina et al. (2017a, 2017b) concluíram que o método de ensaio adotado pela norma brasileira para determinação da resistência ao embutimento, baseado na deformação residual de 2%, é incomum e resulta em valores menores de resistência quando comparado a outros documentos normativos, que

permitem deslocamentos maiores, o que tem influência direta na resistência das ligações e no número de conectores necessários.

Portanto, constata-se que para o embutimento na direção paralela às fibras há divergências na literatura acerca da influência do diâmetro do pino metálico, tanto nos resultados experimentais das pesquisas citadas quanto em relação às equações dos documentos normativos. Em contrapartida, para a direção perpendicular às fibras, os trabalhos da literatura e as equações das normas brasileira, europeia e americana concordam que quanto maior o diâmetro do pino metálico, menor será a resistência ao embutimento.

Em relação ao método de ensaio, os trabalhos citados concordam que o método apresentado pela BS EN 383:2007 é mais adequado quando comparado com o método da ABNT NBR 7190:1997, tanto por resultar em maiores valores de embutimento, que resultam em menor número de conectores calculados nas ligações, quanto por apresentar melhores dimensões de corpos de prova para a direção perpendicular às fibras.

3.4 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO EM PAINÉIS DE CLT

Até o momento, os estudos mais relevantes relativos à resistência ao embutimento em painéis de CLT foram conduzidos por Blass e Uibel (2007), na Alemanha, e por Kennedy et al. (2014a), no Canadá. Nesses trabalhos foram realizados diversos ensaios de embutimento em CLT, seguindo os métodos propostos por normas vigentes naquelas localidades para a determinação de embutimento em madeira serrada e outros produtos derivados de madeira, com o objetivo de buscar equações analíticas para a determinação da resistência ao embutimento em CLT.

Blass e Uibel (2007) realizaram diversos ensaios e propuseram equações para a determinação da resistência ao arrancamento e resistência ao embutimento no plano e na lateral de painéis de CLT, além de equações para determinar a capacidade resistente de ligações entre painéis de CLT e peça metálica. As equações propostas por eles para embutimento, assim como as equações da CEN EN 1995 1-1:2004, dependem da densidade da madeira e do diâmetro do pino metálico. Por ser o foco do presente trabalho, apenas os resultados e equações para embutimento no plano do painel serão apresentados.

Kennedy et al. (2014a) realizaram testes em CLT e compararam com resultados analíticos de acordo com os documentos normativos americano, canadense e europeu, e

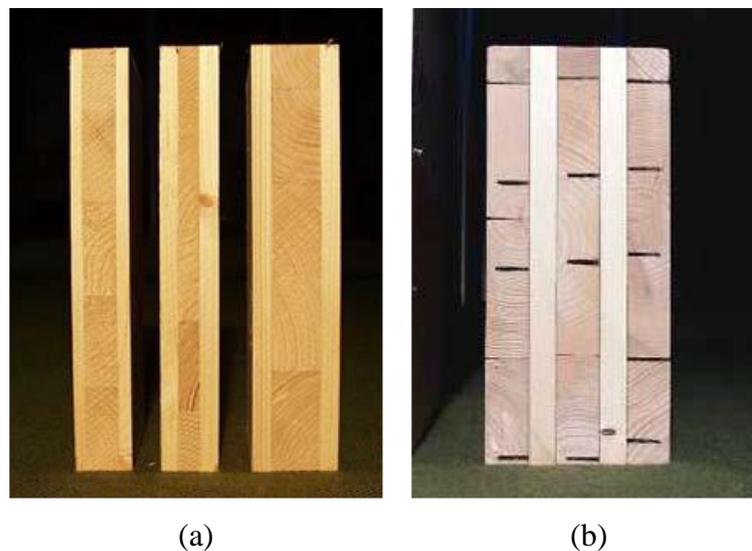
propuseram uma equação para determinação da resistência ao embutimento em painéis de CLT, que independe do diâmetro do pino e da configuração dos painéis.

A seguir são apresentados detalhadamente ambos os trabalhos, os métodos de ensaio utilizados e as equações propostas.

3.4.1 Equações Propostas por Blass e Uibel (2007)

Para determinar a resistência ao embutimento da CLT, Blass e Uibel (2007) ensaiaram painéis de madeira da espécie *Picea Abies* produzidos por quatro fabricantes, com três e cinco camadas e diferentes configurações. Alguns painéis foram produzidos com pequenos espaços entre as lamelas adjacentes, limitados a no máximo 6 mm, como pode ser visto na Figura 3.21b, pois segundo os autores, este é um parâmetro que influencia na determinação da resistência ao embutimento em painéis de CLT.

Figura 3.21 – Seção transversal de painéis de CLT (a) sem espaços entre as lamelas e (b) com espaço entre as bordas das lamelas



Fonte: Blass e Uibel (2007)

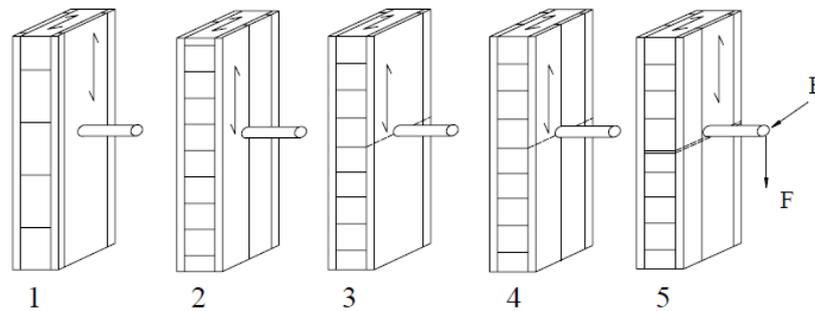
As densidades dos painéis de CLT utilizados nos corpos de prova (CPs) de embutimento, medidas sob temperatura de 20°C e 65 % de umidade relativa, são apresentadas na Tabela 3.4. Com os resultados de densidades obtidos para todos os painéis, os autores propuseram que a densidade característica de painéis de CLT, produzidos com *Picea Abies*, seja tomada como 400 kg/m³.

Tabela 3.4 – Resultados de densidade e umidade para os painéis de CLT

Fabricante/ Espessura da CLT (mm)	Número de CPs	Densidade (kg/m ³)			Umidade da madeira (%)	
		Média	Desvio padrão	5º quantil	Média	Desvio padrão
1 / 85	110	471	26,8	428	10,9	0,66
2/ 60 e 78	110	445	34,2	393	11,5	0,46
3/ 17 4 / 12;25 e 42	397	462	28,3	419	9,97	1,12

Fonte: Blass e Uibel (2007)

No total, foram realizados 620 ensaios de embutimento, de acordo com a BS EN 383:2007, com pinos metálicos lisos, pregos e parafusos de diferentes diâmetros, carregados perpendicularmente ao plano da CLT, a 0°, 45° e 90° em relação às fibras da camada externa do painel. Além disso, variou-se também a posição do pino em relação às juntas entre as lamelas, como mostra a Figura 3.22.

Figura 3.22 – Configurações dos corpos de prova de Blass e Uibel

Fonte: Blass e Uibel (2007)

Na configuração 1, os pinos metálicos estão em uma região sem juntas. As configurações de 2 a 4 são caracterizadas pelo posicionamento dos pinos metálicos na região das juntas, e na configuração 5 o pino metálico é introduzido diretamente por cima de uma junta e carregado na direção desta.

Na Tabela 3.5 apresenta-se um resumo das informações imprescindíveis acerca dos ensaios de embutimento conduzidos por Blass e Uibel (2007). Nessa tabela constam as informações relativas aos diâmetros utilizados para cada tipo de pino metálico, espessura e

configuração das camadas dos painéis de CLT ensaiados, inclinação da força aplicada em relação às fibras das camadas externas da CLT, assim como os resultados médios obtidos para cada direção de carregamento.

Tabela 3.5 – Visão geral dos ensaios de embutimento de Blass e Uibel (2007)

Meios de ligação		CLT (mm)		α em graus	Nº total de CPs	0° f_h , médio (N/mm ²)	90° f_h , médio (N/mm ²)	45° f_h , médio (N/mm ²)
Tipo	d (mm)	Espessura total “t”	Camadas					
Pino Liso	24	85	17-17-17-17-17	0; 90	40	30,4	27,9	-
		78	19-40-19	0; 45; 90	60	23,1	25,8	23,2
		42	8,5-7,5-10-7,5-8,5	0	20	30,3	-	-
Pino Liso	20	85	17-17-17-17-17	0; 45; 90	70	32,3	29,3	29,2
		42	8,5-7,5-10-7,5-8,5	0; 90	40	30,4	29,7	-
Pino Liso	16	60	19-22-19	0; 90	50	29,4	26,5	-
		17	5,3-6,4-5,3	0; 90	40	32,3	29,2	-
		25	4,5-4,8-6,5-4,8-4,5	0; 45; 90	80	32,3	28,7	30,8
Pino Liso	12	12	3,5-5-3,5	0	20	35,6	-	-
Pino Liso	8	12	3,5-5-3,5	0	20	41,3	-	-
Parafuso	12	17	5,3-6,4-5,3	0; 90	40	20	23,4	
Parafuso	8	12	3,5-5-3,5	0; 45; 90	60	27,3	30,3	25,2
Prego	6	12	3,5-5-3,5	0	20	37,5		
Prego	4,2	12	3,5-5-3,5	0; 45; 90	60	38,1	43,4	36,9

Fonte: Adaptado de Blass e Uibel (2007)

Dos ensaios com pinos metálicos lisos, foi feita uma análise de regressão múltipla com os resultados de 438 ensaios, resultando na Equação 3.43, que depende da densidade da madeira (ρ), em kg/m^3 , do diâmetro do pino (d), em mm, do ângulo α entre o carregamento e a direção das fibras da camada exterior do CLT, em graus, e é independente da configuração do painel.

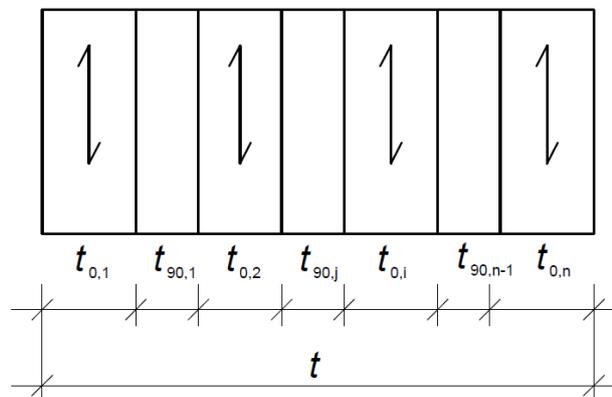
$$f_{h,\alpha} = \frac{0,035 \cdot (1 - 0,015 \cdot d) \cdot \rho^{1,16}}{1,1 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (\text{MPa}) \quad (3.43)$$

Adicionalmente, os autores propuseram um segundo modelo de cálculo, apresentado na Equação 3.44, que considera também a configuração do painel de CLT, além do diâmetro do pino, densidade da madeira e ângulo do carregamento em relação a direção das fibras da camada externa da CLT.

$$f_{h,\alpha} = 0,032 \cdot (1 - 0,015 \cdot d) \cdot \rho^{1,20} \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_{0,i}}{t \cdot (1,6 \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)} + \frac{\sum_{j=1}^n t_{90,j}}{t \cdot (1,6 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)} \right] \quad (\text{MPa}) \quad (3.44)$$

Na Equação 3.44, $t_{0,i}$ é a espessura da camada paralela às camadas externas da CLT, já $t_{90,j}$ é a espessura da camada perpendicular às camadas externas da CLT, conforme ilustra a Figura 3.23. Ou seja, é considerado para definição das espessuras que a camada externa é sempre na direção paralela às fibras, independentemente da direção do carregamento aplicado. O fator que considera o carregamento em relação às fibras é apenas o α .

Figura 3.23 – Explicação sobre $t_{0,i}$ e $t_{90,j}$ considerados na Equação 3.44



Fonte: Blass e Uibel (2007)

A validade das Equações 3.43 e 3.44 é limitada a painéis com lamelas de até 40 mm de espessura e pela relação entre as espessuras das lamelas, apresentada na Equação 3.45.

$$0,95 < \frac{\sum t_{0,i}}{\sum t_{90,j}} < 2,1 \quad (3.45)$$

Dos ensaios com parafusos e pregos, foi feita regressão múltipla com o resultado de 179 ensaios, originando a Equação 3.46, que é independente do ângulo de aplicação da força e é limitada a painéis com lamelas de espessura menor que 9 mm, de acordo com Uibel e Blass (2014).

$$f_h = 0,13 \cdot d^{-0,53} \cdot \rho^{1,05} \text{ (MPa)} \quad (3.46)$$

Segundo Uibel e Blass (2014), para o dimensionamento de ligações com parafusos ou pregos em painéis de CLT, carregadas lateralmente, que tenham lamelas com espessura maior que 9 mm, a resistência ao embutimento pode ser determinada de acordo com as equações da CEN EN 1995 1-1:2004 para madeira maciça, apresentadas na seção 3.3.2 deste trabalho, em razão de que para algumas configurações de ligações o fenômeno de embutimento ocorre predominantemente nas camadas externas.

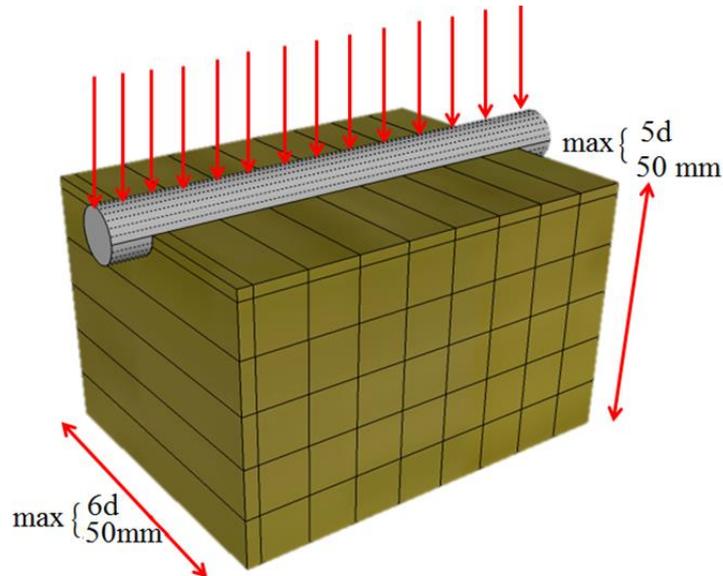
3.4.2 Equação Proposta por Kennedy et al. (2014a)

Para determinar a resistência ao embutimento em painéis de CLT, Kennedy et al. (2014a) realizaram um total de 1080 ensaios, em painéis de 3 e 5 camadas (espessura entre 89 mm e 168 mm), produzidos por fabricantes das cidades de Quebec e Colúmbia Britânica, no Canadá, com madeiras do grupo de espécies *spruce-pine-fir* (Espruce-pinho-abeto). Os corpos de prova foram condicionados no ambiente padrão com $65 \pm 5\%$ de umidade relativa e $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura antes dos ensaios. A densidade relativa da madeira seca variou entre 350 kg/m^3 e 550 kg/m^3 .

Foram utilizados seis diâmetros, parafusos autoatarraxantes de cabeça sextavada e rosca soberba (*lag screws*), com diâmetros de 6,35 mm (1/4") até 19,1 mm (3/4"), e parafusos autoatarraxantes do tipo torx (*self-drilling screws*), com diâmetros de 6 mm, 8 mm e 12 mm.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma americana, ASTM D5764-97a, para carregamentos aplicados a 0°, 45° e 90° em relação às fibras da camada externa do painel. Os autores utilizaram corpos de prova de meio furo, conforme ilustra a Figura 3.24.

Figura 3.24 – Modelo e dimensões dos corpos de prova



Fonte: Adaptado de Kennedy et al. (2014b)

Os corpos de prova foram submetidos a carregamento constante de 1,0 mm/min, sendo o ensaio interrompido quando a resistência diminuía 80% da força de pico ou quando o deslocamento atingisse 7 mm ou metade do diâmetro, o que acontecesse primeiro.

Com os resultados obtidos, Kennedy et al. (2014a) fizeram uma análise de regressão não-linear para desenvolver a Equação 3.47, proposta para determinar a resistência ao embutimento de painéis de CLT, independentemente da configuração do painel e do diâmetro do pino metálico. A equação apresentada é função da densidade da madeira com umidade a 12% (ρ_{12}), em g/cm³, e do ângulo α entre o carregamento e a direção das fibras da camada exterior do CLT, em graus.

$$f_{h,\alpha} = \frac{80 \cdot (\rho_{12} - 0,12)^{1,11}}{1,07 \cdot (\rho_{12} - 0,12)^{-0,07} \cdot \text{sen}^2\alpha + \text{cos}^2\alpha} \text{ (MPa)} \quad (3.47)$$

3.4.3 Trabalhos Técnicos-Científicos Acerca da Resistência ao Embutimento da CLT

Na literatura há escassez de pesquisas acerca da resistência ao embutimento em painéis de CLT. A maior parte das pesquisas encontradas aborda as ligações em CLT e algumas delas estudam o embutimento. Os trabalhos de Muñoz, Mohammad e Gagnon (2010), Gavric, Fragiaco e Ceccotti (2015) e Ringhofer, Brandner e Blass (2018) avaliaram analiticamente a validade das equações propostas por Blass e Uibel (2007) e compararam com as equações propostas na CEN EN 1995 1-1:2004 para madeira serrada e outros produtos à base de madeira. Já Nakashima et al. (2012) e Ottenhaus et al. (2017) estudaram a resistência ao embutimento em CLT através de ensaios.

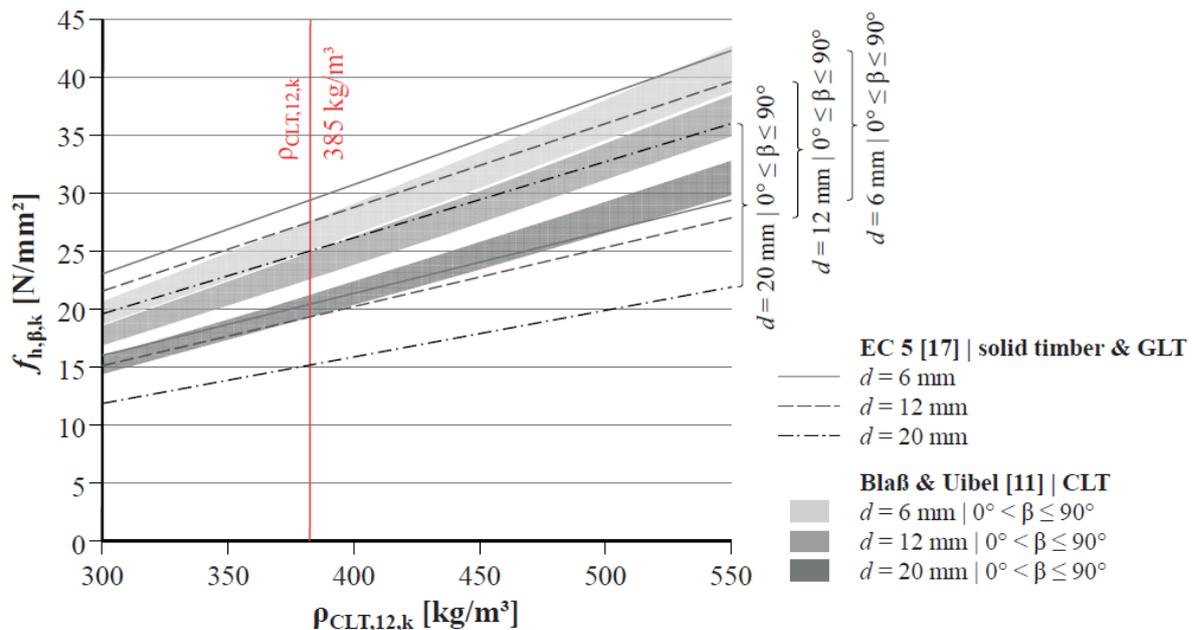
Muñoz, Mohammad e Gagnon (2010) e Gavric, Fragiaco e Ceccotti (2015) conduziram estudos acerca da resistência de ligações em painéis de CLT. Ambos os trabalhos utilizaram as equações de Blass e Uibel (2007) para determinar a resistência ao embutimento, e compararam os resultados experimentais das ligações com resultados analíticos. As pesquisas mostraram que houve maior concordância dos resultados analíticos com os experimentais quando foram utilizadas as equações de Blass e Uibel (2007) ao invés das equações propostas na norma CEN EN 1995 1-1:2004 para determinar a resistência ao embutimento.

Ringhofer, Brandner e Blass (2018) realizaram pesquisa com o objetivo de apresentar uma coleção dos conhecimentos atuais relativos às ligações com pinos metálicos em painéis de CLT, para servir de base para implementação de um novo capítulo de ligações na CEN EN 1995 1-1:2004. Nesse trabalho, os autores apresentaram as principais conclusões das pesquisas realizadas por Blass e seus colaboradores quanto ao embutimento em CLT e estabeleceram comparações entre a equação proposta por Blass e Uibel (2007) (Equação 3.43) e a equação da CEN EN 1995 1-1:2004 (Equação 3.35). Ringhofer, Brandner e Blass (2018) compararam os resultados analíticos obtidos a partir das duas equações, para ângulos variando entre 0° e 90°, considerando diâmetros de 6 mm, 8 mm e 12 mm, e variando a densidade da madeira entre 300 kg/m³ e 550 kg/m³.

Com os resultados, Ringhofer, Brandner e Blass (2018) traçaram um gráfico, apresentado na Figura 3.25, e observaram que em ambas as equações há uma relação similar entre o diâmetro do pino e a resistência ao embutimento. Esses autores notaram que a influência da inclinação da força na resistência ao embutimento em painéis de CLT é bem

menor do que em madeira serrada ou MLC. Assim sendo, os autores propõem que a seja adotada para determinação da resistência ao embutimento em painéis de CLT a mesma equação utilizada para madeira serrada e MLC (Equação 3.35), apenas adaptando o fator k_{90} , que considere a ação conjunta das lamelas cruzadas.

Figura 3.25 – Gráfico de resistência característica ao embutimento por densidade da madeira



Nakashima et al. (2012) conduziram ensaios de embutimento em painéis de CLT, a partir de corpos de prova de meio furo, submetidos a carregamento monotônico. Foi determinada a força de embutimento em dois pontos no gráfico de tensão-deslocamento, referente às forças que provocam um deslocamento residual de 2% e 5% do diâmetro. Foram utilizados painéis de CLT com 5 camadas de 30 mm de espessura, de Cedro Japonês, com densidade entre 380 kg/m³ e 450 kg/m³, e umidade entre 10,5% e 18,2%. Foram realizados ensaios de embutimento a 0°, 30°, 60° e 90° em relação às fibras da camada externa do painel de CLT, utilizando pino metálico liso de 12 mm de diâmetro. O número de corpos de prova (CPs) variou entre 6 e 8 para cada inclinação.

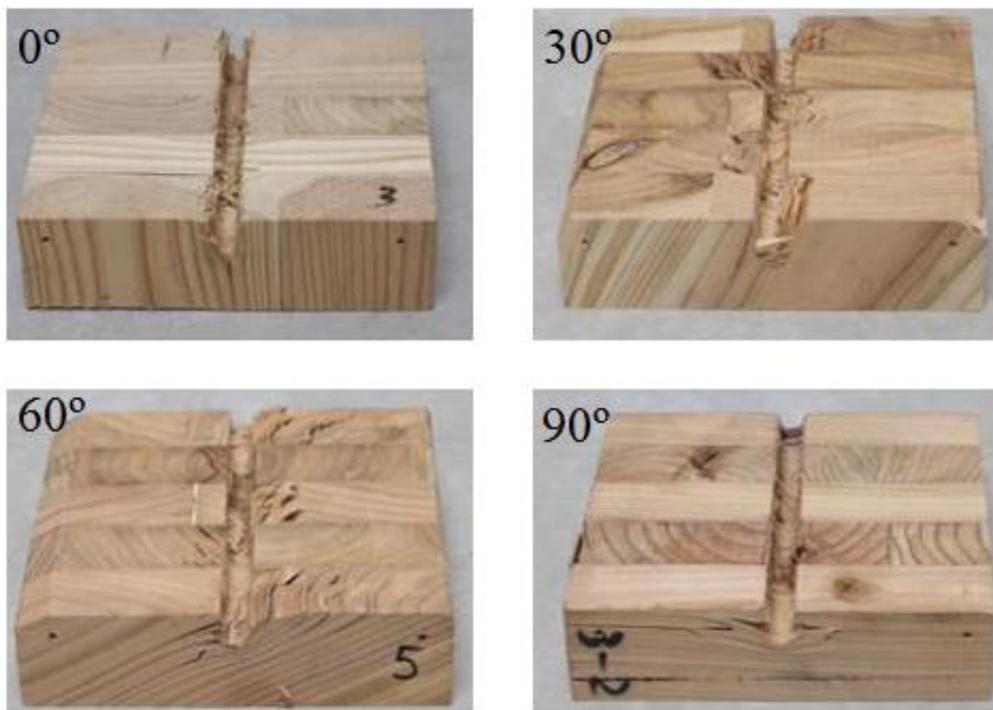
Nakashima et al. (2012) determinaram a resistência ao embutimento analiticamente, utilizando uma média para calcular a resistência ao embutimento do painel, conforme a Equação 3.48, sendo n o número de camadas do painel. Para determinar a resistência individual das lamelas inclinadas (f_{α} e $f_{\alpha+90}$) foi utilizada a equação de Hankinson, e as

resistências ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras foram determinadas a partir de relações com a densidade da madeira ($f_{h,0}=60,68.\rho$ e $f_{h,90}=1/2.f_{h,0}$).

$$f_{h,CLT} = \frac{(n + 1) \cdot f_{h,\alpha} + (n - 1) \cdot f_{h,\alpha+90}}{2n} \quad (3.48)$$

Obtidos os resultados, Nakashima et al. (2012) observaram que a maior e a menor resistência ao embutimento foram a 0° e a 60° em relação às fibras da camada externa do painel, e concluíram que existe boa concordância entre a equação de Hankinson e a resistência ao embutimento em CLT. A Figura 3.26 ilustra os modos de falha para cada direção de carregamento. Os autores observaram que a falha de cada camada foi independente da camada adjacente.

Figura 3.26 – Modos de falha para carregamentos a 0°, 30°, 60° e 90°



Fonte: Adaptado de Nakashima et al. (2012)

Ottenhaus et al. (2018) realizaram ensaios de embutimento na direção paralela às fibras da camada externa dos painéis, segundo a norma americana, utilizando corpos de prova de meio furo em painéis de CLT com adesivo de poliuretano monocomponente, sem

espaçamentos entre as lamelas adjacentes, com madeira da espécie *Pinus Radiata*, da Nova Zelândia, em configurações de 3 e 5 camadas, sendo 20-45-20 mm e 45-20-20-20-45 mm, respectivamente. A umidade média dos corpos de prova foi 9,9%. Foram ensaiados 204 corpos de prova utilizando pino metálico liso com 20 mm de diâmetro. Os autores determinaram também a resistência ao embutimento dos painéis analiticamente, por meio da equação de Blass e Uibel (2007), que é apresentada também no *CLT Handbook* na versão Canadense (Equação 3.43), e por meio das equações propostas na CEN EN 1995 1-1:2004, aplicando as equações de embutimento para as direções paralela e perpendicular às fibras para cada camada do painel, conforme mostra a Equação 3.49, em que t_0 e t_{90} são as espessuras das camadas do painel carregadas nas direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, e t é a espessura total do painel.

$$f_{h,k,calc} = \frac{\sum t_0 \cdot 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k + \sum \frac{t_{90} \cdot 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{1,35 + 0,015 \cdot d}}{t} \quad (3.49)$$

Os resultados experimentais médios e característicos e os resultados analíticos obtidos por Ottenhaus et al.(2017) são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Resultados obtidos por Ottenhaus et al. (2018)

nº de camadas	$\rho_{\text{médio}}$ (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	Calculado ($f_{h,k,calc}$)		Experimental	
			Blass e Uibel (2007) (MPa)	CEN EN 1995 1-1:2004 (MPa)	$f_{h,médio}$ (MPa)	$f_{h,k}$ (MPa)
3	508	456	26,35	23,67	24,55	19,09
5	451	428	24,49	25,13	31,13	26,06

Fonte: Adaptado de Ottenhaus et al. (2018)

Comparando os resultados experimentais com analíticos, para os painéis de 3 camadas os autores concluíram que a equação proposta por Blass e Uibel (2007) resulta em uma resistência 38% maior e, portanto, para painéis de 3 camadas os limites de espessura máxima de 40 mm e relação t_0/t_{90} entre 0,95 e 2,21 sugeridos por Blass e Uibel (2007) devem ser seguidos; já a equação da CEN EN 1995 1-1:2004 resultou em uma resistência ao embutimento 18% maior, indicando que a camada perpendicular ser mais grossa acarreta em

uma diminuição da resistência. Para os painéis de 5 camadas, Ottenhaus et al. (2018) concluíram que ambas as equações resultaram em valores conservativos de resistência e por isso sugeriram que a equação de Blass e Uibel (2007) pode ter seu limite estendido a $t_0/t_{90}=2,25$.

Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) analisaram experimentalmente a influência do número de camadas e da espessura das lamelas da CLT na resistência ao embutimento. Foram considerados painéis de 3, 5 e 9 camadas, mantendo uma taxa de $\Sigma t_0/\Sigma t_{90}= 1,5$ e a espessura total de 100 mm, com densidades de 451 kg/m³, 452 kg/m³ e 464 kg/m³, respectivamente. Os ensaios foram realizados com um total de 60 corpos de prova, com teor de umidade entre 13% e 14%, segundo o método da BS EN 383:2007, considerando apenas a direção paralela às fibras em relação à camada externa da CLT, utilizando pino metálico liso com 20 mm de diâmetro.

Os autores observaram que ocorreu um enrijecimento da CLT (*hardening effect*), devido ao esmagamento das fibras carregadas na direção perpendicular, e por este motivo, mesmo após um deslocamento de 5 mm, houve um aumento constante da carga. Ao comparar os resultados entre a CLT de 3 e 5 camadas com a CLT de 9 camadas, a diferença foi significativa, segundo a análise de variância (Anova). Como justificativa para esta diferença, Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) descartam a possibilidade de influência da espessura das lamelas ou da quantidade de camadas de adesivo. Segundo os autores, esta diferença pode ser justificada pelo efeito de confinamento (*locking effect*), no qual o aparecimento de fendas nas camadas individuais é impedido pela ação das camadas adjacentes, sendo este efeito mais eficaz em camadas mais finas, resultando, portanto, em uma maior resistência ao embutimento na CLT com 9 camadas.

Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) determinaram a resistência ao embutimento também analiticamente, a partir das equações propostas por Blass e Uibel (2007) (Equações 3.43 e 3.44). Ao comparar com os resultados experimentais, os resultados analíticos foram superiores até 21,9%. Em análise, os autores concluíram que as equações de Blass e Uibel (2007) superestimam a resistência ao embutimento de painéis de CLT com camadas de 20 mm, 30 mm e 40 mm de espessura.

Não foi encontrado na literatura pesquisas que utilizassem a equação proposta por Kennedy et al. (2014a).

3.5 DISCUSSÕES RELATIVAS À RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

Conforme ressaltado nas seções anteriores, a resistência ao embutimento da madeira é um parâmetro fundamental na determinação da capacidade resistente de ligações com pinos metálicos. Apesar de sofrer a influência de diversos fatores associados às características mecânicas e geométricas, os fatores preponderantes no embutimento são a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico.

As normas brasileira, europeia e americana adotam diferentes convenções nos ensaios e nas equações que estimam a resistência ao embutimento. No Quadro 3.1 é apresentado uma comparação dos parâmetros adotados por essas normas para determinação analítica da resistência ao embutimento.

Quadro 3.1 – Comparação dos parâmetros adotados pelos documentos normativos brasileiro, europeu e americano

Norma	$f_{e,0}$	$f_{e,90}$
ABNT NBR 7190:1997	$f_{c,0}$	$f_{c,0}; \alpha_e$
CEN EN 1995 1-1:2004	$d; \rho_k$	$d; \rho_k; k_{90}$
ANSI/AWC NDS:2015	G	G; d

Fonte: O autor

Comparando os parâmetros utilizados nas equações analíticas, nota-se que a norma europeia contempla a influência do diâmetro independente da inclinação do carregamento em relação às fibras da madeira, considerando para carregamentos na direção perpendicular às fibras um maior decréscimo da resistência ao embutimento em função do diâmetro. Já as normas brasileira e americana consideram a influência do diâmetro apenas para carregamentos perpendiculares às fibras.

A norma brasileira não considera diretamente a relação da resistência ao embutimento com a densidade da madeira, como fazem a CEN EN 1995 1-1:2004 e a ANSI/AWC NDS:2015. Porém, tendo em vista as pesquisas de Sawata e Yasumura (2002) e Sandhaas et al. (2013), apresentadas na seção 3.3.4, que apontam uma relação direta entre a resistência à compressão e a densidade da madeira, pode-se entender que indiretamente a ABNT NBR 7190:1997 leva em conta a densidade da madeira na determinação da resistência ao embutimento.

No Quadro 3.2 é apresentado a comparação entre as espessuras sugeridas para os corpos de prova e entre os limites de ensaio propostos nos documentos normativos brasileiro, europeu e americano para determinação experimental da resistência ao embutimento.

Quadro 3.2 – Comparação entre os métodos de ensaio propostos pelas normas brasileira, europeia e americana

Norma	Espessura dos CPs	Força de embutimento
ABNT NBR 7190:1997	$t = 2d$	Deformação residual de 2‰
BS EN 383:2007	$1,5d \leq t \leq 4d$	Deslocamento relativo madeira-pino de 5 mm ou força máxima resistida pelo CP
ASTM D5764- 97a:2018	$t \geq$ o menor entre 38 mm ou 2d	Deslocamento residual de 5% do diâmetro

Fonte: O autor

No modelo de ensaio das normas brasileira e europeia, a força de embutimento é aplicada nas extremidades do pino metálico, o qual fica sujeito a tensões de flexão. Em consequência, as normas limitam as espessuras dos corpos de prova, como forma de evitar a ocorrência de falha por flexão do pino durante os ensaios. Já no modelo de ensaio da norma americana, o carregamento é aplicado diretamente ao longo de todo o comprimento do pino, eliminando assim a possibilidade de este sofrer flexão e por isso não há limitações de espessura máxima para os corpos de prova.

Comparando as convenções adotadas pelas três normas citadas para a determinação experimental da resistência ao embutimento, as normas europeia e americana utilizam como parâmetro o deslocamento relativo² entre o pino metálico e a madeira, diferentemente da norma brasileira que considera a deformação específica residual³.

A laminação cruzada da CLT influencia o comportamento dos painéis quando submetidos a tensões de embutimento, devido ao comportamento distinto da madeira serrada que compõe as lamelas sob carregamentos em diferentes direções. Outros fatores como a existência da lâmina de cola entre as camadas, a possível presença de espaços entre as lamelas

² Medida do deslocamento do pino metálico tendo como referência uma das extremidades do corpo de prova.

³ Parâmetro obtido por meio do traçado de uma reta, paralela ao trecho elástico-linear no gráfico de força de embutimento versus deformação específica, sendo que a deformação específica é a razão entre o deslocamento do pino metálico e a distância até a borda descarregada do corpo de prova.

e a possibilidade de o pino metálico estar posicionado em regiões de união entre as lamelas, também influenciam no comportamento de embutimento da CLT.

O Quadro 3.3 mostra a comparação entre os parâmetros contidos nas equações propostas na literatura para determinar a resistência ao embutimento em painéis de CLT.

Quadro 3.3 – Comparação dos parâmetros utilizados para equações de embutimento em CLT

Pesquisador	Parâmetros
	$d; \rho; \alpha$ (pinos lisos modelo 1)
Blass e Uibel (2007)	$d; \rho; \alpha; t_{0,i}; t_{90,j}$ (pinos lisos modelo 2)
	$d; \rho$ (pregos e parafusos)
Kennedy et al. (2014a)	$\rho_{12}; \alpha$

Fonte: O autor

Tanto as equações apresentadas por Blass e Uibel (2007), como a equação apresentada por Kennedy et al. (2014a), são dadas em função da densidade da madeira, com a diferença que a última faz uso da densidade com umidade corrigida ao teor de 12%.

As equações de Blass e Uibel (2007) são dadas também em função do diâmetro do pino metálico e apenas a Equação 3.44 considera a configuração da CLT, embora os autores recomendem limitações relacionadas à espessura das lamelas para as três equações. Já a equação de Kennedy et al. (2014a) é independente do diâmetro do pino metálico e da configuração da CLT.

As equações apresentadas por ambos os pesquisadores consideram a inclinação (α) entre a força e as fibras da camada externa da CLT, com exceção da equação de Blass e Uibel (2007) para pregos e parafusos (Equação 3.46), que assim como a equação da CEN EN 1995 1-1:2004, para pregos e parafusos inseridos sem pré-furação (Equação 3.34), considera que não há influência da inclinação da força aplicada neste caso.

Ao comparar as equações que tratam da determinação da resistência ao embutimento em madeira serrada com as equações propostas para a CLT, nota-se que os parâmetros que se mantêm predominantes são a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico. Assim como para a madeira serrada, a abordagem europeia para CLT se mantém considerando a influência do diâmetro do pino independente da direção do carregamento, ao contrário da abordagem americana que desconsidera esta influência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as informações referentes aos procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho, necessários para a determinação experimental da resistência ao embutimento em painéis de CLT e madeira serrada, para posterior comparação com resultados analíticos propostos na literatura.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Campo Mourão.

4.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa foi utilizada madeira do gênero pinus para confecção dos corpos de prova. A escolha deste gênero deu-se por se tratar de madeira proveniente de florestas plantadas, com reservas expressivas no Estado do Paraná e possuir bom desempenho na colagem de lamelas, sendo apropriado à produção de MLC e painéis de CLT.

Foram adquiridas 24 peças de madeira serrada, com seção transversal bruta de 8 cm por 13 cm e 1,5 m de comprimento. Para a confecção dos corpos de prova de CLT, parte das peças de madeira serrada foram desdobradas em tábuas com aproximadamente 2,5 cm de espessura.

Para a confecção dos corpos de prova de CLT foi utilizado adesivo poliuretano monocomponente, produzido pela empresa Jowat, com designação comercial de Jowat-Faser PUR686.60, conforme ilustra a Figura 4.1. Optou-se por utilizar o poliuretano monocomponente por ser o adesivo utilizado por várias indústrias produtoras de CLT e em pesquisas como de Ecker, Miotto e Turmina (2017), Gsell et al. (2007) e Ottenhaus et al. (2018).

Conforme especificação do fabricante, o tempo de cura do adesivo é de 45 minutos, a uma temperatura de 20°C e umidade relativa de 50%. O fabricante recomenda uma pressão entre 0,6 MPa e 1,0 MPa, por um período de 3 a 4 horas, a uma temperatura de 20°C.

Figura 4.1 – Adesivo poliuretano monocomponente Jowat-Faser PUR 686.60



Fonte: O autor

Devido à dificuldade em encontrar no mercado brasileiro parafusos com os diâmetros e comprimentos necessários, os pinos metálicos utilizados foram barras roscadas, com diâmetros de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm, produzidas com aço de baixo carbono, especificadas como ISO 898 Classe 5.8, que possuem tensão de escoamento nominal de 400 MPa e tensão de ruptura nominal de 500 MPa.

4.2 PROCEDIMENTOS

4.2.1 Caracterização da Madeira Serrada

Para caracterização da madeira serrada de pinus, foram realizados ensaios de densidade e umidade, compressão na direção paralela às fibras da madeira ($f_{c,0}$), módulo de elasticidade em esforços de compressão paralela ($E_{c,0}$), compressão na direção perpendicular às fibras da madeira ($f_{c,90}$) e módulo de elasticidade em esforços de compressão perpendicular ($E_{c,90}$), conforme o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

Para a determinação da resistência ao embutimento analítico de acordo com as recomendações da ANSI/AWC NDS:2015, conduziu-se o ensaio de densidade até obter massa e volume secos, segundo os critérios da ASTM D2395:2017.

4.2.2 Classificação Visual

Como processo preliminar para a produção dos corpos de prova de CLT, as lamelas de madeira serrada passaram por classificação visual e mecânica. As peças utilizadas para produção dos corpos de prova de madeira serrada passaram apenas por classificação visual.

Tendo em vista que foi utilizada madeira do gênero pinus e que a norma brasileira de estruturas de madeira em vigor não propõe procedimentos para a classificação visual da madeira serrada para uso estrutural, a classificação foi embasada na pesquisa realizada por Carreira (2003), o qual fez uso da classificação visual proposta pelo *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB), com base na norma ASTM D245:1993.

Primeiramente as peças de madeira foram classificadas em função das dimensões de seção transversal e do seu uso. As peças de madeira serrada foram desgrossadas e considerando uma seção transversal teórica de 7,5 cm por 12,5 cm, foram classificadas como caibros e pranchas (peças com espessura variando de 38 mm a 89 mm e com largura maior ou igual à 89 mm). As peças para a confecção dos corpos de prova de CLT foram classificadas como tábuas (peças com espessura inferior a 38 mm e largura entre 38 mm e 140 mm), considerado uma seção transversal teórica de 23 mm por 125 mm.

Segundo Carreira (2003), a classificação visual parte da ideia que as características de crescimento modificam as propriedades mecânicas de uma peça de madeira em relação a uma peça isenta de defeitos. As características de crescimento podem ser vistas e julgadas pelo olho humano e com o auxílio de regras de classificação podem ser utilizadas para separar a madeira em classes de qualidade.

Os caibros e pranchas são separados em quatro classes, com nomenclaturas de SS (*Select Structural*), N°1, N°2 e N°3. As classes estruturais para as tábuas recebem a nomenclatura de Industrial 55 (I55), Industrial 45 (I45) e Industrial 26 (I26). Segundo *Southern Pine Inspection Boreau* (1994) apud Carreira (2003), as peças de tábuas das classes I55, I45 e I26 devem apresentar as mesmas características das classes N°1, N°2 e N°3 de caibros e pranchas, respectivamente.

Assim, a classificação visual foi feita analisando-se as características aparentes ao longo de todo o comprimento, nas quatro faces e nas duas extremidades de cada peça. Os defeitos limitados foram inclinação das fibras, nós, torcimento, encanoamento, arqueamento e encurvamento. Para as tábuas, a dimensão dos nós foi determinada pelas médias dos

diâmetros nas duas faces opostas; e os nós em face estreita foram medidos somente quando apareceram também em uma ou ambas as faces largas.

A Tabela 4.1 apresenta a razão de resistência, o limite de inclinação das fibras e dimensões dos nós para cada classe.

Tabela 4.1 – Limitação dos defeitos em caibros e pranchas e tábuas

Classe	Razão de Resistência (%)	Inclinação das fibras	Nós (cm)		
			Face estreita	Centro da face larga	Borda da face larga
SS	67	1:12	2,9 (1,2)	4,5	2,5
Nº1 (I55)	55	1:10	3,9(1,6)	6,2	3,6
Nº 2 (I45)	45	1:8	4,8(1,9)	7,5	4,5
Nº 3 (I26)	26	1:4	5,7(1,9)	9,4	6,2

Fonte: O autor

Para auxiliar na classificação das peças de madeira decorrente da limitação dos tamanhos dos nós, foi confeccionado um gabarito acrílico, com indicações das dimensões máximas permitidas para cada classe, considerando os nós da face estreita, centro e borda da face larga, conforme mostra a Figura 4.2. Foram considerados nós de borda aqueles cuja distância do centro do nó à borda era menor ou igual a $2/3$ do diâmetro do nó.

Figura 4.2 – Gabarito para verificação dos nós



Fonte: O autor

Além da classificação feita a partir da constatação dos defeitos, os caibros e as tábuas foram classificados considerando-se a quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm de comprimento, medidos em uma linha radial representativa. Foram classificadas como densas (D) as peças de madeira que possuíam seis ou mais anéis de crescimento e um terço da seção transversal com madeira de inverno, ou peças com quatro ou mais anéis de crescimento e mais da metade da seção transversal com madeira de inverno. As demais peças foram classificadas como não-densas (ND).

4.2.3 Classificação Mecânica

A classificação mecânica das tábuas foi realizada por meio de teste de flexão estática segundo o eixo de menor inércia, seguindo-se os procedimentos da norma ASTM D4761:2011, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade à flexão (MOE) das lamelas.

As peças de madeira foram apoiadas sobre dois suportes distanciados em 1,3 m. No meio do vão e sobre os dois apoios foram posicionados transdutores de deslocamento digitais, com precisão de 0,001 mm e curso de 12 mm. A Figura 4.3 mostra o arranjo do ensaio para determinação do MOE.

Figura 4.3 – Configuração do ensaio de flexão estática



Fonte: O autor

A intensidade da força aplicada no centro do vão foi determinada a partir de um ensaio teste, limitando a flecha em 6,5 mm (vão/200). Durante o ensaio, foram aplicadas duas intensidades de carregamento, sendo inicialmente uma força de 20,50 N, em seguida uma força de 123,54 N.

Foram anotados os valores de deslocamento vertical para cada peça, correspondente às duas intensidades de forças aplicadas, e por fim o MOE foi determinado a partir da Equação 4.1.

$$\text{MOE} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta v \cdot I} \quad (4.1)$$

Sendo: MOE = módulo de elasticidade (MPa);

ΔF = incremento de força (N);

L = vão livre entre os apoios (mm);

Δv = incremento de deslocamento vertical (mm);

I = momento de inércia da seção transversal (mm⁴).

Conforme indica a ASTM D4761:2011, para reportar a umidade das tábuas ensaiadas, foi realizado no dia do teste de flexão estática ensaio de umidade segundo as prescrições da norma brasileira.

4.2.4 Ensaio de Embutimento

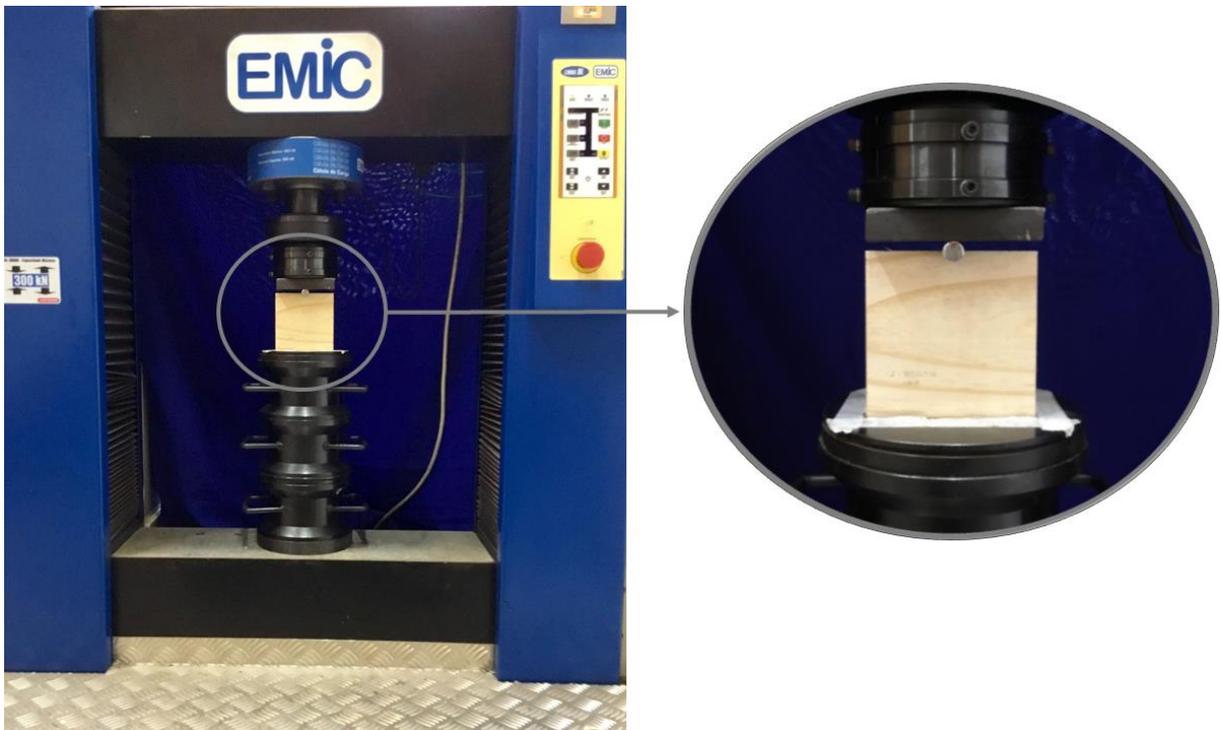
Os ensaios de embutimento na madeira serrada e na CLT foram realizados de acordo com a norma americana ASTM D5764-97a:2018, conforme descrito na seção 3.3.3 deste trabalho. O método de ensaio escolhido é justificado por não limitar a espessura dos corpos de prova, fator que permite que sejam ensaiados painéis de CLT com espessuras comerciais.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 30000, conforme exposto na Figura 4.4. Foi aplicado carregamento do tipo monotônico crescente, para cada diâmetro com um incremento de força tal que a ruptura ocorresse entre 4 e 7 minutos.

Para a determinação da força de embutimento pelo método gráfico proposto pela ASTM D5764-97a:2018, a inclinação da reta, correspondente ao trecho linear da curva de

força de embutimento – deslocamento, foi definida como o trecho entre 10% e 40% da força máxima de embutimento.

Figura 4.4 – Configuração do ensaio de embutimento



Fonte: O autor

4.2.4.1 Preparação dos corpos de prova de embutimento

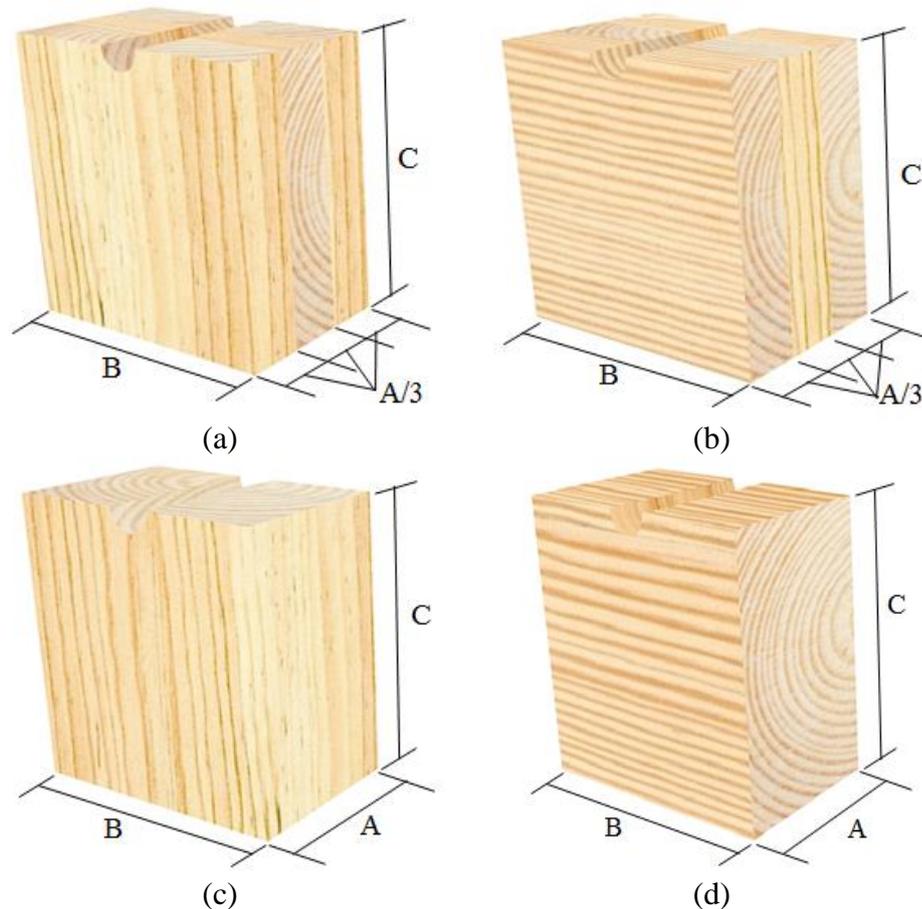
Foram confeccionados seis corpos de prova de CLT e de madeira serrada para cada diâmetro de pino metálico, totalizando 60 corpos de prova para ensaio de embutimento na direção paralela e 60 corpos de prova para a direção perpendicular às fibras.

Nos experimentos foram utilizadas peças de CLT com três camadas ortogonais de 20 mm de espessura, resultando em painéis com 60 mm de espessura. Essa configuração foi escolhida por ser o painel de menor espessura fabricado por diversos produtores.

Os modelos de corpos de prova para os ensaios de embutimento em CLT são apresentados na Figura 4.5a e b, e em madeira serrada na Figura 4.5c e d, nas quais as dimensões A, B e C são 60 mm, 100 mm e 100 mm, respectivamente, fixadas independente do diâmetro do pino metálico, como permite a norma ASTM D5764-97a:2018. A dimensão C foi escolhida visando atender as exigências de distância mínima entre o pino metálico e a

borda carregada do corpo de prova, propostas pelos documentos normativos brasileiro, europeu e americano.

Figura 4.5 – Modelo dos corpos de prova de CLT nas direções (a) paralela e (b) perpendicular às fibras; e madeira serrada nas direções (c) paralela e (d) perpendicular às fibras



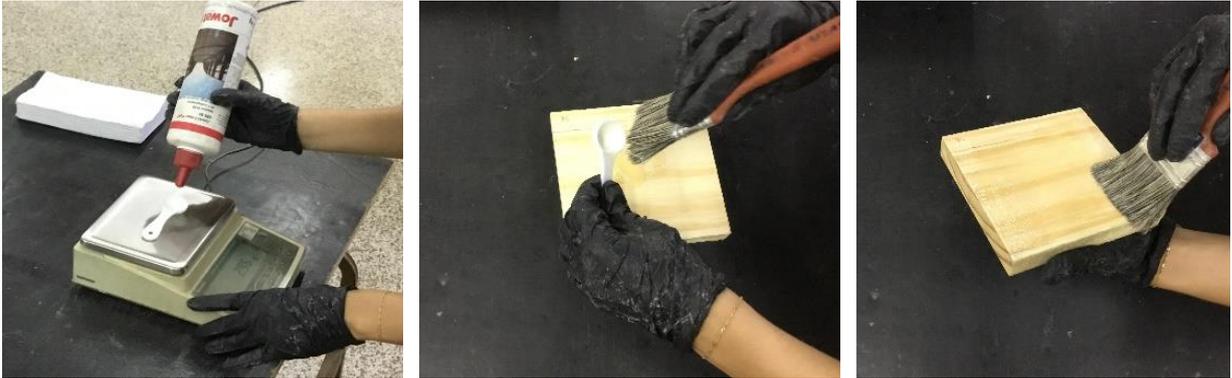
Fonte: O autor

Para a preparação dos corpos de prova, primeiramente as peças de madeira foram aplainadas na espessura necessária, ou seja, as tábuas para os corpos de prova de CLT com 20 mm e as peças de madeira serrada com 60 mm. Posteriormente foram selecionados os trechos das peças isentos de defeitos e foram cortadas nas dimensões pré-determinadas.

Os corpos de prova de CLT foram confeccionados com três camadas de lamelas, sem juntas e sem defeitos. Para montagem, após as lamelas estarem nas dimensões adequadas, as superfícies foram limpas para que ficassem livres de poeira e gordura. Posteriormente foi aplicado o adesivo, na quantidade de 200 g/m², como recomendam Ecker, Miotto e Turmina (2017) para madeira de pinus e adesivo de poliuretano monocomponente. Para a aplicação do

adesivo foram utilizados equipamentos de segurança individual, como luvas, avental, máscara e óculos, conforme recomenda o fabricante. A Figura 4.6 mostra o processo de colagem das lamelas. Após a montagem das três camadas, os corpos de provas foram prensados com auxílio do pórtico de ensaios, durante 4 horas, com uma pressão de 0,8 MPa.

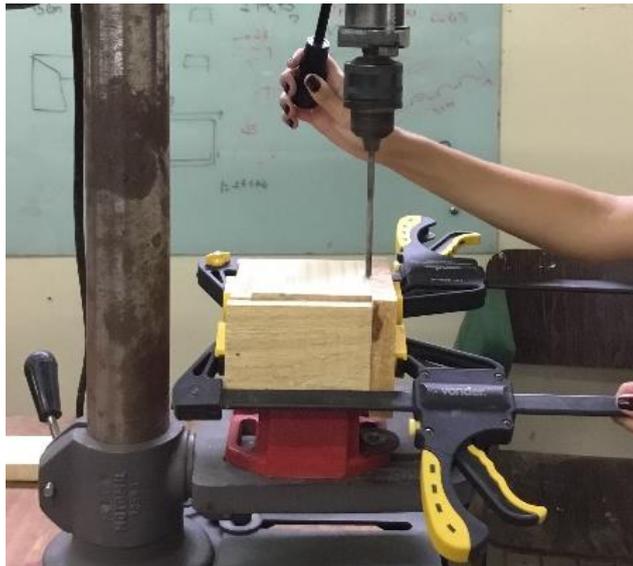
Figura 4.6 – Processo de colagem das lamelas do corpos de prova de CLT



Fonte: O autor

Por fim, foram feitos meios furos nos corpos de prova, em furadeira de bancada, com os diâmetros de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm, para posterior posicionamento do pino metálico.

Figura 4.7 – Realização do furo nos corpos de prova de embutimento



Fonte: O autor

A Figura 4.8 mostra todos os modelos de corpos de prova confeccionados, considerando a CLT e a madeira serrada, nas direções paralela e perpendicular às fibras, para os cinco diâmetros de pinos metálicos investigados.

Figura 4.8 – Corpos de prova para ensaios de embutimento



Fonte: O autor

4.2.5 Determinação Analítica da Resistência ao Embutimento

A determinação analítica da resistência ao embutimento da madeira serrada foi realizada de acordo com as equações propostas nos documentos normativos brasileiro, europeu e americano, que correspondem às Equações 3.29, 3.33 e 3.40 para a direção paralela

às fibras, e Equações 3.30, 3.35 e 3.41 para a direção perpendicular às fibras. Para o cálculo da resistência ao embutimento segundo a AWC/ANSI NDS:2015, para o diâmetro de 6 mm foi utilizada a Equação 3.39, que é independente da direção da força aplicada em relação às fibras da madeira.

Nos cálculos segundo a ABNT NBR 7190:1997, foi utilizado o valor médio de resistência à compressão paralela às fibras obtido nos ensaios. O parâmetro α_e é tabelado em função dos diâmetros (Tabela 3.1), portanto, para valores de diâmetro intermediários, foi realizada interpolação linear.

As equações apresentadas no CEN EN 1995 1-1:2004 utilizam como parâmetro a densidade aparente característica da madeira. Porém, para fins de comparação com os resultados experimentais de resistência ao embutimento, foi utilizado o valor de densidade aparente média, obtida por meio de ensaios. O cálculo do parâmetro k_{90} foi realizado de acordo com a Equação 3.37, específica para madeiras de coníferas.

Para os cálculos de acordo com a ANSI/AWC NDS:2015, a densidade relativa (G) utilizada corresponde ao valor médio de ensaio.

Para a determinação da resistência ao embutimento dos painéis de CLT foram utilizadas as equações propostas por Blass e Uibel (2007) (Equações 3.43, 3.44 e 3.46) e pela equação proposta por Kennedy et al. (2014a) (Equação 3.47).

Nas equações de Blass e Uibel (2007) foram utilizados valores médios de densidade aparente. Já na equação de Kennedy et al. (2014a), a densidade aparente média teve seu valor corrigido para umidade de 12%, por meio do diagrama de Kollmann.

Em todas as equações que apresentam o diâmetro como variável, foram utilizados os diâmetros nominais dos pinos metálicos (6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm).

4.2.6 Comparação entre os resultados

A influência do diâmetro do pino metálico foi avaliada para as direções paralela e perpendicular às fibras da CLT e da madeira serrada, por meio de ensaios com corpos de prova de mesma dimensão, independentemente do diâmetro utilizado.

Foram realizadas comparações entre os resultados experimentais analisando as direções paralela e perpendicular às fibras da CLT e da madeira serrada. Foram comparados também os valores de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada. Para verificar

se os resultados médios de resistência ao embutimento dos dois materiais foram estatisticamente diferentes, foi realizada análise de variância (ANOVA).

Também foram realizadas comparações entre os resultados experimentais e analíticos, conforme elucida o Quadro 4.1, visando verificar a equação que melhor se adapte às características do material ensaiado.

Quadro 4.1 – Comparações a serem realizadas entre resultados experimentais e analíticos

Material	Resultados experimentais		Resultados analíticos	
	Inclinação do carregamento em relação às fibras	Equações	Fontes	
CLT	0°	3.43	Blass e Uibel (2007)	
		3.44	Blass e Uibel (2007)	
		3.46	Blass e Uibel (2007)	
		3.47	Kennedy et al. (2014a)	
		3.29	ABNT NBR 7190:1997	
		3.33	CEN EN 1995 1-1:2004	
		3.40	ANSI/AWC NDS:2015	
	90°	3.43	Blass e Uibel (2007)	
		3.44	Blass e Uibel (2007)	
		3.46	Blass e Uibel (2007)	
		3.47	Kennedy et al. (2014a)	
		3.30	ABNT NBR 7190:1997	
		3.35	CEN EN 1995 1-1: 2004	
		3.41	ANSI/AWC NDS:2015	
Madeira serrada	0°	3.29	ABNT NBR 7190:1997	
		3.33	CEN EN 1995 1-1:2004	
		3.40	ANSI/AWC NDS:2015	
	90°	3.30	ABNT NBR 7190:1997	
		3.35	CEN EN 1995 1-1: 2004	
		3.41	ANSI/AWC NDS:2015	

Fonte: O autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da madeira e classificação visual e mecânica. Os resultados de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, obtidos por meio de experimentos e equações analíticas, também são expostos e discutidos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA SERRADA

Das peças de madeira adquiridas foram extraídos corpos de prova, de maneira aleatória, para a determinação das propriedades físicas e mecânicas. Os resultados médios dos ensaios de caracterização são apresentados na Tabela 5.1. No Apêndice A são apresentadas as tabelas contendo os dados completos dos ensaios de caracterização realizados.

Tabela 5.1 – Resumo das propriedades físicas e mecânicas – valores médios

Propriedades	Valores Médios
Teor de umidade aparente (%)	12,99 %
Densidade aparente (ρ_{ap})	443,62 kg/m ³
Densidade aparente corrigida a umidade de 12% ($\rho_{ap,12\%}$)	439,33 kg/m ³
Densidade básica (ρ_{bas})	372,16 kg/m ³
Desidade relativa (G)	0,409
Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$)	26,62 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras ($f_{c,90}$)	3,25 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras ($E_{c,0}$)	5.716,56 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal perpendicular às fibras ($E_{c,90}$)	269,50 MPa

Fonte: O autor

5.2 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA

Foram classificados visualmente um total de 10 caibros e 24 tábuas. Durante a classificação, notou-se que o defeito com maior ocorrência foram os nós. A Tabela 5.2 apresenta o resultado da classificação visual dos caibros.

Tabela 5.2 – Classificação visual das peças de caibros e pranchas

Caibros e pranchas	Classe Visual
1	N2-ND
2	N2-ND
3	N1-ND
4	SS-ND
5	N3-ND
6	N2-ND
7	N2-ND
8	N3-ND
9	N3-ND
10	N2-ND

Fonte: O autor

A Tabela 5.3 apresenta o resultado da classificação visual e mecânica das peças de tábuas. A partir do ensaio de flexão estática segundo o eixo de menor inércia, obteve-se um valor médio de MOE, corrigido para o teor de umidade padrão de 12%, de 6.947,43 MPa, com coeficiente de variação de 29,63%.

Tabela 5.3 – Classificação visual e mecânica das tábuas
(continua)

Lamela	Classe Visual	MOE (MPa)	MOE _{12%} (MPa)
1	I45-ND	5.272,53	6.082,39
2	I55-ND	6.951,32	8.019,04
3	I55-ND	9.542,63	11.008,37
4	I55-ND	3.954,49	4.561,90
5	I26-ND	4.755,10	5.485,48
6	I26-ND	6.132,19	7.074,10
7	I45-ND	4.836,79	5.579,72
8	I45-ND	5.207,72	6.007,63
9	I55-ND	6.794,66	7.838,32

Tabela 5.3 – Classificação visual e mecânica das tábuas

Lamela	Classe Visual	(conclusão)	
		MOE (MPa)	MOE _{12%} (MPa)
10	I45-ND	4.340,12	5.006,76
11	I26-ND	5.452,11	6.289,55
12	I45-ND	7.362,70	8.493,61
13	I55-ND	5.057,36	5.834,16
14	SS-ND	5.751,79	6.635,26
15	SS-ND	6.823,34	7.871,41
16	SS-ND	10.360,52	11.951,9
17	I26-ND	8.200,55	9.460,15
18	I26-ND	4.785,18	5.520,18
19	I45-ND	5.207,32	6.007,16
20	I45-ND	6.610,78	7.626,19
21	SS-ND	8.149,67	9.401,46
22	I26-ND	3.248,06	3.746,97
23	I26-ND	3.591,58	4.143,25
24	I55-ND	6.148,98	7.093,47
	Média	6.022,39	6.947,43
	Desvio Padrão	1.784,32	2.058,39
	COV (%)	29,63	29,63
	Valor Máximo	10.360,52	11.951,90
	Valor Mínimo	3.248,06	3.746,97

Fonte: O autor

No Apêndice B são apresentados, de maneira detalhada, os parâmetros obtidos durante os ensaios de flexão estática segundo o eixo de menor inércia, utilizados na determinação do MOE.

5.3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO

A seguir são apresentados, discutidos e comparados os resultados experimentais de resistência ao embutimento. Posteriormente, são apresentados os resultados de resistência ao

embutimento obtidos por meio das equações analíticas, seguidos de comparações com os resultados experimentais.

Nos resultados apresentados foi adotada a seguinte nomenclatura: a resistência ao embutimento da CLT corresponde às siglas $f_{e,0,CLT}$ e $f_{e,90,CLT}$, para as direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente; a resistência ao embutimento da madeira serrada corresponde às siglas $f_{e,0,ms}$ e $f_{e,90,ms}$, para as direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

5.3.1 Resultados Experimentais

As Tabelas 5.4 a 5.7 apresentam os resultados dos ensaios de resistência ao embutimento, para os cinco diâmetros de pinos metálicos considerados.

No Apêndice C encontram-se todas as curvas de força de embutimento – deslocamento, com as retas paralelas ao trecho linear deslocadas em 5% do diâmetro, para determinação do valor experimental da força de embutimento, conforme o método da ASTM D5764-97a:2018, apresentado na seção 3.3.3.

Na Tabela 5.4 estão expostos os resultados de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da CLT ($f_{e,0,CLT}$) referentes a todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 5.4 – Resistência ao embutimento da CLT na direção paralela às fibras ($f_{e,0,CLT}$), em MPa

Corpo de prova	Diâmetro (mm)				
	6	8	10	12	16
1	28,97	18,28	21,53	19,08	20,51
2	19,17	22,61	19,92	21,76	22,81
3	19,78	18,62	24,58	22,93	21,57
4	27,78	28,09	21,18	22,25	18,40
5	21,35	24,54	21,69	20,77	22,57
6	28,33	21,76	24,16	26,79	26,40
Média	24,23	22,32	22,18	22,26	22,04
Desvio padrão	4,49	3,71	1,81	2,59	2,67
COV (%)	18,49	16,61	8,18	11,64	12,12

Fonte: O autor

Na Tabela 5.5 estão expostos os todos os resultados de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras da CLT ($f_{e,90,CLT}$).

Tabela 5.5 – Resistência ao embutimento da CLT na direção perpendicular às fibras ($f_{e,90,CLT}$), em MPa

Corpo de prova	Diâmetro (mm)				
	6	8	10	12	16
1	19,32	23,69	13,08	15,44	16,50
2	20,71	19,74	17,95	17,14	19,80
3	17,42	14,85	18,29	15,93	17,27
4	21,12	23,65	20,03	18,02	21,70
5	22,69	21,84	21,30	17,72	22,05
6	19,06	18,74	22,31	16,89	18,59
Média	20,05	20,42	18,83	16,86	19,32
Desvio padrão	1,84	3,39	3,28	1,00	2,28
COV (%)	9,20	16,60	17,42	5,95	11,82

Fonte: O autor

Na Tabela 5.6 estão expostos os resultados de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras referentes à madeira serrada ($f_{e,0,ms}$).

Tabela 5.6 – Resistência ao embutimento da madeira serrada na direção paralela às fibras ($f_{e,0,ms}$), em MPa

Corpo de prova	Diâmetro (mm)				
	6	8	10	12	16
1	19,13	21,06	23,64	19,81	24,60
2	29,98	21,05	22,45	23,12	21,51
3	23,14	28,97	28,34	26,97	22,65
4	19,36	22,04	23,41	24,14	26,17
5	20,42	22,48	23,04	22,71	21,65
6	20,61	22,21	24,51	21,24	23,29
Média	22,11	22,97	24,23	23,00	23,31
Desvio padrão	4,11	2,98	2,12	2,47	1,80
COV (%)	18,60	12,88	8,77	10,72	7,73

Fonte: O autor

Na Tabela 5.7 estão expostos todos os resultados de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras referentes à madeira serrada ($f_{e,90,ms}$).

Tabela 5.7– Resistência ao embutimento da madeira serrada na direção perpendicular às fibras ($f_{e,90,ms}$), em MPa

Corpo de prova	Diâmetro (mm)				
	6	8	10	12	16
1	12,21	13,56	12,33	11,62	12,54
2	13,67	13,32	11,91	11,55	11,81
3	12,87	14,06	20,54	14,35	12,83
4	16,82	14,35	11,60	14,26	21,43
5	22,46	24,52	20,02	22,14	16,36
6	19,72	20,07	19,29	17,97	16,74
Média	16,29	16,65	15,95	15,31	15,28
Desvio padrão	4,13	4,61	4,40	4,09	3,65
COV (%)	25,37	27,68	27,62	26,68	23,89

Fonte: O autor

A Tabela 5.8 apresenta um resumo das médias dos resultados de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, para as direções paralela e perpendicular às fibras, para os diâmetros de 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 16 mm.

Tabela 5.8 – Resumo dos valores médios de resistência ao embutimento

Diâmetro (mm)	CLT		Madeira serrada	
	$f_{e,0,CLT}$ (MPa)	$f_{e,90,CLT}$ (MPa)	$f_{e,0,ms}$ (MPa)	$f_{e,90,ms}$ (MPa)
6	24,23	20,05	22,11	16,29
8	22,32	20,42	22,97	16,65
10	22,18	18,83	24,23	15,95
12	22,26	16,86	23,00	15,31
16	22,04	19,32	23,31	15,28

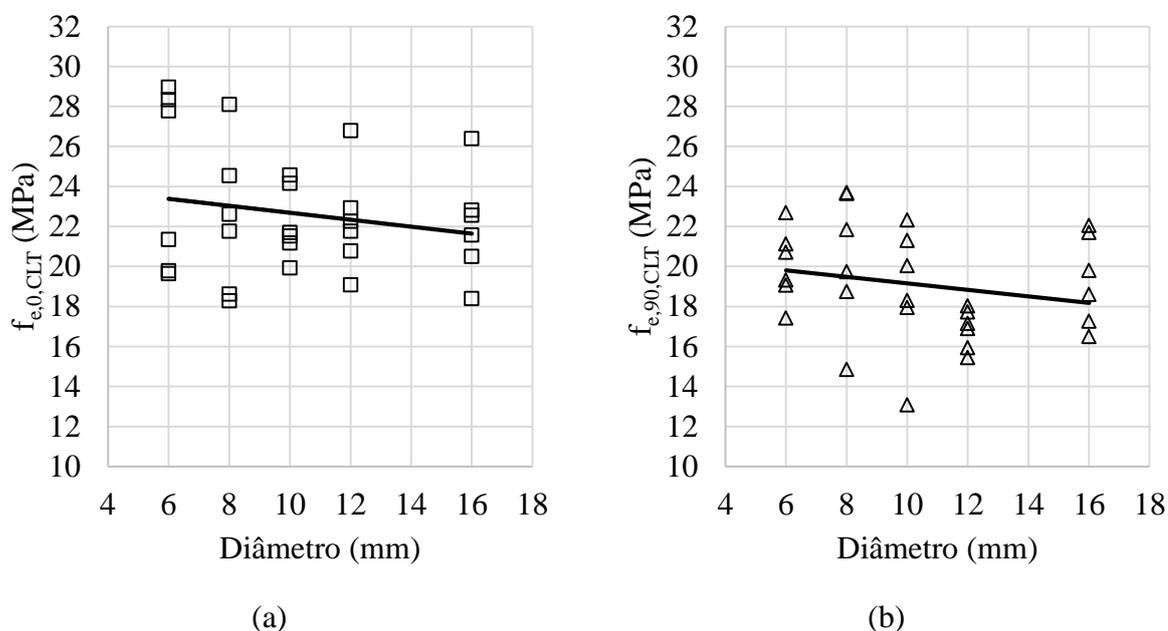
Fonte: O autor

5.3.2 Comparação entre Resultados Experimentais

5.3.2.1 Análise da Influência do Diâmetro

A Figura 5.1 apresenta na forma de gráficos a relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico para a CLT, para carregamentos nas direções paralela e perpendicular às fibras da camada externa da CLT.

Figura 5.1 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico para CLT: (a) na direção paralela às fibras e (b) na direção perpendicular às fibras

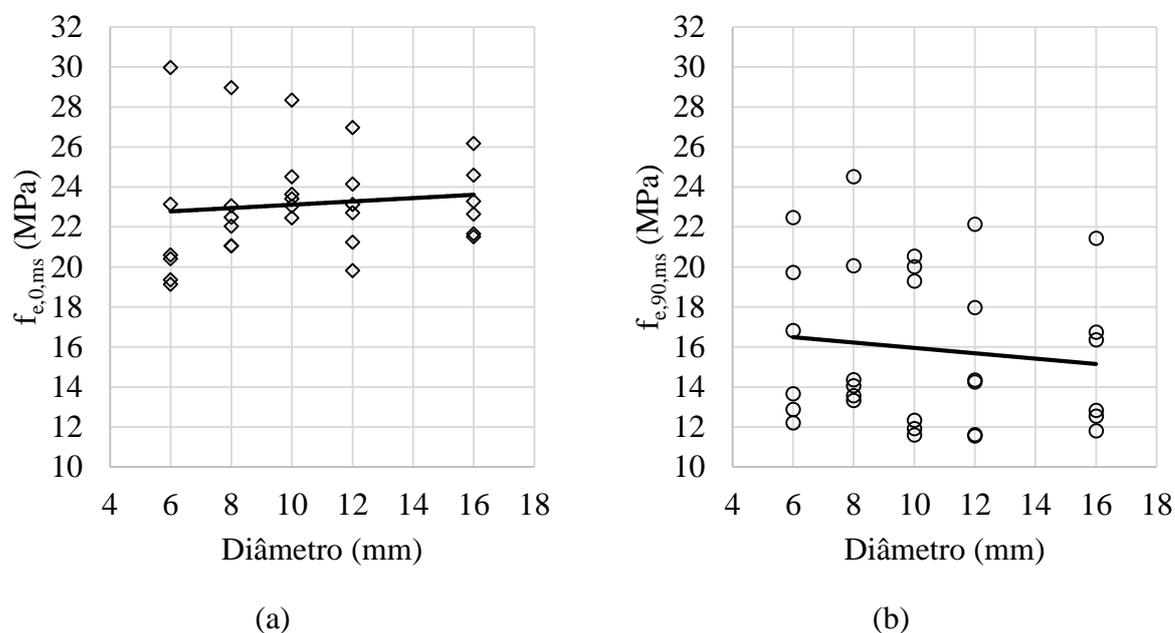


Fonte: O autor

Analisando a linha de tendência dos gráficos da Figura 5.1, é possível notar que há um decréscimo de resistência ao embutimento conforme maior o diâmetro do pino metálico, tanto para a direção paralela quanto para a direção perpendicular às fibras.

A Figura 5.2 apresenta gráficos de relação entre a resistência ao embutimento da madeira serrada e o diâmetro do pino metálico, segundo as direções paralela e perpendicular às fibras.

Figura 5.2 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico para madeira serrada: (a) na direção paralela às fibras e (b) na direção perpendicular às fibras



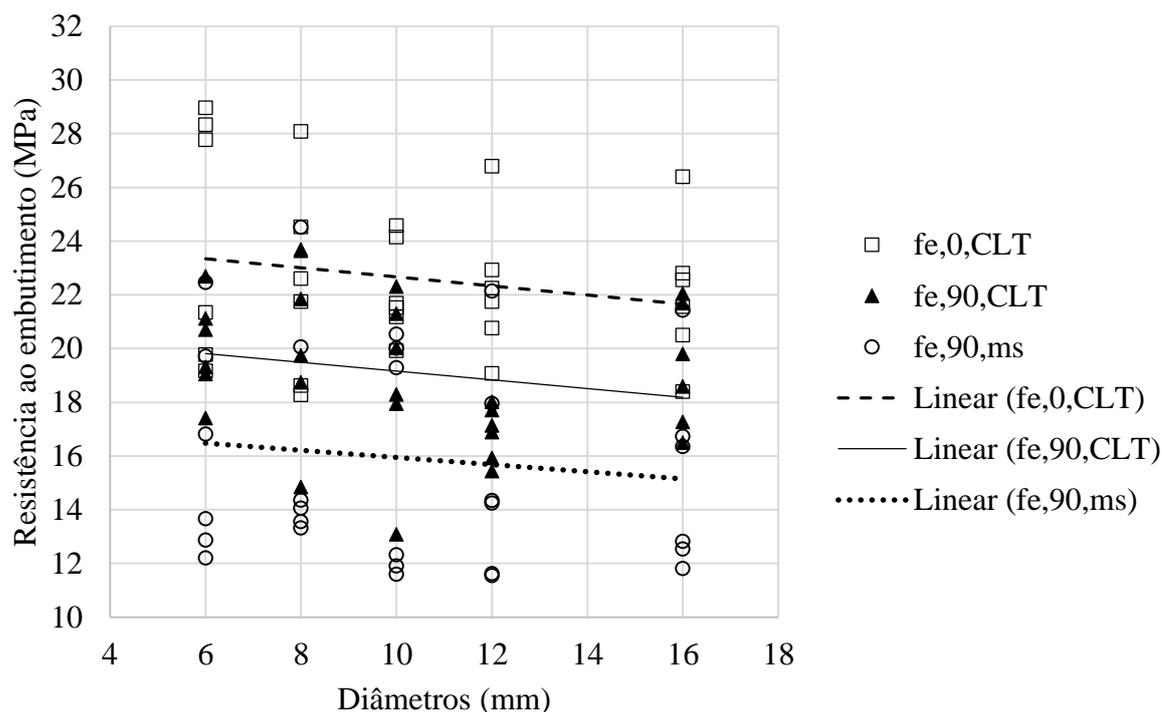
Fonte: O autor

Ao observar a linha de tendência do gráfico da Figura 5.2a, nota-se que não há decréscimo de resistência com aumento do diâmetro para a direção paralela às fibras, corroborando com os resultados encontrados nas pesquisas de Sandhaas et al. (2013), Sawata e Yasumura (2002) e Wilkinson (1991), os quais mostram que a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira serrada é pouco influenciada pelo diâmetro do pino metálico.

Observando-se a linha de tendência do gráfico da Figura 5.2b, constata-se que há uma diminuição da resistência ao embutimento conforme maior o diâmetro do pino metálico para a direção perpendicular às fibras da madeira serrada, assim como os resultados observados nas pesquisas de Sawata e Yasumura (2002) e Schoenmakers, Jorissen e Leijten (2010).

Na Figura 5.3 as séries de resultados que exibiram influência do diâmetro na resistência ao embutimento são sobrepostas, e para cada série foi traçada a respectiva linha de tendência, ou seja, foram sobrepostos os resultados de resistência ao embutimento da CLT, nas direções paralela e perpendicular às fibras, e da madeira serrada apenas na direção perpendicular às fibras.

Figura 5.3 – Relação entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico



Fonte: O autor

Com base no gráfico exposto na Figura 5.3, em especial nas linhas de tendência, fica evidente que a magnitude do decréscimo de resistência ao embutimento quanto maior o diâmetro do pino metálico é semelhante para as três séries. Para a CLT, nota-se que a influência do diâmetro é independente da direção do carregamento em relação às fibras, diferentemente do observado para a madeira serrada, na qual a influência do diâmetro está relacionada com a inclinação entre o carregamento e a direção das fibras.

5.3.2.2 Comparação entre as Resistências ao Embutimento da CLT e da Madeira Serrada com Enfoque na Influência da Direção do Carregamento em Relação às Fibras

A Tabela 5.9 apresenta as razões entre os valores experimentais médios de resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras, referentes à CLT e à madeira serrada, para os cinco diâmetros de pinos metálicos considerados.

Tabela 5.9 – Razão entre a resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras

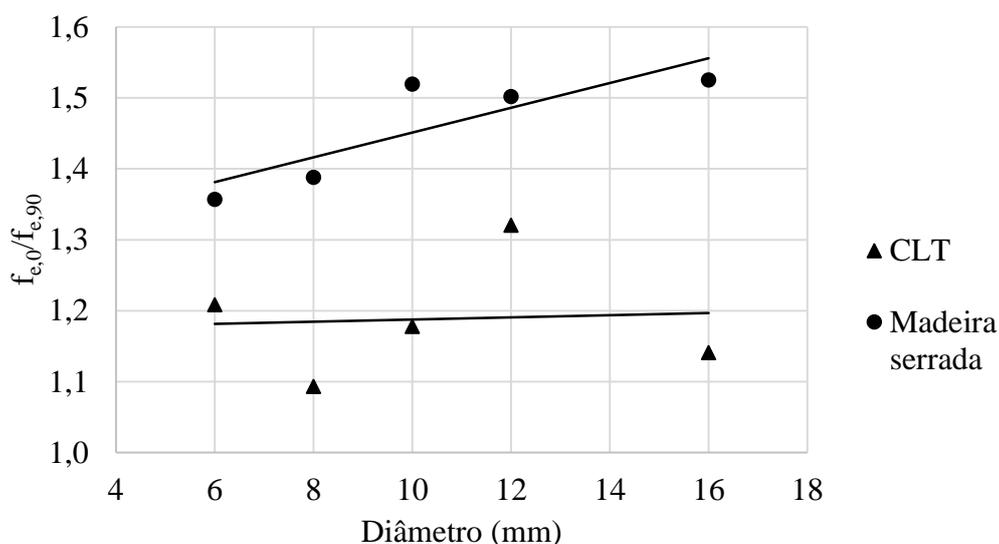
Diâmetro (mm)	CLT	Madeira serrada
	$f_{e,0,CLT}/f_{e,90,CLT}$	$f_{e,0,ms}/f_{e,90,ms}$
6	1,21	1,36
8	1,09	1,38
10	1,18	1,52
12	1,32	1,50
16	1,14	1,53

Fonte: O autor

Nota-se que tanto para a CLT quanto para madeira serrada, para todos os diâmetros analisados, a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras foi superior à resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras. Tal observação está de acordo com os resultados obtidos nas pesquisas de Santos et al. (2010), Sawata e Yasumura (2002) e Wilkinson (1991).

Na Figura 5.4 as razões entre os valores médios de resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras, para a CLT e madeira serrada, são apresentadas de forma gráfica.

Figura 5.4 – Razão entre resistência ao embutimento na direção paralela e perpendicular às fibras ($f_{e,0}/f_{e,90}$) para CLT e madeira serrada para cada diâmetro

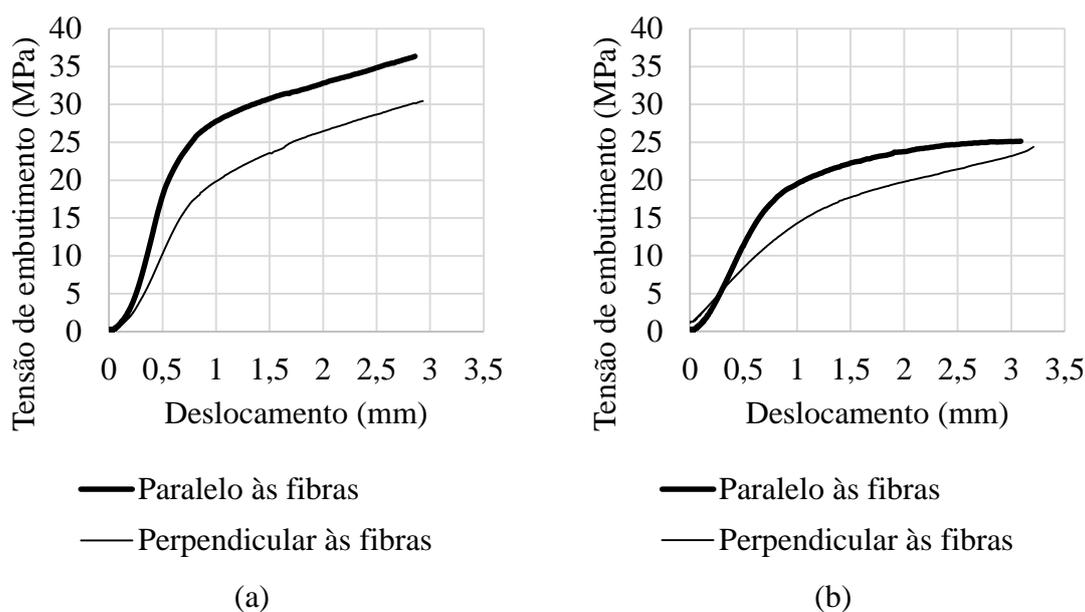


Fonte: O autor

Analisando as linhas de tendência traçadas, observa-se que para a CLT a relação entre a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras ($f_{e,0,CLT}/f_{e,90,CLT}$) não é influenciada pelo diâmetro do pino metálico, diferentemente da madeira serrada, em que a relação entre a resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras ($f_{e,0,ms}/f_{e,90,ms}$) aumenta conforme maior o diâmetro do pino metálico.

A Figura 5.5 mostra as curvas de tensão de embutimento – deslocamento típicas observadas nos ensaios de resistência ao embutimento. As curvas expostas na Figura 5.5 são referentes a corpos de prova com pino metálico de 6 mm, contudo a característica das curvas é semelhante para os demais diâmetros estudados. Assim, optou-se por expor, nesta parte do texto, apenas a curva para o referido diâmetro, para clareza na apresentação.

Figura 5.5 – Curvas típicas de tensão de embutimento – deslocamento para a direção paralela e perpendicular às fibras para: (a) CLT e (b) madeira serrada



Fonte: O autor

Observando as curvas da Figura 5.5a, referentes à CLT, nota-se que o comportamento elasto-plástico é bastante semelhante para carregamentos nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Nas curvas da Figura 5.5b, referentes à madeira serrada, é possível observar que para a direção paralela às fibras, após o ponto de escoamento (considerando o ponto definido pela ASTM D5764-97a:2018), a curva possui característica de comportamento plástico, com expressivo aumento de deslocamento sem grande aumento no valor de resistência. Diferente

da direção perpendicular às fibras, na qual a curva possui característica de comportamento elástico.

Assim sendo, infere-se que a laminação cruzada proporciona à CLT um comportamento intermediário ao comportamento da madeira serrada para as direções paralela e perpendicular às fibras, resultando em uma curva de tensão de embutimento – deslocamento com aumento de resistência após o escoamento.

5.3.2.3 Comparação entre a Resistência ao Embutimento da CLT e Madeira Serrada

Na Tabela 5.10 são apresentadas as razões entre os valores médios de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada ($f_{e,CLT}/f_{e,ms}$) para as direções paralela e perpendicular às fibras, para os cinco diâmetros de pinos metálicos considerados.

Tabela 5.10 – Razão entre a resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada, para as direções paralela e perpendicular às fibras

Diâmetro (mm)	$f_{e,0,CLT}/f_{e,0,ms}$	$f_{e,90,CLT}/f_{e,90,ms}$
6	1,10	1,23
8	0,97	1,23
10	0,92	1,18
12	0,97	1,10
16	0,95	1,26

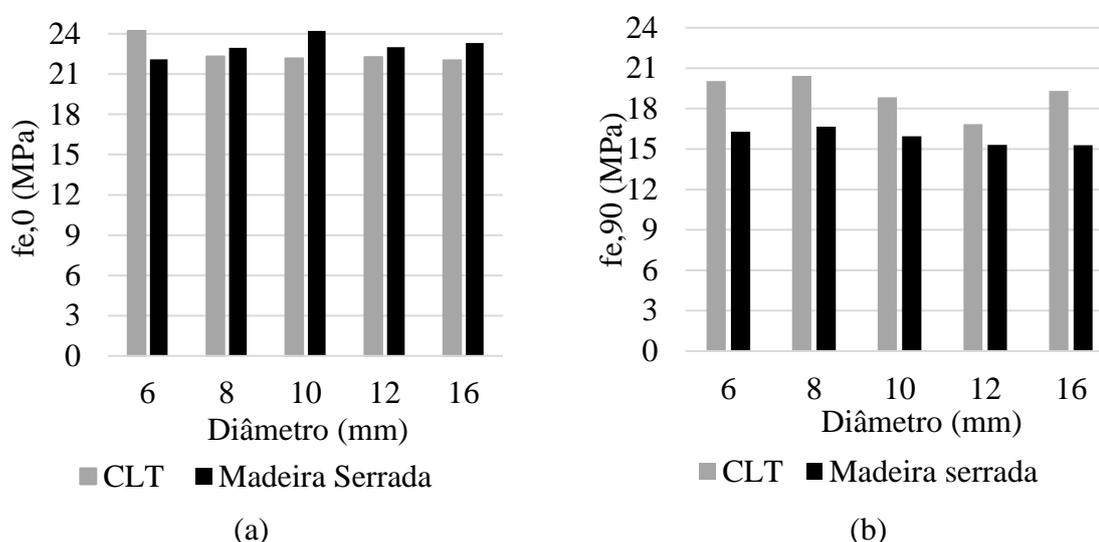
Fonte: O autor

Nota-se que, para a direção paralela às fibras, as razões entre a resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada foram menores que 1, com exceção da razão correspondente ao diâmetro de 6 mm, ficando evidente que, assim como o esperado, a presença de uma camada carregada na direção perpendicular às fibras diminui a resistência ao embutimento quando comparado com madeira serrada.

Analisando as razões entre a resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada, para a direção perpendicular às fibras, observa-se que todos os valores foram maiores que 1, confirmando que a presença de uma camada carregada na direção paralela às fibras aumenta a resistência ao embutimento quando comparado com madeira serrada.

Os resultados médios de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada, expostos na forma de gráfico de barras na Figura 5.6, evidenciam o exposto acima. A resistência ao embutimento da CLT na direção paralela às fibras foi reduzida em até 8% devido a existência de uma lamela carregada na direção perpendicular às fibras, enquanto a resistência ao embutimento da CLT na direção perpendicular às fibras foi aumentada em até 26% em virtude da existência de uma lamela carregada na direção paralela às fibras.

Figura 5.6 – Valores médios de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para as direções: (a) paralela e (b) perpendicular às fibras



Fonte: O autor

Com o propósito de verificar se existe diferença significativa entre as médias dos resultados experimentais de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada, foi realizada análise de variância de um fator (ANOVA – um fator).

Tendo em vista que a direção das fibras e o diâmetro do pino metálico são parâmetros cuja influência já é abordada na literatura, optou-se por não considerar estes parâmetros no teste estatístico. Assim, a ANOVA foi aplicada separadamente para cada diâmetro e direção das fibras, sendo o material (CLT e madeira serrada) a única diferença entre os grupos. Assim, o teste estatístico foi aplicado um total de dez vezes, considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Antes de realizar a ANOVA, foram verificados os pressupostos de que os erros são variáveis aleatórias independentes, de que os erros seguem distribuição normal e que as

variâncias de cada grupo são iguais (verificação da homocedasticidade). Para a ANOVA foram consideradas as seguintes hipóteses:

H_0 : Não existe diferença estatística entre as médias de resistência ao embutimento da CLT e resistência ao embutimento da madeira serrada ($\mu_{CLT} = \mu_{ms}$);

H_1 : As médias de resistência ao embutimento da CLT e resistência ao embutimento da madeira serrada são estatisticamente diferentes ($\mu_{CLT} \neq \mu_{ms}$).

A hipótese H_0 deve ser rejeitada toda vez que o F calculado for superior ao F tabelado ($F_{cal} > F_{tab}$). Para todas as vezes que a ANOVA foi aplicada, o grau de liberdade entre os grupos foi 1 e o grau de liberdade dentro dos grupos foi 10. Assim, da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se que $F_{0,05;1;10} = 4,96$.

Todos os testes de verificação dos pressupostos, assim como as tabelas ANOVA encontram-se no Apêndice D. Na Tabela 5.11 são apresentados os valores de F e P-valor obtidos da análise de variância para cada caso.

Tabela 5.11 – Resumo dos resultados da ANOVA para comparação entre CLT e madeira serrada

Diâmetro (mm)	Direção paralela às fibras		Direção perpendicular às fibras	
	Estatística F (F_{cal})	P-valor	Estatística F (F_{cal})	P-valor
6	0,784	0,397	4,149	0,069
8	0,168	0,691	2,607	0,138
10	3,254	0,101	1,651	0,228
12	0,254	0,625	0,808	0,390
16	0,933	0,357	5,265	0,045

Fonte: O autor

Analisando os resultados obtidos pelo teste estatístico, verifica-se que apenas para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 16 mm, $P\text{-valor} < \alpha$ e $F_{cal} > F_{tab}$, portanto, rejeita-se a hipótese H_0 , ou seja, as médias de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada para a direção perpendicular às fibras, com diâmetro de 16 mm, são estatisticamente diferentes.

Para os demais casos, não há evidências significativas para se rejeitar H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada sejam diferentes.

5.3.3 Resultados Analíticos

Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados de resistência ao embutimento obtidos por meio das equações analíticas propostas por Blass e Uibel (2007), bem como o valor da densidade considerado nos cálculos.

Tabela 5.12 – Resistência ao embutimento calculada: Blass e Uibel (2007)

Diâmetro (mm)	$\rho_{ap,m}$ (kg/m ³)	Equação 3.43 (Modelo 1)		Equação 3.44 (Modelo 2)		Equação 3.45 (Modelo 3)	
		$f_{e,0,CLT}$ (MPa)	$f_{e,90,CLT}$ (MPa)	$f_{e,0,CLT}$ (MPa)	$f_{e,90,CLT}$ (MPa)	$f_{e,0,CLT}$ (MPa)	$f_{e,90,CLT}$ (MPa)
		6	443,62	37,47	34,06	38,25	32,78
8	443,62	36,23	32,94	36,99	31,70	25,98	25,98
10	443,62	35,00	31,81	35,73	30,62	23,08	23,08
12	443,62	33,76	30,69	34,47	29,54	20,96	20,96
16	443,62	31,29	28,45	31,94	27,38	17,99	17,99

Fonte: O autor

Na Tabela 5.13 estão expostos os resultados de resistência ao embutimento obtidos por meio da equação proposta por Kennedy et al. (2014a) e o valor de densidade aparente média, ou seja, corrigida para umidade padrão de 12%.

Tabela 5.13 – Resistência ao embutimento calculada: Kennedy et al. (2014a)

Diâmetro (mm)	$\rho_{12\%,m}$ (g/cm ³)	$f_{e,0,CLT}$ (MPa)	$f_{e,90,CLT}$ (MPa)
6	0,439	22,53	19,44
8	0,439	22,53	19,44
10	0,439	22,53	19,44
12	0,439	22,53	19,44
16	0,439	22,53	19,44

Fonte: O autor

Na Tabela 5.14 são apresentados os valores calculados de resistência ao embutimento obtidos segundo as equações propostas no documento normativo brasileiro, assim como o parâmetro α_e considerado nos cálculos.

Tabela 5.14 – Resistência ao embutimento calculada: ABNT NBR 7190:1997

Diâmetro (mm)	α_e	$f_{e,0}$ (MPa)	$f_{e,90}$ (MPa)
6	2,500	26,62	16,64
8	2,200	26,62	14,64
10	1,905	26,62	12,68
12	1,725	26,62	11,48
16	1,520	26,62	10,12

Fonte: O autor

Na Tabela 5.15 estão expostos os resultados calculados de resistência ao embutimento obtidos de acordo com as equações propostas pelo documento normativo europeu, assim como a densidade considerada nos cálculos.

Tabela 5.15 – Resistência ao embutimento calculada: CEN EN 1995 1-1:2004

Diâmetro (mm)	$\rho_{ap,m}$ (kg/m³)	$f_{e,0}$ (MPa)	$f_{e,90}$ (MPa)
6	443,62	34,19	23,75
8	443,62	33,47	22,77
10	443,62	32,74	21,83
12	443,62	32,01	20,92
16	443,62	30,56	19,22

Fonte: O autor

Na Tabela 5.16 são apresentados os resultados de resistência ao embutimento obtidos a partir das equações propostas na norma americana e a densidade relativa considerada nos cálculos.

Tabela 5.16 – Resistência ao embutimento calculada: ANSI/AWC NDS:2015

Diâmetro (mm)	G	f_{e,0} (MPa)	f_{e,90} (MPa)
6	0,409	21,98	21,98
8	0,409	31,48	20,49
10	0,409	31,48	18,32
12	0,409	31,48	16,73
16	0,409	31,48	14,49

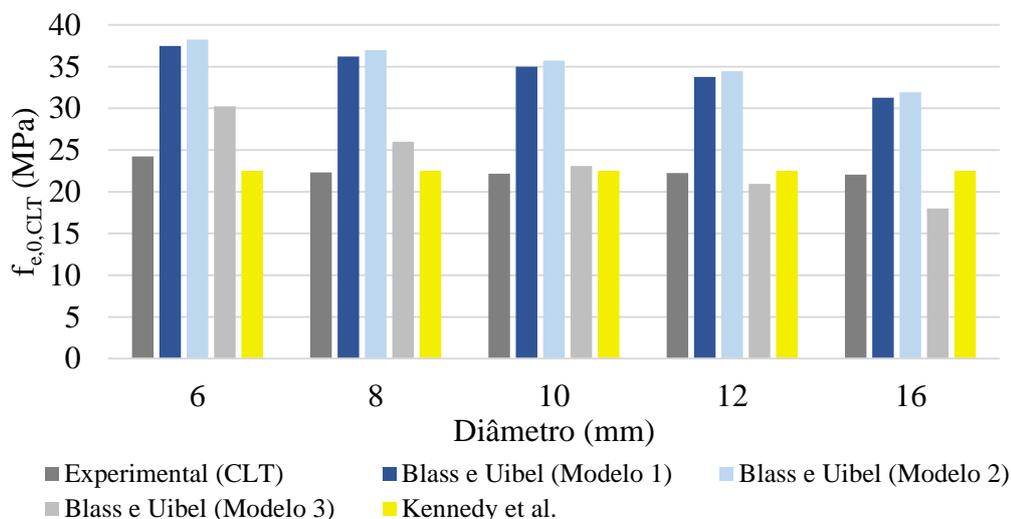
Fonte: O autor

As comparações entre os resultados analíticos e experimentais de resistência ao embutimento são procedidas na próxima seção.

5.3.4 Comparação entre Resultados Analíticos e Experimentais

Nesta seção os valores médios de resistência ao embutimento obtidos experimentalmente são comparados com os resultados de resistência ao embutimento calculados por meio das equações analíticas, conforme explanado na seção 4.2.6. Os resultados são comparados por meio de gráficos de barra e tabelas com as diferenças percentuais entre os resultados.

Na Figura 5.7 e Tabela 5.17, os resultados experimentais de resistência ao embutimento da CLT, na direção paralela às fibras, são comparados com os resultados obtidos por meio das equações propostas por Blass e Uibel (2007) e Kennedy et al. (2014a), para todos os diâmetros de pinos metálicos considerados.

Figura 5.7 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,CLT}$ 

Fonte: O autor

Tabela 5.17 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,CLT}$

Diâmetro (mm)	Experimental* $f_{e,0,CLT}$ (MPa)	Blass e Uibel (2007)			Kennedy et al. (2014a)
		(Modelo1)	(Modelo 2)	(Modelo 3)	
6	24,23	54,6%	57,9%	24,9%	-7,0%
8	22,32	62,4%	65,7%	16,4%	1,0%
10	22,18	57,8%	61,1%	4,1%	1,6%
12	22,26	51,6%	54,8%	-5,9%	1,2%
16	22,04	42,0%	44,9%	-18,4%	2,2%

*valores médios

Fonte: O autor

Nota-se que, para todos os diâmetros considerados e considerando-se as condições e tipo de madeira escolhidos para este estudo, a resistência ao embutimento da CLT obtida por meio das equações propostas por Blass e Uibel (2007), nos modelos 1 e 2, foi até 65,7% superior aos resultados experimentais. Analisando as diferenças percentuais em relação ao modelo 3 de Blass e Uibel (2007), verifica-se que a equação considera um decréscimo de resistência quanto maior o diâmetro do pino superior ao observado nos resultados experimentais.

Para todos os diâmetros considerados, constata-se que a equação de Kennedy et al. (2014a) apresentou relativamente uma boa aproximação com os resultados experimentais de

CLT na direção paralela às fibras, sendo a maior diferença referente ao diâmetro de 6mm, em que a resistência ao embutimento calculada foi 7% inferior ao valor experimental, e ao diâmetro de 16 mm, em que a resistência ao embutimento calculada foi 2,2% superior ao valor experimental.

Na Figura 5.8 e Tabela 5.18, os resultados experimentais de resistência ao embutimento da CLT, na direção perpendicular às fibras, são comparados com os resultados obtidos por meio das equações propostas por Blass e Uibel (2007) e Kennedy et al. (2014a), para todos os diâmetros dos pinos metálicos considerados.

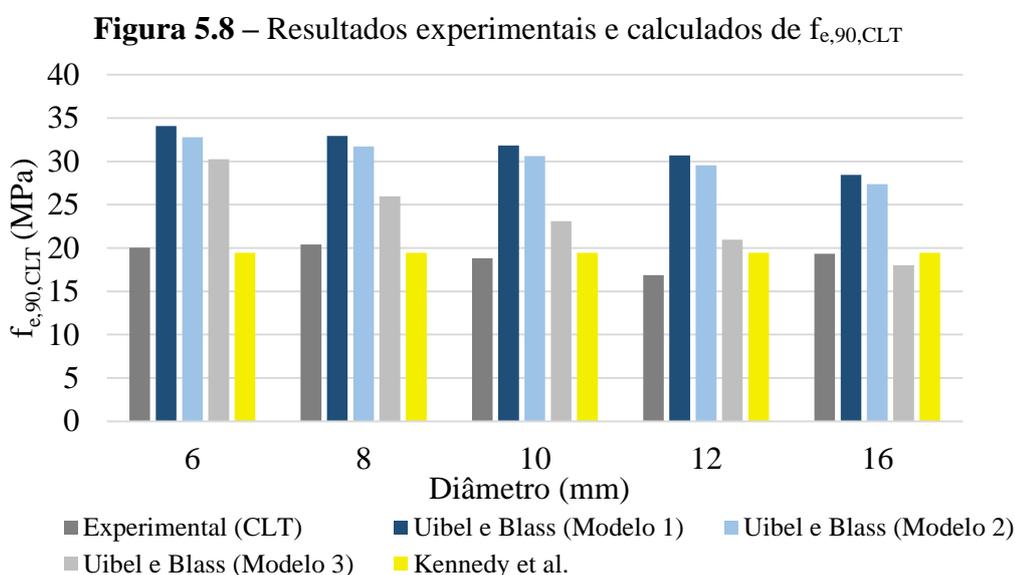


Tabela 5.18 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,CLT}$

Diâmetro (mm)	Experimental* $f_{e,90,CLT}$ (MPa)	Blass e Uibel (2007)			Kennedy et al. (2014a)
		(Modelo 1)	(Modelo 2)	(Modelo 3)	
6	20,05	69,8%	63,5%	50,9%	-3,1%
8	20,42	61,3%	55,3%	27,2%	-4,8%
10	18,83	69,0%	62,6%	22,6%	3,2%
12	16,86	82,1%	75,2%	24,3%	15,3%
16	19,32	47,2%	41,7%	-6,9%	0,6%

*valores médios

Fonte: O autor

Assim como para a direção paralela, para a direção perpendicular às fibras os modelos 1 e 2 de Blass e Uibel (2007) resultaram em valores de resistência ao embutimento da CLT superiores aos resultados experimentais, neste caso com diferença de até 82,1%.

Tanto para a direção paralela, quanto para a direção perpendicular às fibras, foram respeitadas as limitações recomendadas por Blass e Uibel (2007) na aplicação das equações referentes aos modelos 1 e 2 (lamelas com espessura inferior a 40 mm e relação t_0/t_{90} entre 0,95 e 2,21), porém em ambas as direções os modelos resultam em valores de resistência ao embutimento superiores aos resultados experimentais. O mesmo foi observado nas pesquisas de Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) e Ottenhaus et al. (2017), já referenciadas na seção 3.4.3.

Uma das possíveis causas que poderia ser apontada para esta notável diferença entre os resultados experimentais e calculados por meio das equações de Blass e Uibel (2007) seria o método de ensaio, uma vez que o presente trabalho foi realizado segundo as prescrições da ASTM D5764-97a:2018 e a pesquisa de Blass e Uibel (2007) foi realizada segundo a BS EN 383:2007. Porém Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) também realizaram ensaios de acordo com a BS EN 383:2007, e ainda assim observaram que as equações referentes aos modelos 1 e 2 superestimam a resistência ao embutimento.

Assim como observado por Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018), outras duas possíveis causas dessa diferença podem ser apontadas. Ao analisar os dados apresentados na Tabela 3.4, nota-se que a umidade média dos painéis de CLT ensaiados por Blass e Uibel (2007) se encontravam com umidade inferior ao padrão de 12%, e os autores não realizaram nenhum ajuste nos valores de umidade nos dados utilizados para as equações. Porém, na pesquisa realizada por Ottenhaus et al. (2017), os corpos de prova de CLT também encontravam-se com teor de umidade inferior a 12% (9,9%), e ainda assim os resultados experimentais foram inferiores aos resultados segundo o modelo 1 proposto por Blass e Uibel (2007).

Outra observação que pode ser feita é em relação à espessura das camadas da CLT. Apesar de Blass e Uibel (2007) limitarem as equações dos modelos 1 e 2 para CLT com camadas de até 40 mm, apenas um grupo de ensaios considerou CLT com esta espessura. Na pesquisa realizada pelos autores, foram utilizados painéis com camadas de espessura inferior a 20 mm na maior parte dos ensaios, conforme se pode observar na Tabela 3.5. Nota-se ainda

que para um mesmo diâmetro considerado, os resultados referentes a CLT com camadas mais finas foram superiores aos resultados referentes a CLT com camadas de espessura maior.

Assim como a presente pesquisa, os estudos de Tuhkanen, Mölder e Schickhofer (2018) e Ottenhaus et al. (2017) também consideraram CLT com espessuras superiores a 20 mm. Portanto, entende-se que os modelos 1 e 2 propostos por Blass e Uibel (2007) superestimam a resistência ao embutimento, possivelmente por terem sido baseadas em resultados de experimentos realizados predominantemente com CLT de camadas com espessura inferior a 20 mm.

Em relação ao modelo 3, de Blass e Uibel (2007), para a direção perpendicular às fibras, a resistência ao embutimento calculada foi superior aos resultados experimentais para todos os diâmetros, com exceção do diâmetro de 16 mm. Os resultados obtidos pelo modelo 3 não foram satisfatórios tanto para a direção paralela quanto para a direção perpendicular às fibras. Assim, entende-se que o limite sugerido pelos autores, de painéis com lamelas de espessura de até 9 mm, não deve ser excedido.

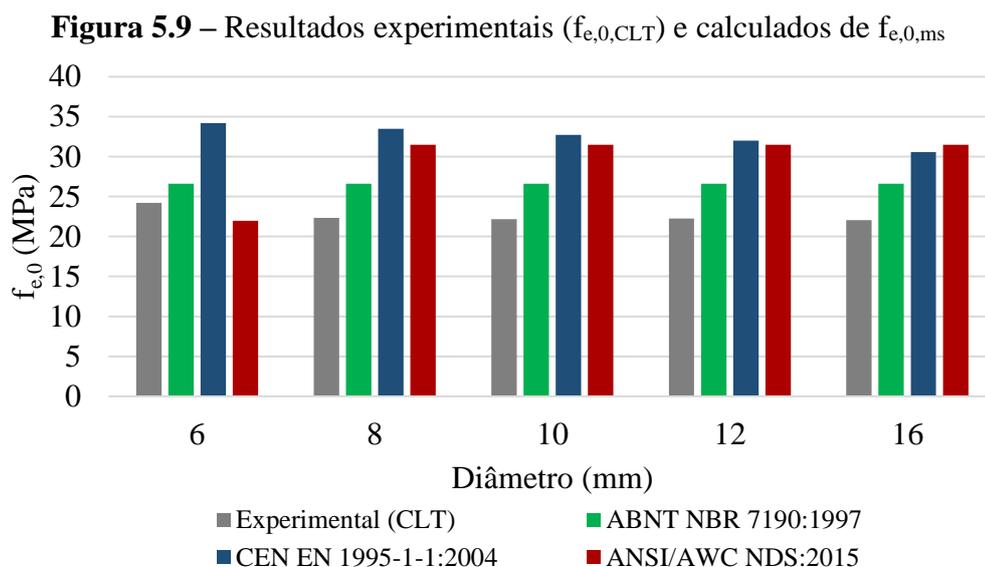
Comparando os resultados experimentais de CLT na direção perpendicular com os resultados obtidos por meio da equação de Kennedy et al. (2014a), para os diâmetros de 6 mm e 8 mm, a resistência ao embutimento calculada foi 3,1% e 4,8% inferior aos resultados experimentais, respectivamente. Para os diâmetros 10 mm, 12 mm e 16 mm, a resistência ao embutimento calculada foi 3,2%, 15,3% e 0,6% superior aos resultados experimentais, respectivamente.

As diferenças percentuais entre os resultados experimentais e aqueles obtidos de acordo com a equação de Kennedy et al. (2014a) são relativamente pequenas. Portanto, analisa-se que houve boa concordância entre os resultados experimentais com aqueles obtidos por meio da equação de Kennedy et al. (2014a), para as duas direções consideradas.

Os valores médios dos ensaios com CLT foram comparados também com os valores de resistência ao embutimento estimados por meio das equações analíticas sugeridas pelos documentos normativos brasileiro, americano e europeu para madeira serrada, haja vista os resultados da análise de variância, nos quais para todos os casos (com exceção do diâmetro de 16 mm e direção perpendicular às fibras) não apontou diferença significativa entre as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada. Outra razão para realizar tal comparação é o apontamento feito por Uibel e Blass (2014), o qual sugere que sejam

utilizadas equações de madeira serrada para estimar a resistência ao embutimento em casos de ligações com pregos e parafusos em CLT com lamelas de espessura superior a 9 mm.

Na Figura 5.9 e Tabela 5.19, os resultados experimentais médios de CLT na direção paralela às fibras são comparados com os resultados obtidos por meio das equações propostas pelas normas: ABNT NBR 7190:1997, CEN EN 1995 1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015.



Fonte: O autor

Tabela 5.19 – Comparação entre resultados experimentais ($f_{e,0,CLT}$) e calculados de $f_{e,0,ms}$

Diâmetro (mm)	Experimental* $f_{e,0,CLT}$ (MPa)	ABNT NBR 7190:1997	CEN EN 1995 1-1:2004	ANSI/AWC NDS:2015
6	24,23	9,9%	41,1%	-9,3%
8	22,32	19,3%	50,0%	41,1%
10	22,18	20,0%	47,6%	42,0%
12	22,26	19,6%	43,8%	41,4%
16	22,04	20,8%	38,6%	42,8%

*valores médios

Fonte: O autor

Com exceção do resultado obtido por meio da ANSI/AWC NDS:2015 para o diâmetro de 6 mm, os demais resultados obtidos por meio das equações das normas brasileira, europeia

e americana, válidas para madeira serrada, resultaram em valores de resistência ao embutimento superiores aos valores de resistência ao embutimento da CLT na direção paralela às fibras. As equações da ABNT NBR 7190:1997, CEN EN 1995 1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015 apresentaram valores de resistência ao embutimento até 20,8%, 50,0% e 42,8% superiores aos resultados experimentais de CLT, respectivamente.

Na Figura 5.10 e os resultados experimentais médios de CLT na direção perpendicular às fibras são comparados com os resultados obtidos por meio das equações propostas pelas normas: ABNT NBR 7190:1997, CEN EN 1995 1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015.

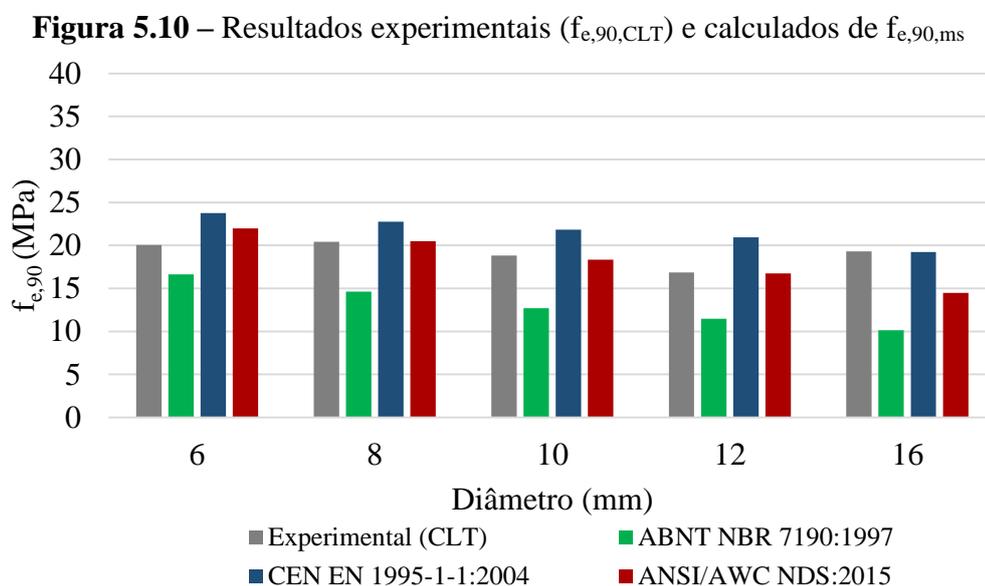


Tabela 5.20 – Comparação entre resultados experimentais ($f_{e,90,CLT}$) e calculados de $f_{e,90,ms}$

Diâmetro (mm)	Experimental* $f_{e,90,CLT}$ (MPa)	ABNT NBR 7190:1997	CEN EN 1995 1-1:2004	ANSI/AWC NDS:2015
6	20,05	-17,0%	18,4%	9,6%
8	20,42	-28,3%	11,5%	0,3%
10	18,83	-32,7%	15,9%	-2,7%
12	16,86	-31,9%	24,1%	-0,8%
16	19,32	-47,6%	-0,5%	-25,0%

*valores médios

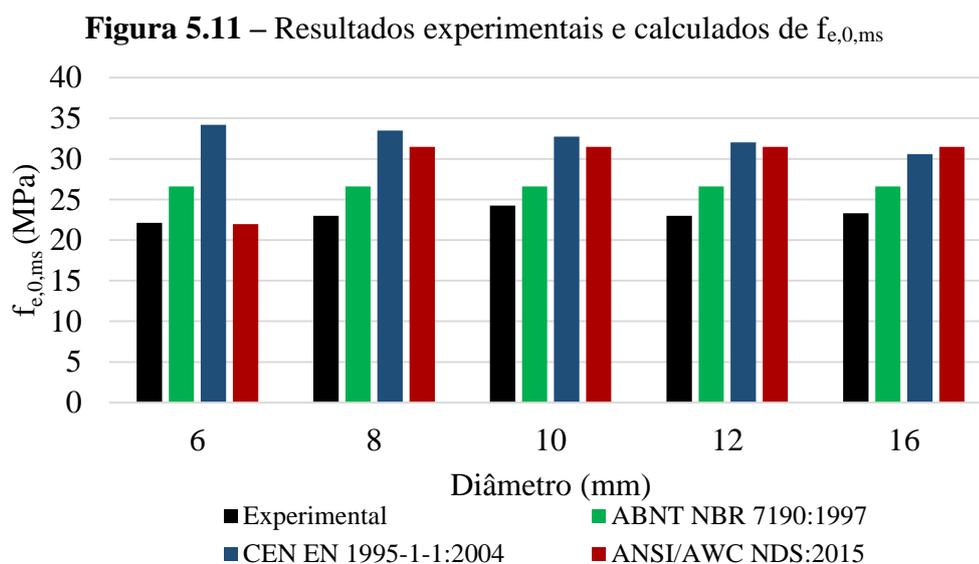
Fonte: O autor

Os valores de resistência ao embutimento calculados de acordo com a equação da norma brasileira, válidos para a madeira serrada, foram até 47,6% inferiores a resistência ao embutimento experimental da CLT na direção perpendicular às fibras. Já os resultados obtidos por meio da equação da norma europeia, também válida para madeira serrada, foram inferiores aos valores experimentais de resistência ao embutimento da CLT apenas para o diâmetro de 16 mm, para os demais diâmetros a resistência calculada foi até 24,1% superior.

Analisando a comparação entre a resistência ao embutimento da CLT na direção perpendicular às fibras e a resistência obtida por meio da equação americana para madeira serrada, se verifica que o resultado analítico referente ao diâmetro de 6 mm foi 9,6% superior. Nota-se que o decréscimo de resistência conforme maior o diâmetro do pino metálico, considerado pela Equação 3.41, foi superior ao observado nos resultados experimentais.

Ao analisar todas as comparações entre resultados experimentais e analíticos realizadas para CLT, nota-se que a equação proposta por Kennedy et al. (2014a) foi a que apresentou melhor aproximação com os resultados experimentais.

Os resultados experimentais médios de madeira serrada foram comparados com os resultados analíticos obtidos por meio das equações dos documentos normativos brasileiro, americano e europeu. Na Figura 5.11 e Tabela 5.21, são comparados os resultados referentes à direção paralela às fibras.



Fonte: O autor

Tabela 5.21 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,0,ms}$

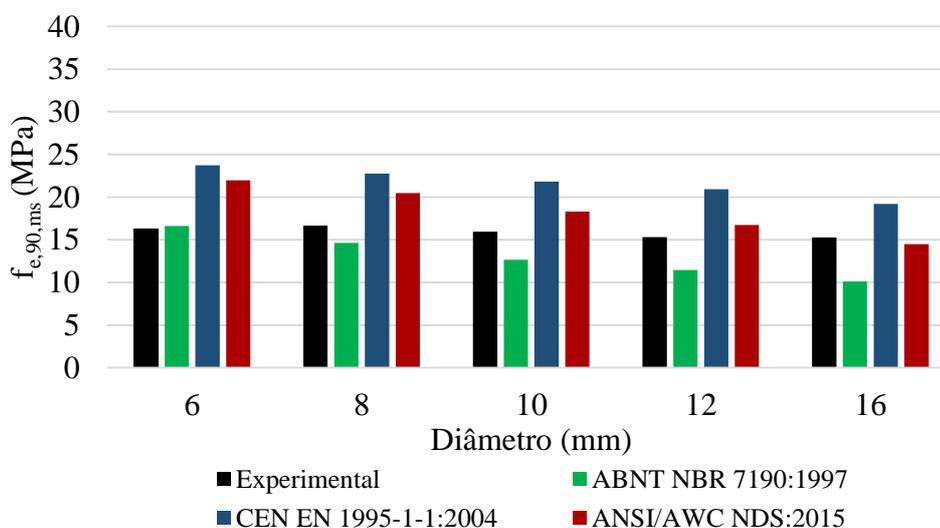
Diâmetro (mm)	Experimental $f_{e,0,ms}$ (MPa)	ABNT NBR 7190:1997	CEN EN 1995 1-1:2004	ANSI/AWC NDS:2015
6	22,11	20,4%	54,7%	-0,6%
8	22,97	15,9%	45,7%	37,0%
10	24,23	9,9%	35,1%	29,9%
12	23,00	15,7%	39,2%	36,9%
16	23,31	14,2%	31,1%	35,0%

*valores médios

Fonte: O autor

Com exceção do resultado obtido por meio da ANSI/AWC NDS:2015 para diâmetro de 6 mm, os demais resultados apresentam valores superiores à resistência ao embutimento da madeira serrada na direção paralela às fibras. As equações das normas brasileira, europeia e americana resultaram em valores resistência ao embutimento até 20,4%, 54,7% e 36,9% superiores aos valores experimentais de madeira serrada, respectivamente.

Na Figura 5.12 e Tabela 5.22, os resultados experimentais médios de madeira serrada na direção perpendicular às fibras são comparados com os resultados obtidos por meio das equações propostas pelas normas: ABNT NBR 7190:1997, CEN EN 1995 1-1:2004 e ANSI/AWC NDS:2015.

Figura 5.12 – Resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,ms}$ 

Fonte: O autor

Tabela 5.22 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de $f_{e,90,ms}$

Diâmetro (mm)	Experimental $f_{e,90,ms}$ (MPa)	ABNT NBR 7190:1997	CEN EN 1995 1-1:2004	ANSI/AWC NDS:2015
6	16,29	2,1%	45,8%	35,0%
8	16,65	-12,1%	36,7%	23,1%
10	15,95	-20,5%	36,9%	14,9%
12	15,31	-25,0%	36,6%	9,2%
16	15,28	-33,8%	25,7%	-5,2%

*valores médios

Fonte: O autor

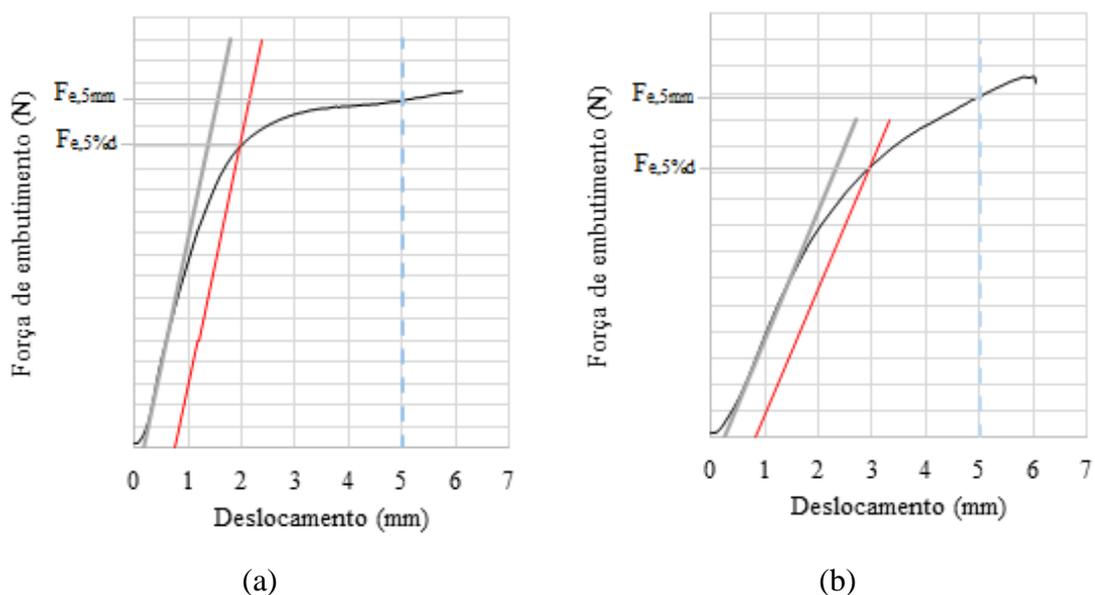
Os resultados obtidos segundo a norma brasileira foram até 33,8% inferiores aos valores experimentais de resistência ao embutimento da madeira serrada, com exceção do resultado referente ao diâmetro de 6 mm. Nota-se que a equação da norma brasileira considera um decréscimo de resistência ao embutimento quanto maior o diâmetro, superior ao observado nos experimentos.

Por outro lado, os resultados obtidos por meio das equações das normas europeia e americana foram até 45,8% superiores aos valores experimentais de resistência ao embutimento, com exceção do resultado obtido segundo a ANSI/AWC NDS:2015 para o diâmetro de 16 mm.

Esperava-se que os resultados analíticos obtidos por meio das equações propostas na ANSI/AWC NDS:2015 apresentassem boa aproximação com os resultados experimentais de madeira serrada, uma vez que se presume que as equações propostas pela norma americana são calibradas com o modelo de ensaio proposto pelo mesmo documento normativo. Porém, tal implicação não foi observada na presente pesquisa, assim como na pesquisa realizada por Almeida (2014).

Com relação ao distanciamento entre os resultados experimentais de madeira serrada e aqueles obtidos por meio das equações da CEN EN 1995 1-1:2004, o provável motivo é o método de ensaio, conforme mostra a Figura 5.13 (curvas referentes à madeira serrada com diâmetro de 12 mm), em que claramente, para grande parte dos casos, o valor da força de embutimento correspondente ao deslocamento de 5 mm, ou força máxima, será superior ao valor da força encontrada pelo método americano (*off-set* de 5% do diâmetro do pino).

Figura 5.13 – Comparação entre o método de *off-set* de 5% d e deslocamento de 5 mm para as direções: (a) paralela e (b) perpendicular às fibras

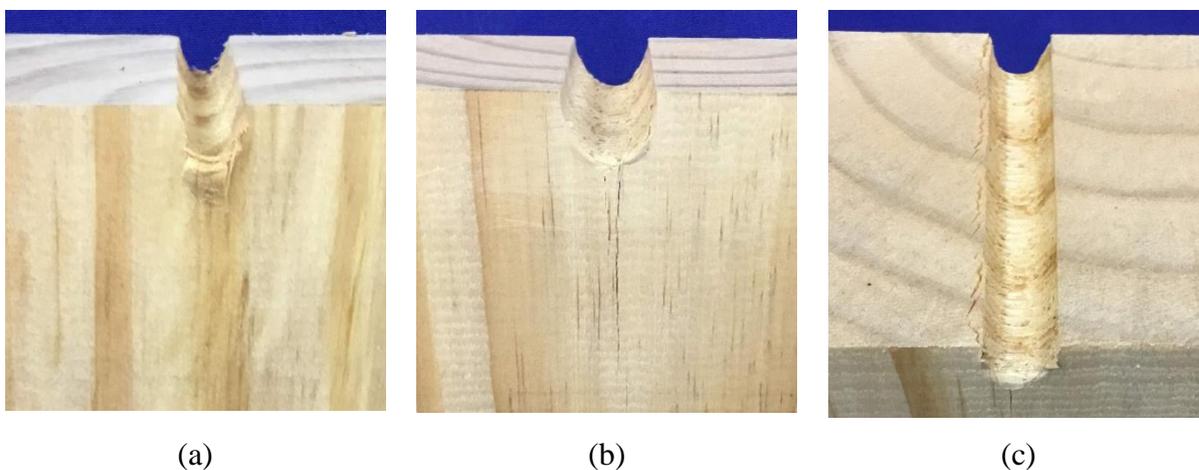


Fonte: O autor

5.3.5 Modos de falha

Observando os corpos de prova, após a realização dos ensaios de embutimento, foram notados diferentes modos de falha. Nos ensaios de madeira serrada na direção paralela às fibras foram observados três modos de ruptura, conforme ilustra a Figura 5.14, nomeados arbitrariamente de modo 1, modo 2 e modo 3.

Figura 5.14 – Modos de falha de madeira serrada na direção paralela às fibras: (a) modo 1, (b) modo 2 e (c) modo 3



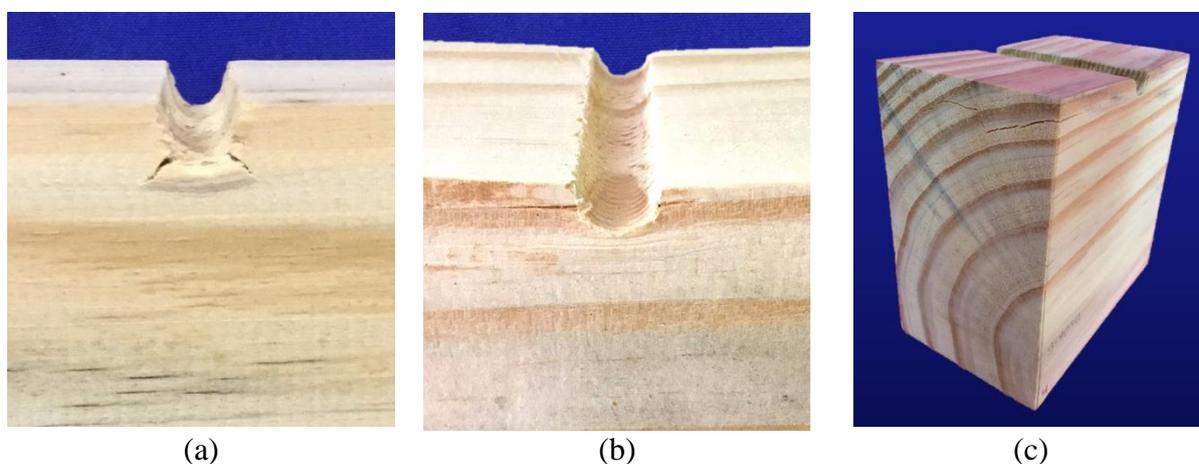
Fonte: O autor

O modo 1 corresponde ao esmagamento localizado das fibras da madeira na região imediatamente abaixo do pino metálico. No modo 2, juntamente com o esmagamento das fibras, ocorre o fendilhamento da madeira na região abaixo do pino metálico. Tal fendilhamento está relacionado com maiores valores de deslocamento durante o ensaio, podendo ser considerado, portanto, um estado final de deformação após o esmagamento. O modo 3 corresponde a fissuras no topo do corpo de prova, associadas a rupturas do modo 1 ou modo 2. Provavelmente o modo 3 está relacionado com o modelo de meio furo dos corpos de prova, nos quais a não continuidade do material permite este tipo de ruptura. Os modos 1 e 2 também foram reportados na pesquisa de Rammer (2001).

Os modos de falha observados com maior frequência nos ensaios de embutimento em madeira serrada na direção paralela às fibras foram: modo 1 e modo 3 associado ao modo 1.

Os modos de falha observados para a madeira serrada na direção perpendicular às fibras foram nomeados aleatoriamente de modo 4, modo 5 e modo 6, e estão apresentados na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Modos de falha de madeira serrada na direção perpendicular às fibras: (a) modo 4, (b) modo 5 e (c) modo 6



Fonte: O autor

O modo 4 é caracterizado pelo esmagamento localizado das fibras da madeira na região abaixo do pino metálico, acompanhado da ruptura das fibras, resultando no aparecimento de fissuras inclinadas em aproximadamente 45 graus. O modo 5 caracteriza-se pelo fendilhamento das fibras da madeira nas proximidades do furo, além do esmagamento localizado na região abaixo do pino metálico. Nos modos 4 e 5 foi observado o esmagamento

das fibras da madeira no estágio inicial de carregamento, sendo que as fissuras surgiram em um estágio final de ruptura por esmagamento.

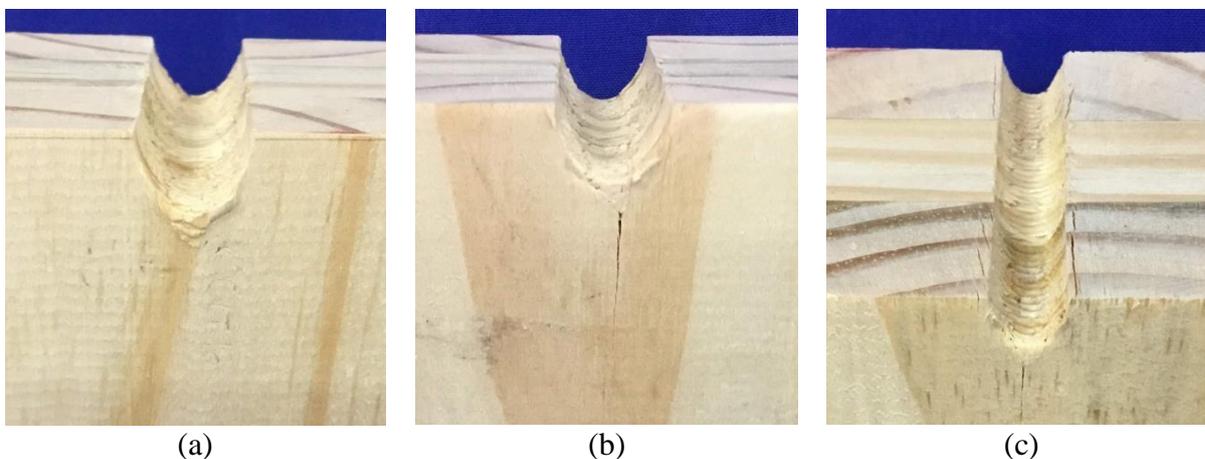
O modo 6 é configurado pelo aparecimento de fissuras em um ou ambos os lados do corpo de prova. Assim como o modo 3, possivelmente a falha referente ao modo 6 está relacionada com o modelo de corpo de prova de meio furo, no qual a não continuidade do material permite este tipo de ruptura.

Para a direção perpendicular às fibras, Rammer (2001) reportou em sua pesquisa apenas o estágio inicial de deformação dos modos 4 e 5, referentes ao esmagamento localizado na região abaixo do pino metálico. Em relação ao modo 6, Rammer (2001) fez as mesmas observações de fissuras em um ou ambos os lados dos corpos de prova.

Notou-se que os modos 4 e 5 ocorreram com maior frequência nos ensaios com diâmetros menores (6 mm, 8 mm e 10 mm), já o modo 6 foi observado com maior frequência nos ensaios com diâmetros de 12 mm e 16 mm.

Na Figura 5.16 são mostrados os modos de falha dos corpos de prova de CLT carregados na direção paralela às fibras. Foram observados os mesmos modos de falha relatados para a madeira serrada na direção paralela às fibras (modo 1, modo 2 e modo 3). Na Figura 5.16a é possível observar apenas o esmagamento na região imediatamente abaixo do carregamento do pino metálico (modo 1). A Figura 5.16b mostra o modo de falha correspondente ao esmagamento e fendilhamento na região abaixo do furo (modo 2). Na Figura 5.16c notam-se fissuras no topo das camadas externas (modo 3). Não foi possível visualizar rupturas na camada central, correspondentes aos modos 4, 5 ou 6, em nenhum dos corpos de prova.

Figura 5.16 – Modos de falha de CLT na direção paralela às fibras

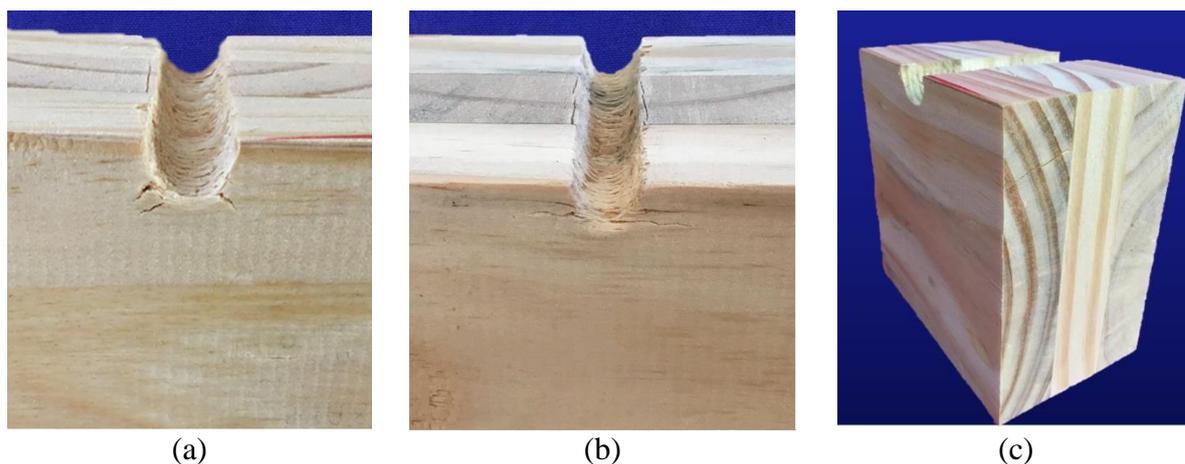


Fonte: O autor

A Figura 5.17 mostra os modos de falha dos corpos de prova de CLT carregados na direção perpendicular às fibras. Foram observados os mesmos modos de falha relatados na madeira serrada na direção perpendicular às fibras (modo 4, modo 5 e modo 6). Na Figura 5.17a observa-se o esmagamento abaixo da região de carregamento do pino metálico, juntamente com a ruptura das fibras em aproximadamente 45° (modo 4). Na Figura 5.17b mostra-se o modo de ruptura correspondente ao esmagamento das fibras associado ao fendilhamento nas proximidades do furo (modo 5). Na Figura 5.17c nota-se uma fissura na lateral do corpo de prova, em apenas uma das camadas externas (modo 6).

Em parte dos corpos de prova de CLT carregados na direção perpendicular às fibras foi possível observar fissuras no topo da camada central, carregada na direção paralela às fibras, correspondente a falha do modo 3, conforme é possível observar na Figura 5.17a e b.

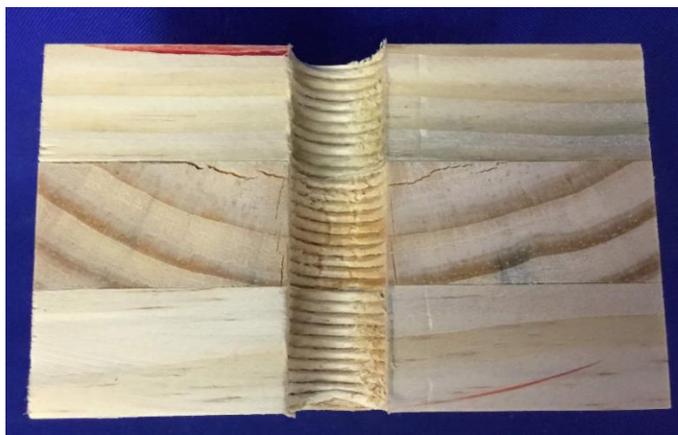
Figura 5.17 – Modos de falha para CLT na direção perpendicular às fibras



Fonte: O autor

Na camada central de alguns corpos de prova de CLT carregados na direção perpendicular às fibras, observou-se a ruptura das fibras nas proximidades do furo, que se propagaram para a linha de cola, conforme mostra a Figura 5.18. Tal fenômeno foi observado com maior frequência em corpos de prova com pinos metálicos de 12 mm e 16 mm de diâmetro. Possivelmente este modo de falha está relacionado com o modelo de meio furo do corpo de prova, ocorrendo apenas devido a não continuidade do material.

Figura 5.18 – Modo de falha da camada interna do painel de CLT com carregamento aplicado na direção perpendicular às fibras da camada externa



Fonte: O autor

Nos corpos de prova de CLT, tanto aqueles carregados na direção paralela quanto aqueles carregados na direção perpendicular às fibras, foram constatados modos de falha distintos em cada uma das camadas. Portanto, pela possibilidade de diversas combinações de ruptura em um único corpo de prova, não foram quantificados o número de exemplares que se romperam segundo cada modo de falha relatado.

6 CONCLUSÃO

O sistema construtivo em CLT vem ganhando reconhecimento e espaço no mercado mundial, por ser um sistema que faz uso de madeiras provenientes de florestas plantadas, possibilita a construção de edifícios de múltiplos pavimentos em madeira, além de possuir alto nível de pré-fabricação, pois os painéis de CLT chegam prontos ao canteiro de obras, restando apenas a realização de pequenas furações e as conexões entre os painéis.

As ligações entre os painéis de CLT são feitas usualmente utilizando chapas metálicas dobradas, fixadas com pinos metálicos (pregos, parafusos passantes ou autoatarraxantes). O fenômeno do embutimento, juntamente com a flexão do pino metálico, governam o comportamento deste tipo de ligação. Assim sendo, pesquisadores apontam que uma vez determinada a resistência ao embutimento da CLT, o dimensionamento das ligações pode ser realizado a partir de equações baseadas no EYM.

Por ser um produto recente, o fenômeno do embutimento ainda não foi suficientemente estudado em painéis de CLT. Portanto, esta pesquisa baseou-se na análise do comportamento de CLT – composta por três camadas de lamelas de pinus de mesma espessura e coladas com adesivo de poliuretano monocomponente – submetida ao embutimento de pinos metálicos, em ensaios experimentais.

Para tal avaliação, foram confeccionados corpos de prova de CLT e madeira serrada, para serem submetidos a forças nas direções paralela e perpendicular às fibras (para a CLT, a direção refere-se às camadas externas), aplicadas em pinos metálicos com diâmetros de 6 mm, 8 mm, 10 mm 12 mm e 16 mm, totalizando 120 corpos de prova. Foram realizadas análises do comportamento da CLT em situações de embutimento com os diferentes diâmetros e carregamentos nas duas direções consideradas. Os valores experimentais de resistência ao embutimento da CLT foram confrontados com os resultados experimentais de madeira serrada, bem como com os resultados de equações analíticas propostas na literatura. Além disso, a partir dos experimentos foram feitas observações a respeito dos modos de falha. Ressalta-se que as análises e conclusões apresentadas são válidas para os materiais e procedimentos metodológicos empregados nesta pesquisa.

A partir dos resultados experimentais, por meio de análises de gráficos de dispersão e as respectivas linhas de tendência, foi constatado para a CLT um decréscimo da resistência ao embutimento quanto maior o diâmetro do pino metálico nas duas direções analisadas. Já para

a madeira serrada, tal influência do diâmetro foi verificada apenas para a direção perpendicular às fibras.

Analisando as curvas de tensão de embutimento – deslocamento, observou-se que a CLT possui um comportamento mecânico intermediário à madeira serrada na direção paralela e perpendicular às fibras. As curvas da CLT possuem um trecho inicial elástico-linear definido e, após o ponto de escoamento, há aumento no valor de resistência.

Foi observado que para a CLT, assim como na madeira serrada, a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras é superior à resistência na direção perpendicular. Ao confrontar os valores médios de resistência ao embutimento da CLT com os referentes à madeira serrada, notou-se, na direção paralela às fibras, que a CLT apresentou resultados inferiores aos da madeira serrada em até 8%. Já na direção perpendicular às fibras, os resultados da CLT foram superiores aos de madeira serrada em até 26%.

Apesar das diferenças observadas entre as médias de resistência ao embutimento da CLT e da madeira serrada, na análise de variância foi constatado que tal diferença é estatisticamente significativa apenas para a direção perpendicular às fibras, com o diâmetro de 16 mm. Para os demais casos considerados, não existem evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes.

Confrontando resultados experimentais com analíticos, os três modelos de equações propostos por Blass e Uibel (2007) superestimaram a resistência ao embutimento da CLT, em até 67,5% para a direção paralela às fibras, e até 82,1% para a direção perpendicular às fibras. O possível motivo apontado para tal discrepância é o fato de os autores terem feito uso de CLT com camadas de espessura inferior a 20 mm em maior parte dos ensaios.

Mesmo não considerando a influência do diâmetro do pino metálico, os resultados analíticos obtidos a partir da equação proposta por Kennedy et al. (2014a) foram os que apresentaram maior concordância com os resultados experimentais da CLT, para as duas direções consideradas.

Ao comparar os resultados experimentais de CLT com os resultados analíticos obtidos por meio das equações apresentadas nas normas brasileira, europeia e americana (sugeridas à madeira serrada), apenas a equação da ANSI/AWC NDS:2015, para a direção perpendicular às fibras, apresentou boa concordância com os resultados experimentais.

Para os resultados experimentais de madeira serrada, os resultados analíticos obtidos por meio das equações propostas pelos três documentos normativos superestimaram a

resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras para todos os diâmetros considerados, com exceção da norma brasileira considerando a direção perpendicular, em que a resistência ao embutimento foi subestimada.

Com relação aos modos de falha na madeira serrada, foram constatados três modos de falha na direção paralela às fibras, nomeados arbitrariamente de modo 1, 2 e 3. O modo 1 correspondente ao esmagamento localizado das fibras da madeira na região abaixo do pino metálico. O modo 2 é caracterizado pelo fendilhamento juntamente ao esmagamento, e o modo 3 corresponde ao aparecimento de fissuras no topo do corpo de prova.

Outros três modos de falha foram constatados na direção perpendicular às fibras, nomeados arbitrariamente de modo 4, 5 e 6. O modo 4 é caracterizado pela ruptura das fibras da madeira, em aproximadamente 45°, na região abaixo do pino metálico. O modo 4 corresponde ao fendilhamento das fibras da madeira nas proximidades do furo, e o modo 6 é caracterizado pelo surgimento de fissuras em um ou ambos os lados do corpo de prova.

Ao analisar as falhas nos corpos de prova de CLT, foram observadas falhas nas lamelas da CLT do mesmo tipo daquelas observadas em madeira serrada, e concluiu-se que a ruptura acontece de maneira individual em cada camada.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O fenômeno do embutimento em madeira serrada é complexo por depender de diversos fatores, sendo os principais a densidade da madeira, o diâmetro do pino metálico, a inclinação da força aplicada em relação às fibras e a espessura das lamelas, no caso dos painéis de CLT. Assim, para dar continuidade à presente pesquisa, sugere-se que sejam realizados experimentos em CLT com três camadas, porém considerando uma maior faixa de espessuras comerciais.

Sugere-se também a realização de um maior número de ensaios considerando a mesma madeira utilizada nesta pesquisa, assim como ensaios em que outras espécies de madeiras sejam empregadas, sobretudo coníferas.

Outra possibilidade consiste em ensaios considerando CLT com maior número de camadas, incluindo o intervalo de diâmetros mais utilizado neste sistema construtivo, a fim de avaliar a influência do diâmetro do pino metálico, assim como a validade da equação proposta por Kennedy et al. (2014a), para casos de embutimento em CLT com mais de três camadas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/AMERICAN WOOD COUNCIL. **NDS: National design specification for wood construction**. Washington, 2015.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTES. **ANSI/APA PRG 320-2018: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Tacoma, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4761 – 11: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural**. West Conshohocken, Estados Unidos, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2395 - 17: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood - based materials**. American Society for Testing and Materials, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5764-97a: Standard test method for evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products**. West Conshohocken, 2018.

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

BLASS, H. J.; SCHÄDLE, P. Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints. **Engineering Structures**, v. 33, n. 11, p. 3018–3026, 2011.

BLASS, H. J.; UIBEL, T. **Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz**. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 2007.

BLERON, L.; DUCHANOIS, G. Angle to the grain embedding strength concerning dowel type fasteners. **Forest Products Journal**, v. 56, n. 3, p. 44–50, 2006.

BRANDNER, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. In: HARRIS, R.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G. (Eds.). **Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)**. 2. ed. Graz: The University of Bath, 2014. p. 3–36.

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

BRITISH STANDARDS. **EN 383: Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners**. Bruxelas: BSI, 2007.

BUCK, D. et al. Bending properties of Cross Laminated Timber (CLT) with a 45° alternating layer configuration. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 4633–4644, 2016.

CARREIRA, M. R. **Critérios Para Classificação Visual De Peças Estruturais De Pinus Sp.** São Carlos: 2003. 182 p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CRESPELL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber: a Primer.** [s.l.] FPInnovations, 2010.

CROSSLAM. **Cross Laminated Timber - Detalhes Construtivos: Catálogo.** Suzano: Crosslam, 2017.

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

EHLBECK, J.; WERNER, H. Softwood and hardwood embedding strength for doweltype fasteners. In: CIB-W18, 25, 1992, Åhus. **Anais...Åhus**: 1992.

ESPINOZA, O. et al. Cross-Laminated Timber: Status and research needs in Europe. **BioResources**, v. 11, p. 281–295, 2016a.

ESPINOZA, O. et al. Identification of research areas to advance the adoption of cross-laminated timber in North America. **BioProducts Business**, n. 5, p. 60–72, 2016b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995 1-1: General - common rules and rules for buildings (Eurocode 5).** Bruxelas, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 16351: Timber structures — Cross laminated timber — Requirements.** Brussels, 2015.

FPINNOVATIONS. Introduction to cross-laminated timber. In: **CLT Handbook: cross laminated timber.** Québec: FPInnovations, 2011.

FRAGIACOMO, M.; DUJIC, B.; SUSTERSIC, I. Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions. **Engineering Structures**, v. 33, n. 11, p. 3043–3053, 2011.

GAGNON, S.; POPOVSKI, M. Structural design of cross-laminated timber elements. In: BELOW, K. D.; MALCZYK, R.; MOSES, D. (Eds.). **CLT handbook: Cross-laminated timber.** Québec: FPInnovations, 2011.

GAVRIC, I.; FRAGIACOMO, M.; CECCOTTI, A. Strength and deformation characteristics of typical X-lam connections. In: World Conference on Timber Engineering, 2012, Auckland. **Anais...Auckland**: Elsevier, 2012.

GAVRIC, I.; FRAGIACOMO, M.; CECCOTTI, A. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. **Materials and Structures**, v. 48, n. 6, p. 1841–1857, 2015.

GSELL, D. et al. Cross-Laminated Timber Plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, v. 133, n. 1, p. 132–138, 2007.

HASSANIEH, A.; VALIPOUR, H. R.; BRADFORD, M. A. Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 122, p. 110–121, 2016.

HOORNWEG, D.; BHADA, P. **What a Waste - A global review of solid waste management**. Washington: World Bank, 2012. v. 15.

HOSSAIN, A.; DANZIG, I.; TANNERT, T. Cross-Laminated Timber shear connections with double-angled self-tapping screw assemblies. **Journal of Structural Engineering**, v. 142, n. 11, p. 1–9, 2016.

HÜBNER, U.; BOGENSPERGER, T.; SCHICKHOFER, G. Embedding strength of european hardwoods. In: CIB-W18, 41, 2008, Saint Andrews. **Anais...Saint Andrews: Universität Karlsruhe (TH)**, 2008.

IZZI, M. et al. Experimental investigations and design provisions of steel-to-timber joints with annular-ringed shank nails for Cross-Laminated Timber structures. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 446–457, 2016.

IZZI, M.; POLASTRI, A.; FRAGIACOMO, M. Modelling the mechanical behaviour of typical wall-to-floor connection systems for cross-laminated timber structures. **Engineering Structures**, v. 162, p. 270–282, 2018.

JOHANSEN, K. W. Theory of timber connections. **International Association of Bridge and Structural Engineering**, v. 9, p. 249–262, 1949.

JORGE, L. Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada-colada cruzada. (P. B. Lourenço et al., Eds.)In: Seminário Casas de Madeira. **Anais...Lisboa: Universidade do Minho**, 2013.

KENNEDY, S. et al. Design equations for dowel embedment strength and withdrawal resistance for threaded fasteners in CLT. In: World Conference on Timber Engineering, 2014, Quebec. **Anais...Quebec: WCTE**, 2014a.

KENNEDY, S. et al. Design equations for embedment strength of wood for threaded fasteners in the canadian timber design code. In: World Conference on Timber Engineering, 2014, Quebec. **Anais...WCTE**, 2014b.

MINDA INDUSTRIEANLAGENC GMBH. **Press Systems for Cross Laminated Timber: Catálogo**. Minden: MINDA, 2014.

MOHAMMAD, M. et al. Introduction to Cross Laminated Timber. **Wood Design Focus**, v. 22, n. 2, p. 3–12, 2012.

MOLINA, J. C. et al. Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004). **REM - International Engineering Journal**, v. 70, n. 1, p. 9–17, 2017a.

MOLINA, J. C. et al. Embedment strength of steel dowel in wood specimens according to ABNT NBR 7190 : 1997 and ASTM D5764 : 2007 Standards Resistencia al aplastamiento de pernos de acero en cuerpos de prueba de madera. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, v. 24, n. 3, p. 492–500, 2017b.

MOOSBRUGGER, T.; GUGGENBERGER, W.; BOGENSPERGER, T. Cross-Laminated Timber Wall Segments under homogeneous Shear — with and without Openings. In: World Conference on Timber Engineering, 2006, Portland. **Anais...Portland: WCTE**, 2006.

MUÑOZ, W.; MOHAMMAD, M.; GAGNON, S. Lateral and withdrawal resistance of typical CLT connections. In: World Conference on Timber Engineering, 2010, Riva del Garda. **Anais...Rival del Guarda: WCTE**, 2010.

NAKASHIMA, S. et al. Evaluation of tensile performance of drift pin joint of cross laminated timber with steel inserted plate. In: World Conference on Timber Engineering, 2012, Auckland. **Anais...Auckland: Elsevier**, 2012.

OTTENHAUS, L. M. et al. Overstrength of dowelled CLT connections under monotonic and cyclic loading. **Bulletin of Earthquake Engineering**, v. 16, p. 753–773, 2018.

POPOVSKI, M.; SCHNEIDER, J.; SCHWEINSTEIGER, M. Lateral load resistance of cross-laminated wood panels. In: World Conference on Timber Engineering, 2010, Riva del Garda. **Anais...Riva del Garda: WCTE**, 2010.

POZZA, L. et al. Axial – Shear interaction on CLT hold-down connections – Experimental investigation. **Engineering Structures**, v. 160, p. 95–110, 2018.

RAMMER, D. R. Effect of Moisture Content on Nail Bearing Strength. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory, Research Paper (FPL-RP-591)**. Madison, 2001.

RAMMER, D. R.; WINISTORFER, S. G. Effect of moisture content on dowel-bearing strength. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1, p. 126–139, 2001.

RINGHOFER, A.; BRANDNER, R.; BLASS, H. J. Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections. **Engineering Structures**, p. 1–13, 2018.

ROTHOBLAAS. **Handbook for CLT buildings**. Cortaccia: Rothoblaas, 2017.

SANDHAAS, C. et al. Analysis of X-lam panel-to-panel connections under monotonic and cyclic loading. In: CIB-W18, 42, 2009. **Anais...**Dübendorf: 2009.

SANDHAAS, C. et al. Embedment tests parallel-to-grain and ductility aspects using various wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, n. 5, p. 599–608, 2013.

SANTOS, C. L. et al. A comparison between the EN 383 and ASTM D5764 test methods for dowel-bearing strength assessment of wood: Experimental and numerical investigations. **Strain**, v. 46, n. 2, p. 159–174, 2010.

SANTOS, C. L. et al. An experimental comparison of strengthening solutions for dowel-type wood connections. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 114–127, 2013.

SAWATA, K.; YASUMURA, M. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. **Journal of Wood Science**, v. 48, n. 2, p. 138–146, 2002.

SCHOENMAKERS, J. C. M.; JORISSEN, A. J. M.; LEIJTEN, A. J. M. Evaluation and modelling of perpendicular to grain embedment strength. **Wood Science and Technology**, v. 44, n. 4, p. 579–595, 2010.

SJÖDIN, J.; SERRANO, E.; ENQUIST, B. An experimental and numerical study of the effect of friction in singledowel joints. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 66, n. 5, p. 363–372, 2008.

TERRIN, M. V. P.; GÓES, J. L. N.; PLETZ, E. Avaliação experimental da madeira ao embutimento. In: XVI EBRAMEM + III CLEM. **Anais...**São Carlos: 2018.

THIEL, A.; SCHICKHOFER, G. CLT designer - A software tool for designing cross laminated timber elements: 1D-plate-design. In: World Conference on Timber Engineering, 2010, Riva del Garda. **Anais...**Riva del Garda: WCTE, 2010.

TUHKANEN, E.; MÖLDER, J.; SCHICKHOFER, G. Influence of number of layers on embedment strength of dowel-type connections for glulam and cross-laminated timber. **Engineering Structures**, v. 176, p. 361–368, 2018.

UIBEL, T.; BLASS, H. J. A new method to determine suitable spacings and distances for self-tapping screws. In: CIB-W18, 43, 2010, Nelson. **Anais...**Nelson: 2010.

UIBEL, T.; BLASS, H. J. Joints with Dowel Type Fasteners in CLT Structures. In: HARRIS, R.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G. (Eds.). **Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)**. 2. ed. Graz: The University of Bath, 2014. p. 119–134.

UNECE/FAO. **Annual Market Review 2016-2017 Forest Products**. Geneva: United Nations Publication, 2017.

UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. 2016. **Structure of UBC's tall wood building now complete**. Disponível em: <<https://news.ubc.ca/2016/09/15/structure-of-ubcs-tall-wood-building-now-complete/>>. Acesso em: 19 maio. 2018.

VALLE, Â. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. 1999. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VAN DE KUILEN, J. W. G. et al. Very tall wooden buildings with Cross Laminated Timber. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 1621–1628, 2011.

WANG, B.; PIRVU, C.; LUM, C. Cross-laminated timber manufacturing. In: CASILLA, R. C.; CHUI, Y. H.; KNUDSON, B. (Eds.). . **CLT Handbook: Cross-laminated timber**. Québec: FPInnovations, 2011.

WHALE, L. R. J.; SMITH, I. A method for measuring the embedding characteristics of wood and wood-based materials. **Materials and Structures**, v. 22, n. 6, p. 403–410, 1989.

WHALE, L. R. J.; SMITH, I.; LARSEN, H. J. Design of nailed and bolted joints proposals for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and CIB Code. In: CIB-W18, 20, 1987, Dublin. **Anais...Dublin: 1987**.

WIERUSZEWSKI, M.; MAZELA, B. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. **Drvna industrija**, v. 68, n. 4, p. 359–367, 2017.

WILKINSON, T. Dowel bearing strength. **USDA Forest service Res. Paper FPL- RP-505**, p. 1–9, 1991.

ZITTO, M. A. S.; KÖHLER, J.; PITER, J. C. Embedding strength in joints of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis with dowel-type fasteners. Analysis according to the criterion adopted by European standards. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 433–440, 2012.

APÊNDICE A – Caracterização da madeira

A Tabela A.1 apresenta os dados registrados referentes ao ensaio de densidade de umidade.

Tabela A.1– Resultados do ensaio de densidade e umidade

(continua)

CP	Dimensões (mm)			Volume inicial (mm ³)	Volume saturado (mm ³)	Volume seco (mm ³)	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Umidade (%)	$\rho_{ap,U\%}$ (kg/m ³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	G
	a	b	c										
1	19,40	31,30	50,20	30,48	32,77	29,10	11,24	9,97	12,78	368,70	367,00	304,07	0,339
2	20,95	30,10	50,00	31,53	33,16	29,54	11,35	10,04	13,06	359,88	364,79	302,67	0,337
3	21,30	31,55	50,30	33,80	35,23	32,71	12,72	11,22	13,45	376,39	368,41	318,34	0,340
4	20,35	32,00	51,35	33,44	35,60	31,78	13,12	11,66	12,46	392,24	392,86	327,60	0,364
5	20,25	30,50	51,00	31,50	34,67	30,04	13,91	12,27	13,33	441,44	435,59	353,85	0,405
6	20,10	30,85	51,55	31,97	33,93	30,20	13,25	11,78	12,50	414,60	416,17	347,20	0,386
7	20,95	31,80	49,95	33,28	34,84	31,34	13,11	11,65	12,56	394,05	396,73	334,40	0,367
8	21,10	31,65	50,20	33,52	34,86	31,93	12,00	10,60	13,19	357,95	355,64	304,09	0,328
9	20,30	30,70	50,80	31,66	32,88	29,93	13,32	11,72	13,65	420,73	416,63	356,45	0,386
10	19,95	31,20	51,40	31,99	33,82	30,65	12,72	11,21	13,46	397,64	389,34	331,55	0,360
11	19,95	31,65	51,40	32,45	33,40	30,63	13,35	11,78	13,34	411,40	408,49	352,70	0,379

Tabela A.1– Resultados do ensaio de densidade e umidade**(continuação)**

CP	Dimensões (mm)			Volume inicial (mm ³)	Volume saturado (mm ³)	Volume seco (mm ³)	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Umidade (%)	$\rho_{ap,U\%}$ (kg/m ³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	G
	a	b	c										
12	20,15	31,75	51,60	33,01	34,61	30,96	15,20	13,44	13,10	460,29	460,28	388,19	0,429
13	20,50	31,55	50,05	32,37	33,99	30,60	12,75	11,33	12,48	393,75	394,80	333,41	0,365
14	19,90	32,70	50,10	32,60	33,72	31,46	12,98	11,54	12,50	398,26	390,87	342,30	0,362
15	21,10	32,10	50,15	33,97	35,59	31,92	14,63	13,00	12,54	430,68	432,44	365,26	0,402
16	20,20	31,20	51,70	32,58	34,11	31,16	12,63	11,20	12,76	387,71	381,17	328,44	0,352
17	20,00	29,80	51,15	30,49	32,05	29,09	13,38	11,93	12,21	438,93	433,05	372,03	0,402
18	20,20	31,20	51,10	32,21	33,79	30,65	13,39	11,93	12,24	415,77	413,39	353,06	0,383
19	21,00	31,70	50,50	33,62	35,19	32,20	16,94	14,96	13,23	503,90	491,11	425,17	0,459
20	21,90	31,35	50,55	34,71	36,60	32,53	20,17	17,80	13,34	581,23	573,87	486,26	0,540
21	21,60	31,15	50,45	33,94	36,02	32,19	18,47	16,25	13,68	544,03	531,06	451,01	0,498
22	20,50	31,85	52,20	34,08	35,89	32,17	16,39	14,46	13,36	480,86	475,24	402,84	0,443
23	20,00	31,00	52,20	32,36	34,14	30,41	17,12	15,12	13,19	528,83	523,32	442,90	0,490
24	20,15	30,75	52,40	32,47	34,33	30,37	17,11	15,10	13,33	526,92	524,21	439,73	0,491
25	20,15	31,05	51,15	32,00	34,05	30,90	12,33	10,99	12,20	385,13	380,17	322,61	0,351
26	20,00	31,85	51,80	33,00	34,94	31,62	13,66	12,10	12,88	413,83	408,25	346,26	0,378

Tabela A.1– Resultados do ensaio de densidade e umidade**(continuação)**

CP	Dimensões (mm)			Volume inicial (mm ³)	Volume saturado (mm ³)	Volume seco (mm ³)	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Umidade (%)	$\rho_{ap,U\%}$ (kg/m ³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	G
	a	b	c										
27	20,00	32,70	51,60	33,75	35,22	32,12	13,34	11,81	12,90	395,24	392,62	335,42	0,363
28	20,10	32,10	52,00	33,55	34,83	32,36	12,22	10,82	12,93	364,10	357,81	310,58	0,330
29	20,25	31,60	51,35	32,86	34,60	31,41	11,65	10,36	12,45	354,67	353,47	299,57	0,326
30	21,00	30,80	51,25	33,15	34,36	31,33	11,74	10,39	12,96	354,13	356,14	302,47	0,329
31	20,15	33,55	51,60	34,88	37,13	32,34	20,26	17,80	13,83	580,88	579,80	479,36	0,546
32	21,00	30,65	51,00	32,83	34,36	30,33	15,23	13,39	13,72	463,81	469,22	389,60	0,437
33	20,00	31,50	50,75	31,97	34,07	30,29	14,87	13,14	13,20	465,15	461,50	385,66	0,430
34	20,10	31,75	52,50	33,50	35,65	32,26	13,53	12,00	12,79	403,89	397,71	336,55	0,368
35	20,15	30,50	50,75	31,19	32,93	29,31	14,70	13,02	12,93	471,37	471,98	395,39	0,440
36	20,00	31,85	50,65	32,26	33,70	30,97	15,61	13,82	12,95	483,91	474,99	410,22	0,443
37	21,45	32,45	50,00	34,80	36,16	33,06	17,10	15,04	13,68	491,31	483,51	415,97	0,451
38	22,25	31,55	49,60	34,82	37,01	32,95	16,65	14,63	13,79	478,14	472,46	395,29	0,441
39	20,30	31,40	52,30	33,34	35,03	31,86	13,65	12,12	12,61	409,39	406,78	346,00	0,377
40	20,15	32,20	52,15	33,84	35,02	32,62	12,25	10,91	12,32	361,98	358,64	311,38	0,331
41	20,00	32,45	51,00	33,10	35,24	31,66	14,17	12,62	12,26	428,11	425,55	358,15	0,395

Tabela A.1– Resultados do ensaio de densidade e umidade**(conclusão)**

CP	Dimensões (mm)			Volume inicial (mm ³)	Volume saturado (mm ³)	Volume seco (mm ³)	Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Umidade (%)	$\rho_{ap,U\%}$ (kg/m ³)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	G
	a	b	c										
42	21,40	31,55	50,00	33,76	35,92	32,03	16,70	14,71	13,54	494,75	486,73	409,50	0,454
43	20,95	31,50	50,70	33,46	35,32	31,93	18,71	16,49	13,47	559,06	544,33	466,76	0,511
44	20,90	31,00	50,75	32,88	35,17	30,73	21,41	18,96	12,95	651,11	644,77	538,90	0,611
45	20,40	32,45	51,10	33,83	35,93	32,07	16,07	14,27	12,67	475,18	471,57	397,07	0,440
46	20,05	32,00	51,30	32,91	35,53	31,66	14,69	13,06	12,51	446,34	438,71	367,54	0,408
47	20,20	31,25	51,45	32,48	34,60	31,52	15,99	14,11	13,34	492,34	475,35	407,79	0,443
Média									12,99	443,62	439,33	372,16	0,409
Desvio Padrão									0,47	68,80	66,98	55,54	0,065
COV (%)									3,64	15,51	15,25	14,92	15,950

Obs: $\rho_{ap,12\%}$ calculada por Kollmann

Fonte: O autor

A Tabela A.2 apresenta os resultados de resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade em esforços de compressão paralelo, com os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela A.2 – Resistência à compressão paralela às fibras

CP	f_{c,0} (MPa)	E_{c,0} (MPa)
1	27,93	6.693,00
2	26,66	6.761,00
3	25,69	5.996,00
4	28,32	6.628,00
5	21,54	3.253,00
6	22,25	3.193,00
7	29,17	8.592,00
8	25,21	5.297,00
9	23,33	5.036,00
10	26,78	-
11	21,04	-
12	33,76	-
13	34,43	-
Média	26,62	5.716,56
Desvio padrão	4,21	1.742,77
COV (%)	15,82	30,49

Fonte: O autor

A Tabela A.3 apresenta os resultados de resistência à compressão perpendicular às fibras e o módulo de elasticidade em esforços de compressão normal, com os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela A.3– Resistência à compressão perpendicular às fibras

CP	f_{c,90} (MPa)	E_{c,90} (MPa)
1	3,60	288
2	3,75	298
3	3,00	244
4	3,21	265
5	3,20	258
6	2,93	239
7	3,45	314
8	3,53	316
9	2,93	223
10	2,91	250
Média	3,25	269,50
Desvio padrão	0,30	30,94
COV (%)	9,12	11,48

Fonte: O autor

APÊNDICE B – Classificação mecânica das lamelas

Imediatamente após a realização do ensaio de flexão estático segundo o eixo de menor inércia, foi realizado ensaio para a determinação do teor de umidade, segundo o Anexo B da ABNT NBR 7190:1997. A umidade média das lamelas foi de 19,68%.

Tabela B.1– Classificação mecânica das lamelas

Lamela	Classe Visual	b (mm)	h (mm)	I (mm ⁴)	L _i (mm)	L _f (mm)	Δ (mm)	MOE (MPa)	MOE _{12%} (MPa)
1	I45-ND	131,00	23,40	139874,20	1,218	7,608	6,390	5.272,53	6.082,39
2	I55-ND	131,20	23,55	142799,05	0,930	5,678	4,748	6.951,32	8.019,04
3	I55-ND	130,70	22,95	131656,53	0,740	4,491	3,751	9.542,63	11.008,37
4	I55-ND	131,00	22,00	116240,67	1,998	12,250	10,252	3.954,49	4.561,90
5	I26-ND	130,80	23,65	144184,95	1,300	8,174	6,874	4.755,10	5.485,48
6	I26-ND	129,65	23,55	141112,02	1,034	6,480	5,446	6.132,19	7.074,10
7	I45-ND	131,10	22,00	116329,40	1,610	9,986	8,376	4.836,79	5.579,72
8	I45-ND	130,50	23,55	142037,17	1,230	7,601	6,371	5.207,72	6.007,63
9	I55-ND	130,75	23,40	139607,27	0,990	5,958	4,968	6.794,66	7.838,32
10	I45-ND	134,00	23,40	143077,43	1,463	9,052	7,589	4.340,12	5.006,76
11	I26-ND	133,65	23,55	145465,65	1,164	7,106	5,942	5.452,11	6.289,55
12	I45-ND	134,00	23,00	135864,83	0,941	5,652	4,711	7.362,70	8.493,61
13	I55-ND	132,45	23,90	150683,06	1,177	7,361	6,184	5.057,36	5.834,16
14	SS-ND	132,65	22,50	125913,87	1,284	7,791	6,507	5.751,79	6.635,26
15	SS-ND	131,45	23,00	133279,35	1,022	6,204	5,182	6.823,34	7.871,41
16	SS-ND	129,80	23,75	144905,31	0,601	3,740	3,139	10.360,52	11.951,9
17	I26-ND	128,55	23,00	130338,99	0,869	5,278	4,409	8.200,55	9.460,15
18	I26-ND	129,90	24,10	151523,16	1,254	7,753	6,500	4.785,18	5.520,18
19	I45-ND	131,20	23,55	142799,05	1,227	7,564	6,338	5.207,32	6.007,16
20	I45-ND	130,25	23,75	145407,67	0,962	5,864	4,903	6.610,78	7.626,19
21	SS-ND	129,10	23,10	132611,42	0,865	5,225	4,361	8.149,67	9.401,46
22	I26-ND	134,40	23,60	147215,67	2,059	11,915	9,856	3.248,06	3.746,97
23	I26-ND	133,25	23,90	151593,18	1,671	10,327	8,656	3.591,58	4.143,25
24	I55-ND	132,70	22,75	130206,86	1,142	7,028	5,886	6.148,98	7.093,47
Média								6.022,39	6.947,43
Desvio Padrão								1784,32	2058,39
COV (%)								29,63	29,63
Valor Máximo								10.360,52	11.951,9
Valor Mínimo								3.248,06	3.746,97

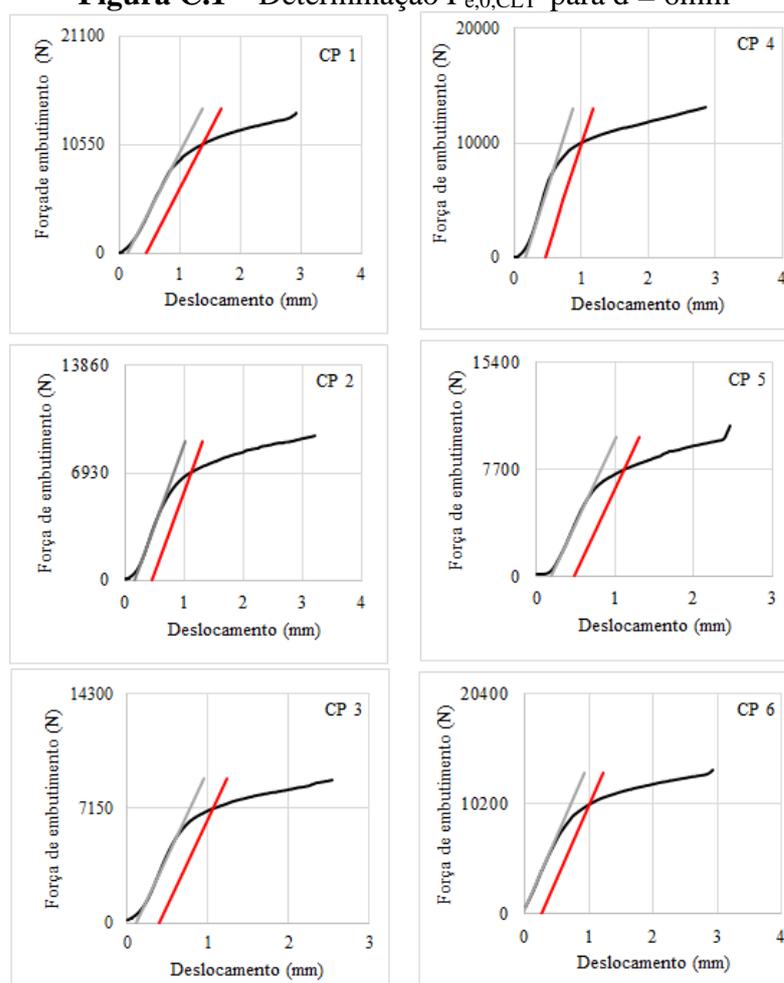
Fonte: O autor

APÊNDICE C – CURVAS DE FORÇA DE EMBUTIMENTO – DESLOCAMENTO E DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Posteriormente à apresentação das curvas de força de embutimento – deslocamento, são apresentadas as tabelas com as dimensões dos corpos de prova, seguidas da respectiva força e resistência ao embutimento. Foi adotada a seguinte nomenclatura para as séries de ensaio: o primeiro número indica a direção do carregamento em relação às fibras (0 ou 90), seguido da letra(s) referente ao material (CLT para *Cross Laminated Timber* e S para madeira serrada), e por fim o número referente ao diâmetro (6 para $d = 6\text{ mm}$, 8 para $d = 8\text{ mm}$, e assim sucessivamente). Por exemplo, 0CLT6 corresponde a ensaios com CLT na direção paralela às fibras e diâmetro de 6 mm.

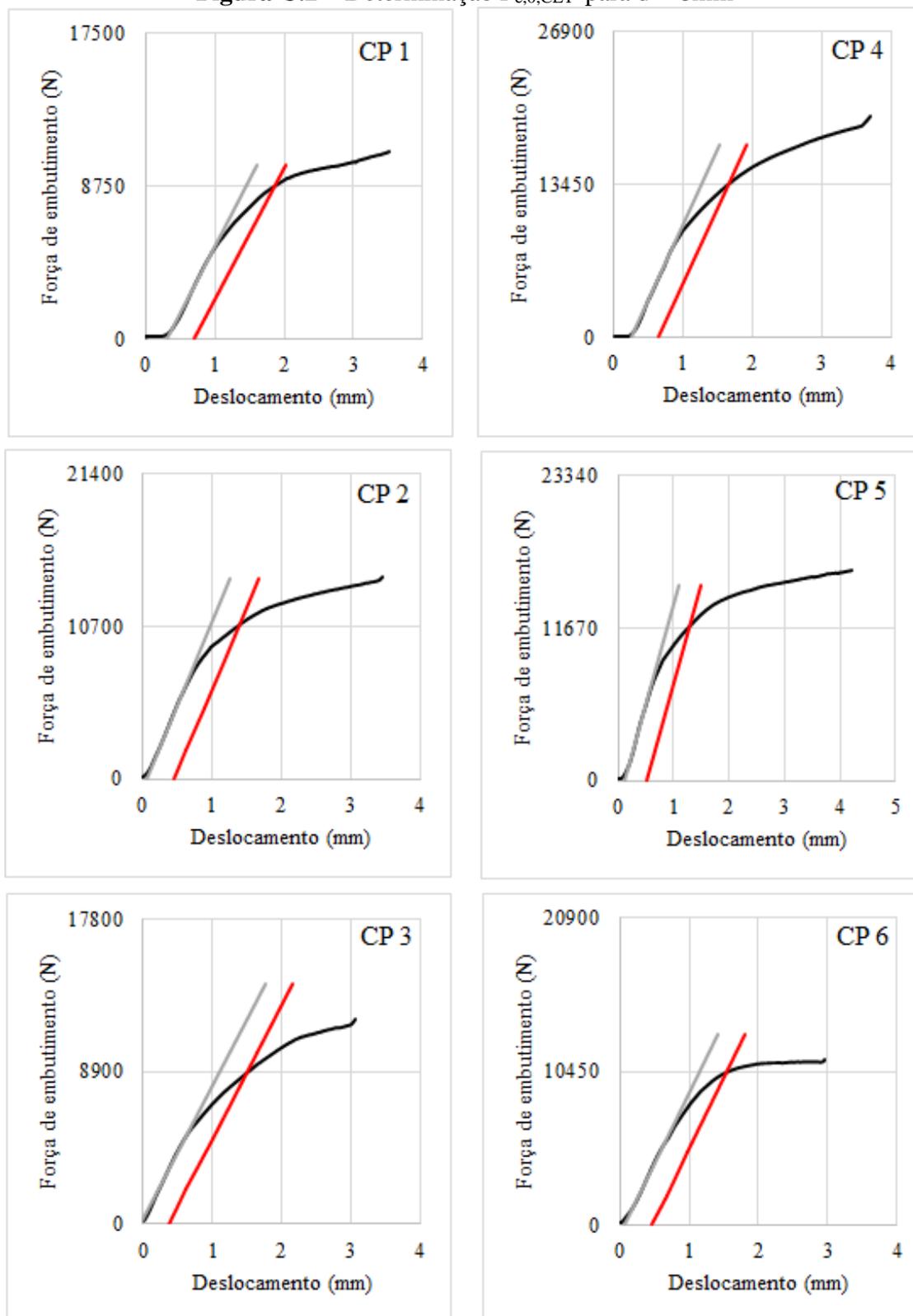
C.1 Curvas referentes à CLT na direção paralela às fibras

Figura C.1 – Determinação $F_{e,0,CLT}$ para $d = 6\text{ mm}$



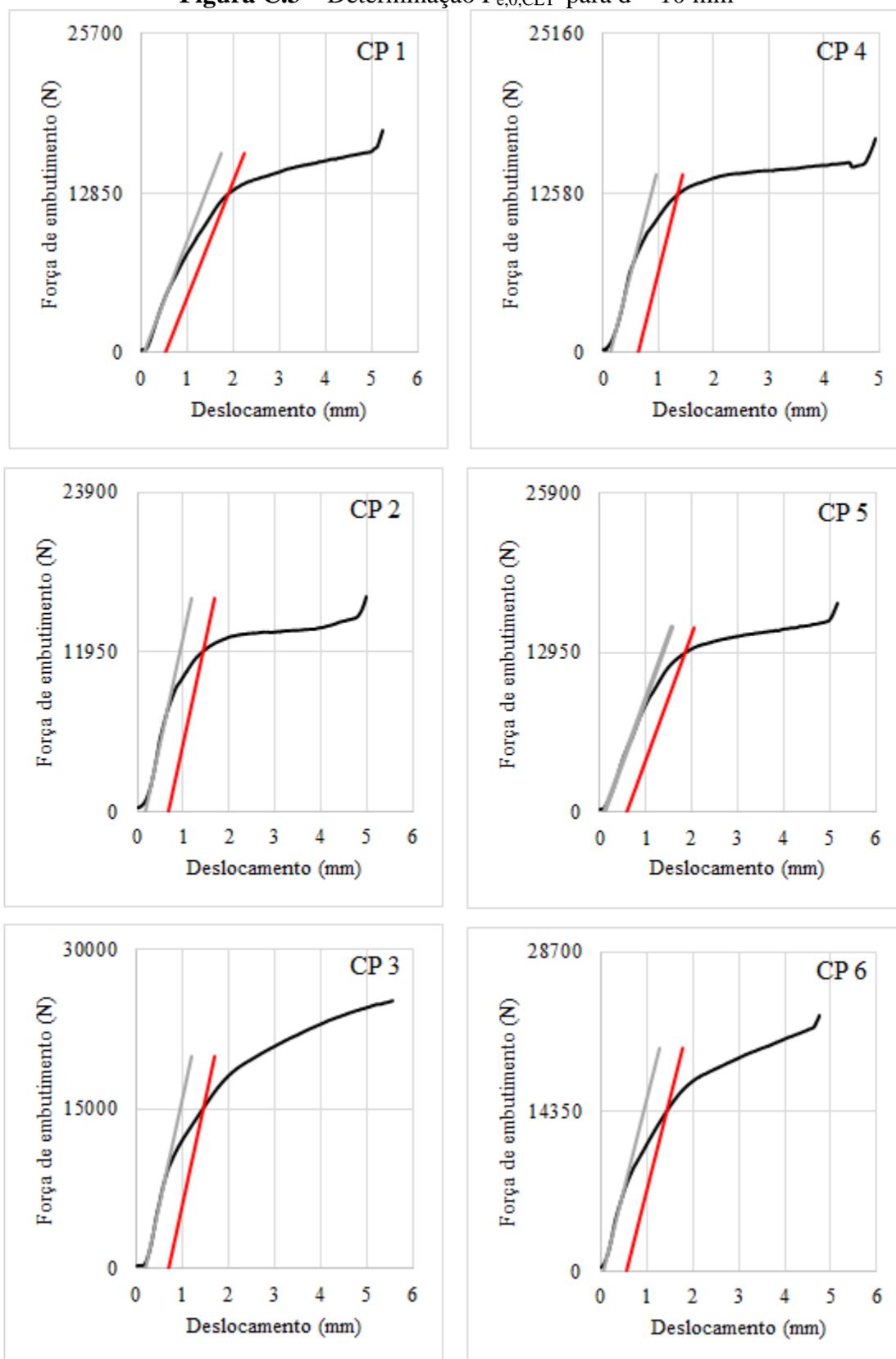
Fonte: O autor

Figura C.2 – Determinação $F_{e,0,CLT}$ para $d = 8\text{mm}$



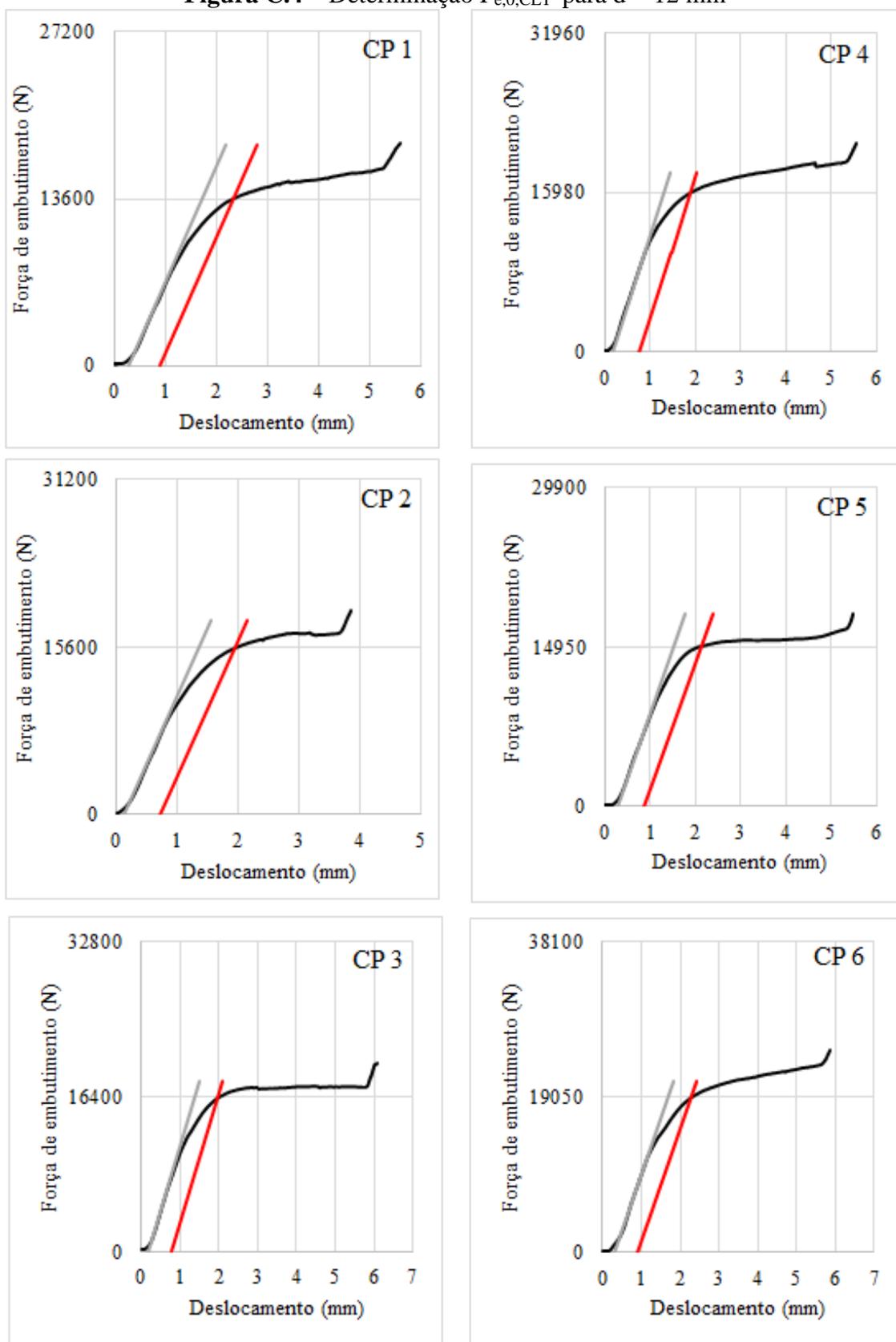
Fonte: O autor

Figura C.3 – Determinação $F_{e,0,CLT}$ para $d = 10$ mm



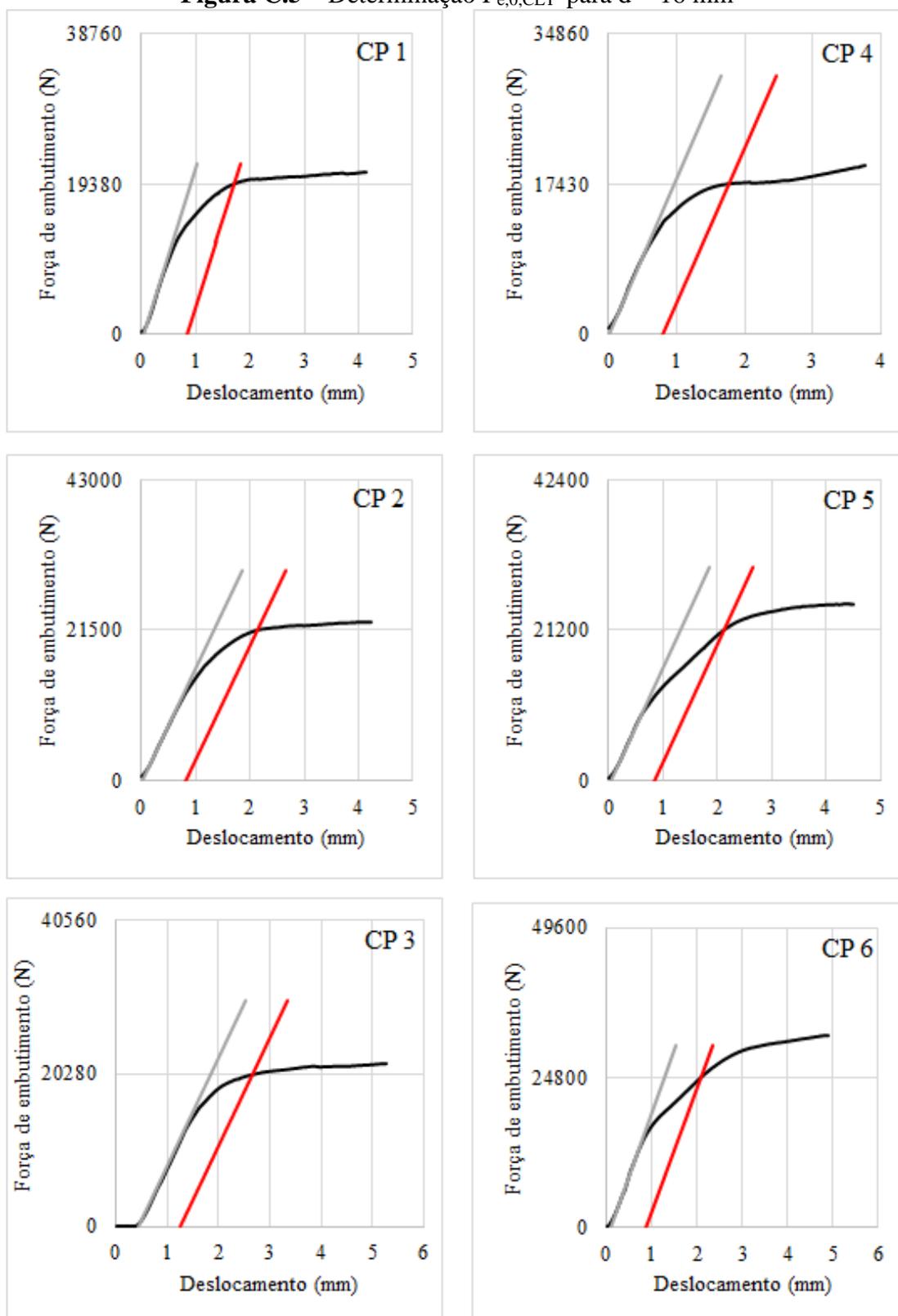
Fonte: O autor

Figura C.4 – Determinação $F_{e,0,CLT}$ para $d = 12$ mm



Fonte: O autor

Figura C.5 – Determinação $F_{e,0,CLT}$ para $d = 16$ mm



Fonte: O autor

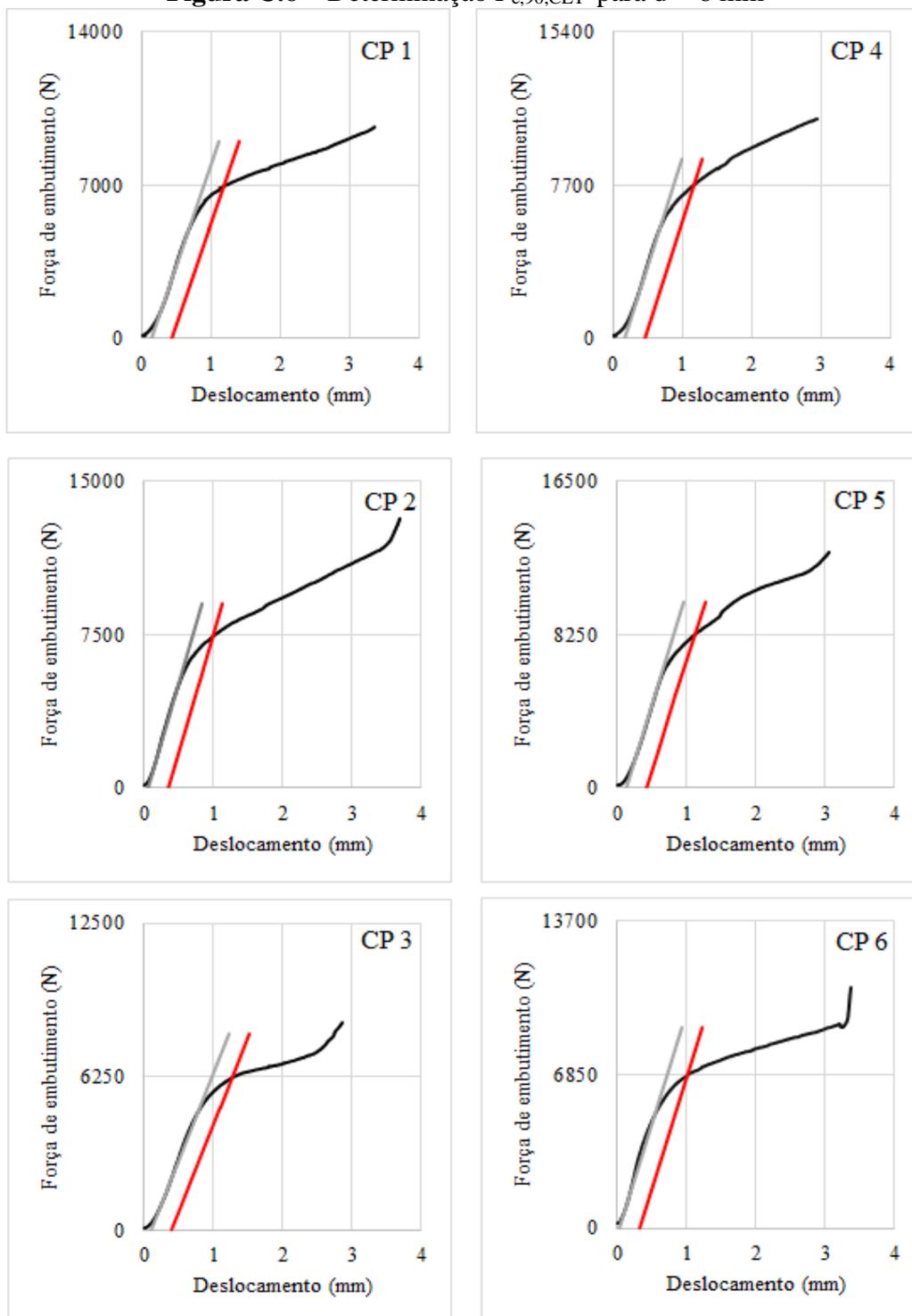
Tabela C.1 – Dimensões dos corpos de prova, força e resistência ao embutimento da CLT na direção paralela às fibras

Corpo de prova/série	Dimensões (mm)			Diâmetro real (mm)	Fe,0,CLT (N)	fe,0,CLT (MPa)
	A	B	C			
1 - 0CLT6	60,70	100,95	100,25	6,00	10550	28,97
2 - 0CLT6	60,25	101,75	100,60	6,00	6930	19,17
3 - 0CLT6	60,25	102,00	101,25	6,00	7150	19,78
4 - 0CLT6	60,00	102,00	101,80	6,00	10000	27,78
5 - 0CLT6	60,10	100,40	101,10	6,00	7700	21,35
6 - 0CLT6	60,00	100,65	102,10	6,00	10200	28,33
1 - 0CLT8	60,60	100,30	100,10	7,90	8750	18,28
2 - 0CLT8	59,90	100,90	101,00	7,90	10700	22,61
3 - 0CLT8	60,50	100,85	101,90	7,90	8900	18,62
4 - 0CLT8	60,60	100,75	102,00	7,90	13450	28,09
5 - 0CLT8	60,20	100,65	100,90	7,90	11670	24,54
6 - 0CLT8	60,80	100,15	100,25	7,90	10450	21,76
1 - 0CLT10	60,30	100,75	100,15	9,90	12850	21,53
2 - 0CLT10	60,60	100,65	100,25	9,90	11950	19,92
3 - 0CLT10	61,65	101,20	102,00	9,90	15000	24,58
4 - 0CLT10	60,00	100,80	101,15	9,90	12580	21,18
5 - 0CLT10	60,30	100,50	100,60	9,90	12950	21,69
6 - 0CLT10	60,00	101,85	101,05	9,90	14350	24,16
1 - 0CLT12	59,90	100,40	101,30	11,90	13600	19,08
2 - 0CLT12	60,25	101,30	100,40	11,90	15600	21,76
3 - 0CLT12	60,10	100,25	100,30	11,90	16400	22,93
4 - 0CLT12	60,35	100,75	100,70	11,90	15980	22,25
5 - 0CLT12	60,50	100,40	100,75	11,90	14950	20,77
6 - 0CLT12	59,75	100,60	100,90	11,90	19050	26,79
1 - 0CLT16	60,00	100,65	100,85	15,75	19380	20,51
2 - 0CLT16	59,85	100,15	100,55	15,75	21500	22,81
3 - 0CLT16	59,70	100,40	101,60	15,75	20280	21,57
4 - 0CLT16	60,15	100,75	101,20	15,75	17430	18,40
5 - 0CLT16	59,65	100,00	101,00	15,75	21200	22,57
6 - 0CLT16	59,65	100,35	101,10	15,75	24800	26,40

Fonte: O autor

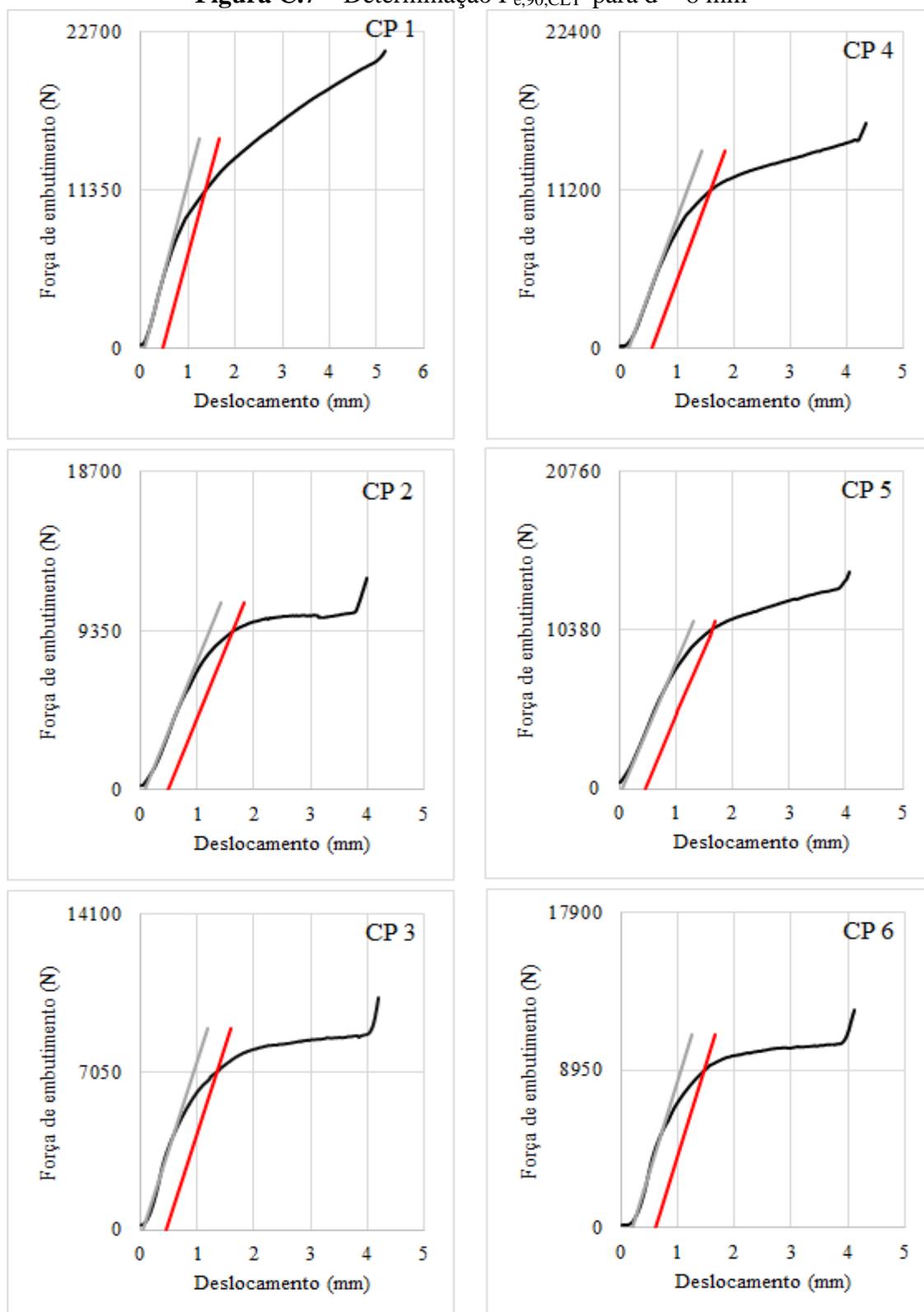
C.2 Curvas referentes à CLT na direção perpendicular às fibras

Figura C.6 – Determinação $F_{e,90,CLT}$ para $d = 6$ mm



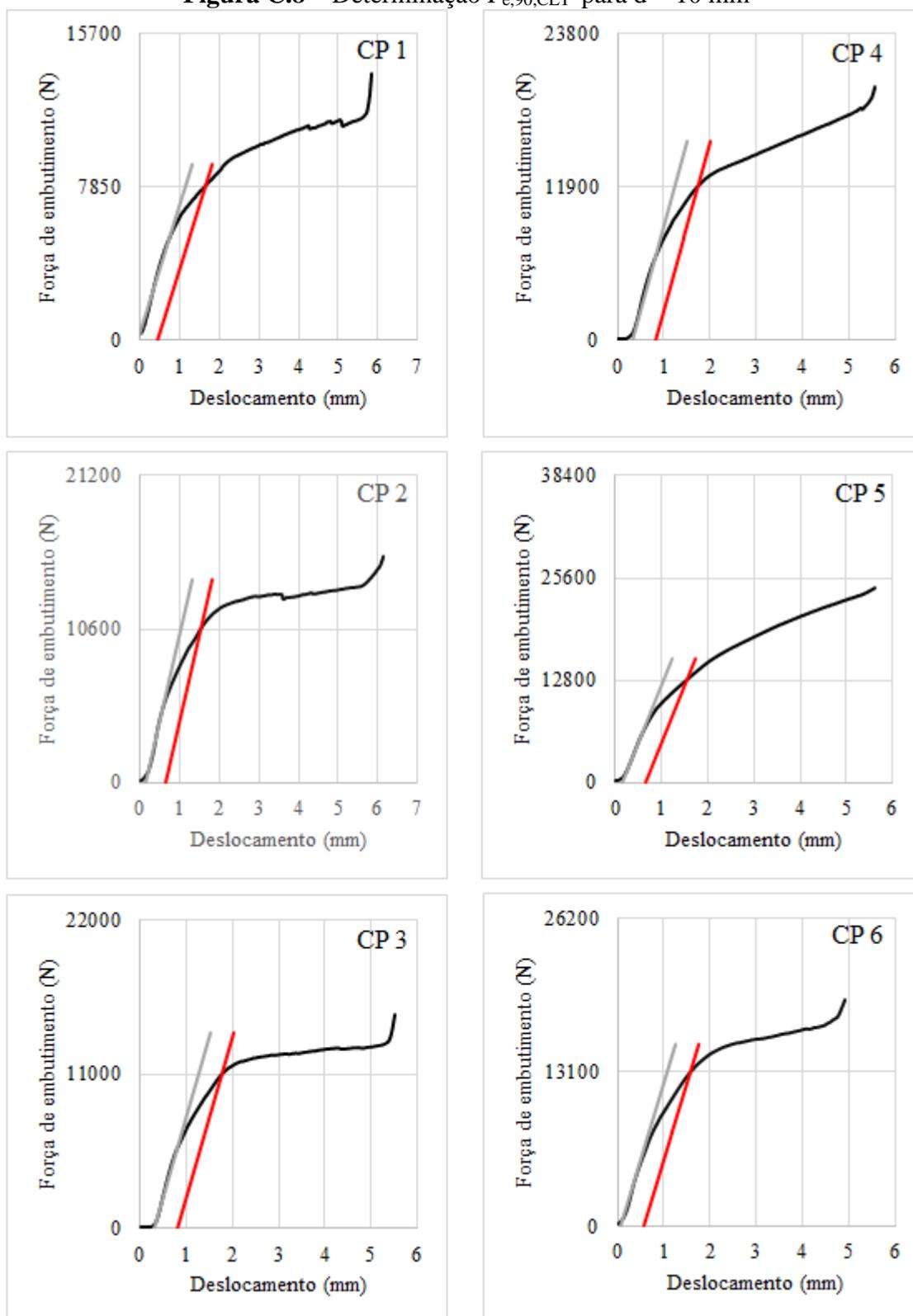
Fonte: O autor

Figura C.7 – Determinação $F_{e,90,CLT}$ para $d = 8$ mm



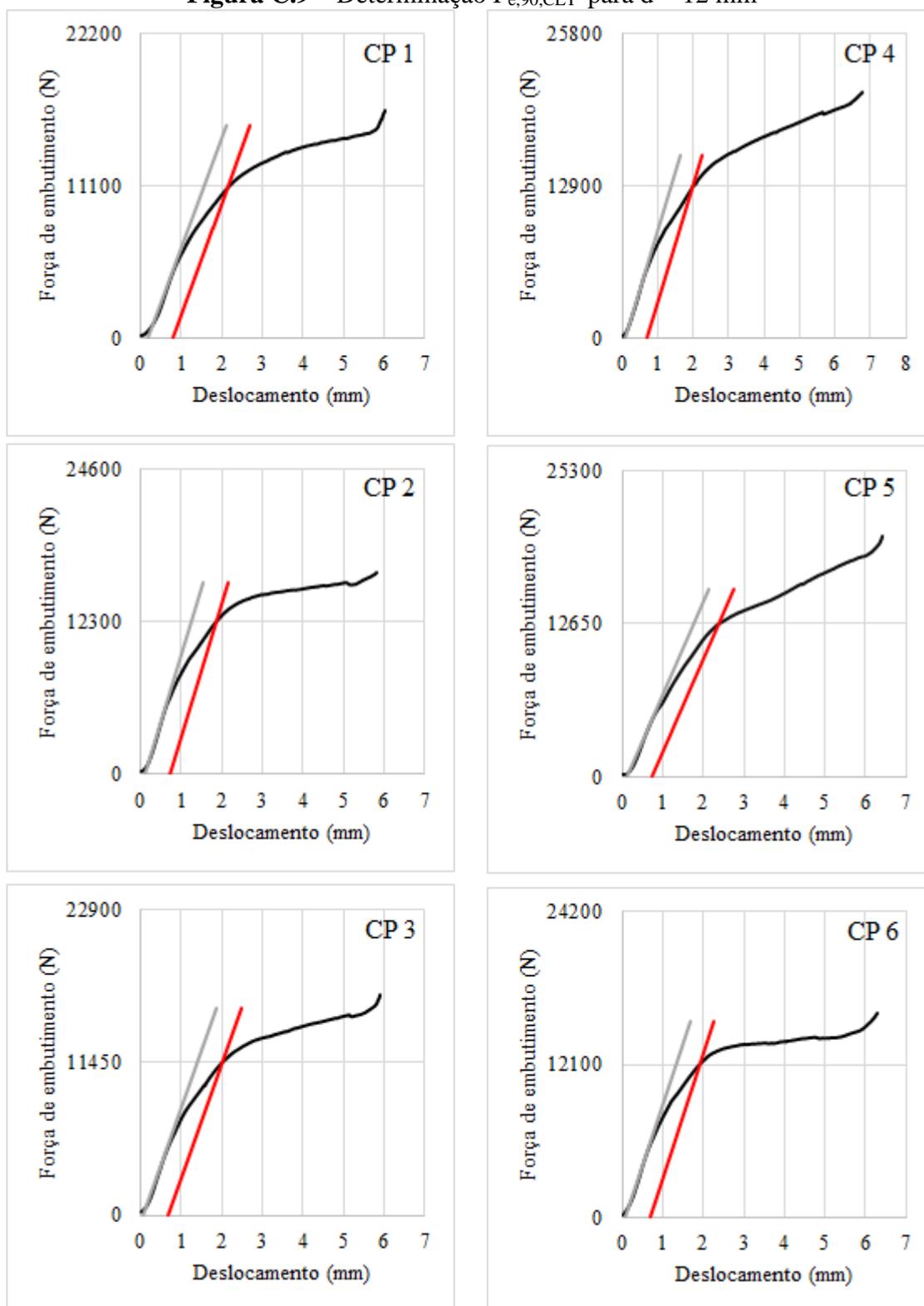
Fonte: O autor

Figura C.8 – Determinação $F_{e,90,CLT}$ para $d = 10$ mm



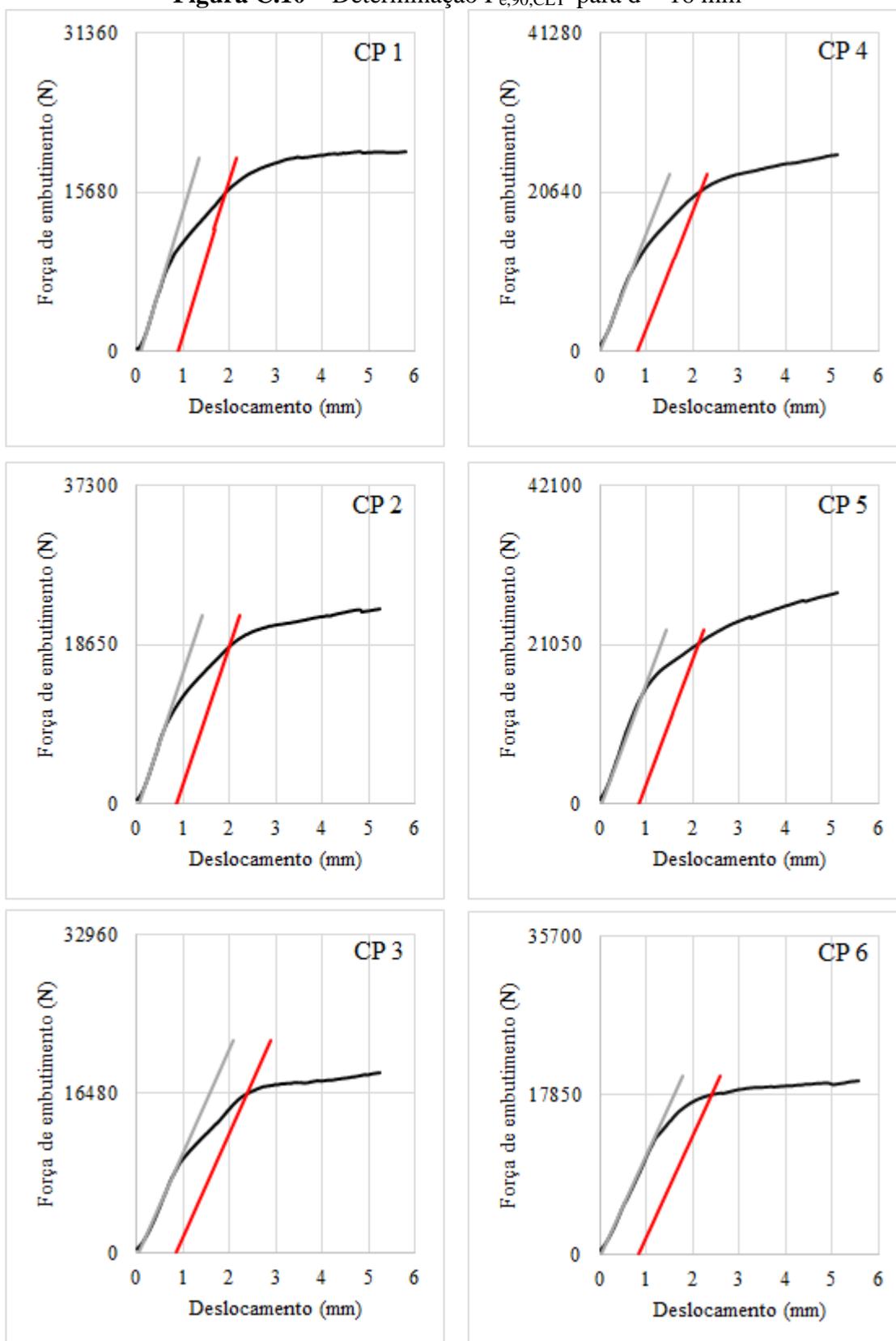
Fonte: O autor

Figura C.9 – Determinação $F_{e,90,CLT}$ para $d = 12$ mm



Fonte: O autor

Figura C.10 – Determinação $F_{e,90,CLT}$ para $d = 16$ mm



Fonte: O autor

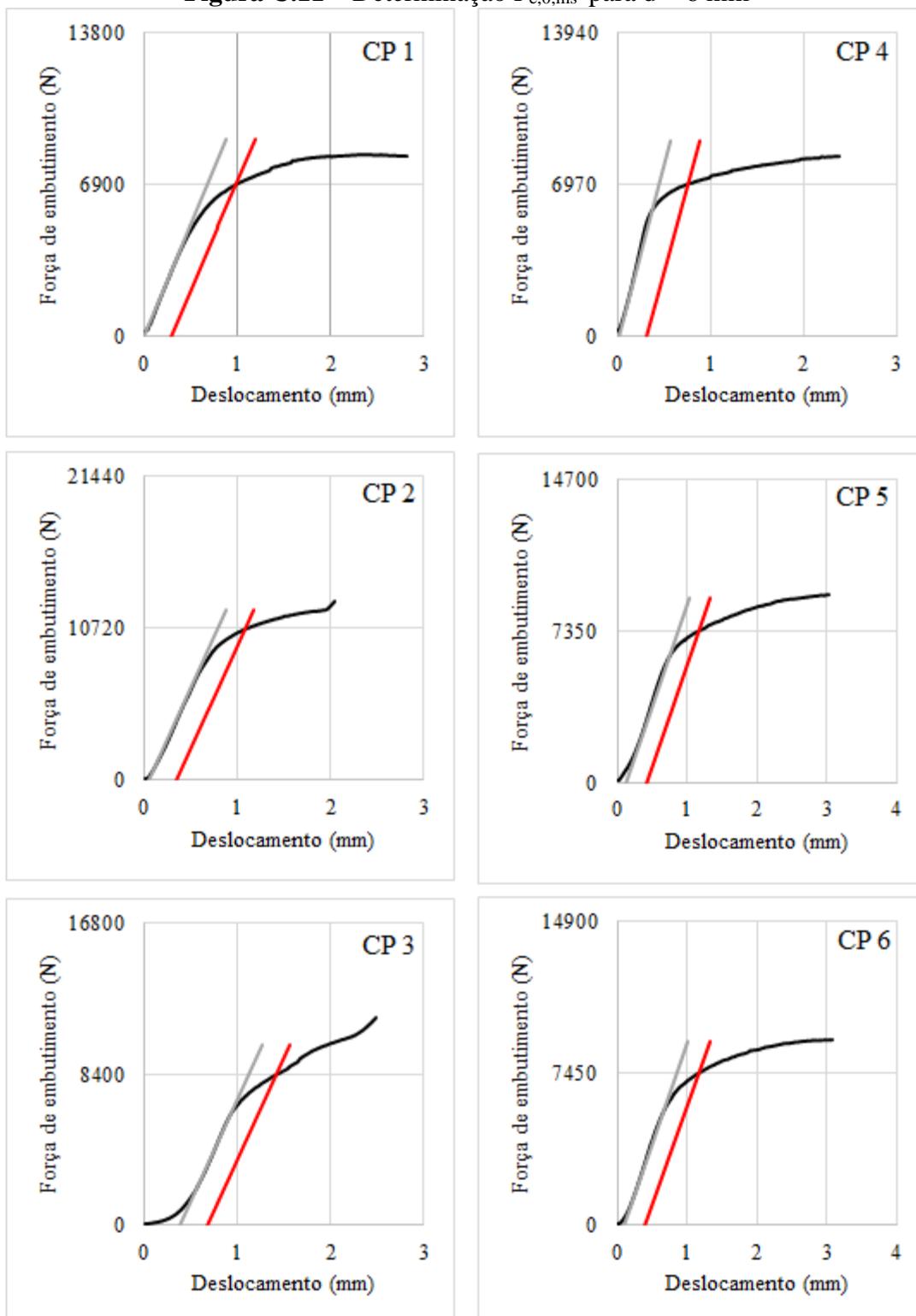
Tabela C.2 – Dimensões dos corpos de prova, força e resistência ao embutimento da CLT na direção perpendicular às fibras

Corpo de prova/série	Dimensões (mm)			Diâmetro real (mm)	Fe,90,CLT (N)	fe,90,CLT (MPa)
	A	B	C			
1 - 90CLT6	60,40	100,10	100,45	6,00	7000	19,32
2 - 90CLT6	60,35	101,35	100,30	6,00	7500	20,71
3 - 90CLT6	59,80	101,00	101,60	6,00	6250	17,42
4 - 90CLT6	60,75	101,00	100,75	6,00	7700	21,12
5 - 90CLT6	60,60	101,40	101,85	6,00	8250	22,69
6 - 90CLT6	59,90	100,45	100,80	6,00	6850	19,06
1 - 90CLT8	60,65	100,35	99,70	7,90	11350	23,69
2 - 90CLT8	59,95	101,60	100,15	7,90	9350	19,74
3 - 90CLT8	60,10	100,25	101,90	7,90	7050	14,85
4 - 90CLT8	59,95	101,00	100,65	7,90	11200	23,65
5 - 90CLT8	60,15	102,70	99,70	7,90	10380	21,84
6 - 90CLT8	60,45	100,35	101,00	7,90	8950	18,74
1 - 90CLT10	60,60	102,45	101,50	9,90	7850	13,08
2 - 90CLT10	59,65	100,10	100,50	9,90	10600	17,95
3 - 90CLT10	60,75	100,45	100,70	9,90	11000	18,29
4 - 90CLT10	60,00	100,45	101,90	9,90	11900	20,03
5 - 90CLT10	60,70	100,85	100,70	9,90	12800	21,30
6 - 90CLT10	59,30	101,00	100,65	9,90	13100	22,31
1 - 90CLT12	60,40	100,10	100,65	11,90	11100	15,44
2 - 90CLT12	60,30	100,00	101,40	11,90	12300	17,14
3 - 90CLT12	60,40	101,10	100,95	11,90	11450	15,93
4 - 90CLT12	60,15	100,95	99,15	11,90	12900	18,02
5 - 90CLT12	60,00	100,95	100,55	11,90	12650	17,72
6 - 90CLT12	60,20	99,25	99,70	11,90	12100	16,89
1 - 90CLT16	60,35	101,10	101,50	15,75	15680	16,50
2 - 90CLT16	59,80	99,80	101,00	15,75	18650	19,80
3 - 90CLT16	60,60	101,70	100,60	15,75	16480	17,27
4 - 90CLT16	60,40	99,65	100,10	15,75	20640	21,70
5 - 90CLT16	60,60	98,70	101,20	15,75	21050	22,05
6 - 90CLT16	60,95	100,45	100,70	15,75	17850	18,59

Fonte: O autor

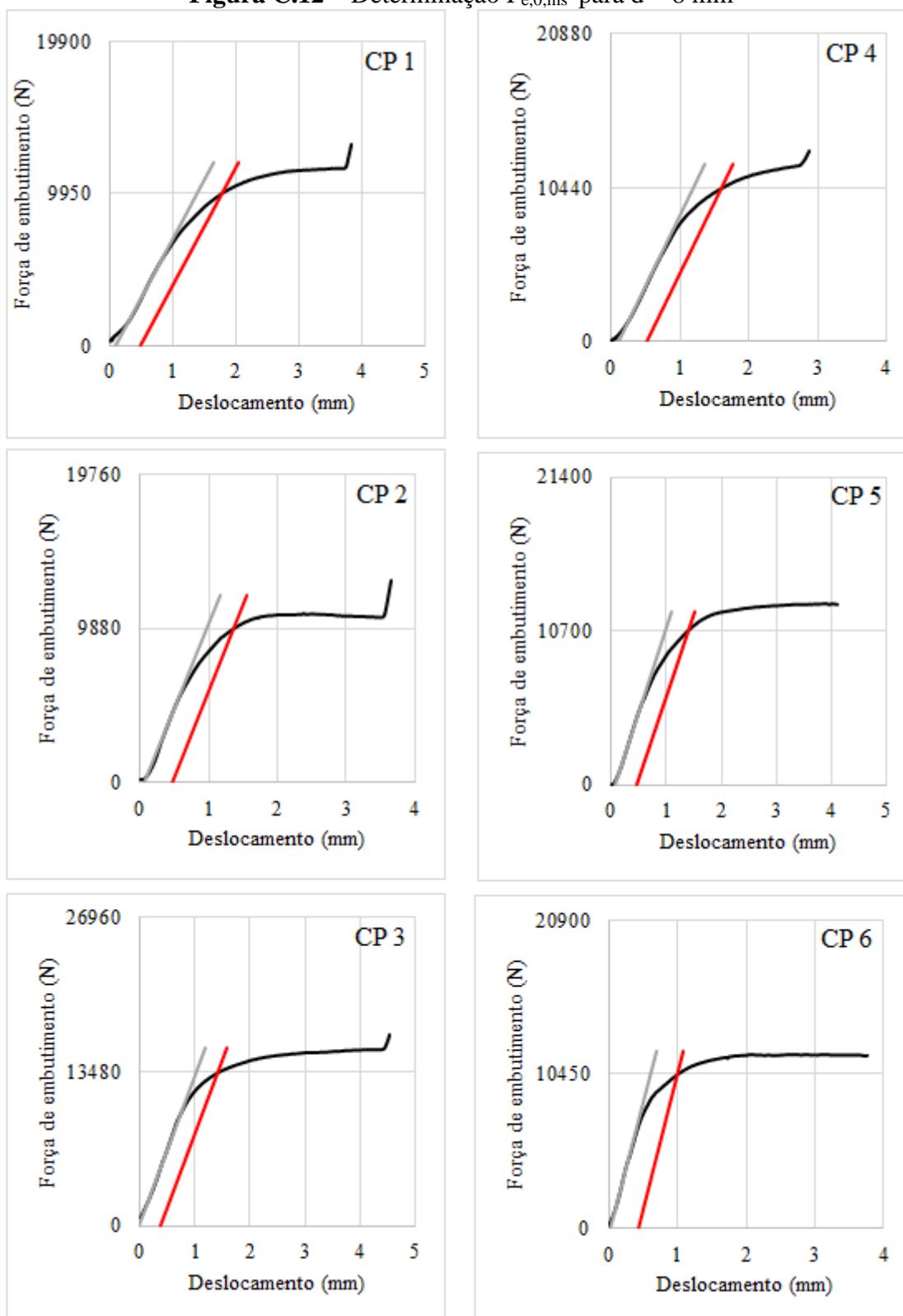
C.2 Curvas referentes à madeira serrada na direção paralela às fibras

Figura C.11 – Determinação $F_{e,0,ms}$ para $d = 6$ mm



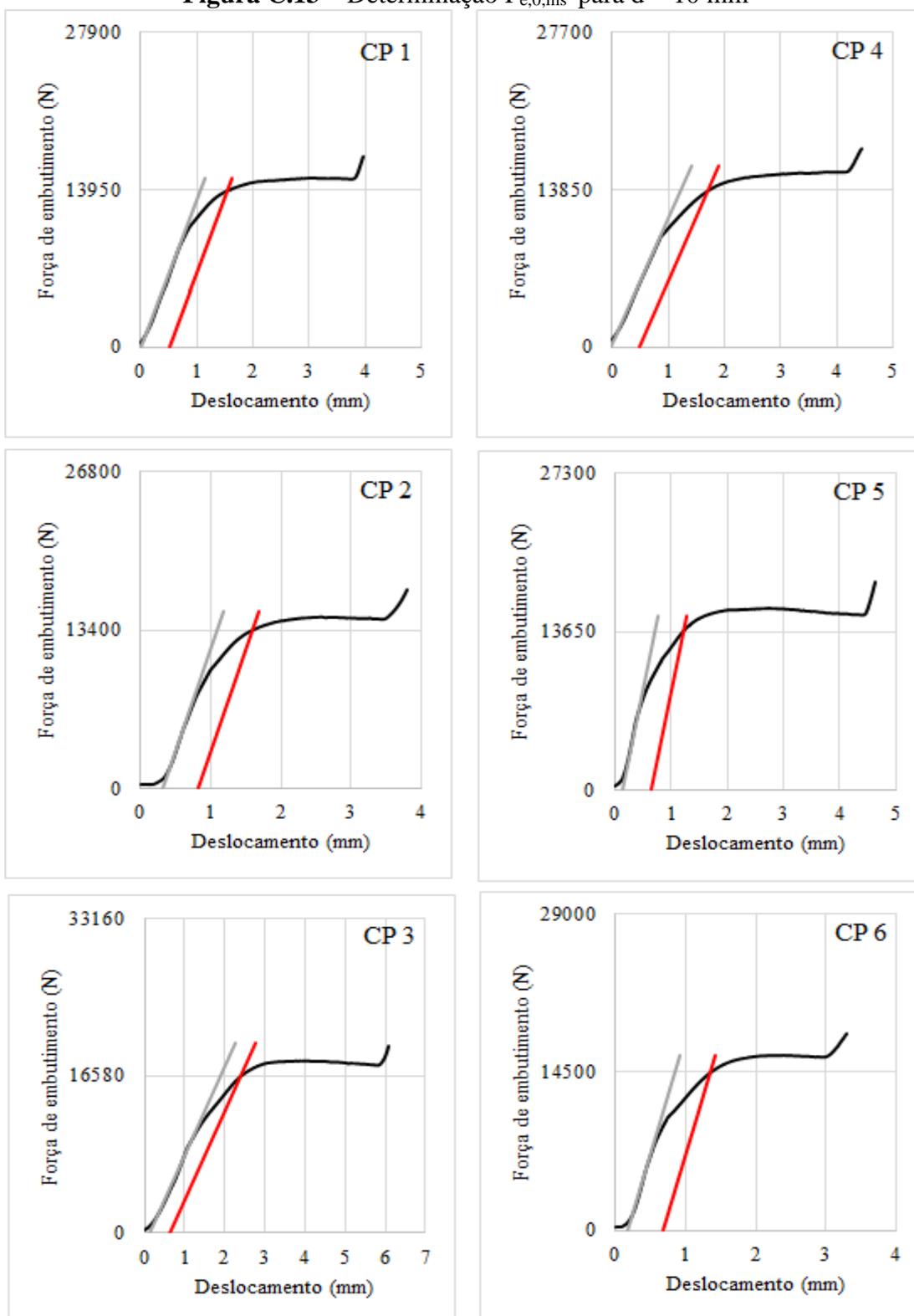
Fonte: O autor

Figura C.12 – Determinação $F_{e,0,ms}$ para $d = 8$ mm



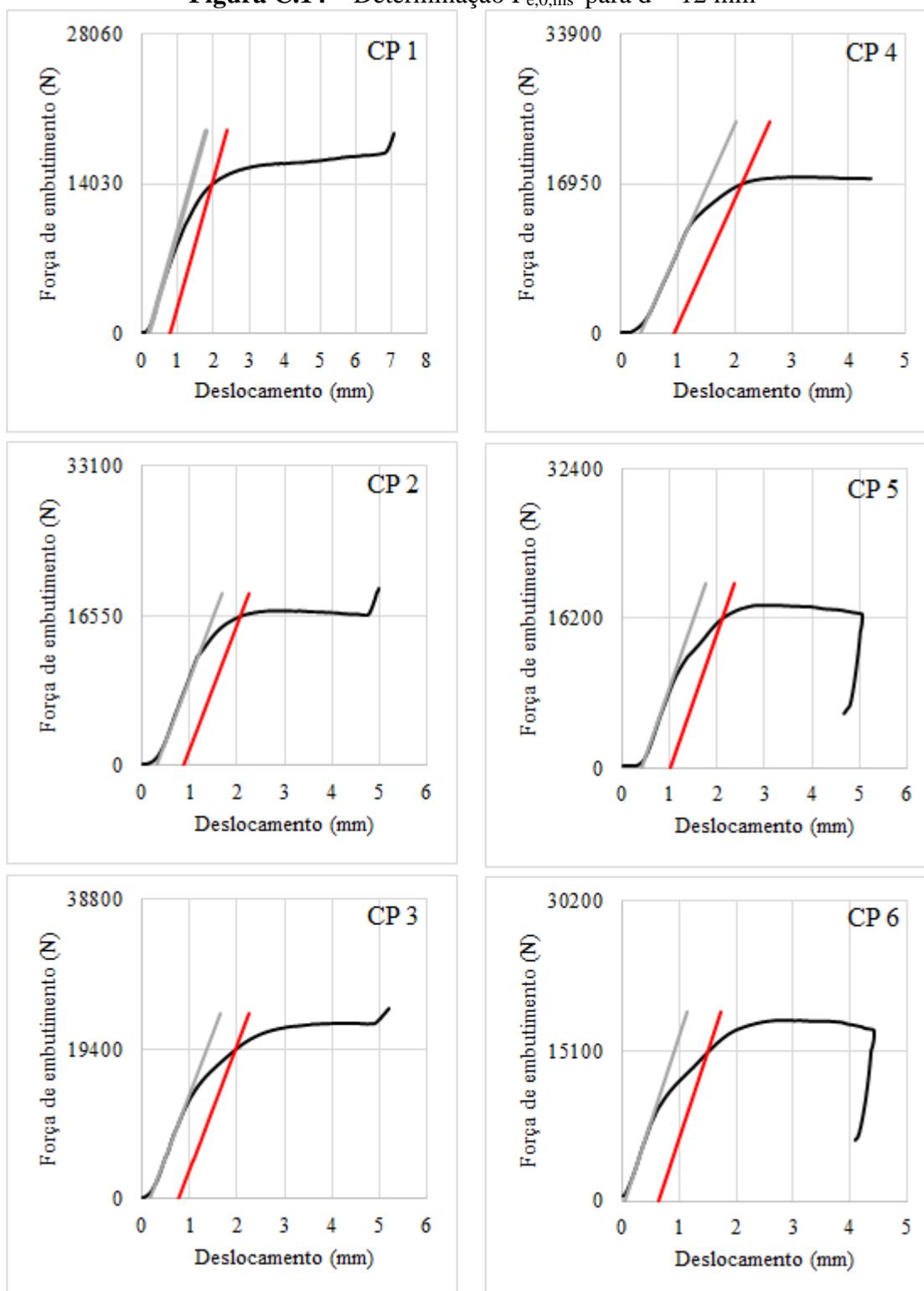
Fonte: O autor

Figura C.13 – Determinação $F_{e,0,ms}$ para $d = 10$ mm



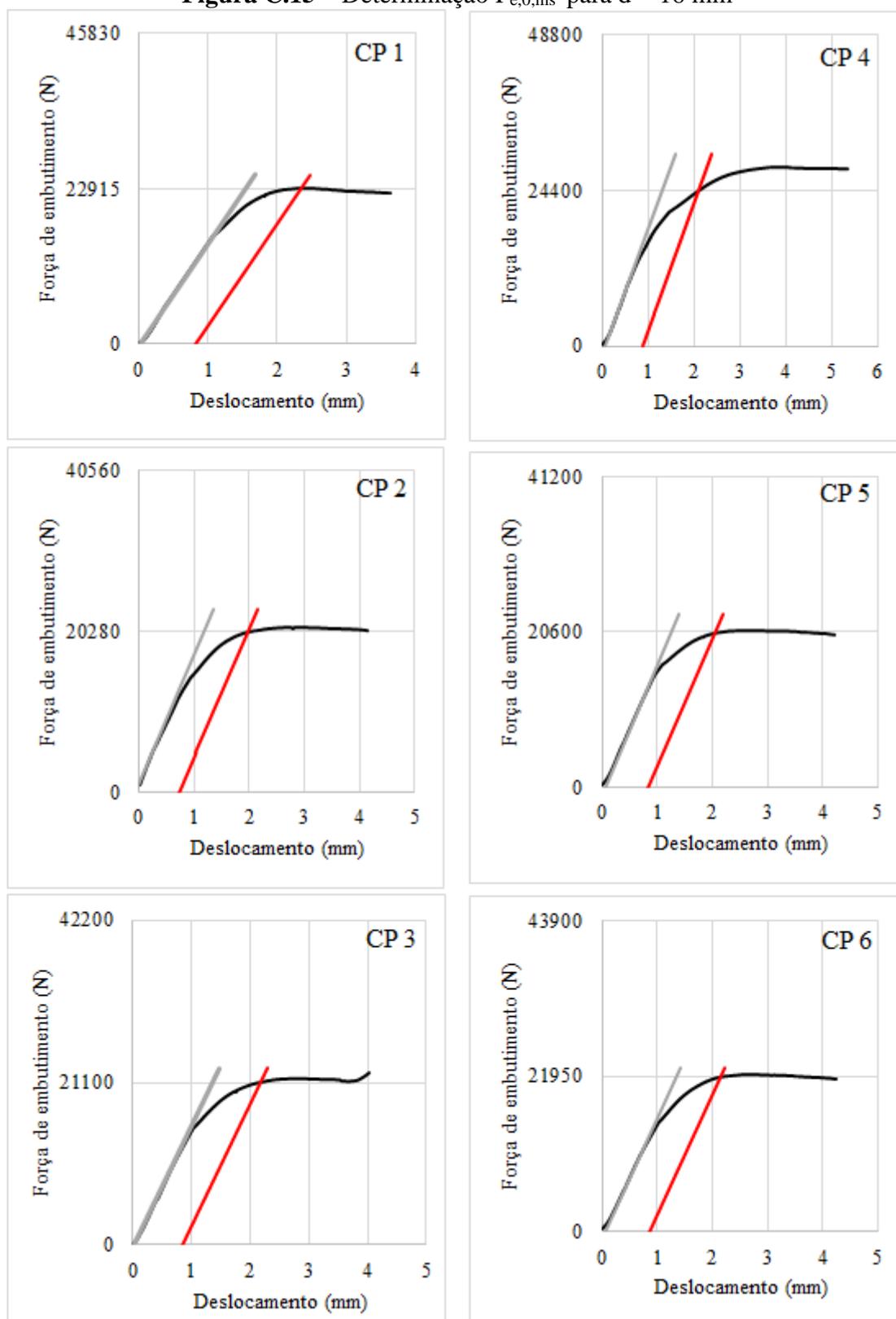
Fonte: O autor

Figura C.14 – Determinação $F_{e,0,ms}$ para $d = 12$ mm



Fonte: O autor

Figura C.15 – Determinação $F_{e,0,ms}$ para $d = 16$ mm



Fonte: O autor

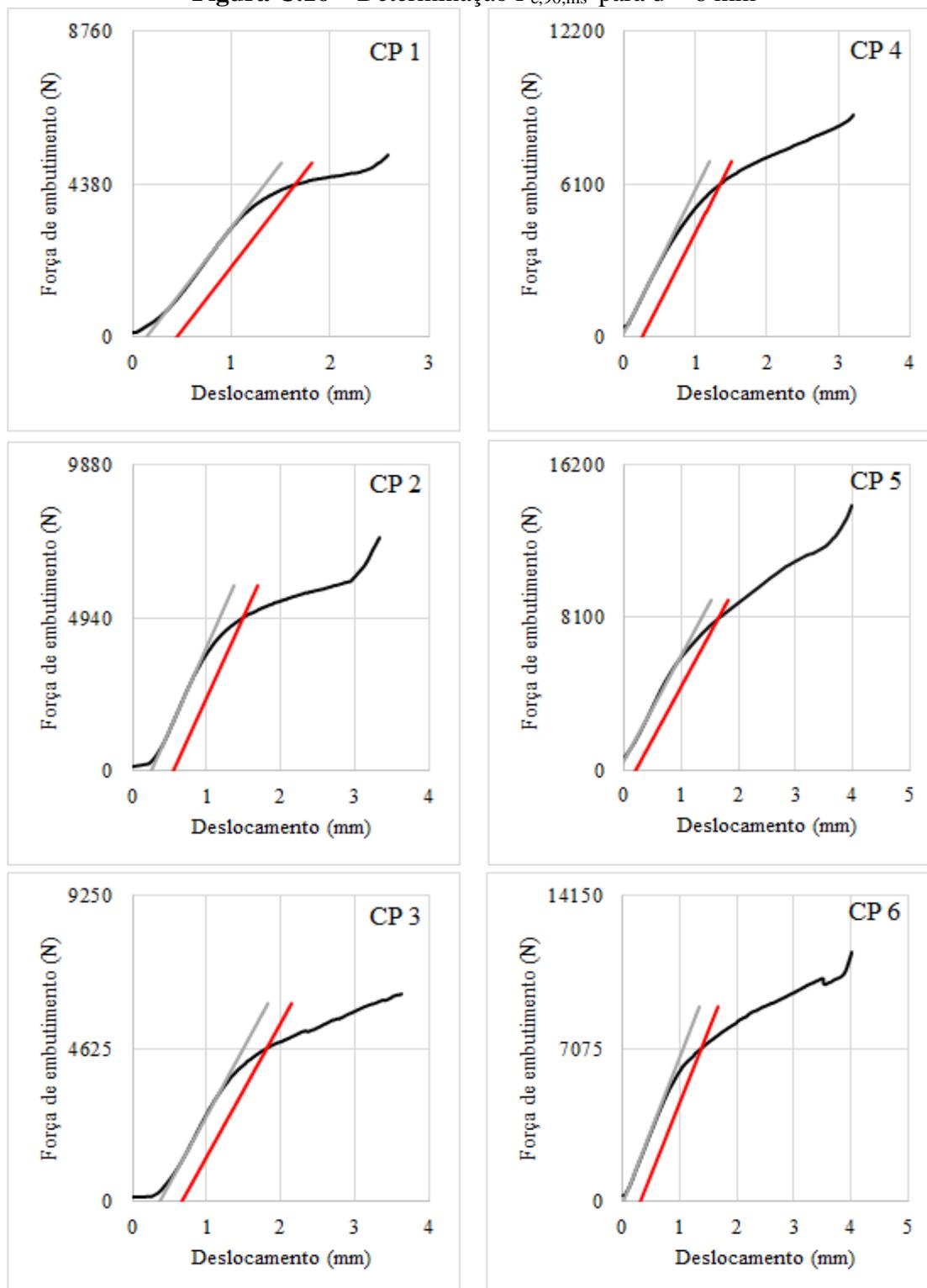
Tabela C.3 – Dimensões dos corpos de prova, força e resistência ao embutimento da madeira serrada na direção paralela às fibras

Corpo de prova/série	Dimensões (mm)			Diâmetro real (mm)	Fe,0,ms (N)	fe,0,ms (MPa)
	A	B	C			
1 - OS6	60,10	101,55	101,60	6,00	6900	19,13
2 - OS6	59,60	101,00	100,95	6,00	10720	29,98
3 - OS6	60,50	100,85	102,00	6,00	8400	23,14
4 - OS6	60,00	99,50	100,65	6,00	6970	19,36
5 - OS6	60,00	101,00	101,05	6,00	7350	20,42
6 - OS6	60,25	101,90	100,80	6,00	7450	20,61
1 - OS8	59,80	100,60	101,00	7,90	9950	21,06
2 - OS8	59,40	101,15	101,75	7,90	9880	21,05
3 - OS8	58,90	100,85	100,45	7,90	13480	28,97
4 - OS8	59,95	101,00	101,35	7,90	10440	22,04
5 - OS8	60,25	100,80	100,55	7,90	10700	22,48
6 - OS8	59,55	100,70	101,25	7,90	10450	22,21
1 - OS10	59,60	100,90	101,25	9,90	13950	23,64
2 - OS10	60,30	101,00	101,90	9,90	13400	22,45
3 - OS10	59,10	100,65	100,00	9,90	16580	28,34
4 - OS10	59,75	100,90	101,65	9,90	13850	23,41
5 - OS10	59,85	100,95	100,75	9,90	13650	23,04
6 - OS10	59,75	101,00	101,60	9,90	14500	24,51
1 - OS12	59,50	101,10	101,00	11,90	14030	19,81
2 - OS12	60,15	101,35	101,40	11,90	16550	23,12
3 - OS12	60,45	101,50	100,75	11,90	19400	26,97
4 - OS12	59,00	100,75	109,40	11,90	16950	24,14
5 - OS12	59,95	101,10	100,85	11,90	16200	22,71
6 - OS12	59,75	100,85	102,20	11,90	15100	21,24
1 - OS16	59,15	100,05	101,95	15,75	22915	24,60
2 - OS16	59,85	100,50	102,55	15,75	20280	21,51
3 - OS16	59,15	100,05	101,95	15,75	21100	22,65
4 - OS16	59,20	100,90	101,65	15,75	24400	26,17
5 - OS16	60,40	99,55	101,30	15,75	20600	21,65
6 - OS16	59,85	100,50	102,55	15,75	21950	23,29

Fonte: O autor

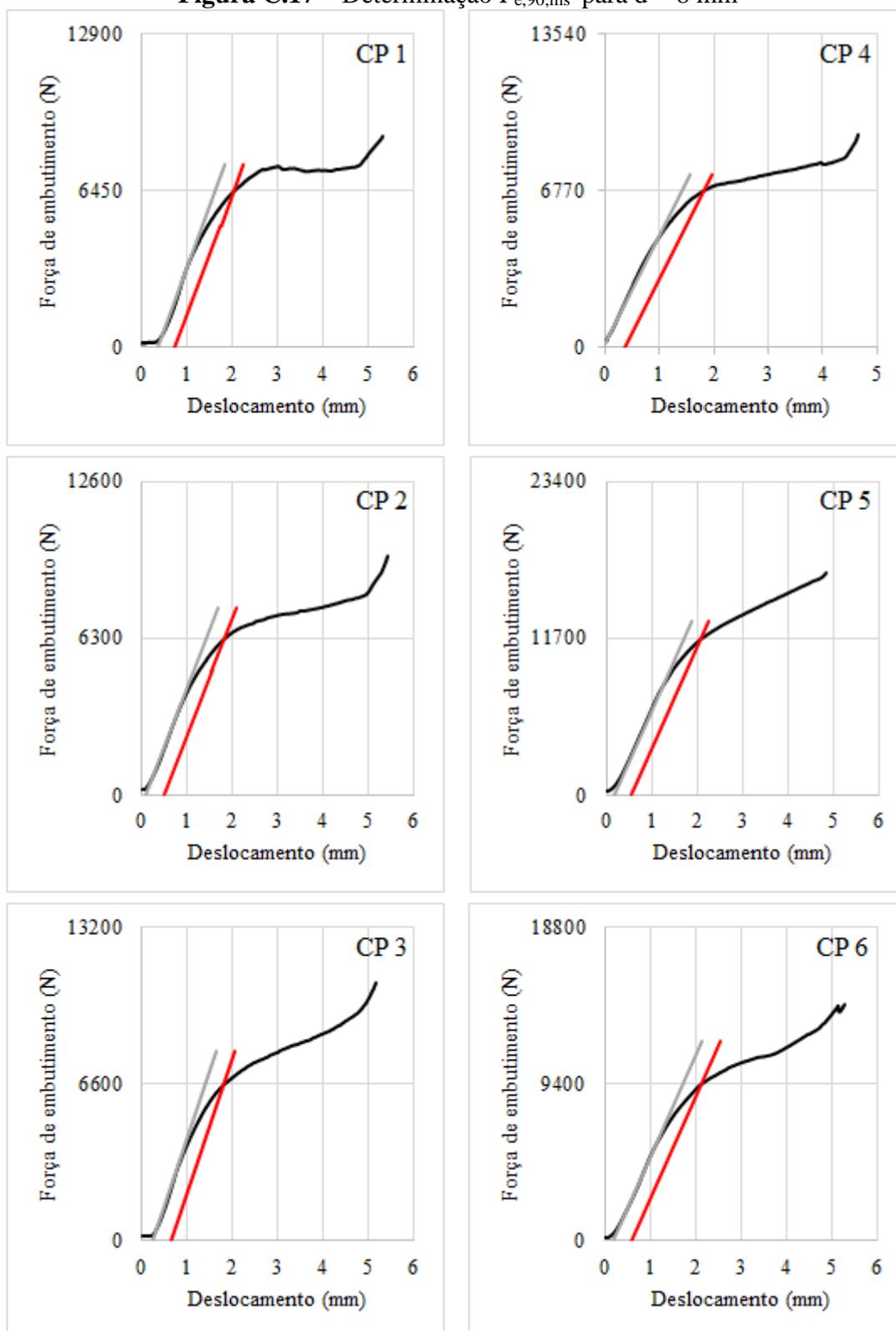
C.2 Curvas referentes à madeira serrada na direção perpendicular às fibras

Figura C.16 – Determinação $F_{e,90,ms}$ para $d = 6$ mm



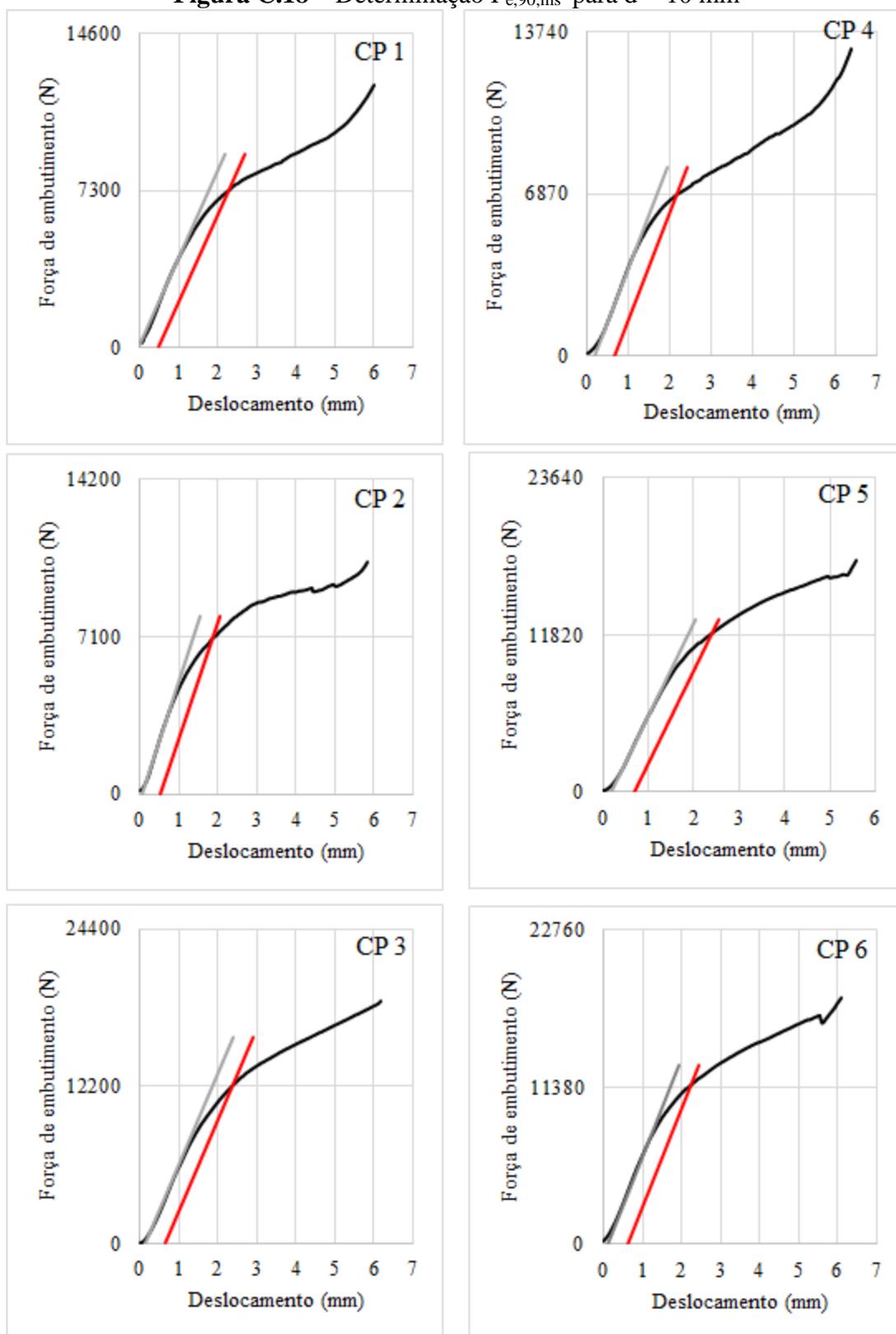
Fonte: O autor

Figura C.17 – Determinação $F_{e,90,ms}$ para $d = 8$ mm



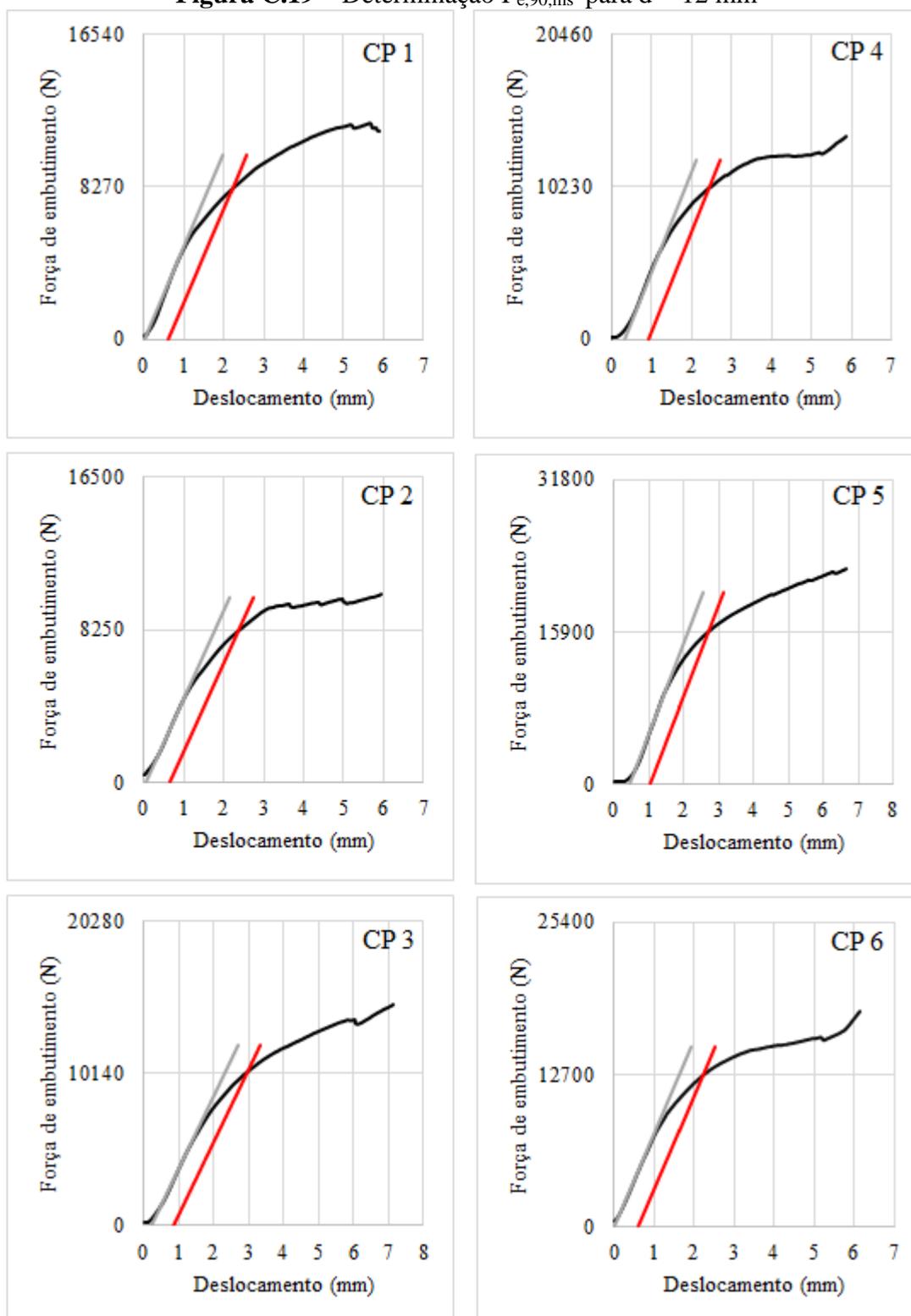
Fonte: O autor

Figura C.18 – Determinação $F_{e,90,ms}$ para $d = 10$ mm



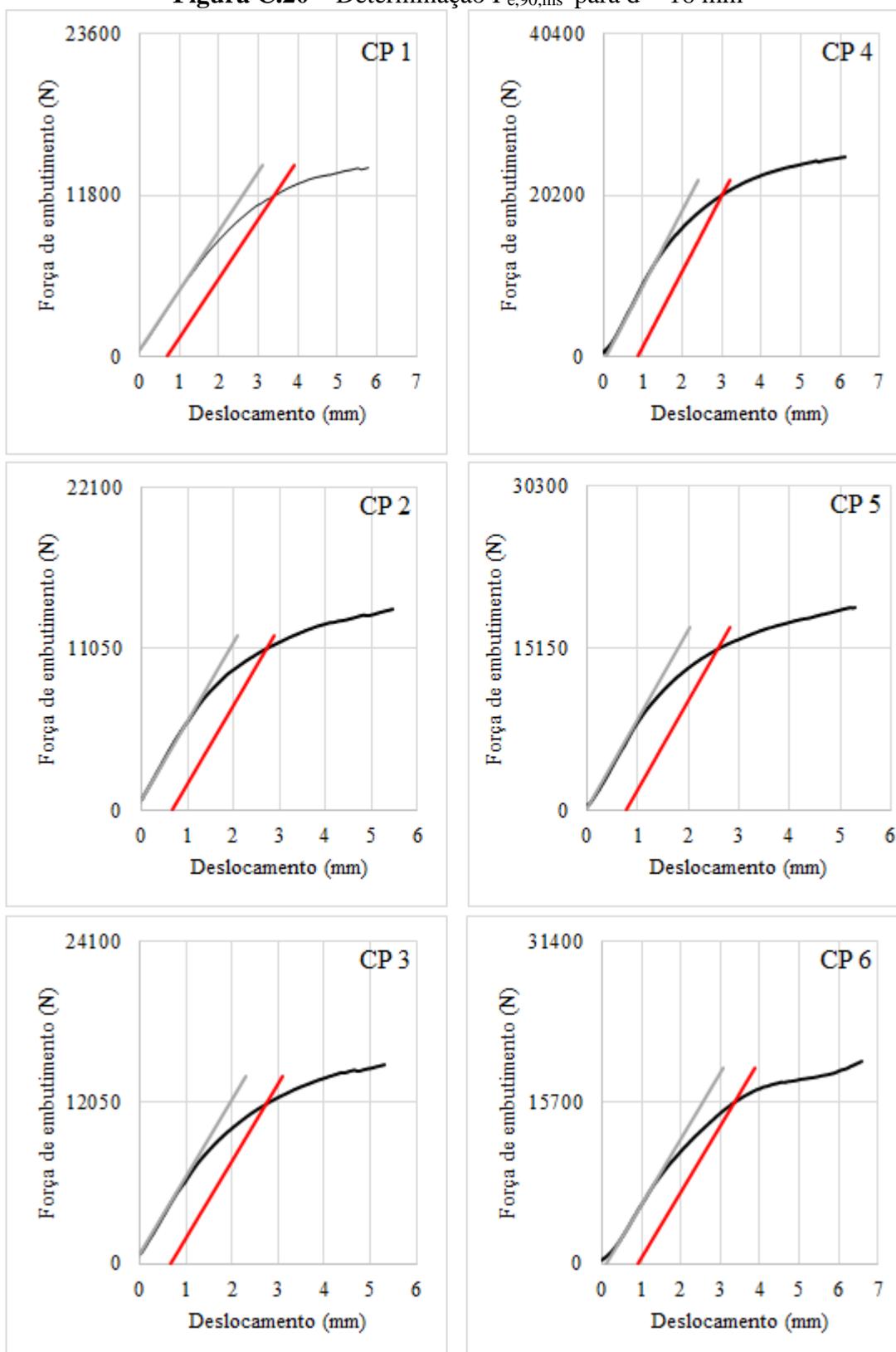
Fonte: O autor

Figura C.19 – Determinação $F_{e,90,ms}$ para $d = 12$ mm



Fonte: O autor

Figura C.20 – Determinação $F_{e,90,ms}$ para $d = 16$ mm



Fonte: O autor

Tabela C.4 – Dimensões dos corpos de prova, força e resistência ao embutimento da madeira serrada na direção perpendicular às fibras

Corpo de prova/série	Dimensões (mm)			Diâmetro real (mm)	Fe,90,ms (N)	fe,90,ms (MPa)
	A	B	C			
1 - 90S6	59,80	100,75	100,90	6,00	4380	12,21
2 - 90S6	60,25	101,25	101,85	6,00	4940	13,67
3 - 90S6	59,90	100,40	101,85	6,00	4625	12,87
4 - 90S6	60,45	101,20	101,80	6,00	6100	16,82
5 - 90S6	60,10	100,75	102,20	6,00	8100	22,46
6 - 90S6	59,80	100,95	102,15	6,00	7075	19,72
1 - 90S8	60,20	100,60	101,50	7,90	6450	13,56
2 - 90S8	59,85	100,45	102,10	7,90	6300	13,32
3 - 90S8	59,40	101,10	102,00	7,90	6600	14,06
4 - 90S8	59,70	100,95	102,00	7,90	6770	14,35
5 - 90S8	60,40	101,35	102,65	7,90	11700	24,52
6 - 90S8	59,30	100,65	102,20	7,90	9400	20,07
1 - 90S10	59,80	101,05	101,85	9,90	7300	12,33
2 - 90S10	60,20	101,20	101,75	9,90	7100	11,91
3 - 90S10	60,00	101,00	101,40	9,90	12200	20,54
4 - 90S10	59,80	100,25	101,60	9,90	6870	11,60
5 - 90S10	59,65	101,90	100,95	9,90	11820	20,02
6 - 90S10	59,60	100,50	99,75	9,90	11380	19,29
1 - 90S12	59,80	100,80	102,35	11,90	8270	11,62
2 - 90S12	60,00	100,85	100,95	11,90	8250	11,55
3 - 90S12	59,40	101,40	101,40	11,90	10140	14,35
4 - 90S12	60,30	101,70	100,15	11,90	10230	14,26
5 - 90S12	60,35	101,35	101,55	11,90	15900	22,14
6 - 90S12	59,40	100,75	101,80	11,90	12700	17,97
1 - 90S16	59,75	101,60	101,10	15,75	11800	12,54
2 - 90S16	59,40	100,70	100,75	15,75	11050	11,81
3 - 90S16	59,65	101,50	100,60	15,75	12050	12,83
4 - 90S16	59,85	100,20	101,70	15,75	20200	21,43
5 - 90S16	58,80	100,50	101,50	15,75	15150	16,36
6 - 90S16	59,55	100,20	101,70	15,75	15700	16,74

Fonte: O autor

APÊNDICE D – Análise de variância (ANOVA)

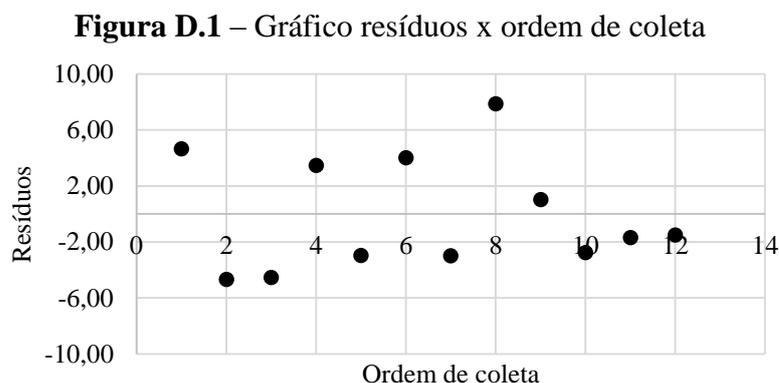
Os testes de verificação dos pressupostos de normalidade e homocedasticidade das observações foram realizados por meio do software Action.

D.1 ANOVA para direção paralela às fibras

D.1.1 Diâmetro de 6 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros



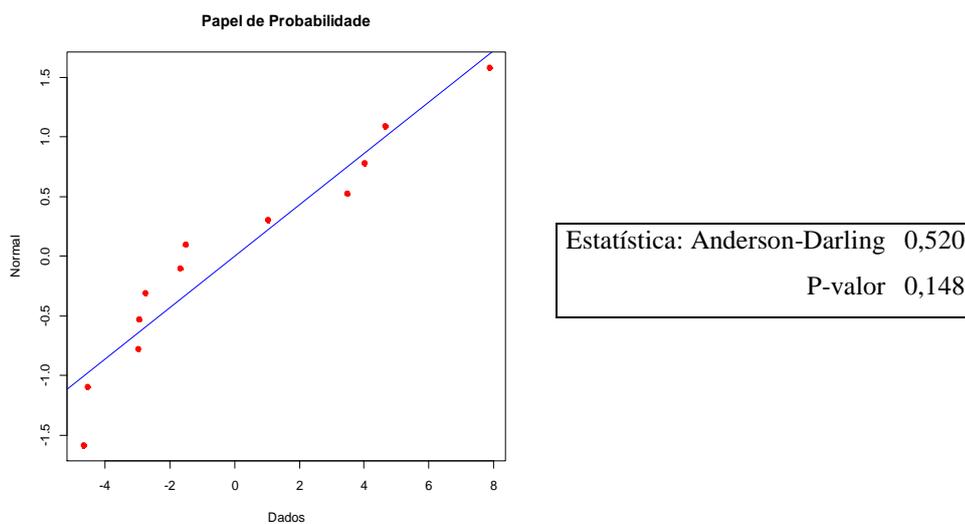
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.1 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

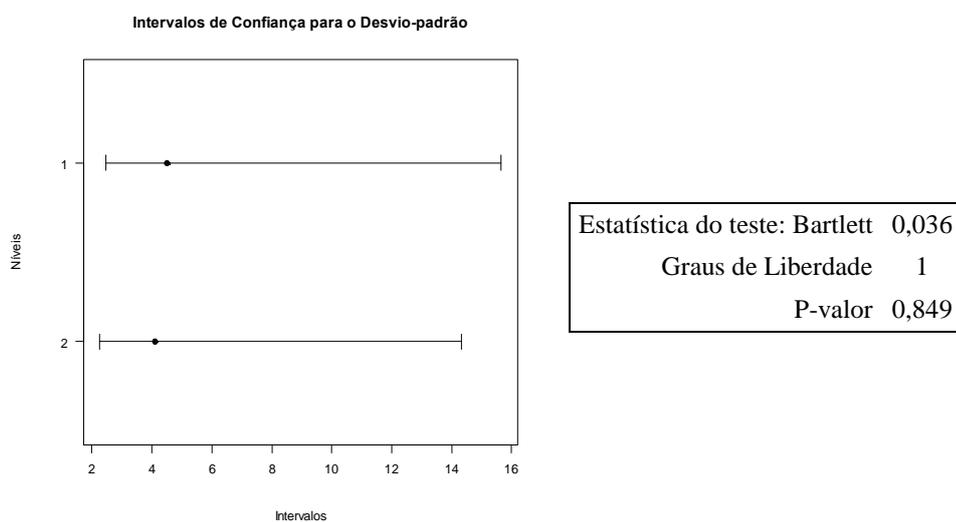
A Figura D.2 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

Figura D.2 – Teste de normalidade: Anderson-Darling

Fonte: O autor

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.3 – Homocedasticidade das variâncias: Bartlett

Fonte: O autor

A Figura D.3 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.1 e D.2.

Tabela D.1– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	145,85	24,31	20,20
Madeira serrada perpendicular	6	132,64	22,11	16,90

Fonte: O autor

Tabela D.2– ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	14,55	1	14,55	0,78	0,397
Dentro dos grupos	185,48	10	18,55		
Total	200,02	11			

Fonte: O autor

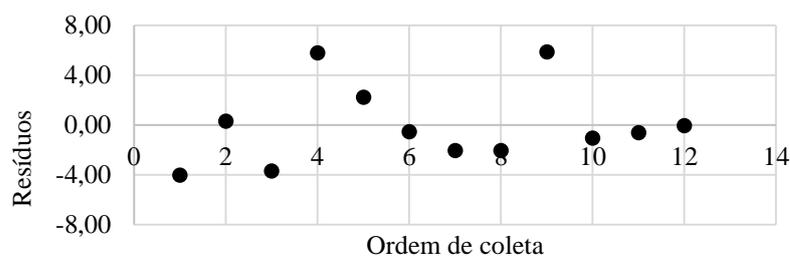
Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção paralela às fibras e diâmetro de 6mm sejam diferentes.

D.1.2 Diâmetro de 8 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

Figura D.4 – Gráfico resíduos x ordem de coleta



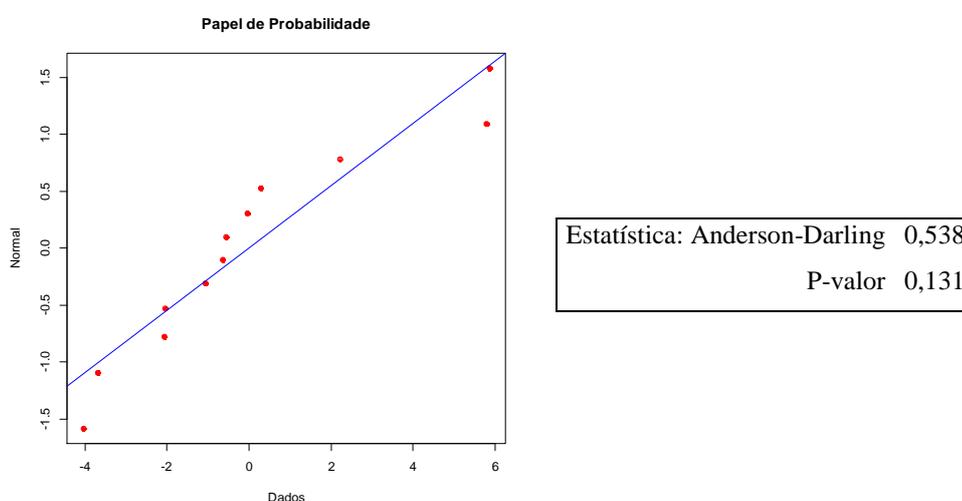
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.4 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.5 – Teste de normalidade: Anderson-Darling



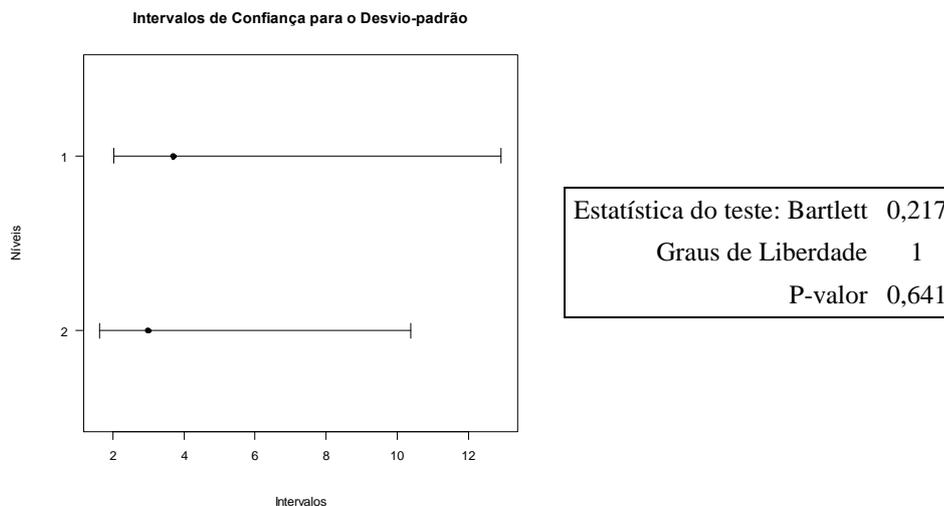
Fonte: O autor

A Figura D.5 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Figura D.6 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Figura D.6 – Homocedasticidade das variâncias: Bartlett

Fonte: O autor

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.3 e D.4

Tabela D.3 – Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	133,90	22,32	13,74
Madeira serrada perpendicular	6	138,67	23,11	8,86

Fonte: O autor

Tabela D.4 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	1,899	1	1,90	0,17	0,691
Dentro dos grupos	112,99	10	11,30		
Total	114,89	11			

Fonte: O autor

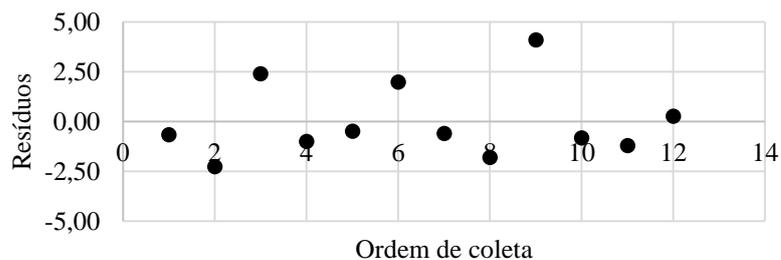
Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção paralela às fibras e diâmetro de 8 mm sejam diferentes.

D.1.3 Diâmetro de 10mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

Figura D.7 – Gráfico resíduos x ordem de coleta



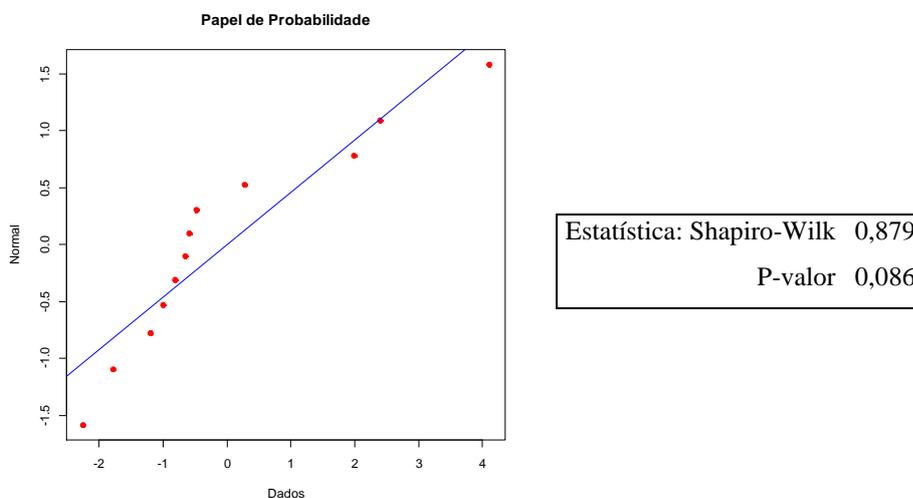
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.7 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.8 – Teste de normalidade: Shapiro-Wilk



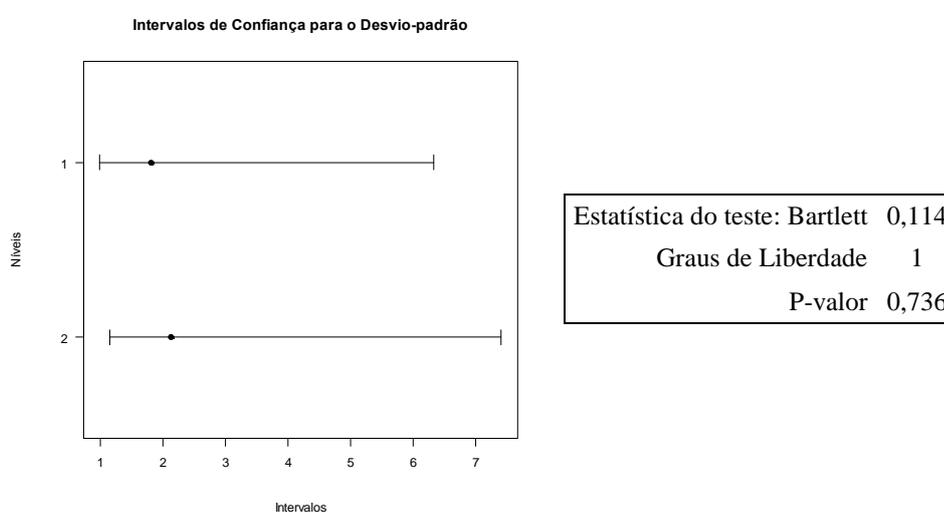
Fonte: O autor

A Figura D.8 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.9 – Homocedasticidade das variâncias: Bartlett



Fonte: O autor

A Figura D.9 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.5 e D.6.

Tabela D.5 – Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	133,05	22,18	3,29
Madeira serrada perpendicular	6	145,39	24,23	4,51

Fonte: O autor

Tabela D.6 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	12,69	1	12,69	3,25	0,101
Dentro dos grupos	39,01	10	3,90		
Total	51,70	11			

Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção paralela às fibras e diâmetro de 10mm sejam diferentes.

D.1.4 Diâmetro de 12 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros



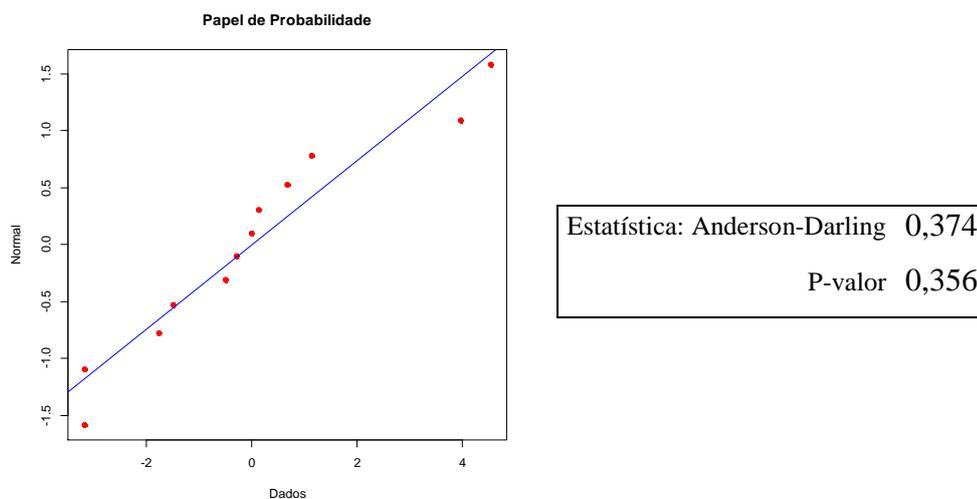
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.10 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.11 – Teste de normalidade: Anderson-Darling



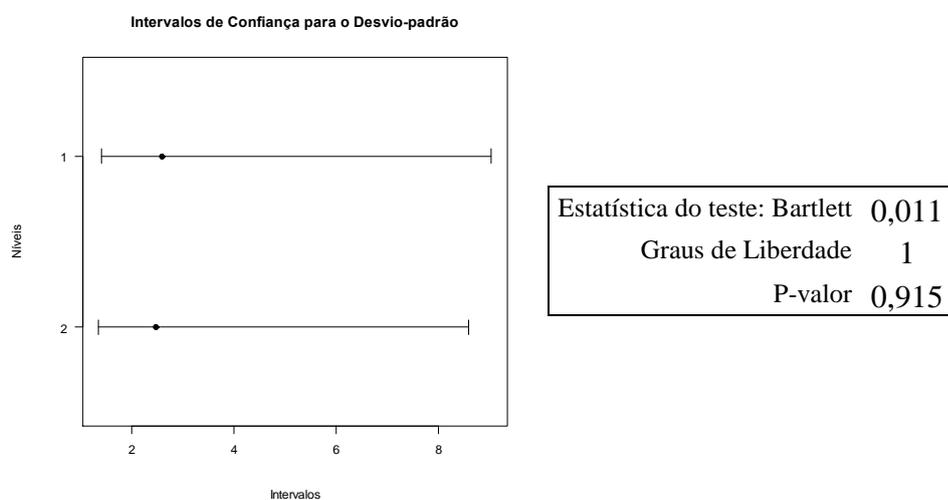
Fonte: O autor

A Figura D.11 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$. A Figura D.12 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Figura D.12 – Homocedasticidade das variâncias: Bartlett



Fonte: O autor

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.7 e D.8.

Tabela D.7– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	133,58	22,26	6,72
Madeira serrada perpendicular	6	137,99	23,00	6,08

Fonte: O autor

Tabela D.8 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	1,62	1	1,62	0,25	0,625
Dentro dos grupos	64,00	10	6,40		
Total	65,62	11			

Fonte: O autor

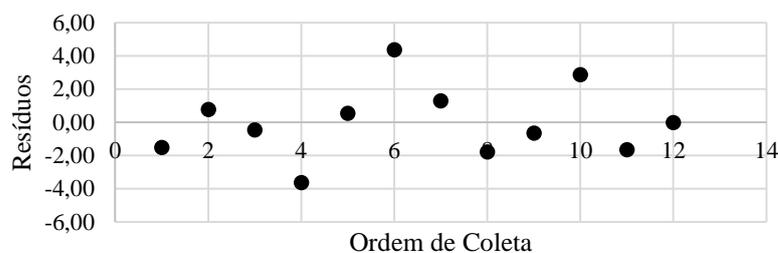
Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção paralela às fibras e diâmetro de 12mm sejam diferentes.

D.1.5 Diâmetro de 16 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

Figura D.13 – Gráfico resíduos x ordem de coleta



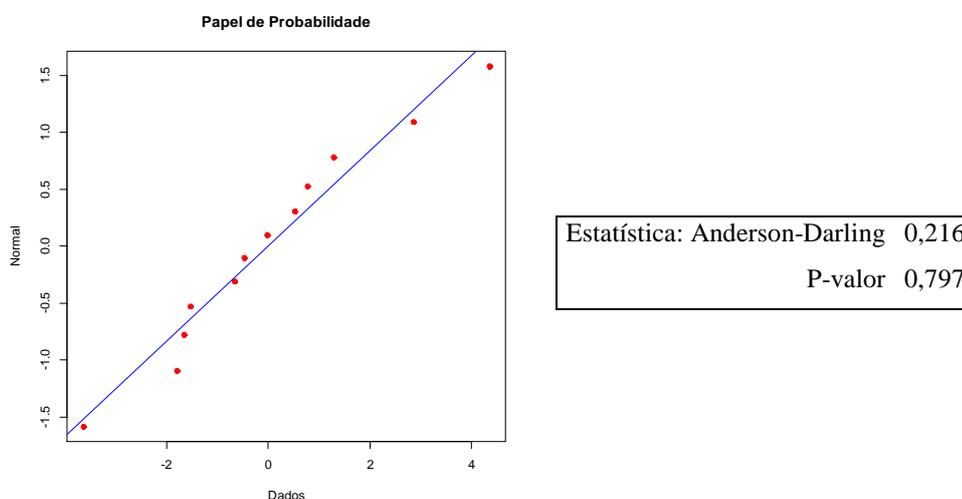
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.13 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.14– Teste de normalidade:Anderson-Darling



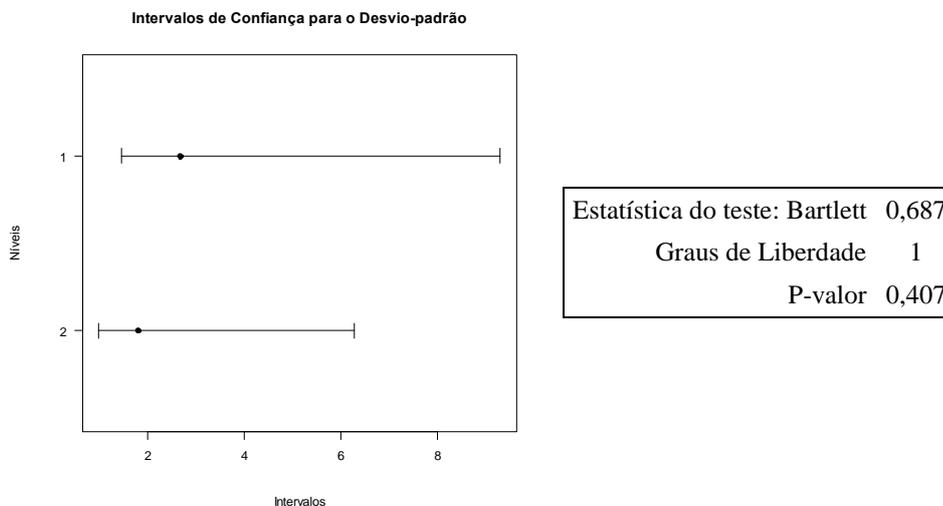
Fonte: O autor

A Figura D.14 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Figura D.15 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Figura D.15– Homocedasticidade das variâncias: Bartlett

Fonte: O autor

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.9 e D.10

Tabela D.9– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	132,25	22,04	7,14
Madeira serrada perpendicular	6	139,87	23,31	3,25

Fonte: O autor

Tabela D.10 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	4,84	1	4,84	0,93	0,357
Dentro dos grupos	51,92	10	5,19		
Total	56,76	11			

Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção paralela às fibras e diâmetro de 16mm sejam diferentes.

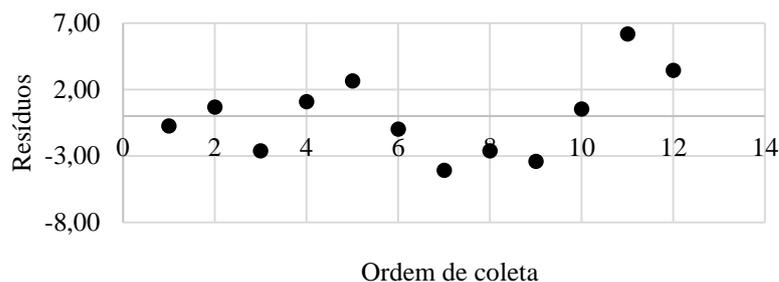
D.2 ANOVA para direção perpendicular às fibras

D.2.1 Diâmetro de 6 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

Figura D.16– Gráfico resíduos x ordem de coleta



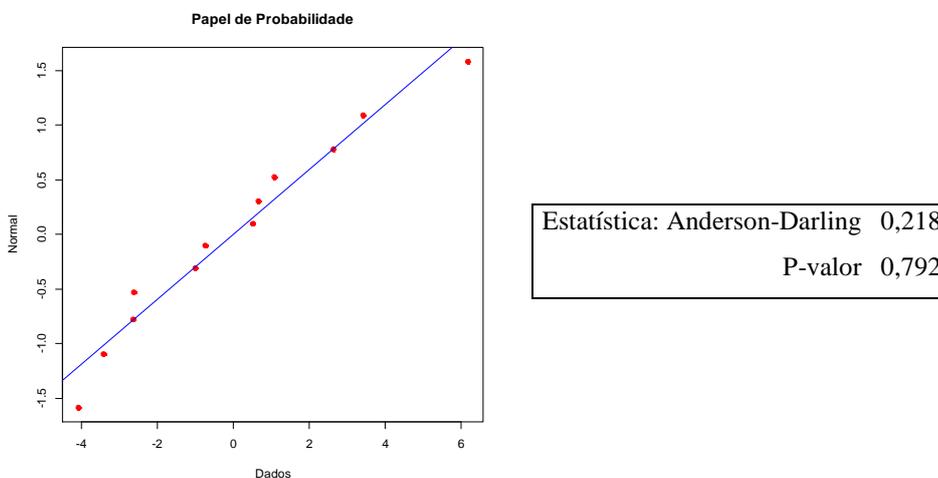
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.16 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.17– Teste de normalidade: Anderson-Darling



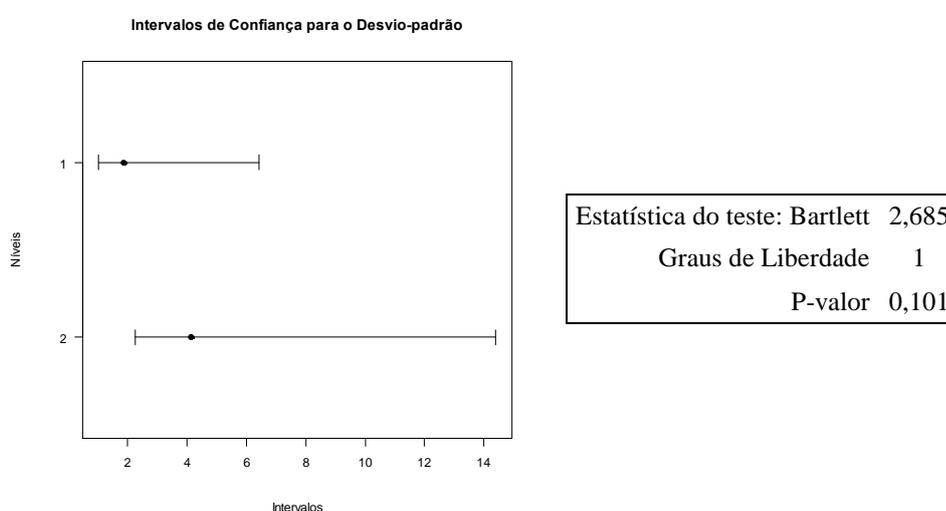
Fonte: O autor

A Figura D.17 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.18– Homocedasticidade das variâncias: Bartlett



Fonte: O autor

A Figura D.18 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.11 e D.12.

Tabela D.11– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	120,32	20,05	3,40
Madeira serrada perpendicular	6	97,74	16,29	17,08

Fonte: O autor

Tabela D.12 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	42,49	1	42,49	4,15	0,069
Dentro dos grupos	102,40	10	10,24		
Total	144,89	11			

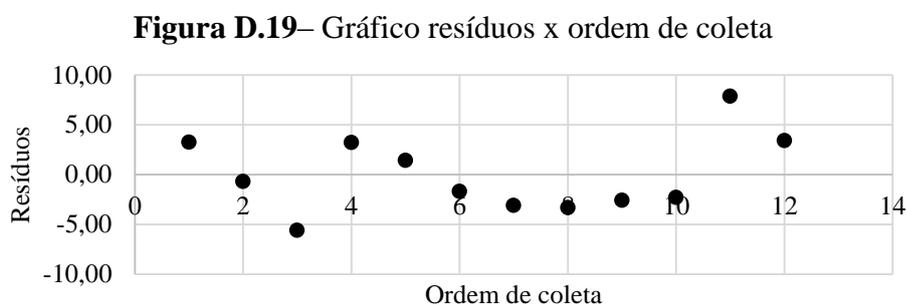
Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 6mm sejam diferentes.

D.2.2 Diâmetro de 8 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

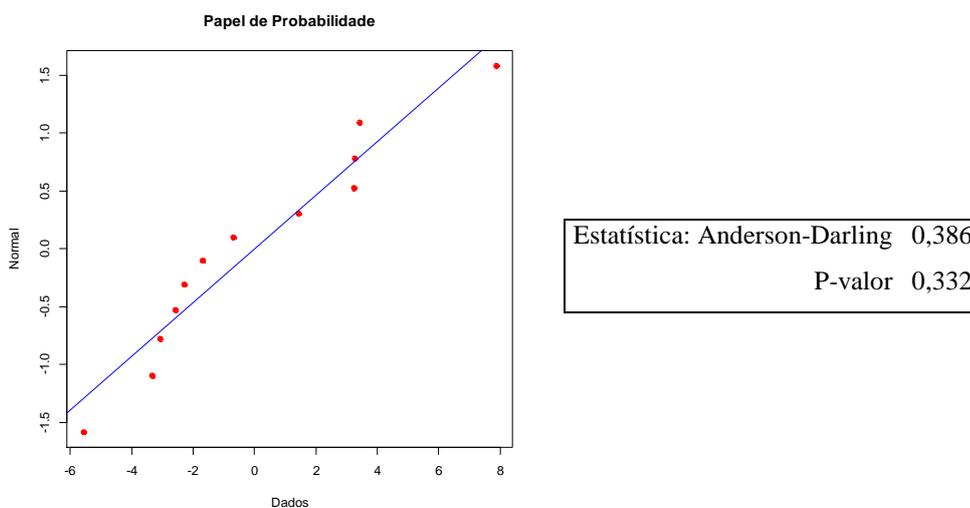


Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.19 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

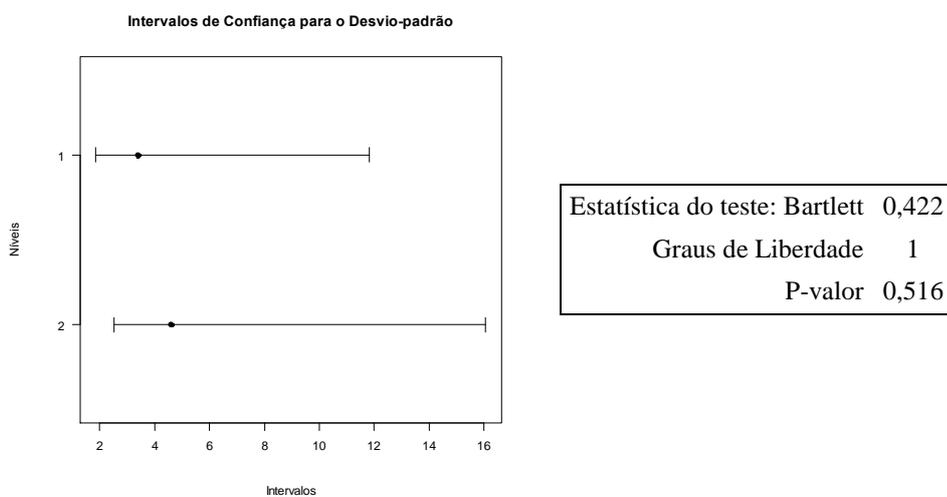
Figura D.20– Teste de normalidade: Anderson-Darling

Fonte: O autor

A Figura D.20 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.21– Homocedasticidade das variâncias: Bartlett

Fonte: O autor

A Figura D.21 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.13 e D.14.

Tabela D.13– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	122,51	20,42	11,49
Madeira serrada perpendicular	6	99,89	16,65	21,23

Fonte: O autor

Tabela D.14 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F_{calculado}	P-valor
Entre grupos	42,65	1	42,65	2,61	0,138
Dentro dos grupos	163,60	10	16,36		
Total	206,24	11			

Fonte: O autor

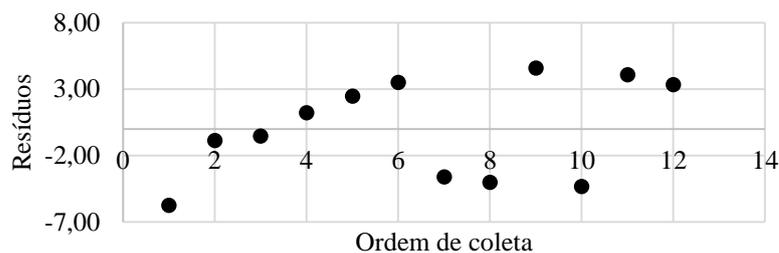
Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como P-valor $> \alpha$ e $F_{cal} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 8 mm sejam diferentes.

D.2.3 Diâmetro de 10mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros

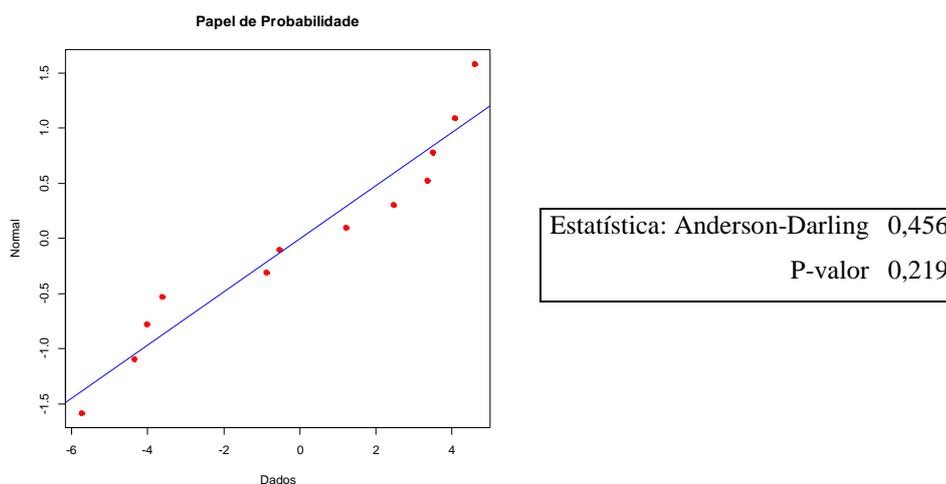
O gráfico apresentado na Figura D.22 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

Figura D.22 – Gráfico resíduos x ordem de coleta

Fonte: O autor

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.23– Teste de normalidade: Anderson-Darling

Fonte: O autor

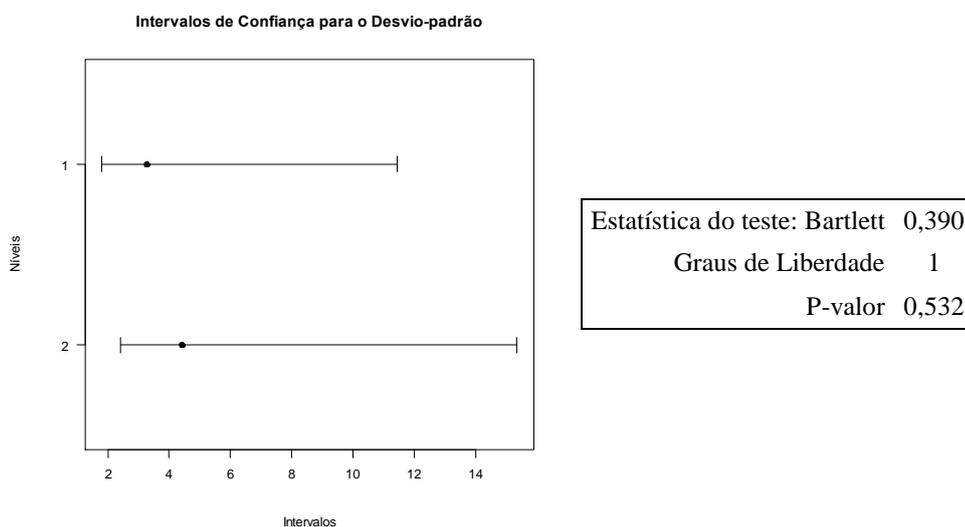
A Figura D.23 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Figura D.24 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Figura D.24– Homocedasticidade das variâncias: Bartlett



Fonte: O autor

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.15 e D.16.

Tabela D.15– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	112,97	18,83	10,75
Madeira serrada perpendicular	6	95,69	15,95	19,40

Fonte: O autor

Tabela D.16– ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	24,89	1	24,89	1,65	0,228
Dentro dos grupos	150,77	10	15,08		
Total	175,66	11			

Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 10 mm sejam diferentes.

D.2.4 Diâmetro de 12 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros



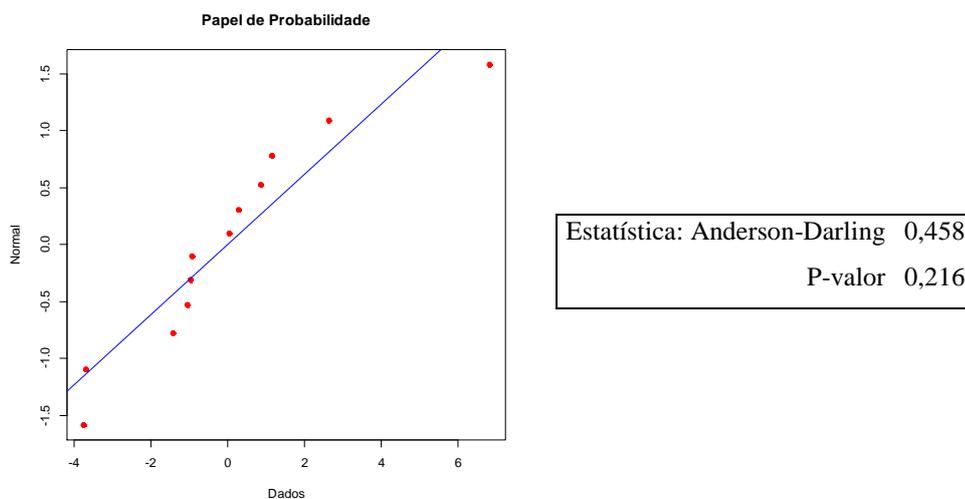
Fonte: O autor

O gráfico apresentado na Figura D.25 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

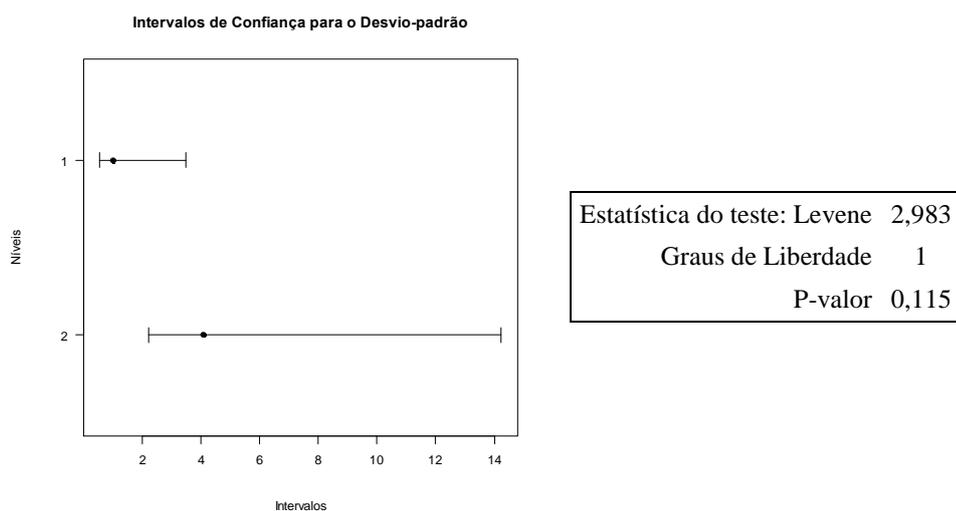
A Figura D.26 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo $P\text{-valor} > \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

Figura D.26– Teste de normalidade: Anderson-Darling

Fonte: O autor

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Levene, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura D.27– Homocedasticidade das variâncias: Levene

Fonte: O autor

A Figura D.27 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.17 e D.18.

Tabela D.17 – Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	101,14	16,86	1,01
Madeira serrada perpendicular	6	91,88	15,31	16,69

Fonte: O autor

Tabela D.18 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	7,15	1	7,15	0,81	0,390
Dentro dos grupos	88,49	10	8,85		
Total	95,64	11			

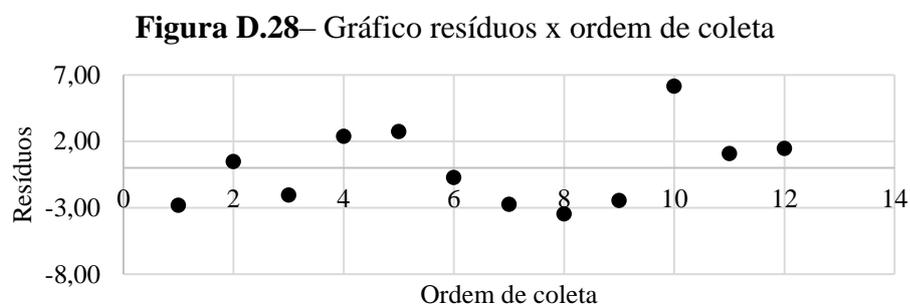
Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} > \alpha$ e $F_{\text{cal}} < F_{0,05;1;10}$, não existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, não existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 12 mm sejam diferentes.

D.2.5 Diâmetro de 16 mm

Verificação dos pressupostos:

I) Independência dos erros



Fonte: O autor

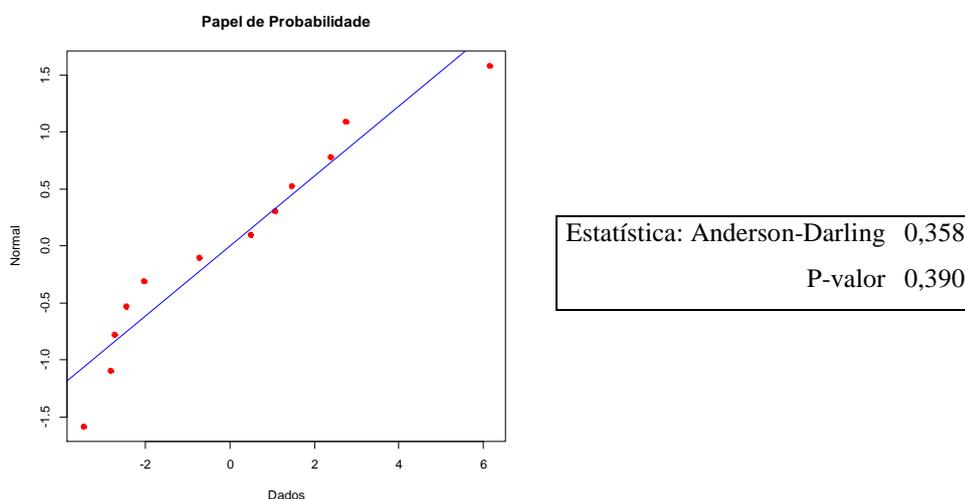
O gráfico apresentado na Figura D.28 indica que os erros são variáveis aleatórias independentes, tendo em vista que os pontos dispostos seguem distribuição aleatória.

II) Normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Anderson-Darling, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Figura D.29 mostra o teste de normalidade dos resíduos cujo P-valor $> \alpha$, confirmando, portanto, a hipótese de que os resíduos seguem distribuição normal.

Figura D.29– Teste de normalidade: Anderson-Darling

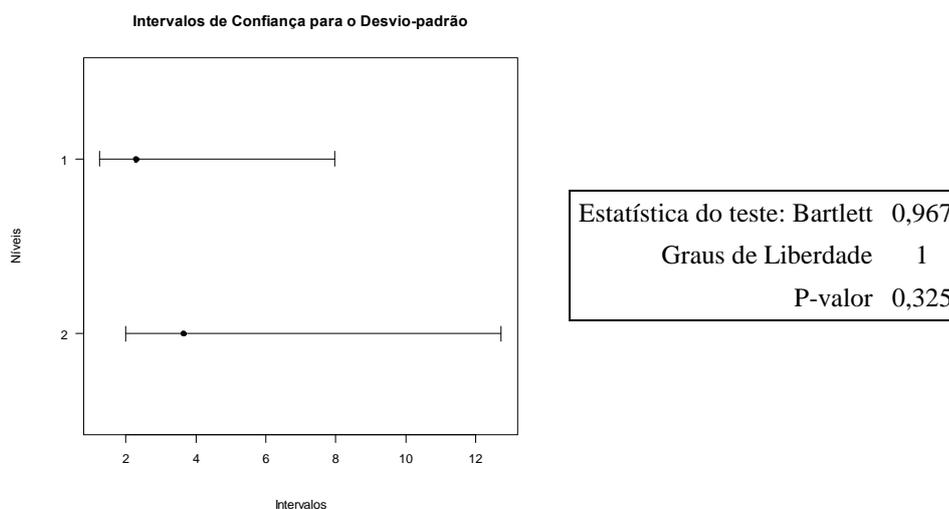


Fonte: O autor

III) Homocedasticidade

Para verificação da homocedasticidade da variância foi aplicado o teste de Bartlett, com nível de significância $\alpha = 0,05$.

A Figura D.30 mostra o teste cujo P-valor $> \alpha$, portanto, verifica-se a hipótese de homocedasticidade das variâncias.

Figura D.30– Homocedasticidade das variâncias: Bartlett

Fonte: O autor

Uma vez que todos os pressupostos foram verificados, a ANOVA foi realizada conforme os dados apresentados de maneira resumida nas Tabelas D.19 e D.20.

Tabela D.19– Resumo dos dados para ANOVA

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
CLT perpendicular	6	115,91	19,32	5,21
Madeira serrada perpendicular	6	91,70	15,28	13,33

Fonte: O autor

Tabela D.20 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	P-valor
Entre grupos	48,83	1	48,83	5,26	0,045
Dentro dos grupos	92,75	10	9,27		
Total	141,58	11			

Fonte: O autor

Da tabela de distribuição F-Snedecor tem-se $F_{0,05;1;10} = 4,96$. Como $P\text{-valor} < \alpha$ e $F_{\text{cal}} > F_{0,05;1;10}$, existem evidências estatísticas para rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, existem indicações estatísticas de que as médias de resistência ao embutimento da CLT e madeira serrada para a direção perpendicular às fibras e diâmetro de 16 mm sejam diferentes.