

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATEUS VINICIUS PASTORI TERRIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO
EMBUTIMENTO**

CAMPO MOURÃO

2018

MATEUS VINICIUS PASTORI TERRIN

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO
EMBUTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA AO EMBUTIMENTO

por

Mateus Vinicius Pastori Terrin

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9h20min do dia 26 de junho de 2018 como requisito parcial para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim

Corelhano

(UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Agradecimentos

Aos meus pais, Jovino e Lucia, pelo amor incondicional.

Aos meus irmãos pelo companheirismo e suporte nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes pela excepcional orientação e amizade ao longo dos anos de graduação.

Ao Eng. Maiko Cristian Sedoski pelas inúmeras horas dedicadas e por toda sua contribuição na realização deste trabalho.

Aos membros do Programa de Educação Tutorial por toda colaboração e dedicação.

Aos amigos, que sempre estiveram presentes e sem os quais a vida não seria a mesma.

À Juliana por seu companheirismo, dedicação e amor.

Resumo

TERRIN, M. V. P. **Avaliação Experimental da Resistência da Madeira ao Embutimento**. 2018. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

Nas estruturas de madeira, as ligações são elementos de elevada importância, pois conferem continuidade aos membros, além de resistência e estabilidade ao sistema. Para conectar as peças de madeira, são utilizados pinos metálicos, como os parafusos passantes com porca e arruela, dentre outros elementos. A capacidade resistente das ligações com pinos metálicos é influenciada por diversos fatores, dentre eles a resistência ao escoamento do aço do pino e a resistência da madeira ao embutimento. O objetivo deste trabalho é comparar a resistência ao embutimento obtida por meio do método de ensaio presente no documento normativo BS EN 383:2007 com as resistências calculadas de acordo com as seguintes normas: ABNT NBR 7190:1997, CEN EUROCODE 5:2004 e ANSI/AWC NDS:2015. Foram realizados ensaios de embutimento na direção paralela às fibras para seis espécies de madeira, a saber: Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Eucalipto-grandis (*Eucalyptus grandis*), Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Pinus eliottii (*Pinus eliottii*). Ademais, foram realizados ensaios de embutimento na direção perpendicular às fibras para duas espécies: Eucalipto-grandis (*Eucalyptus grandis*) e Pinus eliottii (*Pinus eliottii*). Além disso, utilizou-se seis diâmetros para o pino metálico (3, 6, 8, 10, 12 e 16 milímetros). Os resultados experimentais obtidos indicaram que o modelo de cálculo da norma europeia (CEN EUROCODE 5:2004) é mais adequado que o da norma brasileira e o da norma americana para a determinação da resistência ao embutimento da madeira.

Palavras-chaves: Estruturas de madeira. Ligações em madeira. Pinos metálicos. Resistência ao embutimento.

Abstract

TERRIN, M. V. P. **Experimental Evaluation of Dowel Embedment Strength**. 2018. 101 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

The main objective of this work is to validate the mechanical connection design formulation presented in CEN EUROCODE 5:2004, for commonly used Brazilian wood species, considering the dowel embedment strength determination according to the testing procedures presented in the normative document BS EN 383:2007. The conducted tests were carried out in the direction parallel to the fibers using six wood species, widely used in Brazil, namely: Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Eucalipto-grandis (*Eucalyptus grandis*), Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Pinus elliottii (*Pinus elliottii*). Two species were also tested in the direction perpendicular to the fibers: Eucalipto-grandis (*Eucalyptus grandis*) and Pinus elliottii (*Pinus elliottii*). Six different dowel diameters (3, 6, 8, 10, 12 and 16 millimeters) were used. The experimental results obtained indicated that the European standard calculation model (with its correspondent dowel embedment strength evaluation procedure) is more adequate than the current Brazilian and North-American standards for designing dowel-type joints in timber structures and testing dowel embedment strength. The mechanical connection performance were estimated with a higher reliability, allowing to design safer joints.

Keywords: Timber structures. Timber connections. Dowel-type connections. Embedment strength.

Lista de figuras

Figura 1 – Gráfico de resistência ao embutimento por teor de umidade para três espécies de madeira	22
Figura 2 – Gráfico de resistência ao embutimento por diâmetro do pino metálico	25
Figura 3 – Gráfico de resistência ao embutimento por densidade aparente para duas espécies de madeira	26
Figura 4 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento	30
Figura 5 – Diagrama tensão por deformação específica de embutimento	30
Figura 6 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras de acordo com a ABNT NBR 7190:1997	31
Figura 7 – Configuração de ensaio recomendada pela norma ABNT NBR 7190:1997	31
Figura 8 – Procedimento de carregamento para ensaio de embutimento	32
Figura 9 – Diagrama de força de embutimento (F_e) por deslocamento (mm)	33
Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras de acordo com o BS EN 383:2007	33
Figura 11 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras de acordo com o BS EN 383:2007	34
Figura 12 – Aparato de ensaio recomendado pela norma BS EN 383:2007. (A) aparato de aço, (B) medidor de deslocamento, (C) pino metálico e (D) tira de aço.	34
Figura 13 – Ensaio real de embutimento de acordo com o BS EN 383:2017	35
Figura 14 – Diagrama de força de embutimento (F_e) por deformação (ε)	36
Figura 15 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras de acordo com o método <i>half hole</i> da ASTM D5764:2013	37
Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras de acordo com o método <i>full hole</i> da ASTM D5764:2013	37
Figura 17 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção normal às fibras de acordo com o método <i>full hole</i> da ASTM D5764:2013	38
Figura 18 – Vista frontal do aparato de ensaio para o método <i>half hole</i>	38
Figura 19 – Vista lateral do aparato de ensaio para o método <i>half hole</i>	39
Figura 20 – Ensaio real de embutimento de acordo com o método <i>half hole</i> da ASTM D5764:2013	39

Figura 21 – Vista frontal (a) e lateral (b) do aparato de ensaio para o método <i>full hole</i> . . .	40
Figura 22 – Modos de falha por esmagamento da madeira na direção paralela (a) e normal (c) às fibras e por fissuração da madeira na direção paralela (b) e normal (d) às fibras	43
Figura 23 – Relações entre resistência ao embutimento e deslocamento	44
Figura 24 – Peças de madeira das espécies Cedrinho, Garapeira e Itaúba utilizadas na confecção dos corpos de prova	51
Figura 25 – Parafuso M12 sextavado com rosca parcial	52
Figura 26 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras	52
Figura 27 – Ensaio de compressão paralela às fibras	53
Figura 28 – Diagrama de carregamento para o ensaio de compressão paralela às fibras . .	53
Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de densidade aparente, densidade relativa e teor de umidade	54
Figura 30 – Corpos de prova da espécie Itaúba para ensaio na direção paralela às fibras . .	55
Figura 31 – Corpos de prova da espécie <i>Pinus elliottii</i> para ensaio na direção perpendicular às fibras	56
Figura 32 – Vista frontal (a) e lateral (a) do aparato de ensaio de embutimento	56
Figura 33 – Pré-furação dos corpos de prova	57
Figura 34 – Posição do aparato e corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras	57
Figura 35 – Posição do aparato e corpo de prova para ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras	58
Figura 36 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Caixeta	65
Figura 37 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Cedrinho	66
Figura 38 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Eucalipto- <i>grandis</i>	66
Figura 39 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Garapeira	67
Figura 40 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Itaúba	67
Figura 41 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie <i>Pinus elliottii</i> . . .	68
Figura 42 – Resultados experimentais e estimados de f_{e90} para a espécie Eucalipto- <i>grandis</i> . . .	73
Figura 43 – Resultados experimentais e estimados de f_{e90} para a espécie <i>Pinus elliottii</i> . . .	74
Figura 44 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e densidade aparente média para o diâmetro igual a 11,70 mm	77

Figura 45 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e densidade aparente média para o diâmetro igual a 11,70 mm	78
Figura 46 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e diâmetro do pino metálico para a espécie Garapeira	79
Figura 47 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e diâmetro do pino metálico para a espécie Pinus elliottii	79
Figura 48 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras	80
Figura 49 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras para todos os diâmetros avaliados .	81
Figura 50 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras	83
Figura 51 – Comportamento característico do modo de falha 1	85
Figura 52 – Corpo de prova ensaiado da espécie Itaúba, na direção paralela às fibras e diâmetro de 9,70 mm (modo de falha 1)	86
Figura 53 – Comportamento característico do modo de falha 2	86
Figura 54 – Corpo de prova ensaiado da espécie Garapeira, na direção paralela às fibras e diâmetro de 9,70 mm (modo de falha 2)	87
Figura 55 – Comportamento característico do modo de falha 3	87
Figura 56 – Corpo de prova ensaiado da espécie Caixeta, na direção paralela às fibras e diâmetro de 15,80 mm (modo de falha 3)	88
Figura 57 – Corpo de prova ensaiado da espécie Eucalipto-grandis, na direção perpendicular às fibras e diâmetro de 3,00 mm (modo de falha 3)	88
Figura 58 – Corpo de prova ensaiado da espécie Pinus elliottii, na direção perpendicular às fibras e diâmetro de 9,70 mm (modo de falha 3)	89
Figura 59 – Detalhe do aparecimento de fissuras (<i>peeling</i>)	89
Figura 60 – Comportamento característico dos ensaios na direção perpendicular às fibras	90
Figura 61 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação ao diâmetro do pino	92
Figura 62 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação à densidade aparente média	92
Figura 63 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação à resistência à compressão paralela às fibras	93

Figura 64 – Incidência dos modos de falha para a espécie Caixeta ensaiada na direção paralela às fibras	93
Figura 65 – Incidência dos modos de falha para a espécie Cedrinho ensaiada na direção paralela às fibras	94
Figura 66 – Incidência dos modos de falha para a espécie Eucalipto-grandis ensaiada na direção paralela às fibras	94
Figura 67 – Incidência dos modos de falha para a espécie Garapeira ensaiada na direção paralela às fibras	94
Figura 68 – Incidência dos modos de falha para a espécie Itaúba ensaiada na direção paralela às fibras	95
Figura 69 – Incidência dos modos de falha para a espécie Pinus elliottii ensaiada na direção paralela às fibras	95
Figura 70 – Incidência dos modos de falha para a espécie Eucalipto-grandis ensaiada na direção perpendicular às fibras	96
Figura 71 – Incidência dos modos de falha para a espécie Pinus elliottii ensaiada na direção perpendicular às fibras	96

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões do corpo de prova de embutimento para o método <i>half hole</i> . . .	37
Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova de embutimento para o método <i>full hole</i> . . .	38
Tabela 3 – Séries de ensaios de embutimento	41
Tabela 4 – Coeficiente α_e para cálculo da resistência ao embutimento perpendicular às fibras	45
Tabela 5 – Espécies de madeiras	50
Tabela 6 – Diâmetros dos parafusos passantes	51
Tabela 7 – Parâmetros necessários para o cálculo de f_{e0} e f_{e90}	58
Tabela 8 – Resultado dos ensaios de teor de umidade, densidade aparente média e densidade relativa	60
Tabela 9 – Resultado dos ensaios de compressão paralela às fibras (f_{c0})	60
Tabela 10 – Valores de resistência ao embutimento paralela às fibras (f_{e0}) estimados . .	61
Tabela 11 – Valores de resistência ao embutimento perpendicular às fibras (f_{e90}) estimados	62
Tabela 12 – Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa . . .	62
Tabela 12 – Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa (continuação)	63
Tabela 13 – Resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), em MPa	64
Tabela 14 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pela ABNT NBR 7190:1997 .	69
Tabela 15 – Relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente média	70
Tabela 16 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pelo CEN EUROCODE 5:2004	71
Tabela 17 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011)	72
Tabela 18 – Relação entre as resistências ao embutimento experimentais na direção paralela e perpendicular às fibras	74
Tabela 19 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pela ABNT NBR 7190:1997	75

Tabela 20 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pelo CEN EUROCODE 5:2004	76
Tabela 21 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011)	76
Tabela 22 – Valores de resistência ao embutimento paralela às fibras calculados pelas equações propostas	82
Tabela 23 – Relação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Sawata e Yasumura (2002)	84
Tabela 24 – Incidência dos modos de falha para ensaios na direção paralela às fibras . . .	90
Tabela 25 – Incidência dos modos de falha para ensaios na direção perpendicular às fibras	91

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
AS	Standards Australia
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWC	American Wood Council
BS	British Standard
CEN	Comité Européen de Normalisation
CP	Corpo de prova
CV	Coefficiente de variação
EN	European Standard
EUROCODE	Comissão Europeia de Normas Técnicas
EYM	European Yield Model
ISO	International Organization for Standardization
LVL	Laminated Venner Lumber
MLC	Madeira Laminada Colada
NBR	Norma Brasileira Registrada
NDS	National Design Specification for Wood Construction
NZS	Standards New Zealand

Lista de símbolos

F_{5mm}	Força que causa deslocamento relativo de 5 mm
F_e	Força de embutimento
F_{e0}	Força de embutimento paralela às fibras
F_{e90}	Força de embutimento perpendicular às fibras
$F_{e2\%}$	Força que causa deslocamento residual de 2‰
$F_{e5\%}$	Força que causa deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino
$F_{máx}$	Força máxima resistida
$F_{máx,est}$	Força máxima estimada
G	Densidade relativa
U	Teor de umidade
V_i	Volume inicial
V_s	Volume seco
d	Diâmetro do pino metálico
f_{12}	Resistência a 12% de umidade
f_U	Resistência a $U\%$ de umidade
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
f_e	Resistência ao embutimento
f_{e0}	Resistência ao embutimento paralela às fibras
$f_{e0,12}$	Resistência ao embutimento paralela às fibras a 12% de umidade
$f_{e0,U}$	Resistência ao embutimento paralela às fibras a $U\%$ de umidade
f_{e90}	Resistência ao embutimento perpendicular às fibras
$f_{e,k}$	Resistência ao embutimento característica

$f_{e0,k}$	Resistência ao embutimento paralela às fibras característica
k_{90}	Fator baseado na classificação da madeira
m_i	Massa inicial
m_s	Massa seca
t	Espessura da peça de madeira
α	Ângulo de aplicação de força em relação às fibras da madeira
α_e	Coefficiente em função do diâmetro do pino metálico
ε	Deformação específica
ρ	Densidade aparente
$\rho_{\text{água}}$	Densidade da água
ρ_k	Densidade aparente característica
ρ_m	Densidade aparente média

Sumário

1	Introdução	17
2	Objetivos	18
2.1	<i>Objetivo Geral</i>	18
2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	18
3	Justificativa	19
4	Revisão Bibliográfica	20
4.1	<i>Ligações em estruturas de madeira</i>	20
4.2	<i>Embutimento da madeira</i>	20
4.3	<i>Fatores que influenciam a resistência ao embutimento da madeira</i>	21
4.3.1	Teor de umidade	22
4.3.2	Características do pino metálico	24
4.3.3	Densidade	26
4.3.4	Direção das fibras em relação à força aplicada	27
4.4	<i>Relação entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão da madeira</i>	27
4.5	<i>Ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento</i>	29
4.5.1	ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira	29
4.5.2	BS EN 383:2007 - <i>Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners</i>	31
4.5.3	ASTM D5764:2013 - <i>Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products</i>	35
4.5.4	Comparação entre os métodos de ensaios	40
4.5.5	Modos de ruptura no embutimento	42
4.5.6	Resultados típicos de ensaios de embutimento de acordo com o BS EN 383:2007	43
4.6	<i>Valor de resistência estimada</i>	44
4.6.1	ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira	45

4.6.2	CEN EUROCODE 5: <i>Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings</i>	45
4.6.3	ANSI/AWC NDS:2015 - <i>National Design Specification for Wood Construction</i>	46
4.6.4	Outros documentos normativos	48
4.7	<i>Conclusões da revisão bibliográfica</i>	48
5	Materiais e Métodos	50
5.1	<i>Materiais</i>	50
5.1.1	Madeiras	50
5.1.2	Pinos metálicos	51
5.2	<i>Ensaio</i>	52
5.2.1	Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras	52
5.2.2	Ensaio de densidade aparente, densidade relativa e teor de umidade	53
5.2.3	Ensaio de resistência ao embutimento	54
5.3	<i>Estimativa teórica dos valores de resistência ao embutimento</i>	58
6	Resultados	60
6.1	<i>Ensaio de caracterização das espécies de madeira</i>	60
6.2	<i>Valores de resistência ao embutimento estimados</i>	61
6.3	<i>Ensaio de resistência ao embutimento</i>	62
7	Discussões	65
7.1	<i>Comparação entre os valores de resistência ao embutimento obtidos e estimados</i>	65
7.2	<i>Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e densidade aparente</i>	77
7.3	<i>Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e diâmetro do pino metálico</i>	78
7.4	<i>Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e resistência à compressão paralela às fibras</i>	80
7.5	<i>Análise dos modos de falha dos ensaios de embutimento</i>	84
7.5.1	Descrição dos modos de falha obtidos nos ensaios	84

7.5.2	Análise da incidência dos modos de falha obtidos nos ensaios de embutimento	90
8	Conclusões	97
	Referências	99

1 Introdução

A madeira é um elemento estrutural cujo desempenho e durabilidade dependem diretamente de suas propriedades físicas e mecânicas.

Nas estruturas de madeira, as ligações são componentes de elevada importância, pois conferem continuidade aos membros cujas dimensões são limitadas pelo comprimento da árvore ou pelo meio de transporte disponível. As ligações devem ser adequadamente dimensionadas com o propósito de oferecer resistência, estabilidade, durabilidade e segurança ao sistema.

Para conectar as peças de madeira, são utilizados diversos dispositivos, como os pinos metálicos, as cavilhas, as chapas com dentes estampados, os anéis metálicos, entre outros.

As ligações com pinos metálicos, que são as mais utilizadas em razão de seu baixo custo e fácil aplicação, podem ser efetuadas por meio de pregos, parafusos sextavados com porcas e arruelas, parafusos auto atarraxantes ou barras de aço liso.

A capacidade resistente das ligações com pinos metálicos é influenciada por diversos fatores, como a geometria da ligação, o diâmetro do pino, a conformação superficial de sua haste e a resistência ao escoamento do aço usado na sua fabricação. Ademais, a direção de aplicação da força em relação às fibras, o teor de umidade, a densidade e a resistência da madeira ao embutimento também possuem grande influência sobre a resistência das ligações.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em seu documento normativo ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, fornece metodologias de ensaio e de cálculo para a determinação da resistência da madeira ao embutimento que diferem das metodologias presentes em documentos normativos de outros países com tradição no uso da madeira como elemento estrutural. Enquanto a norma brasileira estima a resistência ao embutimento com base na resistência à compressão paralela às fibras, diversos documentos normativos usam outros parâmetros, como a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico utilizado.

Portanto, é necessária a avaliação experimental da resistência da madeira ao embutimento e a comparação dos valores obtidos com os modelos de estimativa presentes em outros documentos normativos com o propósito de determinar o modelo de cálculo mais adequado, que poderá ser incorporado à ABNT NBR 7190:1997 em futuras revisões.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente a resistência ao embutimento de espécies de madeiras brasileiras e compará-la com os valores de resistência ao embutimento obtidos por métodos analíticos presentes nas normas ABNT NBR 7190:1997, CEN EUROCODE 5:2004 – *Design of Timber Structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings* e ANSI/AWC NDS:2015 – *National Design Specification for Wood Construction*.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar experimentalmente a resistência ao embutimento de seis espécies de madeiras de acordo com o documento normativo BS EN 383:2007 – *Timber Structures – Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*;
- Comparar os valores experimentais com os analíticos obtidos por meio dos modelos de cálculo presentes em normas nacionais e internacionais;
- Avaliar possíveis correlações entre a resistência ao embutimento e o diâmetro do pino metálico;
- Avaliar possíveis correlações entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão paralela às fibras da madeira;
- Avaliar possíveis correlações entre a resistência ao embutimento e a densidade aparente da madeira;
- Avaliar os modos de falha predominantes para cada espécie de madeira e diâmetro de pino metálico.

3 Justificativa

A resistência ao embutimento é um dos fatores mais importantes na determinação da resistência das ligações em madeira por pinos metálicos. Quanto mais próximo do real for seu valor, maior a segurança e economia no dimensionamento das conexões dos sistemas estruturais.

Os documentos normativos brasileiro, americano e europeu apresentam modelos de cálculo de resistência ao embutimento e métodos de ensaio para determinação experimental diferentes entre si. Portanto, é pertinente avaliar qual procedimento gera valores de resistência mais próximos dos reais. Além disso, é igualmente apropriado verificar se as diversas metodologias fornecem valores de resistência distintos.

A ABNT NBR 7190:1997 fornece um método analítico simplificado para determinação da resistência ao embutimento, que se baseia na resistência à compressão paralela às fibras. As metodologias presentes em documentos normativos internacionais amplamente utilizados levam em consideração outros parâmetros, como o diâmetro do pino metálico e a densidade aparente característica, que podem ser responsáveis por melhor caracterizar a resistência de acordo com os materiais utilizados na ligação.

Portanto, é de elevada importância a realização de um estudo comparativo entre os valores de resistência obtidos por modelos analíticos presentes em documentos normativos nacionais e internacionais e os valores experimentais provenientes de ensaios normatizados para que se possa avaliar a adequação do modelo de cálculo de resistência ao embutimento presente na norma brasileira.

Atualmente, a ABNT NBR 7190:1997 encontra-se em processo de revisão que poderá alterar o modelo de cálculo de resistência ao embutimento da madeira. Por isso, é necessário a realização de estudos comparativos que possam servir de subsídio para as possíveis modificações.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 Ligações em estruturas de madeira

Nas estruturas de madeira, as ligações são necessárias para a confecção de elementos com diversas peças, como as treliças, ou quando há dificuldade na obtenção de componentes com comprimento elevado (CALIL; LARH; DIAS, 2003). É de fundamental importância um bom detalhamento das ligações, que deve considerar as possíveis variações nos teores de umidade da madeira, o fácil acesso para manutenção e a transmissão eficiente das forças (DUARTE, 2004).

As conexões entre elementos estruturais de madeira podem ser subdivididas em três grandes grupos: ligações por contato, ligações coladas e ligações mecânicas. Além disso, é possível efetuar uma combinação entre os tipos de ligação (OLIVEIRA, 2001).

As ligações mecânicas, nas quais ocorre a penetração do conector nas peças de madeira, subdividem-se em dois grupos de acordo com o modo de transmissão das forças entre os membros da ligação. No primeiro, *metal dowel type fasteners*, a transferência de carregamento ocorre pela ação do elemento metálico de ligação (pregos, parafusos, pinos metálicos e grampos). No segundo, *bearing-type connectors*, o carregamento é transferido principalmente pela superfície próxima ao conector (chapas com dentes estampados e anéis metálicos) (BLASS, 1995).

O modelo de cálculo europeu (EYM), que é o método de cálculo no qual a ABNT NBR 7190:1997 se baseia, é um método analítico usado para prever a capacidade resistente de ligações com duas ou três peças de madeira conectadas por pinos metálicos (ligação mecânica). A teoria desenvolvida por Johansen (1949), que serviu de base para a formulação do EYM, é baseada nas equações de equilíbrio do diagrama de corpo livre de um parafuso passante em um membro de madeira. O modelo idealizado por Johansen (1949) é ligeiramente conservador, pois não considera o atrito nas ligações (SOLTIS; HUBBARD; WILKINSON, 1986). No entanto, o modelo de cálculo presente no CEN EUROCODE 5:2004 leva em consideração o efeito do atrito nas conexões.

4.2 Embutimento da madeira

Conforme demonstrado por Johansen (1949), a resistência ao embutimento da madeira e o momento resistente do pino metálico à flexão governam as propriedades que determinam a resistência das ligações de madeira com pinos metálicos.

Segundo Stamato e Calil (2002), “a determinação da contribuição de cada um destes fatores é complexa, sendo necessária a separação destes dois fenômenos, buscando-se entender o processo de flexão do pino e o de embutimento na madeira independentemente”.

O embutimento pode ser descrito como o fenômeno de deformação localizada na região de contato do pino metálico com a madeira, devido às tensões localizadas causadas pela transmissão de força entre o pino e a madeira. Por causa da natureza celular complexa da madeira e de seus produtos derivados, a resistência ao embutimento depende não apenas das características da madeira, mas também de outros fatores, como o tipo de pino metálico utilizado na ligação bem como a forma de instalação do mesmo (PORTEOUS; KERMANI, 2007) (EHLBECK; WERNER, 1992).

Rammer e Winistorfer (2001) definem a resistência ao embutimento (f_e) como uma propriedade da madeira de resistir a uma compressão localizada em torno do pino quando submetido à aplicação de uma força perpendicular ao seu eixo.

Segundo Almeida (1987), a pressão que o pino metálico aplica gera um estado múltiplo de tensões na região ao redor do furo, que tende a embutir o pino na madeira.

A resistência ao embutimento pode ser determinada de duas maneiras: por meio de ensaio de embutimento do pino na madeira, conforme apresentado na seção 4.5, e por meio de equações empíricas obtidas a partir de análises experimentais, que são apresentadas na seção 4.6.

4.3 Fatores que influenciam a resistência ao embutimento da madeira

A resistência ao embutimento de uma ligação mecânica com pinos é influenciada por vários fatores, como a densidade e o teor de umidade da madeira, o diâmetro do pino e a superfície de sua haste, a direção das fibras da madeira em relação à força aplicada e a metodologia utilizada no ensaio para obtenção da resistência.

Xu et al. (2013) concluíram que avaliar experimentalmente cada um dos fatores que influenciam a resistência ao embutimento seria impraticável. Por isso, os autores desenvolveram uma modelagem tridimensional por meio do método dos elementos finitos para prever a resistência ao embutimento da madeira laminada colada (MLC) em ligações com pinos metálicos. Para validar o modelo, ensaios de acordo com a norma ASTM D5764:2002 foram realizados.

Nas seções abaixo, apresenta-se os fatores que mais influenciam a resistência ao embutimento da madeira.

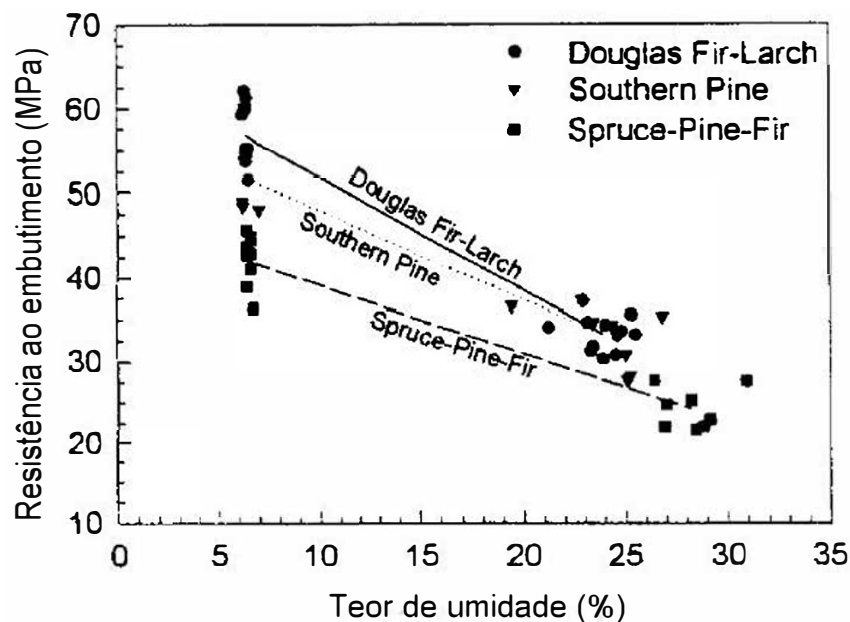
4.3.1 Teor de umidade

A umidade tem grande efeito sobre as propriedades das madeiras. De acordo com Pfeil e Pfeil (2012), “com o aumento da umidade, a resistência diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras; acima desse ponto, a resistência mantém-se constante”.

O modelo de cálculo para resistência ao embutimento apresentado no documento normativo ANSI/AWC NDS:2015 foi formulado com base nos experimentos realizados por Wilkinson (1991). No entanto, a pesquisa de Wilkinson (1991) aborda a influência da densidade relativa, do diâmetro do pino metálico e da direção de aplicação da força, mas não do teor de umidade.

Rammer e Winistorfer (2001) aplicaram as equações propostas por Wilkinson (1991) e estudaram a correlação entre o teor de umidade da madeira e sua respectiva resistência ao embutimento. Ensaios foram realizados com três espécies de coníferas sob diversos teores de umidade (4, 6, 12, 19% e fibras saturadas). Notou-se que a resistência ao embutimento aumentou com a diminuição do teor de umidade (figura 1). Além disso, constatou-se que a correlação entre a resistência e a umidade independe da espécie da madeira e do diâmetro do conector.

Figura 1 – Gráfico de resistência ao embutimento por teor de umidade para três espécies de madeira



Fonte: Adaptada de Rammer e Winistorfer (2001).

Winistorfer (1994) também identificou significativa influência do teor de umidade na resistência ao embutimento de coníferas em ligações pregadas. Para duas espécies (*Southern*

Pine e Spruce-Pine-Fir), a resistência foi ao menos 50% maior para o teor de umidade de 6% em relação a um teor de umidade de 24%.

Vários autores pesquisaram e encontraram equações para relacionar a resistência ao embutimento e o teor de umidade da madeira dentro de certos intervalos de validade. Fahlbusch (1949) ensaiou três espécies com um parafuso passantes de 12 mm e determinou a equação 1, que é válida para teores de umidade entre 5 e 30%, para relacionar a resistência ao embutimento paralela às fibras com a umidade.

$$f_{e0,U} = \frac{26f_{e0,12}}{U + 14} \quad (1)$$

Na equação 1, $f_{e0,U}$ e $f_{e0,12}$ são as resistências ao embutimento paralelas às fibras com teores de umidade iguais a U e 12%, respectivamente, ambas em N/mm^2 . O teor de umidade (U) é dado em porcentagem.

Koponen (1991), para avaliar a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da espécie *Finnish spruce*, utilizou parafusos passantes com diâmetros entre 12 e 20 mm. O teor de umidade variou entre 9% e a saturação das fibras. O autor encontrou a equação 2 para U menor que 22,5% e a equação 3 para U maior que 22,5%, com $f_{e0,U}$ em N/mm^2 e U em porcentagem.

$$f_{e0,U} = 46,7 - 1,35U \quad (2)$$

$$f_{e0,U} = 16,5 \quad (3)$$

Rammer e Winistorfer (2001), a partir dos ensaios já citados, encontraram as equações 4, para U menor que 25,3%, e 5, para U maior que 25,3%, para determinar a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras de acordo com o teor de umidade da espécie *Clear Southern Pine*, com $f_{e0,U}$ em N/mm^2 e U em porcentagem.

$$f_{e0,U} = 49,59 - 1,186U \quad (4)$$

$$f_{e0,U} = 20 \quad (5)$$

De acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997, os valores de resistência f_U obtidos de ensaios com corpos de prova cujos teores de umidade (U) estão situados entre 10 e 20% podem ser corrigidos para o teor de umidade padrão de 12% (f_{12}) com o uso da equação 6, em que U é

expresso em percentual. Para isso, admite-se que haja 3% de variação de resistência para 1% de variação de umidade (PFEIL; PFEIL, 2012).

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3}{100}(U - 12) \right] \quad (6)$$

É importante ressaltar que a equação proposta pela ABNT NBR 7190:1997 (6) é válida para qualquer tipo de resistência, e não somente para a resistência ao embutimento.

4.3.2 Características do pino metálico

Os ensaios elaborados por Wilkinson (1991) serviram de base para a formulação das equações de resistência ao embutimento presentes no documento normativo americano. O autor separou seus ensaios em dois grandes grupos (parafusos passantes com porcas e arruelas e pregos). Para avaliar a influência do diâmetro dos parafusos passantes, ensaiou 240 corpos de prova da espécie *Southern Pine*, nas direções paralela e perpendicular às fibras, usando diâmetros de 6 a 38 *mm* e pré-furação de 1,6 *mm* a mais que o diâmetro do parafuso. Para avaliar o efeito do diâmetro dos pregos, ensaiou 139 corpos de prova da espécie *Douglas Fir*, nas direções paralela e perpendicular às fibras, com diâmetros de 3,8, 4,1 e 5,7 *mm*. As conclusões do autor foram as seguintes:

- A resistência ao embutimento para parafusos carregados paralelamente às fibras depende apenas da densidade relativa (G) da madeira seca;
- A resistência ao embutimento para parafusos carregados perpendicularmente às fibras depende da densidade relativa (G) da madeira seca e do diâmetro (d) do conector;
- A resistência ao embutimento para pregos depende da densidade relativa (G) da madeira seca e independe da direção do carregamento e do diâmetro (d) do conector.

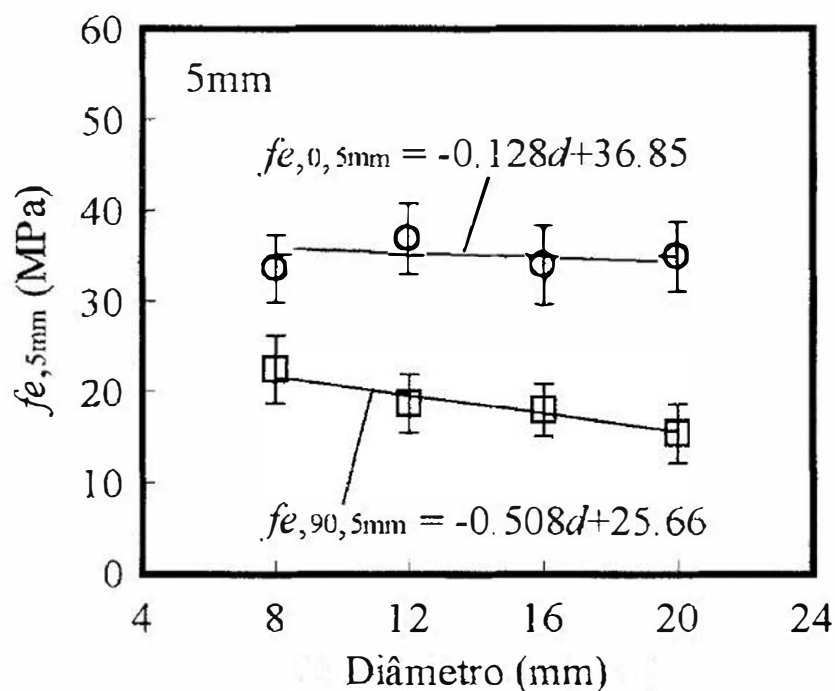
Além disso, para Wilkinson (1991), as equações propostas para parafusos passantes e pregos são distintas porque a superfície de contato entre o parafuso e a madeira é suave, enquanto que a superfície entre o prego e a madeira torna-se irregular após a cravação.

Após realização de diversos ensaios com espécies de coníferas e folhosas, Ehlbeck e Werner (1992) e Smith, Whale e Larsen (1987), pesquisadores cujos estudos serviram de base para a formulação da norma europeia, concluíram que a resistência ao embutimento depende significativamente do diâmetro do pino metálico para ambas as direções paralela e perpendicular às fibras. Ainda de acordo com os autores, quanto maior o diâmetro, menor a resistência ao

embutimento. Deve-se, no entanto, levar em consideração outros parâmetros, como a existência ou não de pré-furação, a densidade da madeira, as irregularidades na superfície do conector e a direção de aplicação da força em relação às fibras da madeira.

Sawata e Yasumura (2002) também concluíram que, para espécies de coníferas utilizadas amplamente no Japão, a resistência ao embutimento, tanto na direção paralela quanto perpendicular às fibras, avaliada pelo método europeu (BS EN 383:2007), diminui com o aumento do diâmetro do pino metálico (figura 2).

Figura 2 – Gráfico de resistência ao embutimento por diâmetro do pino metálico



Fonte: Adaptada de Sawata e Yasumura (2002).

Koponen (1991), ao realizar ensaios de embutimento com orifícios de até 2 mm a mais que o diâmetro do conector, concluiu que a pré-furação não influencia no valor da resistência ao embutimento de ligações com parafusos passantes com porcas e arruelas. Smith, Whale e Larsen (1987), a partir de seus ensaios, notaram que as diferenças na resistência ao embutimento de ligações pregadas em coníferas e folhosas ocorriam por causa da existência ou não de pré-furação, e não por causa das diferentes características das espécies.

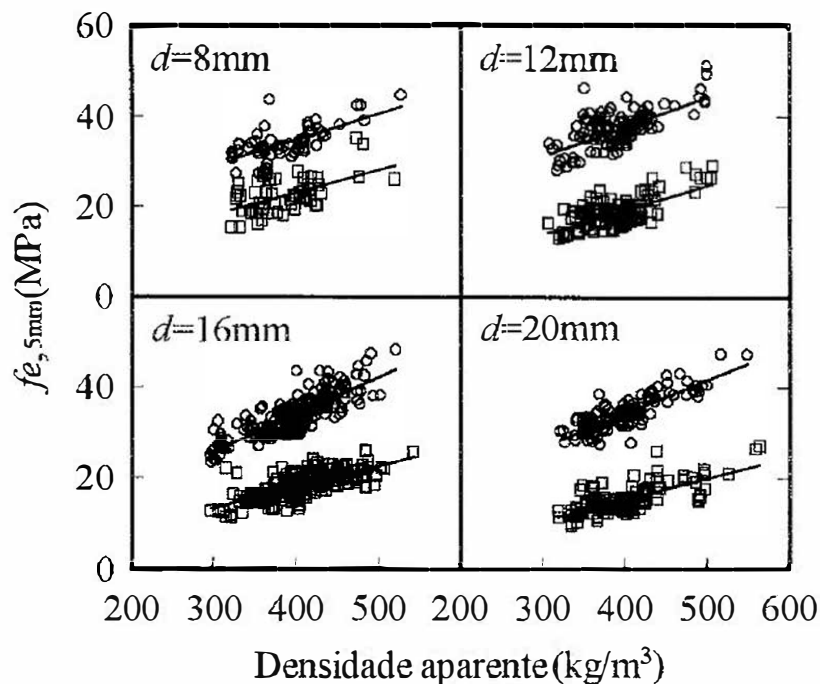
4.3.3 Densidade

Segundo o Wood Handbook (2010), quanto maior a densidade da madeira, maior sua resistência ao embutimento. No entanto, as espécies menos densas são, de forma geral, mais resistentes à fissuração e, por isso, permitem a cravação de um maior número de pinos ou a utilização de pinos metálicos com diâmetros maiores sem a necessidade de pré-furação.

De acordo com Ehlbeck e Werner (1992), pode-se assumir que, independentemente da espécie da madeira, a resistência ao embutimento cresce linearmente com o aumento da densidade. Ademais, segundo os autores, a resistência é aproximadamente 10% maior para folhosas do que para coníferas com a mesma densidade.

Sawata e Yasumura (2002) realizaram ensaios de embutimento de acordo com o documento normativo BS EN 383:2007 com duas espécies de coníferas japonesas, duas direções e quatro diâmetros de pino metálico (8, 12, 16 e 20 mm). Também concluíram que a resistência ao embutimento possui correlação com a densidade da madeira, independentemente do diâmetro do pino e ângulo em relação às fibras (figura 3).

Figura 3 – Gráfico de resistência ao embutimento por densidade aparente para duas espécies de madeira



Fonte: Adaptada de Sawata e Yasumura (2002).

4.3.4 Direção das fibras em relação à força aplicada

De acordo com Smith e Whale (1985), apesar da espessura da madeira e as propriedades dos materiais que compõem os pinos metálicos também influenciarem, a direção da aplicação do carregamento em relação às fibras impacta significativamente nos valores de rigidez e resistência ao embutimento.

Ehlbeck e Werner (1992) notaram que, de forma análoga à madeira submetida à compressão, a resistência ao embutimento decresce conforme o aumento do ângulo de aplicação da força em relação às fibras. Além disso, esse efeito é mais significativo para conectores com maior diâmetro.

4.4 Relação entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão da madeira

Segundo Duarte (2004), “como a resistência ao embutimento é uma medida da resistência da madeira a uma compressão localizada, é de se esperar que a relação entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão da madeira tenha boa correlação”.

Diversos autores realizaram ensaios e encontraram equações, que são válidas para certos intervalos, para relacionar a resistência ao embutimento paralela às fibras com a resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Trayer (1932), a partir de seus ensaios com coníferas, encontrou a equação 7, que é válida para parafusos passantes cuja relação entre o comprimento e o diâmetro seja menor que 2 e para teores de umidade entre 10 e 14%, com ambas as resistências em N/mm^2 .

$$f_{e0} = 0,64f_{c0} \quad (7)$$

Kuipers e Vermeyden (1965) encontraram a equação 8 (f_{e0} e f_{c0} em N/mm^2) após ensaios com madeira europeia de baixa densidade, com teor de umidade igual a 12% e pregos com diâmetro de 6,7 mm.

$$f_{e0} = 0,6f_{c0} + 6 \quad (8)$$

Larsen e Sorensen (1973) ensaiaram duas espécies de coníferas e determinaram a equação 9 para pregos e parafusos passantes com diâmetros maiores que 6,1 mm.

$$f_{e0} = 0,7f_{c0} \quad (9)$$

Rammer e Winistorfer (2001), por meio do estudo especificado na seção 4.3.1, encontraram a equação 10, com ambas as resistências em N/mm^2 .

$$f_{e0} = 0,438f_{c0} + 11,897 \quad (10)$$

De acordo com Rammer e Winistorfer (2001), a equação proposta por eles é a mais abrangente, pois foi obtida a partir de um maior número de ensaios.

Sawata e Yasumura (2002) realizaram ensaios de embutimento com espécies de coníferas japonesas, em duas direções e com quatro diâmetros de pinos metálicos (8, 12, 16 e 20 mm) e concluíram que a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras era igual a 90% do valor de resistência à compressão paralela às fibras, conforme equação 11, com f_{e0} e f_{c0} em MPa.

$$f_{e0} = 0,9f_{c0} \quad (11)$$

Seus ensaios também indicaram que a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras era igual a 400% do valor da resistência à compressão na direção perpendicular às fibras. Ademais, Sawata e Yasumura (2002) notaram que, quando a resistência na direção perpendicular às fibras foi avaliada pelo método do deslocamento de 5 mm presente na norma europeia (seção 4.5.2), a proporção entre os valores de resistências ao embutimento e à compressão na direção perpendicular às fibras diminuía conforme aumentava o diâmetro do conector. A equação empírica 12, encontrada pelos autores, relaciona a resistência ao embutimento perpendicular às fibras (f_{e90}) com a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), ambas em MPa, e o diâmetro do pino metálico, em mm .

$$f_{e90} = (-0,016d + 0,745)f_{c0} \quad (12)$$

Para a equação 11 e 12, a resistência à compressão paralela às fibras pode ser determinada pela equação 13, encontrada pelos autores, que depende da densidade aparente (ρ), em kg/m^3 .

$$f_{c0} = 0,0973\rho \quad (13)$$

A ABNT NBR 7190:1997 também fornece equações para o cálculo da resistência ao embutimento com base na resistência à compressão paralela às fibras (seção 4.6.1). Duarte (2004), com base nos resultados dos trabalhos de Rammer e Winistorfer (2001), afirma que a relação entre a resistência ao embutimento e a resistência à compressão da madeira apresentada no documento normativo brasileiro é mais precisa para teores de umidade acima de 19%.

Almeida e Dias (2016) avaliaram a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras para seis espécies de madeiras brasileiras usando o método de ensaio da ABNT NBR 7190:1997 e compararam os resultados experimentais com os valores obtidos pelo método analítico do mesmo documento normativo, que iguala a resistência ao embutimento (f_{e0}) à resistência à compressão (f_{c0}). A comparação indicou que a metodologia de realização do ensaio influencia no valor de resistência ao embutimento obtido.

4.5 Ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento

Os ensaios de resistência ao embutimento devem ser realizados com uma dupla seção de corte simétrica, com membros laterais de aço rígido e a peça de madeira como membro central. Tal disposição deve ser adotada para que o conector haja como um corpo rígido submetido a um deslocamento na direção do carregamento. Além disso, a espessura da peça de madeira deve possuir um limite apropriado para que a flexão do pino possa ser desprezada. A espessura da peça de madeira igual a duas vezes o diâmetro do pino ($2d$) mostrou-se satisfatória (SMITH; WHALE, 1989).

Nas seções abaixo, apresenta-se os métodos de ensaio dos principais documentos normativos para a determinação da resistência ao embutimento da madeira.

4.5.1 ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira

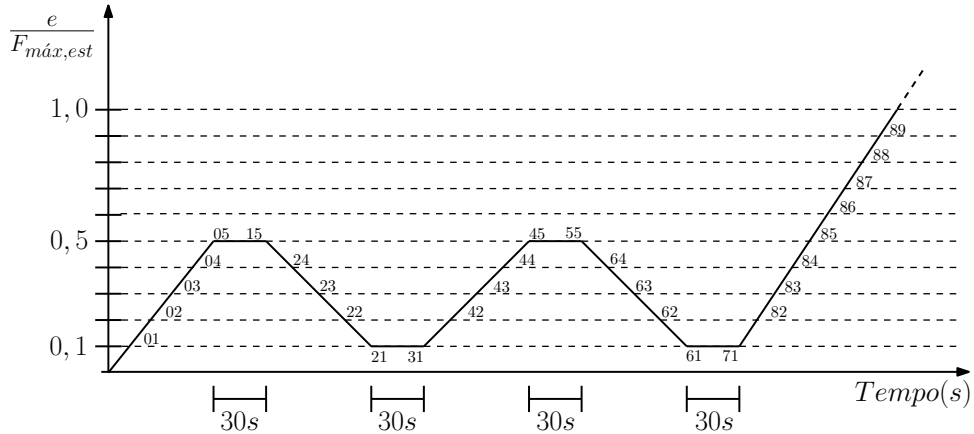
A ABNT define em seu documento normativo NBR 7190:1997 a resistência de embutimento (f_e) como a razão entre a força F_e que causa a deformação específica residual de 2‰ e a área de embutimento do pino metálico, que é dada pelo produto entre o diâmetro do pino (d) e a espessura da peça de madeira (t) que compõe o corpo de prova, de acordo com a equação 14.

$$f_e = \frac{F_{e2\%0}}{td} \quad (14)$$

Antes do início do ensaio, deve-se estimar a resistência ($F_{máx,est}$) por meio de ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionado da amostra a ser investigada. Em seguida, aplica-se três ciclos de carga e descarga até 50% da carga de ruptura estimada, de acordo com o anexo B da ABNT NBR 7190:1997 (figura 4). Para a determinação da deformação específica, devem ser feitas medidas do deslocamento relativo entre o pino e a extremidade do corpo de

prova em duas faces opostas com o uso de transdutores de deslocamentos. A norma brasileira também recomenda que se aplique uma taxa de carregamento igual a 10 MPa/min.

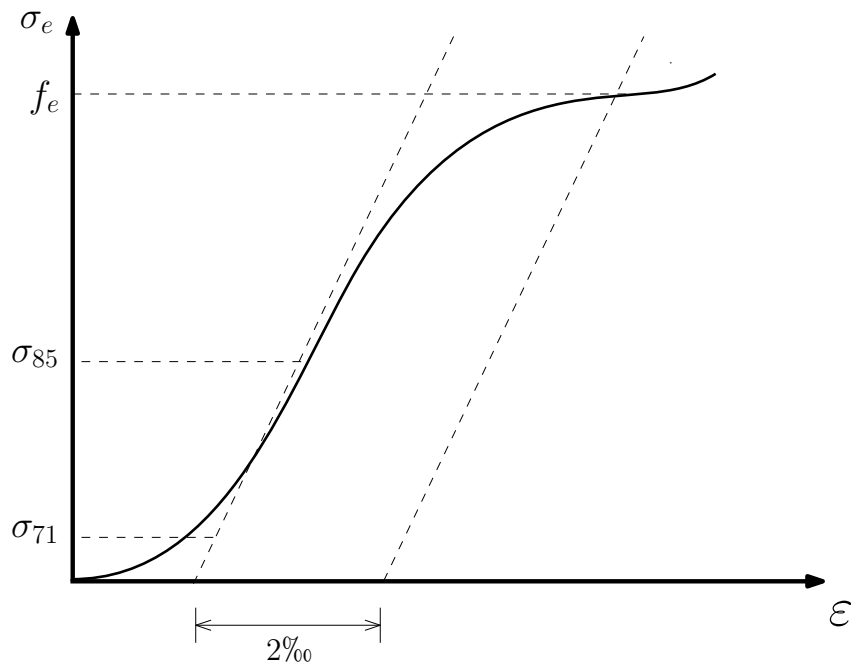
Figura 4 – Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

A figura 5 indica o método para a obtenção da resistência ao embutimento por meio do diagrama tensão por deformação específica de embutimento, que é gerado após os ciclos de carregamento.

Figura 5 – Diagrama tensão por deformação específica de embutimento

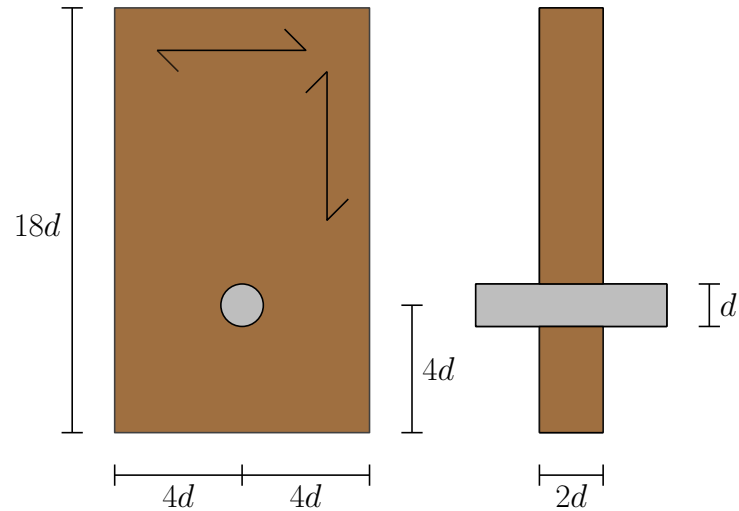


Fonte: Adaptada da ABNT NBR 7190:1997.

O corpo de prova para a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras deve possuir forma prismática, de seção retangular, com $8d$ de largura, $2d$ de espessura e $18d$ de comprimento ao longo das fibras. Para a resistência na direção perpendicular às fibras, o CP

deve ter as mesmas dimensões, tomando-se o eixo maior na direção perpendicular às fibras da madeira, conforme figura 6.

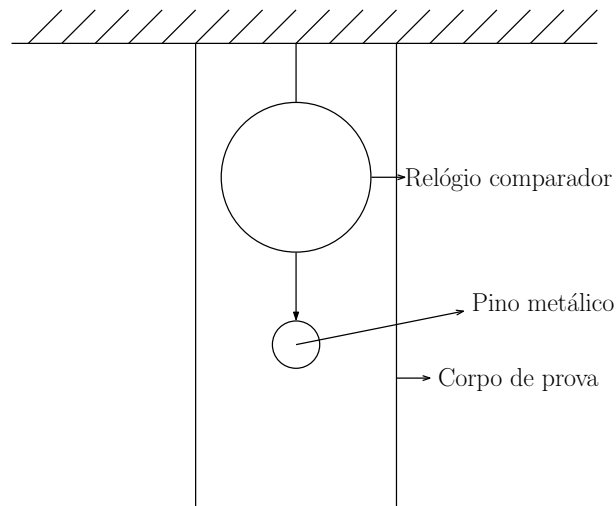
Figura 6 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras de acordo com a ABNT NBR 7190:1997



Fonte: Adaptada da norma ABNT NBR 7190:2007.

A norma brasileira indica uma configuração de aparato para realização de ensaio de embutimento, que é apresentada na figura 7.

Figura 7 – Configuração de ensaio recomendada pela norma ABNT NBR 7190:1997



Fonte: Adaptada de ABNT NBR 7190:1997.

4.5.2 BS EN 383:2007 - Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners

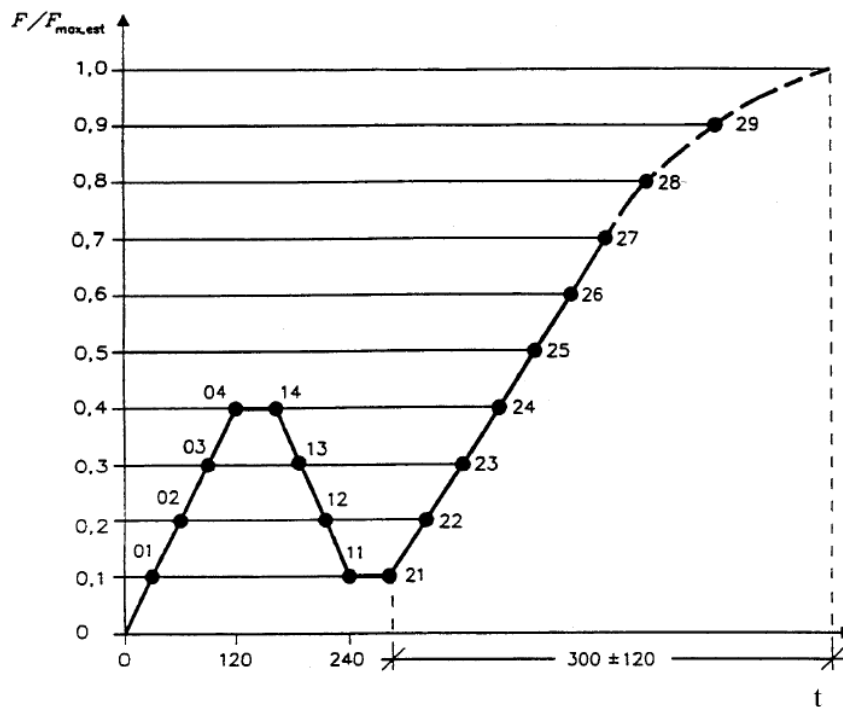
O documento normativo europeu BS EN 383:2007 define a resistência ao embutimento (f_e) como a força que causa deslocamento relativo de 5 mm entre o corpo de prova e o pino

metálico (F_{5mm}) ou a máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{máx}$) dividida pelo produto entre a espessura (t) da peça de madeira e o diâmetro (d) do pino metálico, conforme equação 15.

$$f_e = \frac{F_{5mm} \text{ ou } F_{máx}}{td} \quad (15)$$

Antes do início do ensaio, deve-se estimar a máxima força ($F_{máx,est}$) resistida por meio de ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionado da amostra a ser investigada. Após a estimativa, deve ser aplicado um carregamento até $0,4 F_{máx,est}$ e mantido por 30 segundos. Após isso, o carregamento deve ser reduzido para $0,1 F_{máx,est}$ e mantido por 30 segundos. Por fim, deve-se carregar até que se atinja a ruptura ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a peça de madeira (figura 8). A norma indica que a força máxima deve ser atingida em $300 \pm 120 \text{ s}$.

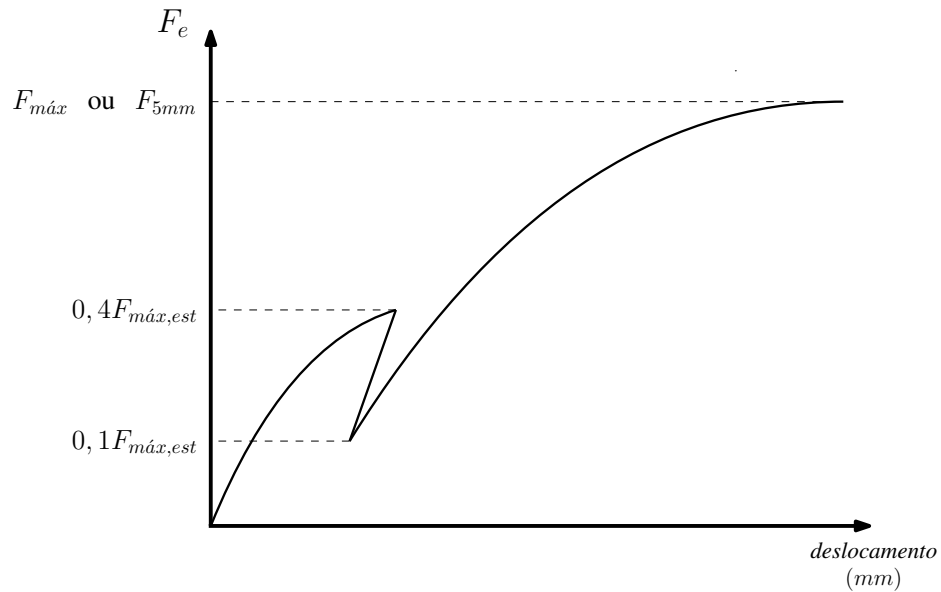
Figura 8 – Procedimento de carregamento para ensaio de embutimento



Fonte: BS EN 383:2007.

A figura 9 apresenta o gráfico força (F_e) por deslocamento (mm) obtido no ensaio, do qual se obtém a resistência ao embutimento.

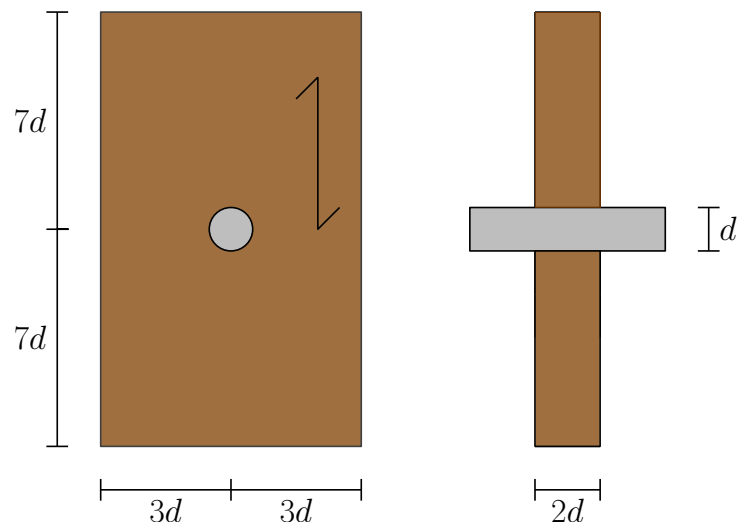
Figura 9 – Diagrama de força de embutimento (F_e) por deslocamento (mm)



Fonte: Adaptada da norma BS EN 383:2007.

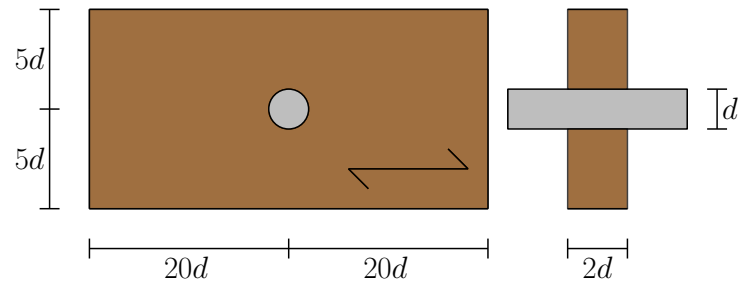
As dimensões dos corpos de prova para ensaio de resistência ao embutimento para parafusos passantes com porcas e arruelas nas direções paralela e perpendicular às fibras, de acordo com o BS EN 383:2007, são apresentadas nas figuras 10 e 11, respectivamente. Na direção paralela às fibras, a espessura deve ser igual a $2d$, a largura igual a $6d$ e o comprimento igual a $14d$. Na direção perpendicular às fibras, a espessura deve ser igual a $2d$, a largura igual a $10d$ e o comprimento igual a $40d$.

Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras de acordo com o BS EN 383:2007



Fonte: Adaptada da norma BS EN 383:2007.

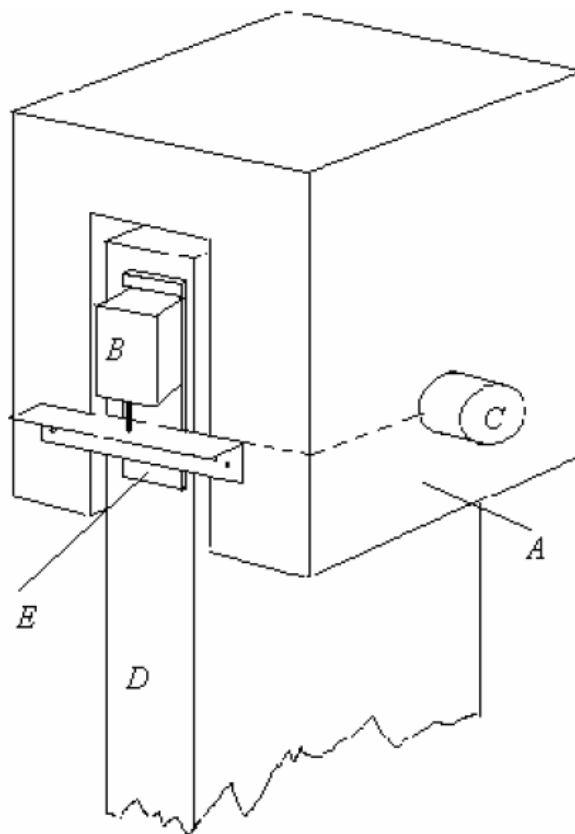
Figura 11 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras de acordo com o BS EN 383:2007



Fonte: Adptada da norma BS EN 383:2007.

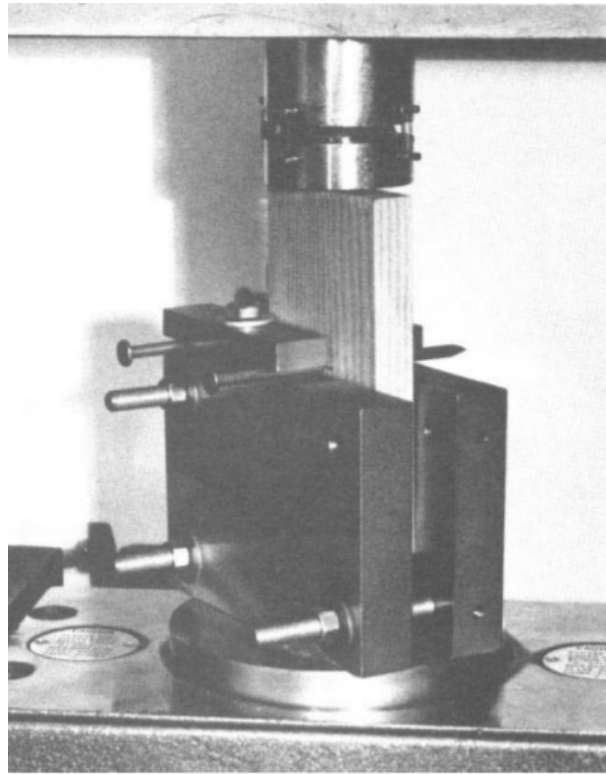
O aparato de ensaio recomendado pelo documento normativo BS EN 383:2007 é indicado na figura 12. A figura 13 mostra um ensaio real de embutimento.

Figura 12 – Aparato de ensaio recomendado pela norma BS EN 383:2007. (A) aparato de aço, (B) medidor de deslocamento, (C) pino metálico e (D) tira de aço.



Fonte: BS EN 383:2007.

Figura 13 – Ensaio real de embutimento de acordo com o BS EN 383:2017



Fonte: Aune e Patton-Mallory (1986).

4.5.3 ASTM D5764:2013 - *Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products*

O documento normativo ASTM D5764:2013 indica dois possíveis métodos de ensaio para a determinação da resistência ao embutimento. O primeiro método, chamado *half hole*, é indicado para qualquer tipo de madeira, enquanto o segundo, *full hole*, é permitido para espécies de madeira em que haja a possibilidade de ocorrência de fendilhamento antes do término do ensaio.

No método *half hole*, a carga é aplicada ao longo de todo o pino, que é posicionado em um semicírculo entalhado na madeira. No método *full hole*, a carga é aplicada nas extremidades do pino, que atravessa a seção transversal do corpo de prova. Caso haja ocorrência de flexão do pino durante o ensaio, deve-se considerar o uso do primeiro método.

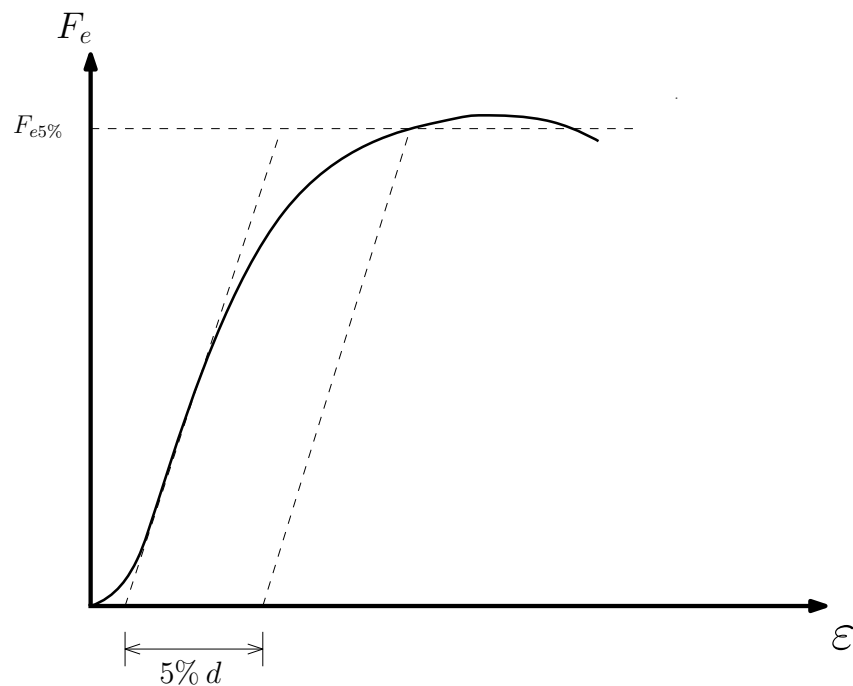
Em ambas as configurações de ensaio, a resistência ao embutimento (f_e) é dada pela razão entre a força que causa um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino metálico

($F_{e5\%}$) e o produto da espessura da peça de madeira (t) pelo diâmetro do pino (d), conforme a equação 16.

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{td} \quad (16)$$

A norma também recomenda que se aplique uma taxa de carregamento com a qual se atinja a carga máxima entre 1 e 10 minutos de ensaio. Normalmente, usa-se uma taxa de 1,0 mm/min . A figura 14 ilustra o modo de obtenção da resistência ao embutimento por meio do gráfico força de embutimento (F_e) por deformação (ε).

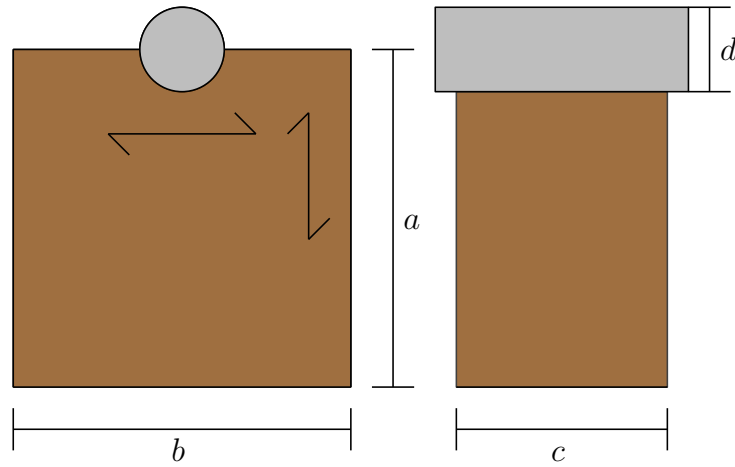
Figura 14 – Diagrama de força de embutimento (F_e) por deformação (ε)



Fonte: Adaptada da norma ASTM D5764:2013.

O corpo de prova utilizado no método *half hole* deve possuir formato de um paralelepípedo retangular com a metade de um furo em uma das faces, conforme figura 15. As dimensões do CP são indicadas na tabela 1.

Figura 15 – Corpo de prova para ensaio de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras de acordo com o método *half hole* da ASTM D5764:2013



Fonte: Adaptada da ASTM D5764:2013.

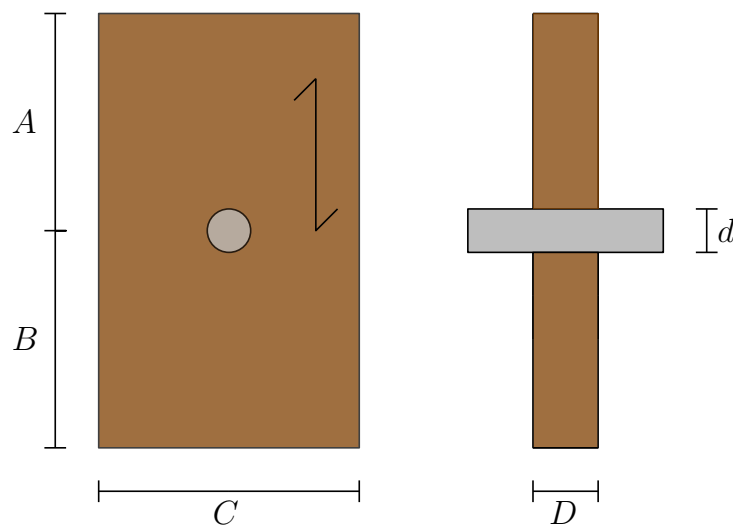
Tabela 1 – Dimensões do corpo de prova de embutimento para o método *half hole*

Dimensão	
<i>a</i>	Maior valor entre 50 mm e 4 <i>d</i>
<i>b</i>	Maior valor entre 50 mm e 4 <i>d</i>
<i>c</i>	Menor valor entre 38 mm e 2 <i>d</i>

Fonte: Adaptada da ASTM D5764:2013.

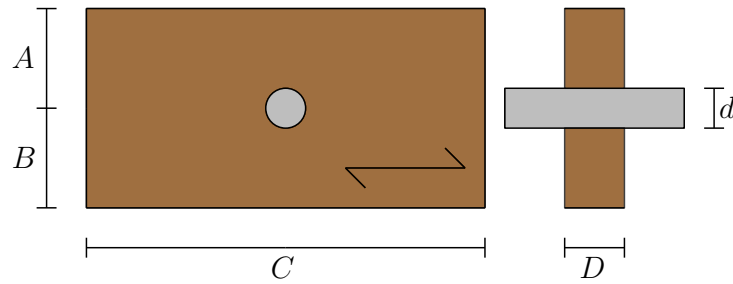
No método *full hole*, o CP deve possuir o mesmo formato, mas com um furo completo atravessando a seção transversal da peça, conforme figuras 16 e 17. As dimensões devem estar de acordo com a tabela 2.

Figura 16 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras de acordo com o método *full hole* da ASTM D5764:2013



Fonte: Adaptada da ASTM D5764:2013.

Figura 17 – Corpo de prova para ensaio de embutimento na direção normal às fibras de acordo com o método *full hole* da ASTM D5764:2013



Fonte: Adaptada da ASTM D5764:2013.

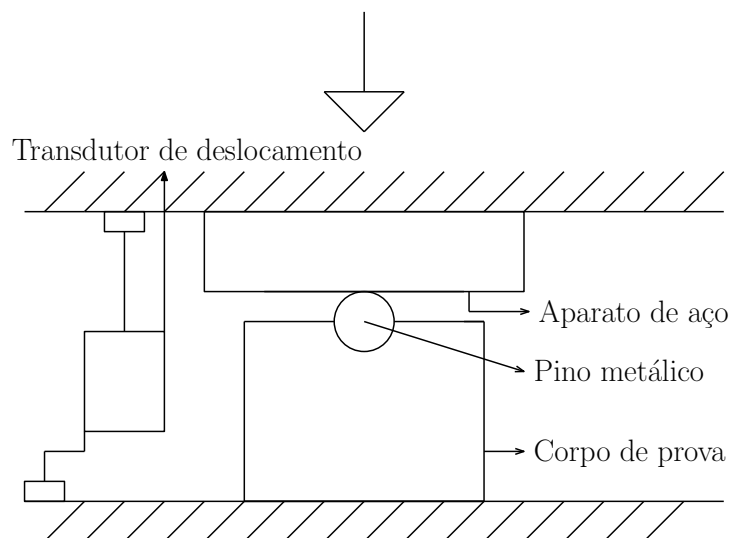
Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova de embutimento para o método *full hole*

Dimensão	
A	Maior valor entre 25 mm e 2d
B	Maior valor entre 50 mm e 4d
C	Maior valor entre 50 mm e 4d
D	Menor valor entre 38 mm e 2d

Fonte: Adaptada da ASTM D5764:2013.

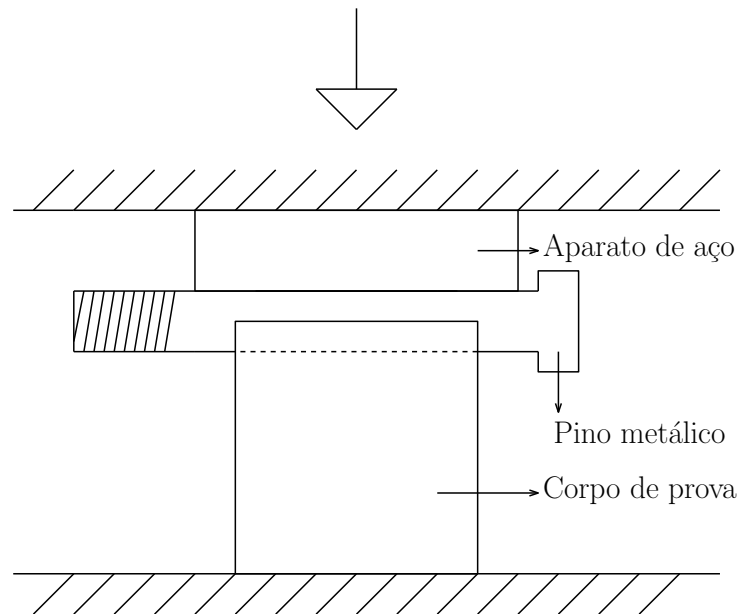
A ASTM D5764:2013 indica uma configuração de aparato para ensaio de embutimento para cada um dos dois métodos. A configuração indicada para o ensaio *half hole* é mostrada nas figuras 18 e 19. A figura 20 indica um ensaio real de acordo com o método *half hole*.

Figura 18 – Vista frontal do aparato de ensaio para o método *half hole*



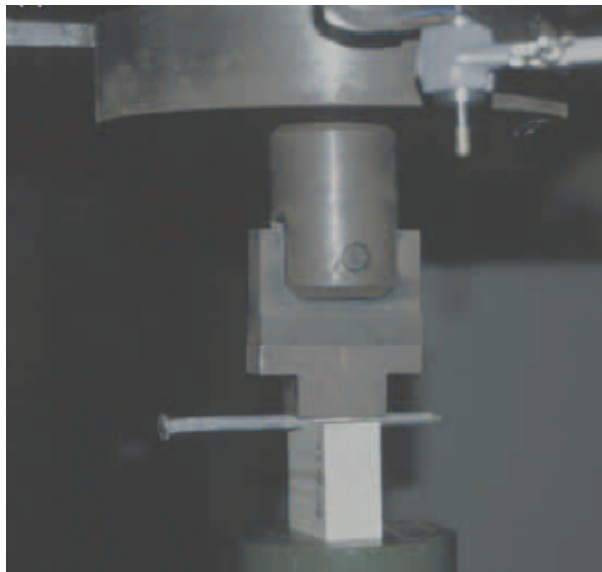
Fonte: Adaptada de ASTM D5764:2014.

Figura 19 – Vista lateral do aparato de ensaio para o método *half hole*



Fonte: Adaptada de ASTM D5764:2014.

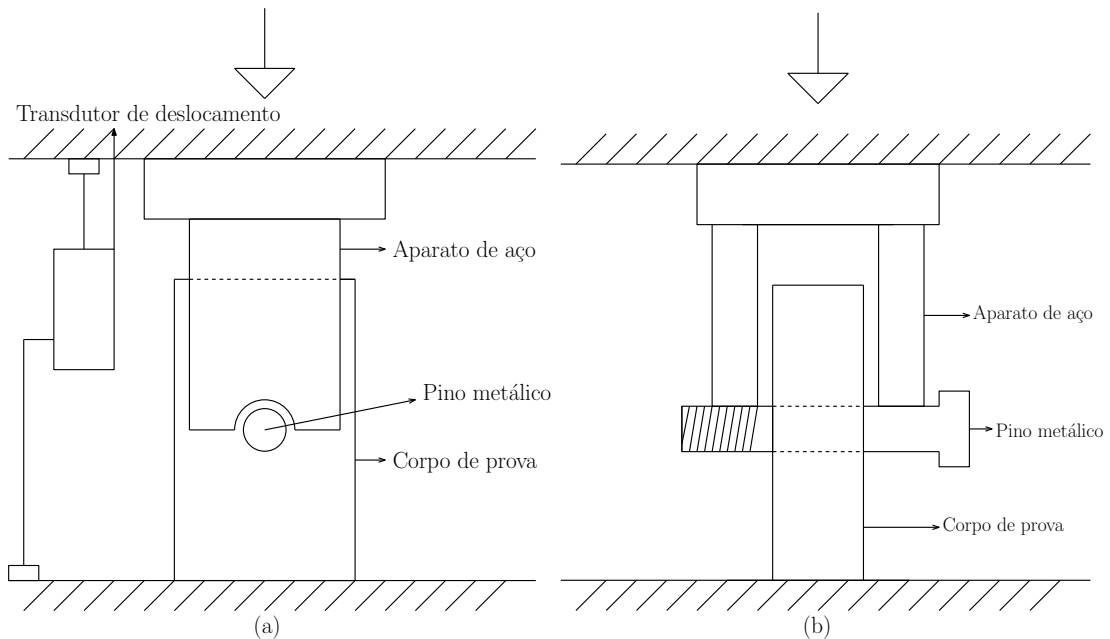
Figura 20 – Ensaio real de embutimento de acordo com o método *half hole* da ASTM D5764:2013



Fonte: Rammer (2001)

A configuração indicada para o ensaio *full hole* é mostrada nas figura 21.

Figura 21 – Vista frontal (a) e lateral (b) do aparato de ensaio para o método *full hole*



Fonte: Adaptada de ASTM D5764:2014.

4.5.4 Comparação entre os métodos de ensaios

As equações para o cálculo da resistência ao embutimento propostas pelos diversos documentos normativos são equações empíricas, isto é, baseada em resultados experimentais realizados por pesquisadores. No entanto, como visto na seção 4.5, não há um método de ensaio unificado. Dessa forma, a comparação entre os valores de resistência torna-se mais complexa. De acordo com Franke e Magnière (2014), as variações nos testes resultam em significativas diferenças na resistência ao embutimento (f_e) e, portanto, é muito difícil comparar todos os resultados de ensaios provenientes da literatura.

Franke e Magnière (2014) compararam, entre outros, os métodos de ensaios dos documentos normativos ASTM D5764:2013 e BS EN 383:2007. As principais conclusões obtidas pelos pesquisadores foram:

- No ensaio *half hole*, aplica-se carregamento ao longo de todo o comprimento do pino metálico, o que permite que se obtenha um resultado livre da influência da flexão do pino. Tal método gera uma resistência ao embutimento mais próxima da real, mas não reflete a rigidez da conexão, na qual pode ocorrer a flexão do conector;

- Apesar de considerar a flexão do pino, o ensaio *full hole* não leva em consideração a distribuição de tensão uniforme no conector, que foi considerada no desenvolvimento do modelo de cálculo europeu (EYM);
- A resistência ao embutimento pode ser determinada a partir da força que provoca um deslocamento de 5 *mm* entre o pino e a peça de madeira (BS EN 383:2007) ou a partir da força que causa um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino metálico (ASTM D5764:2013). As diferentes metodologias utilizadas podem levar, segundo o autor, a uma diferença de 50% ou mais na resistência ao embutimento.

Após a avaliação dos métodos, Franke e Magnière (2014) realizaram seis séries de ensaios variando o documento normativo, o método (*half-hole* ou *full-hole*) e a direção (paralela ou perpendicular) de aplicação de força em relação às fibras, conforme indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Séries de ensaios de embutimento

Série	Nome	Tipo de ensaio	Número de ensaios	Norma	Ângulo
1	FH0-EN383	Full-hole	5	EN 383:2007	0°
2	FH0-ASTM	Full-hole	5	ASTM D5764-97a	0°
3	HH0-ASTM	Half hole	5	ASTM D5764-97a	0°
4	FH90-EN383	Full hole	5	EN 383:2007	90°
5	FH90-ASTM	Full hole	5	ASTM D5764-97a	90°
6	HH90-ASTM	Half hole	5	ASTM D5764-97a	90°

Fonte: Franke e Magnière (2014) (Adaptado).

Após análise dos resultados, Franke e Magnière (2014) concluíram que as variações nos testes e os métodos de ensaio influenciam significativamente na resistência ao embutimento. Os autores encontraram variações de até 23% para o mesmo método de ensaio e de até 76% para documentos normativos diferentes.

Almeida e Dias (2016) realizaram ensaios de embutimento na direção paralela às fibras com seis espécies de madeiras brasileiras (coníferas e folhosas). Além disso, utilizaram quatro diâmetros de parafusos passantes com porcas e arruelas (8, 10, 12 e 16 *mm*). Os ensaios foram realizados de acordo com três normas, a saber: ABNT NBR 7190:1997, BS EN 383:2007 e ASTM D5794:2007. Três ensaios foram realizados para cada combinação de espécie, diâmetro do pino e norma. Segundo os autores, para todas as madeiras e diâmetros, os maiores valores médios de resistência ao embutimento foram encontrados com o uso da metodologia de ensaio presente no documento normativo BS EN 383:2007. Além disso, afirmam que isso ocorre porque a norma brasileira utiliza um método gráfico na determinação da resistência ao embutimento, que resulta em valores menores.

Molina et al. (2017) também realizaram ensaios de embutimento segundo os procedimentos descritos nos documentos normativos brasileiro e europeu. Para isso, usaram duas espécies de madeira (*Pinnus elliotti* e *Eucalyptus saligna*) e um diâmetro de pino metálico (6,35mm). Os ensaios foram realizados em duas direções (0° e 90°). Os maiores valores médios de resistência foram obtidos com o uso do modelo de ensaio europeu. De acordo com os autores, isso ocorreu pelos mesmo motivo apontado por Almeida e Dias (2016). Molina et al. (2017) também indica que os menores valores de resistência ao embutimento encontrados por meio da ABNT NBR 7190:1997 levam a um aumento no número de conectores nas ligações das estruturas de madeira. Os valores de resistência proveniente das equações e dos ensaios, para ambas as normas, foram desiguais. Tais diferenças, segundo Molina et al. (2017), podem ser atribuídas à influência da flexão do pino metálico, que possuía um diâmetro pequeno. Notou-se também que a desigualdade entre os valores foi maior para a espécie mais densa (*Eucalyptus saligna*).

4.5.5 Modos de ruptura no embutimento

Rammer (2001) realizou um extensivo estudo experimental para avaliar a resistência ao embutimento de quatro espécies de madeiras norte-americanas. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D5764 (*half hole*) e variou-se o diâmetro do prego (3,33, 3,76, 4,11 e 5,76 mm), o teor de umidade da madeira e a direção de aplicação de força. Foram ensaiados 1243 corpos de prova na direção paralela às fibras e 1217 na direção perpendicular às fibras.

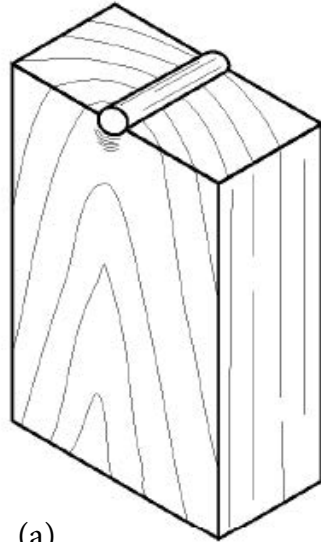
Rammer (2001) observou dois modos de ruptura diferentes para cada uma das direções de aplicação de força analisadas (0° e 90°). Para espécimes carregadas na direção paralela às fibras, o modo de falha predominante foi o esmagamento localizado (*bearing*) embaixo do prego por compressão, que ocorreu em 78% de todos os ensaios nessa direção. Para os 22% dos testes remanescentes, ocorreu o aparecimento de fissuras na região abaixo do prego (*splitting*).

Para espécimes carregadas na direção perpendicular às fibras, o modo de ruptura preponderante também foi o esmagamento localizado (*bearing*) embaixo do prego (79% dos casos). Nos demais ensaios, o modo de ruptura identificado foi o surgimento de fissuras nas laterais dos corpos de prova (*peeling*).

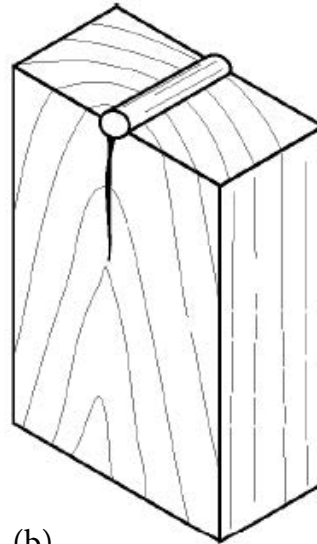
Ainda de acordo com o autor, para a maioria das espécies de madeira, a ocorrência de fissuras aumentou conforme o teor de umidade diminuía (da saturação até 6%). A figura 22 indica os modos de ruptura dos ensaios de embutimento.

Figura 22 – Modos de falha por esmagamento da madeira na direção paralela (a) e normal (c) às fibras e por fissuração da madeira na direção paralela (b) e normal (d) às fibras

Direção paralela às fibras

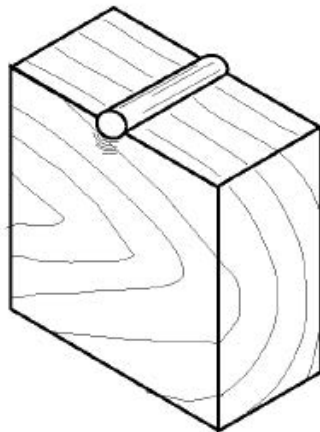


(a)

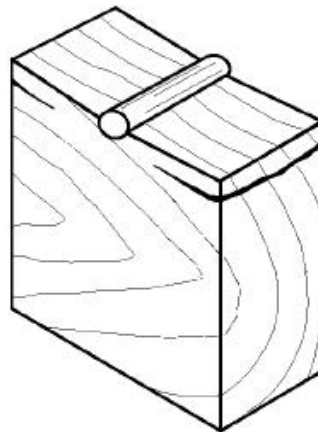


(b)

Direção normal às fibras



(c)



(d)

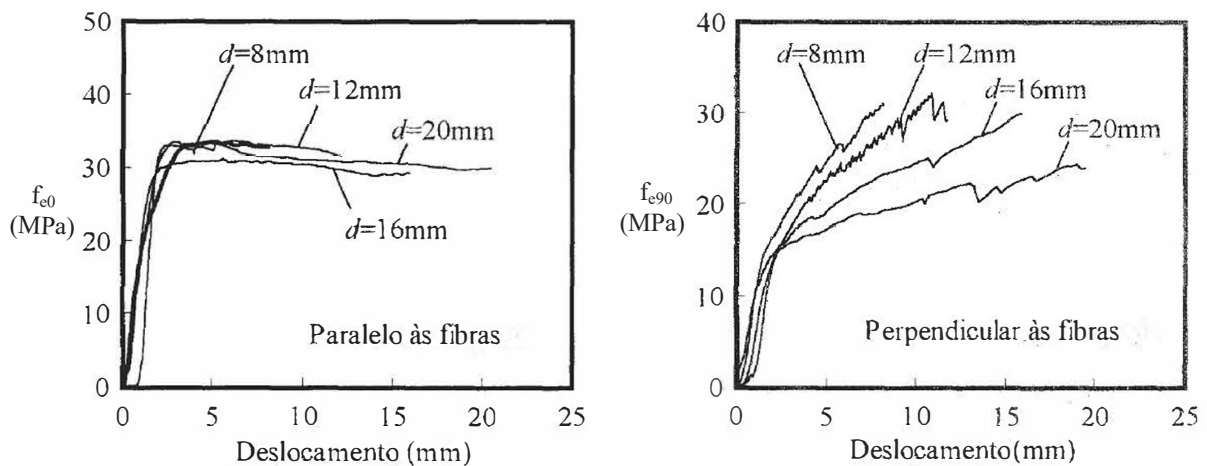
Fonte: Adaptada de Rammer (2001).

4.5.6 Resultados típicos de ensaios de embutimento de acordo com o BS EN 383:2007

O documento normativo europeu BS EN 383:2007 define a resistência ao embutimento como a máxima força resistida pelo corpo de prova dentro de um deslocamento limite de 5 *mm* para ambas as direções paralela e perpendicular às fibras. De acordo com Leijten, Köhler e Jorissen (2004), para ensaios de embutimento na direção paralela às fibras, a força máxima é geralmente atingida para um deslocamento entre 2 e 3 *mm* e o diagrama resistência ao

embutimento x deslocamento possui um trecho elástico-linear e um patamar de plastificação da madeira bem definidos. Para ensaios na direção perpendicular às fibras, a força máxima geralmente ocorre para um deslocamento próximo de 5 *mm*. Além disso, o mecanismo de falha é completamente diferente. De acordo com Franke e Magnière (2014), devido ao esmagamento das fibras na região abaixo do pino metálico, ocorre um enrijecimento da madeira (*hardening behaviour*). Assim, o diagrama resistência ao embutimento x deslocamento passa a conter um trecho de plastificação com ganho de resistência considerável. A figura 23 apresenta os diagramas de resistência ao embutimento x deslocamento obtidos por Sawata e Yasumura (2002) a partir de ensaios de embutimento de acordo com o BS EN 383:2007. Nota-se que nos ensaios na direção perpendicular às fibras, com todos os diâmetros analisados, há aumento considerável de f_{e90} mesmo após o fim do trecho elástico-linear.

Figura 23 – Relações entre resistência ao embutimento e deslocamento



Fonte: Adaptado de Sawata e Yasumura (2002).

Hübner (2008), ao realizar ensaios de embutimento com espécies de folhosas e em várias direções, notou que os valores de f_{e90} para o diâmetro de pino metálico de 6 *mm* eram consideravelmente superiores aos valores de f_{e0} para ao menos uma espécie. Tal resultado inesperado poderia ser explicado, segundo o autor, pelo *hardening behaviour* da madeira sob aplicação de força na direção perpendicular às fibras nos ensaios de embutimento.

4.6 Valor de resistência estimada

Nesta seção, serão descritos os métodos analíticos utilizados pelos principais documentos normativos para o cálculo da resistência ao embutimento na ausência de ensaios específicos.

4.6.1 ABNT NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira

A ABNT NBR 7190:1997 indica que, na ausência de determinação experimental específica, as resistências ao embutimento nas direções paralela (f_{e0}) e perpendicular (f_{e90}) às fibras podem ser determinadas a partir da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), de acordo com as equações 17 e 18, respectivamente. Na determinação da resistência na direção perpendicular às fibras, deve-se utilizar o parâmetro α_e , que depende do diâmetro do pino metálico. Os valores de α_e são indicados na tabela 4.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (17)$$

$$f_{e90} = 0,25f_{c0}\alpha_e \quad (18)$$

Tabela 4 – Coeficiente α_e para cálculo da resistência ao embutimento perpendicular às fibras

d (cm)	$\leq 0,62$	0,95	1,25	1,60	1,90	2,20	2,50	3,10	3,80	4,40	5,00	$\geq 7,50$
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.

A resistência ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha}$), com uma inclinação α em relação às fibras, pode ser determinada pela Equação de Hankinson (19).

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0}f_{e90}}{f_{e0}\text{sen}^2\alpha + f_{e90}\text{cos}^2\alpha} \quad (19)$$

4.6.2 CEN EUROCODE 5: *Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*

O documento normativo CEN EUROCODE 5:2004 fornece equações diferentes para o cálculo da resistência ao embutimento para parafusos passantes com porcas e arruelas e para pregos. Para parafusos com diâmetro de até 30 mm e para pregos com diâmetros maiores que 8 mm, a resistência ao embutimento característica da madeira, em uma direção α em relação às fibras ($f_{e\alpha,k}$), é dada pela equação 20.

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90}\text{sen}^2\alpha + \text{cos}^2\alpha} \quad (20)$$

A resistência ao embutimento característica na direção paralela às fibras ($f_{e0,k}$), em MPa, é calculada por meio da equação 21, que depende do diâmetro do pino metálico (d), em mm , e da densidade aparente característica (ρ_k) da madeira, em kg/m^3 .

$$f_{e0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (21)$$

Como o CEN EUROCODE 5:2004 utiliza a densidade aparente característica (ρ_k) e a ABNT NBR 7190:1997 usa a densidade aparente média (ρ_m), pode-se utilizar a equação 22 para efetuar a conversão.

$$\rho_k \approx \frac{\rho_m}{1,2} \quad (22)$$

O valor de k_{90} , que é um fator utilizado para simplificar a Equação de Hankinson (19), depende do diâmetro do prego ou parafuso passante, em mm , e da classificação da madeira, que pode ser conífera (Equação 23) ou folhosa (Equação 24).

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (23)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015d \quad (24)$$

Para pregos com diâmetros menores ou iguais a 8 mm , a resistência independe da direção α , mas depende do modo como a conexão foi realizada (com ou sem pré-furação). Para ligações pregadas sem pré-furação, a resistência ao embutimento característica ($f_{e,k}$), em qualquer direção, é dada pela equação 25.

$$f_{e,k} = 0,082\rho_k d^{-0,3} \quad (25)$$

Para ligações pregadas com pré-furação, a resistência ao embutimento característica ($f_{e,k}$), em qualquer direção, é dada pela equação 26.

$$f_{e,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (26)$$

Nas equações 25 e 26, as unidades de d , ρ_k e $f_{e,k}$ também são mm , kg/m^3 e MPa, na devida ordem.

4.6.3 ANSI/AWC NDS:2015 - *National Design Specification for Wood Construction*

O documento normativo americano ANSI/AWC NDS:2015 fornece as equações 27, 28 e 29 para o cálculo da resistência ao embutimento (f_e), em *psi*. O parâmetro utilizado é a densidade

relativa (G) da madeira, com valor adimensional, obtida pela razão entre a massa seca ($U = 0\%$), medida em g , pelo volume seco ($U = 0\%$), medido em cm^3 . Para pinos metálicos com diâmetros maiores ou iguais a $1/4''$ ($6,35\text{ mm}$), a resistência ao embutimento paralela (f_{e0}) às fibras é dada pela equação 27.

$$f_{e0} = 11200G \quad (27)$$

Para pinos metálicos com diâmetros maiores ou iguais a $1/4''$, a resistência ao embutimento perpendicular (f_{e90}) às fibras é dada pela equação 28, que também utiliza o diâmetro (d), em polegadas, como parâmetro.

$$f_{e90} = 6100G^{1,45}d^{-0,5} \quad (28)$$

Para pinos metálicos com diâmetros menores que $1/4''$, ambas as resistências ao embutimento paralela (f_{e0}) e perpendicular às fibras (f_{e90}), em *psi*, são dadas pela equação 29.

$$f_e = 16600G^{1,84} \quad (29)$$

Apesar da densidade relativa (G) ser determinada para um teor de umidade de 0% , os valores de resistência ao embutimento obtidos por meio das equações 27, 28 e 29 já estão ajustados para o teor de umidade padrão (12%) utilizado pela ABNT NBR:7190 1997.

No sistema métrico, as equações 27, 28 e 29 podem ser escritas como 30, 31 e 32, respectivamente, com resistência ao embutimento (f_e) em MPa e diâmetro (d) em mm .

$$f_{e0} = 77G \quad (30)$$

$$f_{e90} = 212G^{1,45}d^{-0,5} \quad (31)$$

$$f_e = 114G^{1,84} \quad (32)$$

Assim como nas normas brasileira e europeia, a resistência ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha}$), com uma inclinação α em relação às fibras, pode ser determinada pela Equação de Hankinson (19).

4.6.4 Outros documentos normativos

Os documentos normativos AS1720.1-2010 - *Timber Structures - Part 1: Design methods* (australiano) e NZS 3603:1993 - *Timber Structures Standard* (neozelandês) não utilizam o modelo de cálculo europeu (EYM) para a determinação da resistência das ligações com pinos metálicos. Em ambas as normas, a resistência da ligação depende apenas do diâmetro do pino, da espessura da madeira e do grupo de qual a espécie de madeira faz parte. Portanto, não há equações para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira nos dois documentos.

Franke e Quenneville (2011) realizaram ensaios de embutimento de acordo com a norma ASTM D5764:2013 para avaliar a possibilidade de adoção do EYM pelos dois documentos normativos citados. Foram ensaiados 494 corpos de prova de LVL (*Laminated Veneer Lumber*), com vários diâmetros de pino metálico (6, 8, 12, 16, 20, 25 e 30 *mm*) e cinco direções de carregamento. Além disso, também foram ensaiados 270 corpos de prova da espécie *Radiata pine*, com quatro diâmetros de pino (6, 8, 25 e 30 *mm*) e três direções de carregamento. Por fim, os autores concluíram que o modelo de cálculo europeu pode ser adotado em ambas as normas, mas ressaltaram que devem ser realizados ensaios com pregos e parafusos auto atarraxantes. Além disso, os autores propuseram equações empíricas para o cálculo da resistência ao embutimento para *Radiata pine* e LVL (Equações 33 e 34, respectivamente) similares às do documento normativo europeu, com diâmetro do pino metálico (d) em *mm* e densidade aparente característica (ρ_k) em kg/m^3 .

$$f_{e0,k} = 0,072(1 - 0,0024d)\rho_k \quad (33)$$

$$f_{e0,k} = 0,075(1 - 0,0037d)\rho_k \quad (34)$$

Para o cálculo da resistência ao embutimento em uma direção α em relação às fibras, deve-se utilizar a equação 20, com k_{90} igual a 2,0 para *Radiata pine* e 1,5 para LVL.

4.7 Conclusões da revisão bibliográfica

A resistência ao embutimento é um parâmetro importante para a determinação da capacidade resistente das ligações mecânicas nas estruturas de madeira. Quanto mais próximo do real for seu valor, maior será a economia e a segurança das conexões.

O valor da resistência ao embutimento é governado por diversos fatores, como a densidade e o teor de umidade da madeira, o diâmetro do pino metálico e a direção de aplicação da carga em relação às fibras. Outro fator que se destaca é a metodologia experimental adotada nos ensaios normatizados de embutimento.

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, a resistência da madeira ao embutimento é definida pela razão entre a força que causa deformação residual específica de 2‰ e área resistente ao embutimento. A ASTM D5764:2013, por sua vez, determina a resistência ao embutimento como a razão entre a força que causa um deslocamento residual igual a 5% do diâmetro do pino metálico e a área resistente ao embutimento. Já o documento normativo BS EN 383:2007 define a resistência ao embutimento como a razão entre a força que causa deslocamento relativo de 5 *mm* entre o corpo de prova e o pino metálico (ou a força máxima) e a área resistente.

Nota-se, portanto, que entre as três normas, apenas a brasileira e a norte-americana utilizam um método gráfico para avaliar a resistência ao embutimento da madeira. Ademais, apenas a norma brasileira usa a deformação específica como parâmetro de avaliação, enquanto que as outras utilizam o deslocamento relativo entre o pino metálico e a peça de madeira.

Os três documentos normativos mencionados acima também fornecem equações para estimar a resistência ao embutimento na ausência de ensaios. A norma brasileira (ABNT NBR 7190:1997) iguala os valores das resistências ao embutimento e à compressão para a direção paralela às fibras, não fazendo distinção para diferentes diâmetros de pino. As normas ANSI/AWC NDS:2015 (norte-americana) e CEN EUROCODE 5:2004 (europeia) indicam equações que dependem da densidade da madeira e do diâmetro do pino metálico.

Alguns estudos indicam que a metodologia de ensaio e as equações para o cálculo da resistência ao embutimento da norma brasileira fornecem valores menores em relação aos obtidos por meio da norma europeia. Além do mais, com base em vários estudos empíricos, a resistência ao embutimento é melhor caracterizada quando se leva em conta a densidade da madeira e o diâmetro do conector utilizado na ligação.

5 Materiais e Métodos

5.1 Materiais

5.1.1 Madeiras

Para avaliar experimentalmente a resistência ao embutimento da madeira, confeccionou-se corpos de prova de seis diferentes espécies, indicadas na tabela 5. Escolheu-se peças homogêneas e livres de defeitos em atendimento às especificações das normas ABNT NBR 7190:1997 e BS EN 383:2007. Além disso, antes do início da fabricação dos corpos de prova, as peças de madeira foram previamente acondicionadas para que o teor de umidade ficasse próximo a 12%.

Tabela 5 – Espécies de madeiras

Nome popular	Nome científico
Caixeta	<i>Tabebuia cassinoides</i>
Cedrinho	<i>Erisma uncinatum</i>
Eucalipto-grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>
Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i>
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>
Pinus elliottii	<i>Pinus elliottii</i>

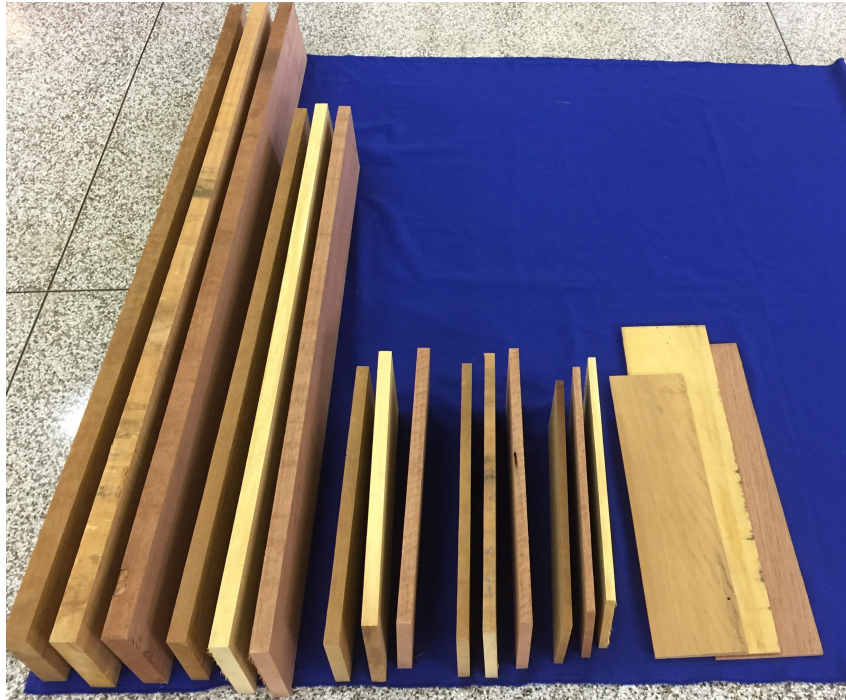
Fonte: Autoria própria (2017).

Previamente foram realizados ensaios básicos de caracterização, como o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras, densidade aparente e teor de umidade para todas as seis espécies de madeira estudadas.

Para cada espécie nativa (Caixeta, Cedrinho, Garapeira e Itaúba), os corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização e embutimento foram extraídos de uma única viga com seção retangular de 5x15 *cm* e comprimento igual a 3 *m*. Para as espécies de reflorestamento, os CP's foram extraídos de vigas com seção retangular de 5x30 *cm*. Para a espécie Eucalipto-grandis, utilizou-se duas vigas com 3 *m* de comprimento cada. Para a espécie Pinus elliottii, utilizou-se três vigas com 3 *m* de comprimento cada.

A figura 24 apresenta peças de madeira de algumas das espécies avaliadas. Para facilitar a confecção dos corpos de prova e minimizar a perda de material, as peças foram cortadas com os comprimentos adequados e as bitolas requisitadas pelo documento normativo utilizado.

Figura 24 – Peças de madeira das espécies Cedrinho, Garapeira e Itaúba utilizadas na confecção dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2017).

5.1.2 Pinos metálicos

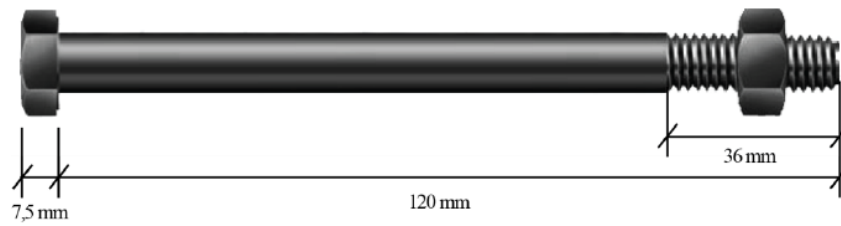
Nos ensaios de embutimento, utilizou-se parafusos passantes com cabeça sextavada de rosca parcial, fabricados com aço estrutural classe 8.8, de acordo com a ISO 898-1:2013, com dimensões determinadas pela ISO 4016:2011. Os diâmetros dos parafusos utilizados e suas respectivas designações encontram-se na tabela 6. A figura 25 indica o formato e as dimensões de um dos parafusos utilizado nos ensaios.

Tabela 6 – Diâmetros dos parafusos passantes

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro aferido (mm)	Designação
3,00	3,00	ISO 4016 – M3 8.8
6,00	5,90	ISO 4016 – M6 8.8
8,00	7,80	ISO 4016 – M8 8.8
10,00	9,70	ISO 4016 – M10 8.8
12,00	11,70	ISO 4016 – M12 8.8
16,00	15,80	ISO 4016 – M16 8.8

Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 25 – Parafuso M12 sextavado com rosca parcial



Fonte: Silva (2017)

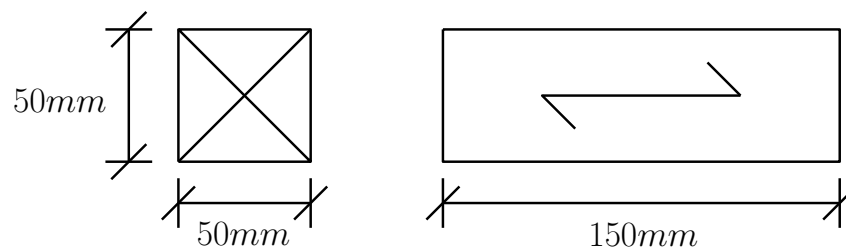
Os diâmetros de parafusos passantes mencionados acima foram adotados porque são os mais utilizados nas construções de estruturas de madeira. Como a ABNT NBR 7190:1997 não permite o uso de parafusos com diâmetro menor que 10 *mm*, os testes realizados com diâmetros menores tem como objetivo avaliar o comportamento da resistência ao embutimento em ligações com pregos.

5.2 Ensaios

5.2.1 Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras

Para os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), foram confeccionados ao menos seis corpos de prova para cada uma das seis espécies utilizadas. As dimensões adotadas estão indicadas na figura 26.

Figura 26 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

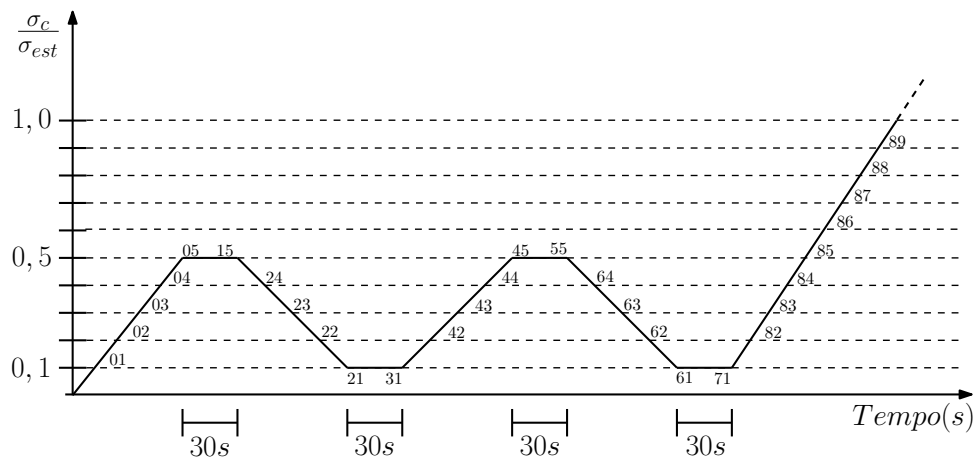
Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com os preconizados pela ABNT NBR 7190:1997 no seu anexo B. Os ensaios de compressão foram efetuados na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL-30000, do Laboratório de Sistemas Estruturais (figura 27). Aplicaram-se três ciclos de carga e descarga, conforme especificado no diagrama da figura 28, com carregamento monotônico a uma taxa de 10 MPa/min.

Figura 27 – Ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 28 – Diagrama de carregamento para o ensaio de compressão paralela às fibras

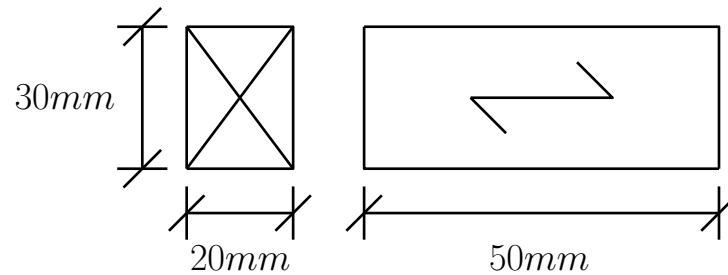


Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

5.2.2 Ensaio de densidade aparente, densidade relativa e teor de umidade

Para obter a densidade aparente, densidade relativa e o teor de umidade das espécies de madeiras estudadas, foram confeccionados seis corpos de prova extraídos aleatoriamente das vigas de madeira para cada espécie. As dimensões, que seguem as diretrizes da ABNT NBR 7190:1997, estão indicadas na figura 29.

Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de densidade aparente, densidade relativa e teor de umidade



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

De acordo com os procedimentos de ensaio determinados pela norma brasileira, a massa inicial (m_i) dos corpos de prova foi aferida por meio de uma balança de precisão. As dimensões foram medidas com o uso de paquímetro. Em seguida, os CP foram dispostos em uma câmara de secagem, com temperatura máxima de $103^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$.

A massa dos CP foi medida a cada seis horas. Quando houve variação menor ou igual a 0,5% entre duas medidas consecutivas, determinou-se a massa seca (m_s). O teor de umidade foi obtido pela equação 35.

$$U(\%) = \left(\frac{m_i - m_s}{m_s} \right) 100 \quad (35)$$

Para a determinação da densidade aparente (ρ) das madeiras, utilizou-se a equação 36, com m_i medida em g e o volume inicial (V_i) medido em cm^3 .

$$\rho = \frac{m_i}{V_i} \quad (36)$$

Ademais, para a determinação da resistência ao embutimento das madeiras por meio das equações propostas pela ANSI/AWC NDS:2015 (seção 4.6.3), também calculou-se a densidade relativa (G). Para isso, foi utilizada a equação 37. O valor de G é adimensional, pois é uma relação entre as densidades da madeira e da água ($1 g/cm^3$).

$$G = \frac{\frac{m_s}{V_s}}{\rho_{\text{água}}} \quad (37)$$

Tanto a massa seca (m_s), medida em g , quanto o volume seco (V_s), medido em cm^3 , foram aferidos quando o teor de umidade dos corpos de prova atingiram 0%.

5.2.3 Ensaio de resistência ao embutimento

Os ensaios de resistência ao embutimento foram realizados de acordo com o documento normativo BS EN 383:2007 (seção 4.5.2). Foram ensaiados ao menos seis corpos de prova

para cada combinação de espécie de madeira, diâmetro de pino metálico e direção de aplicação de força em relação às fibras. No entanto, devido a alguns problemas que surgiram durante a execução dos ensaios, só foi possível a obtenção de quatro resultados válidos para algumas séries. As espécies de madeira utilizadas estão indicadas na tabela 5. Os diâmetros nominais dos parafusos passantes utilizados estão indicados na tabela 6. Para as espécies nativas (Caixeta, Cedrinho, Garapeira e Itaúba), realizaram-se apenas ensaios na direção paralela às fibras. Para as espécies de reflorestamento (Eucalipto-grandis e Pinus elliottii), foram realizados ensaios nas direções paralela e perpendicular às fibras. Para todas as espécies ensaiadas na direção paralela às fibras, foram realizados ensaios com todos os diâmetros de pino metálico. Para as espécies ensaiadas na direção perpendicular às fibras, foram realizados ensaios com todos os diâmetros, exceto o de 15,80 *mm*.

Conforme indicado pelo BS EN 383:2007, os corpos de prova de embutimento para ensaios na direção paralela às fibras foram confeccionados com comprimento igual a 14 *d*, largura igual a 6 *d* e espessura igual a 2 *d*. Já os corpos de prova de embutimento para ensaios na direção perpendicular às fibras foram confeccionados com comprimento igual a 40 *d*, largura igual a 10 *d* e espessura igual a 2 *d*.

A figura 30 mostra os corpos de prova da espécie Itaúba para cada diâmetro utilizado nos ensaios de embutimento na direção paralela às fibras. A figura 31 apresenta os corpos de prova da espécie Pinus elliottii para cada diâmetro utilizado nos ensaios de embutimento na direção perpendicular às fibras.

Figura 30 – Corpos de prova da espécie Itaúba para ensaio na direção paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 31 – Corpos de prova da espécie *Pinus elliottii* para ensaio na direção perpendicular às fibras

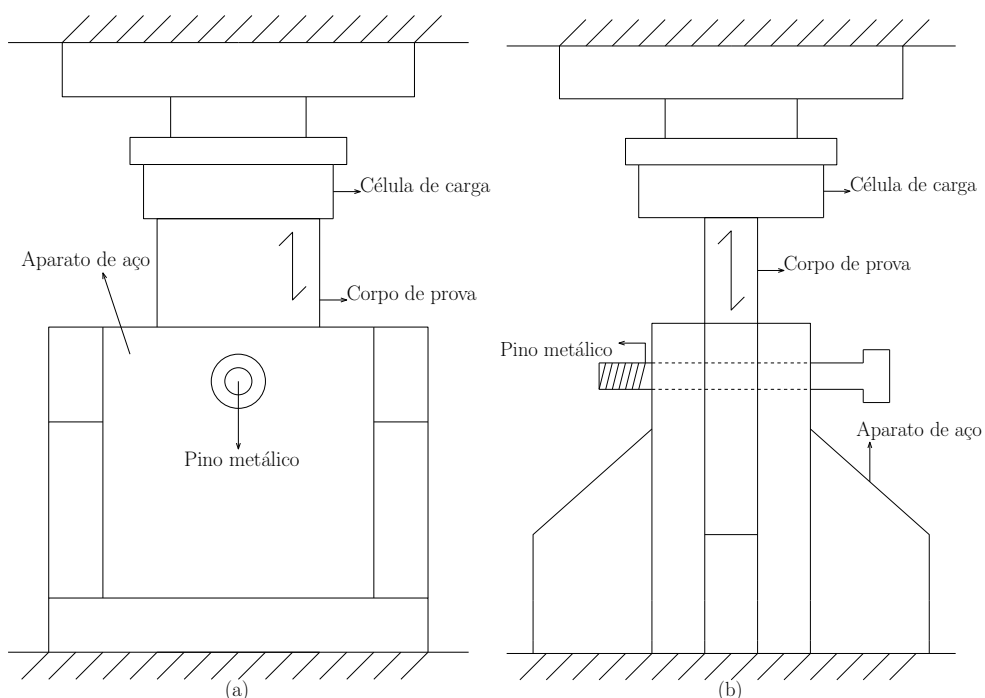


Fonte: Autoria própria (2017).

Para os ensaios de resistência ao embutimento, utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL-30000, do Laboratório de Sistemas Estruturais. A estimativa da resistência foi realizada com base no ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo.

Para posicionar o corpo de prova de embutimento e aplicar a carga, foi utilizado um aparato de aço, detalhado na figura 32, com um furo por onde passa o parafuso. O diâmetro do furo é ajustável por meio do uso de buchas de aço.

Figura 32 – Vista frontal (a) e lateral (a) do aparato de ensaio de embutimento



Fonte: Autoria própria (2017).

Os furos dos corpos de prova de madeira foram feitos com o uso de uma furadeira de bancada (figura 33). Os diâmetros das brocas de aço rápido utilizados são idênticos aos diâmetros nominais dos parafusos (tabela 6).

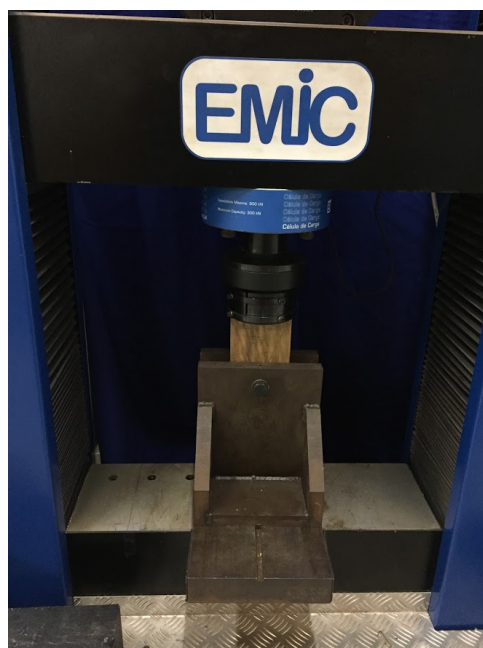
Figura 33 – Pré-furação dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2017).

O ciclo de carregamento foi feito conforme especificado na seção 4.5.2. Além disso, a taxa de carregamento foi ajustada para cada espécie de madeira para que a força máxima pudesse ser atingida em 300 ± 120 s, conforme indicado no documento normativo BS EN 383:2007. A figura 34 e 35 mostram como foi posicionado o aparato e o corpo de prova antes do início de ensaio para as direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente.

Figura 34 – Posição do aparato e corpo de prova para ensaio de embutimento na direção paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 35 – Posição do aparato e corpo de prova para ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras



Fonte: Autoria própria (2017).

5.3 Estimativa teórica dos valores de resistência ao embutimento

Os valores médios de resistência obtidos nos ensaios foram comparados com os valores de resistência teóricos estimados com o uso das equações presentes nos seguintes documentos normativos: ABNT NBR 7190:1997, ANSI/AWC NDS:2015 e CEN EUROCODE 5:2004. Para isso, foram necessários os parâmetros indicados na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros necessários para o cálculo de f_{e0} e f_{e90}

Documento normativo	f_{e0}	f_{e90}
ABNT NBR 7190:1997	f_{c0}	f_{c0} e α_e
ANSI/AWC NDS:2015	G	d e G
CEN EUROCODE 5:2004	d e ρ_m	d , ρ_m e k_{90}

Fonte: Autoria própria (2017).

Os valores médios de f_{c0} foram colhidos dos ensaios de compressão especificados na seção 5.2.1. Os valores de α_e , que é um fator que depende do diâmetro do pino metálico, foram coletados da tabela 4. Para valores de diâmetros intermediários, α_e foi determinado por interpolação linear. Os valores de G e ρ_m foram obtidos nos ensaios de densidade aparente e

densidade relativa especificados na seção 5.2.2. Apesar do CEN EUROCODE 5:2004 usar ρ_k no cálculo da resistência ao embutimento, optou-se por utilizar a ρ_m para que fosse possível efetuar comparação com as resistências médias colhidas nos ensaios de embutimento. Para o cálculo do k_{90} , a espécie de madeira *Pinus elliottii* (*Pinus elliottii*) foi classificada como conífera, enquanto que as espécies *Tabebuia cassinoides* (Caixeta), *Erisma uncinatum* (Cedrinho), *Eucalyptus grandis* (Eucalipto-grandis), *Apuleia leiocarpa* (Garapeira) e *Mezilaurus itauba* (Itaúba) foram classificadas como folhosas.

6 Resultados

6.1 Ensaios de caracterização das espécies de madeira

A tabela 8 apresenta o teor de umidade (U), a densidade aparente média (ρ_m) e a densidade relativa (G), com seus respectivos valores médios e coeficientes de variação (CV) das seis espécies de madeira avaliadas.

Tabela 8 – Resultado dos ensaios de teor de umidade, densidade aparente média e densidade relativa

Espécie	Número de CP	U (%)	ρ_m (kg/m ³)	G
		Valor médio (CV%)		
Caixeta	8	12,84 (1,17)	459,69 (2,31)	0,42 (4,73)
Cedrinho	6	18,92 (0,55)	599,69 (5,67)	0,54 (0,69)
Eucalipto-grandis	8	15,52 (3,31)	618,30 (20,83)	0,56 (21,36)
Garapeira	6	15,42 (3,30)	884,81 (2,36)	0,82 (2,23)
Itaúba	6	14,19 (0,74)	860,08 (1,25)	0,74 (0,57)
Pinus elliottii	14	11,72 (2,36)	561,91 (4,36)	0,53 (5,07)

Fonte: Autoria própria (2018).

A tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), com seus respectivos valores médios e coeficientes de variação, para as seis espécies de madeira avaliadas.

Tabela 9 – Resultado dos ensaios de compressão paralela às fibras (f_{c0})

Espécie	Número de CP	f_{c0}	
		Valor médio (MPa)	CV (%)
Caixeta	8	30,72	10,32
Cedrinho	6	39,76	3,85
Eucalipto-grandis	8	47,53	13,38
Garapeira	6	72,05	3,82
Itaúba	6	63,64	8,97
Pinus elliottii	9	38,92	21,42

Fonte: Autoria própria (2018).

Os valores médios de ρ_m , G e f_{c0} obtidos nos ensaios foram utilizados para estimar as resistências de acordo com os códigos normativos, conforme especificado na seção 5.3.

6.2 Valores de resistência ao embutimento estimados

A tabela 10 apresenta os valores de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa, obtidos por meio das equações analíticas indicadas pelos documentos normativos ABNT NBR 7190:1997, CEN EUROCODE 5:2004 e ANSI/AWC NDS:2015. Os parâmetros utilizados para alimentar as equações estão indicados na seção 6.1.

Tabela 10 – Valores de resistência ao embutimento paralela às fibras (f_{e0}) estimados

Espécie	Diâmetro (mm)	3,00	5,90	7,80	9,70	11,70	15,80
		f_{e0} (MPa)					
Caixeta	ABNT NBR 7190:1997	30,72	30,72	30,72	30,72	30,72	30,72
	CEN EUROCODE 5:2004	36,59	35,49	34,78	34,06	33,31	31,76
	ANSI/AWC NDS:2015	23,00	23,00	32,26	32,26	32,26	32,26
Cedrinho	ABNT NBR 7190:1997	39,76	39,76	39,76	39,76	39,76	39,76
	CEN EUROCODE 5:2004	47,72	46,30	45,36	44,43	43,44	41,43
	ANSI/AWC NDS:2015	36,81	36,81	41,66	41,66	41,66	41,66
Eucalipto-grandis	ABNT NBR 7190:1997	47,53	47,53	47,53	47,53	47,53	47,53
	CEN EUROCODE 5:2004	49,16	47,69	46,72	45,76	44,75	42,67
	ANSI/AWC NDS:2015	39,48	39,48	43,27	43,27	43,27	43,27
Garapeira	ABNT NBR 7190:1997	72,05	72,05	72,05	72,05	72,05	72,05
	CEN EUROCODE 5:2004	70,39	68,29	66,91	65,53	64,08	61,10
	ANSI/AWC NDS:2015	79,66	79,66	63,37	63,37	63,37	63,37
Itaúba	ABNT NBR 7190:1997	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64
	CEN EUROCODE 5:2004	68,40	66,36	65,02	63,68	62,27	59,38
	ANSI/AWC NDS:2015	74,57	74,57	61,14	61,14	61,14	61,14
Pinus elliottii	ABNT NBR 7190:1997	38,92	38,92	38,92	38,92	38,92	38,92
	CEN EUROCODE 5:2004	44,70	43,37	42,49	41,61	40,69	39,80
	ANSI/AWC NDS:2015	35,45	35,45	40,81	40,81	40,81	40,81

Fonte: Autoria própria (2018).

A tabela 11 apresenta os valores de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras (f_{e90}) obtidos pelas equações analíticas de modo análogo à seção 11. Como apenas as espécies Eucalipto-grandis (*Eucalyptus grandis*) e Pinus elliottii (*Pinus elliottii*) foram ensaiadas na direção perpendicular às fibras, f_{e90} não foi estimada para as demais espécies.

Tabela 11 – Valores de resistência ao embutimento perpendicular às fibras (f_{e90}) estimados

Espécie	Diâmetro (mm)	3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
		f_{e90} (MPa)				
Eucalipto-grandis	ABNT NBR 7190:1997	29,70	29,70	28,40	22,93	20,79
	CEN EUROCODE 5:2004	52,02	48,24	45,94	43,77	41,61
	ANSI/AWC NDS:2015	39,48	39,48	32,92	29,52	26,88
Pinus elliottii	ABNT NBR 7190:1997	24,32	24,32	23,25	18,78	17,03
	CEN EUROCODE 5:2004	32,04	30,15	28,96	27,83	26,67
	ANSI/AWC NDS:2015	35,45	35,45	30,23	27,11	24,69

Fonte: Autoria própria (2018).

6.3 Ensaios de resistência ao embutimento

A tabela 12 apresenta os valores de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa, das seis espécies avaliadas. Alguns valores de f_{e0} foram descartados porque seus respectivos ensaios apresentaram problemas. Ademais, não foram realizados ensaios com diâmetro de 15,80 mm para a espécie Pinus elliottii devido a limitações na espessura das peças de madeira disponíveis.

Tabela 12 – Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa

Espécie	Diâmetro (mm)					
	3,00	5,90	7,80	9,70	11,70	15,80
Caixeta	34,37	36,15	37,91	35,83	33,31	29,16
	39,52	36,39	36,84	34,45	31,75	29,29
	36,25	36,01	39,15	38,08	33,59	29,18
	37,75	34,76	37,57	33,94	33,44	29,60
	35,32	35,54	34,98	38,58	29,69	31,98
	40,25	34,57	32,93	31,18	31,26	31,55
	38,99	35,68	34,02	33,88	31,64	30,28
	36,66	35,29	33,05	33,74	32,27	32,59
Valor médio	37,39	35,55	35,80	34,96	32,12	30,45
CV (%)	5,60	1,82	6,63	6,99	4,13	4,56
Cedrinho	45,68	40,96	43,94	38,55	41,64	39,62
	43,90	41,85	42,46	45,85	45,70	39,26
	46,67	44,36	42,63	39,95	46,27	39,30
	43,35	47,61	43,66	44,85	46,50	41,05
	47,52	39,37	42,82	43,52	45,69	38,65
	-	41,53	43,13	41,49	48,52	42,43
Valor médio	45,43	42,62	43,11	42,37	45,72	40,05
CV (%)	3,92	6,89	1,36	6,75	4,93	3,53

Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 12 – Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}), em MPa (continuação)

	74,54	85,22	61,64	60,38	73,11	34,49
	77,05	76,31	65,56	65,38	71,84	32,90
	62,58	86,40	69,46	64,21	44,78	34,07
Eucalipto-grandis	62,70	78,04	74,05	47,28	50,14	32,09
	42,17	42,57	38,56	36,96	37,17	36,96
	36,29	34,93	41,91	38,19	37,32	37,52
	34,82	54,36	42,21	34,86	37,18	-
	41,86	42,53	44,67	41,20	35,85	-
Valor médio	54,00	62,54	54,76	48,56	48,42	34,67
CV (%)	31,85	33,87	26,19	26,43	32,26	6,26
	101,12	79,84	83,20	84,29	73,91	76,11
	96,26	93,05	82,07	81,34	70,54	69,15
Garapeira	86,68	94,95	78,85	77,14	83,52	66,82
	93,13	86,55	86,65	81,44	78,65	67,32
	93,83	81,97	84,52	80,82	82,38	78,52
	87,24	86,10	82,86	78,56	77,16	-
Valor médio	93,04	87,08	83,02	80,60	77,69	71,58
CV (%)	5,89	6,84	3,13	3,09	6,37	7,50
	70,80	69,50	69,29	66,63	61,72	59,55
	67,53	69,13	77,16	61,84	61,61	63,45
Itaúba	63,73	75,69	66,12	66,31	56,87	69,35
	67,71	73,85	65,79	64,22	55,22	72,85
	74,21	79,19	67,31	63,40	59,41	66,48
	91,21	67,87	63,24	62,44	60,70	61,88
Valor médio	72,53	72,54	68,15	64,14	59,25	65,60
CV (%)	13,52	6,12	7,10	3,09	4,51	7,54
	42,40	47,84	44,57	49,10	33,69	-
	36,61	38,40	45,55	55,41	39,44	-
	34,95	48,40	44,67	52,38	54,85	-
Pinus elliottii	48,24	43,76	38,97	39,34	36,82	-
	55,32	34,18	46,14	55,53	45,85	-
	49,12	29,20	47,99	41,49	42,39	-
	-	38,18	39,35	49,20	44,15	-
	-	40,16	42,52	47,63	37,80	-
Valor médio	44,44	40,01	43,72	48,76	41,87	-
CV (%)	17,73	16,43	7,34	12,16	15,75	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Os altos valores de coeficiente de variação obtidos nos ensaios com a espécie Eucalipto-grandis são explicados porque metade dos corpos de prova de cada combinação diâmetro-direção foram extraídos de uma peça com densidade mais alta (cerne), enquanto que a outra metade foi extraída de outra peça cuja densidade era menor (alburno). Apesar do CV alto, talvez o valor médio da resistência ao embutimento obtido possa representar o comportamento da madeira de

forma aproximada. No entanto, deve-se realizar mais ensaios com a espécie para verificar se os resultados são válidos.

A tabela 13 apresenta os valores de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), em MPa, das duas espécies ensaiadas nessa direção. Foram realizados apenas quatro ensaios com os diâmetros de 9,70 e 11,70 mm para a espécie Eucalipto-grandis em razão da quantidade disponível de madeira em uma mesma peça homogênea.

Os altos valores de coeficiente de variação obtidos nos ensaios com a espécie Eucalipto-grandis ocorreram devido aos mesmos motivos já mencionados.

Tabela 13 – Resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras (f_{e90}), em MPa

Espécie	Diâmetro (mm)				
	3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	128,55	71,05	68,32	62,05	53,90
	113,65	72,66	66,24	52,80	53,15
	108,63	79,10	70,54	28,35	20,67
	136,82	82,65	70,74	34,94	23,08
	59,51	27,60	32,05	-	-
	63,02	35,63	35,97	-	-
	68,65	46,94	36,54	-	-
	79,19	35,69	32,73	-	-
Valor médio	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
CV (%)	32,49	39,42	36,06	35,00	48,55
Pinus elliottii	102,05	49,43	32,54	41,11	21,09
	72,15	38,35	41,57	31,01	20,55
	62,19	56,66	36,74	32,67	27,03
	66,08	46,33	32,04	29,25	40,61
	85,50	51,81	36,25	29,47	28,19
	74,67	46,39	31,39	32,55	25,98
	58,02	33,97	42,64	45,78	33,31
	70,29	42,64	57,88	29,83	28,77
Valor médio	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
CV (%)	19,11	15,98	22,53	18,04	23,06

Fonte: Autoria própria (2018).

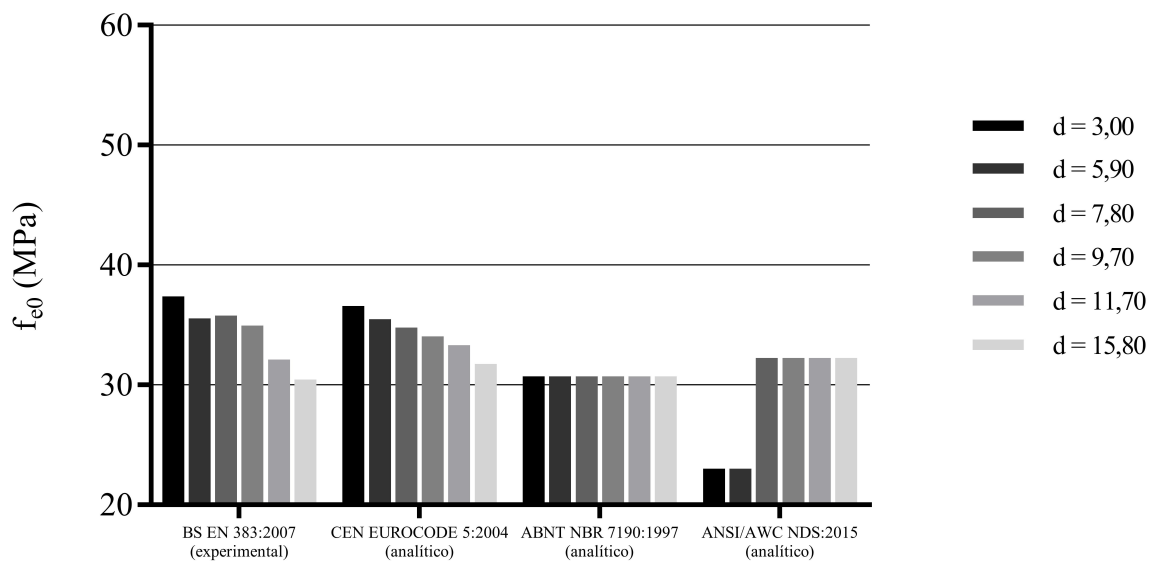
7 Discussões

7.1 Comparação entre os valores de resistência ao embutimento obtidos e estimados

Nesta seção, serão apresentados os resultados de f_{e0} e f_{e90} obtidos por meio dos ensaios de corpos de prova e calculados pelas equações indicadas pelos códigos normativos. Optou-se por utilizar gráficos de barra para facilitar a comparação entre os valores para cada espécie.

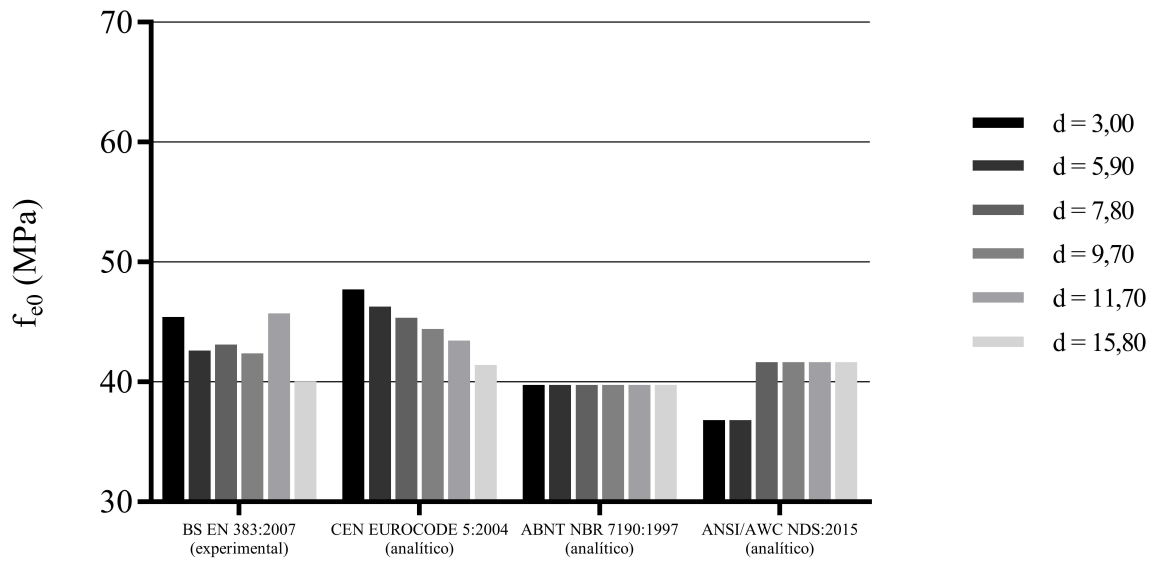
As figuras 36 a 41 apresentam os valores médios de f_{e0} obtidos experimentalmente e as resistências estimadas por meio das equações analíticas, em MPa. Cada figura apresenta os resultados para uma das seis espécies avaliadas nessa direção. Cada tonalidade de barra representa um dos seis diâmetros utilizados, em *mm*.

Figura 36 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Caixeta



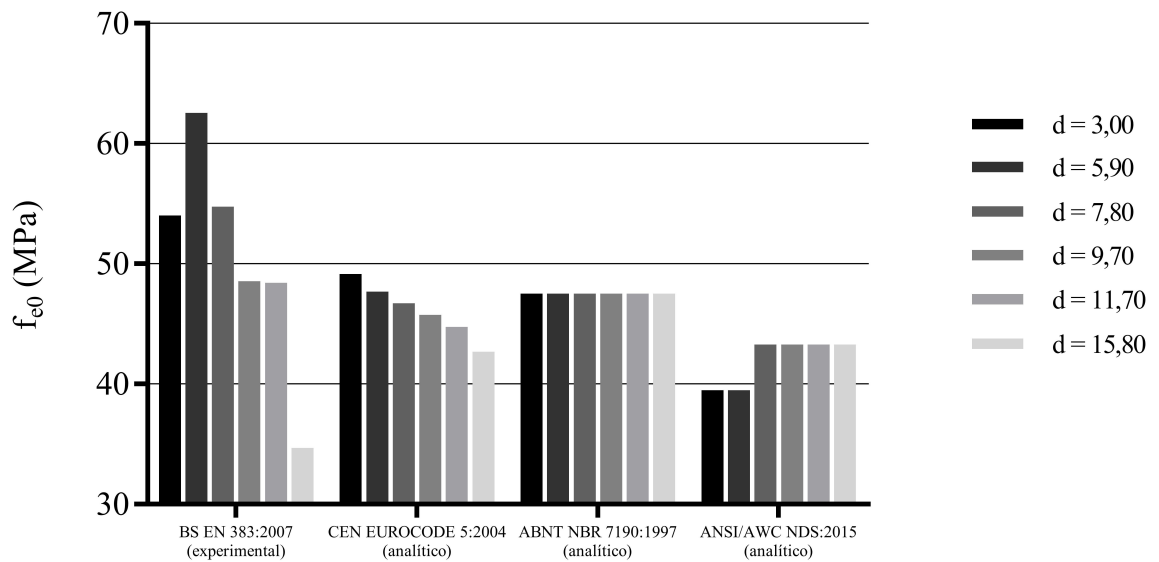
Fonte: Aatoria própria (2018).

Figura 37 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Cedrinho



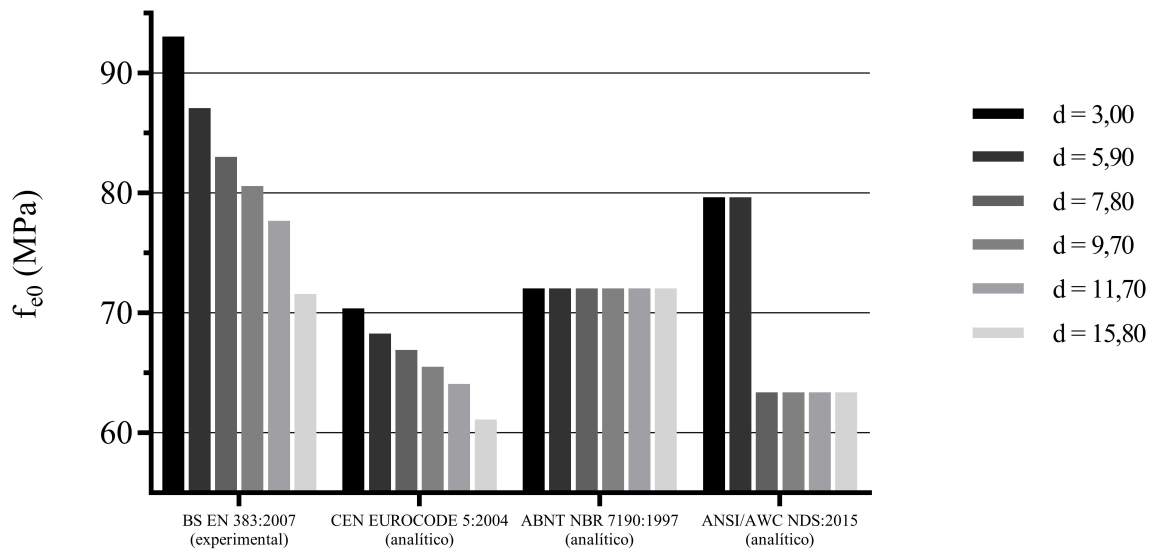
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 38 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Eucalipto-grandis



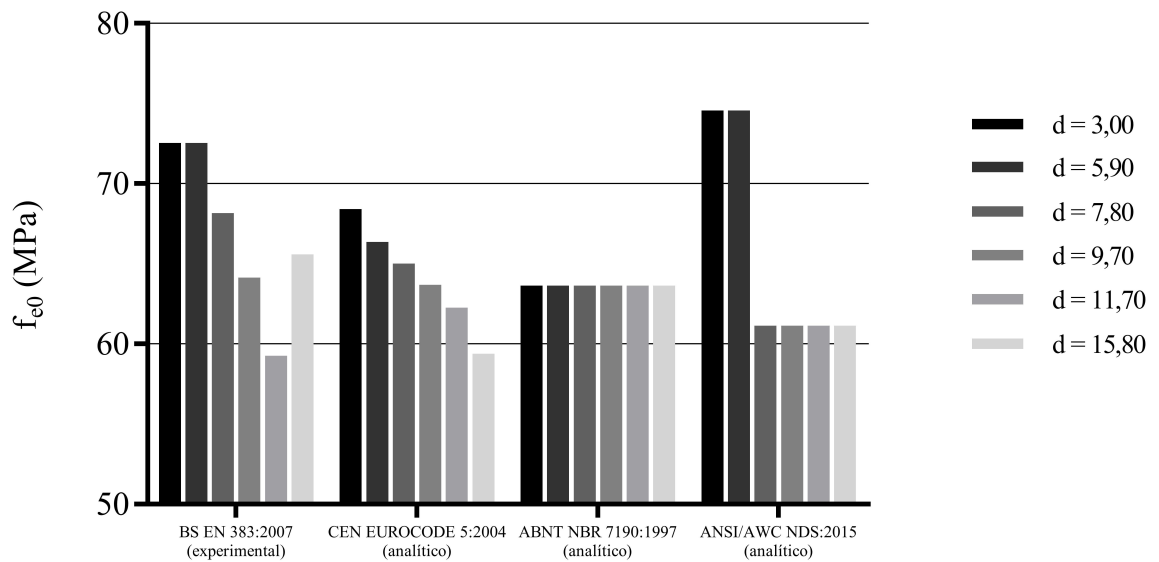
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 39 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Garapeira



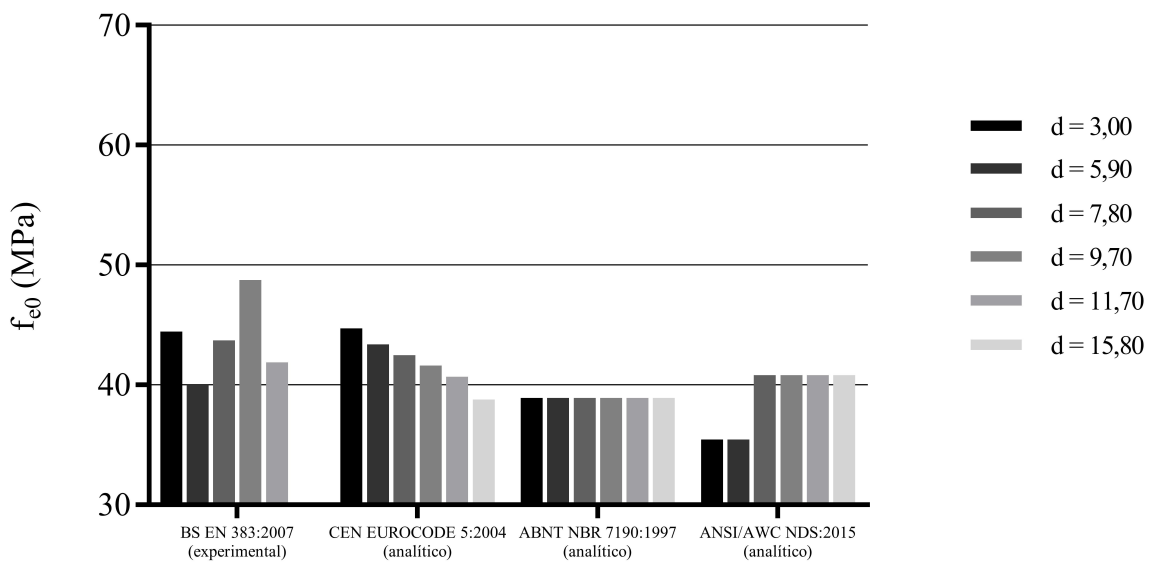
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 40 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie Itaúba



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 41 – Resultados experimentais e estimados de f_{e0} para a espécie *Pinus elliottii*



Fonte: Autoria própria (2018).

Para todas as espécies avaliadas na direção paralela às fibras, nota-se que a resistência ao embutimento (f_{e0}) avaliada experimentalmente varia conforme o diâmetro do pino metálico utilizado. Ademais, verifica-se uma tendência decrescente na resistência com o aumento de d . Tal comportamento, que é mais evidente para as espécies Caixeta e Garapeira, concorda com os resultados analíticos obtidos pelas equações do CEN EUROCODE 5:2004 e com os resultados experimentais de Ehlbeck e Werner (1992), Smith, Whale e Larsen (1987) e Sawata e Yasumura (2002).

Para a maioria das espécies e diâmetros, verifica-se que as resistências (f_{e0}) obtidas por meio dos ensaios de acordo com o BS EN 383:2007 são maiores que as resistências calculadas por meio da ABNT NBR 7190:1997. Portanto, é prudente dizer que igualar os valores de f_{e0} e f_{c0} subestima a resistência ao embutimento. Também é notável que, quanto menor o diâmetro do pino metálico, mais a norma brasileira subestima a resistência na direção paralela às fibras, conforme indicado na tabela 14.

Tabela 14 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pela ABNT NBR 7190:1997

Espécie	f_{e0} (MPa)	Diâmetro (mm)					
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70	15,80
Caixeta	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	37,39	35,55	35,80	34,96	32,12	30,45
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	30,72	30,72	30,72	30,72	30,72	30,72
	(2)/(1)	82%	86%	86%	88%	96%	101%
Cedrinho	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	45,43	42,62	43,11	42,37	45,72	40,05
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	39,76	39,76	39,76	39,76	39,76	39,76
	(2)/(1)	88%	93%	92%	94%	87%	99%
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	54,00	62,54	54,76	48,56	48,42	34,67
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	47,53	47,53	47,53	47,53	47,53	47,53
	(2)/(1)	88%	76%	87%	98%	98%	137%
Grapeira	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	93,04	87,08	83,02	80,60	77,69	71,58
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	72,05	72,05	72,05	72,05	72,05	72,05
	(2)/(1)	77%	83%	87%	89%	93%	101%
Itaúba	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	72,53	72,54	68,15	64,14	59,25	65,60
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64	63,64
	(2)/(1)	88%	88%	93%	99%	107%	97%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	44,44	40,01	43,72	48,76	41,87	-
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	38,92	38,92	38,92	38,92	38,92	-
	(2)/(1)	88%	97%	89%	80%	93%	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Para as espécies Caixeta e Cedrinho, os valores calculados pelo CEN EUROCODE 5:2004 foram maiores que os calculados pela ABNT NBR 7190:1997 para todos os diâmetros. Tal tendência também ocorre para as espécies Itaúba (para diâmetros menores que 11,70 mm) e Pinus elliottii (com exceção do diâmetro igual a 11,70 mm). Para a espécie Eucalipto-grandis, as resistências calculadas por ambas as normas foram aproximadamente iguais. Para a espécie Grapeira, as resistências calculadas pela norma brasileira foram maiores para todos os diâmetros. A espécie Grapeira é exceção porque a relação entre sua resistência à compressão paralela às

fibras (f_{c0}) e sua densidade aparente média (ρ_m) é maior que para as outras espécies. A tabela 15 apresenta as relações entre ambos os parâmetros para as seis espécies avaliadas.

Tabela 15 – Relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente média

Espécie	f_{c0} (MPa) (1)	ρ_m (kg/m^3) (2)	(1)/(2)
Caixeta	30,72	459,69	0,067
Cedrinho	39,76	599,69	0,066
Eucalipto-grandis	47,53	618,30	0,077
Garapeira	72,05	884,81	0,081
Itaúba	63,64	860,08	0,074
Pinus elliottii	38,92	561,91	0,069

Fonte: Autoria própria (2018).

É importante lembrar que a equação da norma europeia utiliza, além da densidade aparente média, o diâmetro do pino metálico (d).

A tabela 16 apresenta a relação entre as resistências obtidas experimentalmente por meio do BS EN 383:2007 e calculadas por meio do CEN EUROCODE 5:2004. Verifica-se que, para a maioria das espécies e diâmetros, os valores calculados pelo CEN EUROCODE 5:2004 são mais próximos dos resultados empíricos que os calculados pela ABNT NBR 7190:1997. Para a espécie Garapeira, os resultados calculados pela norma brasileira são mais próximos dos valores obtidos nos ensaios por causa da relação entre sua resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e sua densidade aparente média (ρ_m), que é maior em relação às outras espécies (tabela 15).

Tabela 16 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pelo CEN EUROCODE 5:2004

Espécie	f_{e0} (MPa)	Diâmetro (mm)					
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70	15,80
Caixeta	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	37,39	35,55	35,80	34,96	32,12	30,45
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	36,59	35,49	34,78	34,06	33,31	31,76
	(2)/(1)	98%	100%	97%	97%	104%	104%
Cedrinho	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	45,43	42,62	43,11	42,37	45,72	40,05
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	47,72	46,30	45,36	44,43	43,44	41,43
	(2)/(1)	105%	109%	105%	105%	95%	103%
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	54,00	62,54	54,76	48,56	48,42	34,67
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	49,16	47,69	46,72	45,76	44,75	42,67
	(2)/(1)	91%	76%	85%	94%	92%	123%
Garapeira	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	93,04	87,08	83,02	80,60	77,69	71,58
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	70,39	68,29	66,91	65,53	64,08	61,10
	(2)/(1)	76%	78%	81%	81%	82%	85%
Itaúba	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	72,53	72,54	68,15	64,14	59,25	65,60
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	68,40	66,36	65,02	63,68	62,27	59,38
	(2)/(1)	94%	91%	95%	99%	105%	91%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	44,44	40,01	43,72	48,76	41,87	-
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	44,70	43,37	42,49	41,61	40,69	-
	(2)/(1)	101%	108%	97%	85%	97%	-

Fonte: A autoria própria (2018).

A tabela 17 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras experimental e calculada por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011) (equação 33), que, assim como a equação do CEN EUROCODE 5:2004, usa como parâmetros a densidade aparente, em kg/m^3 , e o diâmetro do pino metálico, em mm . Para efetuar a comparação com os valores experimentais, foi utilizada a densidade aparente média (ρ_m).

Tabela 17 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011)

Espécie	f_{e0} (MPa)	Diâmetro (mm)					
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70	15,80
Caixeta	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	37,39	35,55	35,80	34,96	32,12	30,45
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	32,88	32,65	32,50	32,35	32,19	31,86
	(2)/(1)	88%	92%	91%	93%	100%	105%
Cedrinho	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	45,43	42,62	43,11	42,37	45,72	40,05
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	42,89	42,59	42,39	42,19	41,99	41,56
	(2)/(1)	94%	100%	98%	100%	92%	104%
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	54,00	62,54	54,76	48,56	48,42	34,67
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	44,18	43,87	43,66	43,46	43,25	42,81
	(2)/(1)	82%	70%	80%	89%	89%	123%
Garapeira	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	93,04	87,08	83,02	80,60	77,69	71,58
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	63,26	62,82	62,53	62,24	61,93	61,30
	(2)/(1)	68%	72%	75%	77%	80%	86%
Itaúba	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	72,53	72,54	68,15	64,14	59,25	65,60
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	61,47	61,04	60,76	60,48	60,18	59,57
	(2)/(1)	85%	84%	89%	94%	102%	91%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	44,44	40,01	43,72	48,76	41,87	-
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	40,17	39,89	39,71	39,52	39,33	-
	(2)/(1)	90%	100%	91%	81%	94%	-

Fonte: Autoria própria (2018).

Apesar da equação proposta por Franke e Quenneville (2011) resultar em valores próximos dos experimentais para vários casos, as resistências obtidas pela equação indicada pelo CEN EUROCODE 5:2004 são mais próximas das obtidas experimentalmente para a maioria dos ensaios.

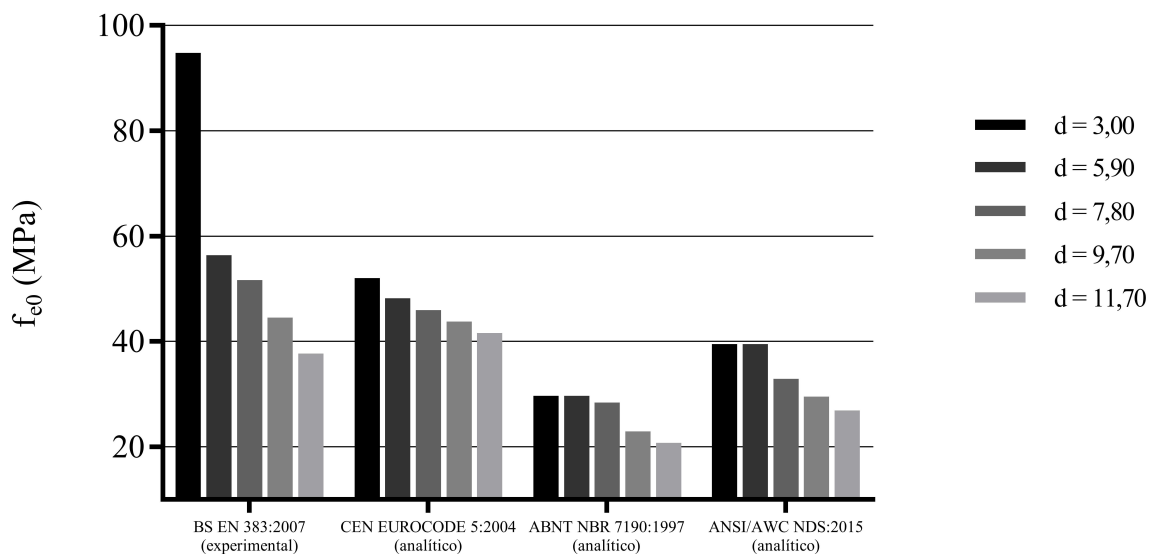
Outro ponto importante de ser observado é a diferença nas resistências estimadas pelas equações recomendadas pela norma americana. Ela define duas equações diferentes, uma para pinos com diâmetros menores que 6,35 mm e outra para maiores, produzindo diferentes valores de resistência estimada. Além disso, de acordo com as equações da ANSI/AWC NDS:2015,

para espécies com valores de G menores ou iguais a 0,62, f_{e0} calculada é menor para diâmetros menores que 6,35 mm do que para diâmetros maiores que 6,35 mm . É o que ocorre com as espécies Caixeta, Cedrinho, Eucalipto-grandis e Pinus elliottii. Para valores de G maiores que 0,62, caso das espécies Garapeira e Itaúba, a tendência se inverte.

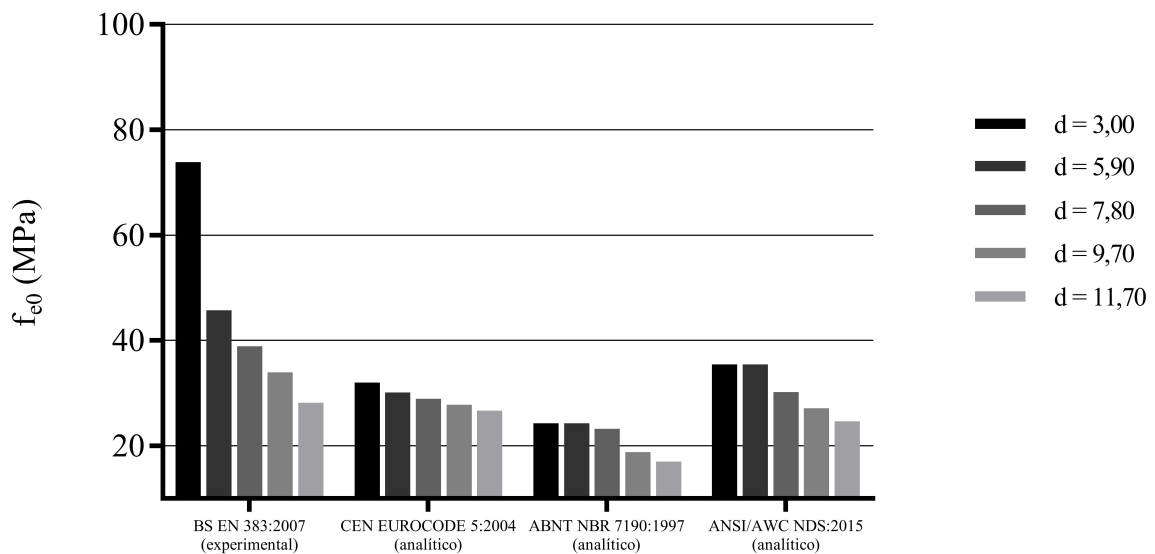
Apesar das diferenças na resistência devido aos valores de G , as equações da norma americana para a direção paralela às fibras não levam em consideração o diâmetro do pino metálico.

As figuras 42 e 43 apresentam os valores médios de f_{e90} obtidos experimentalmente e as resistências estimadas por meio das equações analíticas, em MPa. Cada figura apresenta os resultados para uma das duas espécies avaliadas nessa direção. Cada tonalidade de barra representa um dos seis diâmetros utilizados, em mm .

Figura 42 – Resultados experimentais e estimados de f_{e90} para a espécie Eucalipto-grandis



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 43 – Resultados experimentais e estimados de f_{e90} para a espécie *Pinus elliottii*

Fonte: Autoria própria (2018).

Para ambas as espécies avaliadas na direção perpendicular às fibras, nota-se que f_{e90} experimental decresce com o aumento de d . Tal tendência concorda com as equações indicadas pelo CEN EUROCODE 5:2004 e com os resultados obtidos por Ehlbeck e Werner (1992).

Nota-se também que f_{e90} é menor que f_{e0} para a maioria dos diâmetros das duas espécies avaliadas em ambas as direções, conforme indicado na tabela 18.

Tabela 18 – Relação entre as resistências ao embutimento experimentais na direção paralela e perpendicular às fibras

Espécie		Diâmetro (mm)				
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	f_{e0} (1)	54,00	62,54	54,76	48,56	48,42
	f_{e90} (2)	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
	(2)/(1)	175%	90%	94%	92%	78%
Pinus elliottii	f_{e0} (1)	44,44	40,01	43,72	48,76	41,87
	f_{e90} (2)	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
	(2)/(1)	166%	114%	89%	70%	67%

Fonte: Autoria própria (2018).

Para a espécie *Eucalipto-grandis*, somente f_{e90} ensaiada com pino metálico de 3,00 mm foi superior à f_{e0} . Para a espécie *Pinus elliottii*, apenas os diâmetros de 3,00 e 5,90 mm resultaram em valores de f_{e90} maiores que f_{e0} .

Por meio tabela 18, nota-se também que a relação entre f_{e90} e f_{e0} diminui com o aumento de d para quase todos os casos. Tal resultado é o mesmo obtido Ehlbeck e Werner (1992), que

concluíram que a disparidade entre as resistências em ambas as direções é maior para diâmetros maiores.

Para as duas espécies e todos os diâmetros analisados, verifica-se que as resistências (f_{e90}) obtidas por meio dos ensaios de acordo com o BS EN 383:2007 são maiores que as resistências calculadas por meio da ABNT NBR 7190:1997. Diferentemente de f_{e0} , f_{e90} estimada pela ABNT NBR 7190:1997 decresce com o aumento de d para diâmetros acima de 6,20 mm devido ao coeficiente α_e , que multiplica f_{c0} . Para diâmetros menores ou iguais a 6,20 mm, o coeficiente α_e é constante e com valor igual a 2,50.

Ademais, de modo análogo aos resultados obtidos na direção paralela às fibras, quanto menor o diâmetro do pino metálico, mais a norma brasileira subestima a resistência na direção perpendicular às fibras. A tabela 19 indica a relação entre as resistências ensaiadas por meio do método da norma BS EN 383:2007 e calculadas pela norma brasileira.

Tabela 19 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pela ABNT NBR 7190:1997

Espécie	f_{e90} (MPa)	Diâmetro (mm)				
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	29,70	29,70	28,40	22,93	20,79
	(2)/(1)	31%	53%	55%	51%	55%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
	ABNT NBR 7190:1997 (calculada) (2)	24,32	24,32	23,25	18,78	17,03
	(2)/(1)	33%	53%	60%	55%	60%

Fonte: Autoria própria (2018).

Para ambas as espécies e todos os diâmetros avaliados, os valores de f_{e90} calculados por meio documento normativo CEN EUROCODE 5:2004 foram superiores aos valores calculados pela ABNT NBR 7190:1997.

A tabela 20 apresenta a relação entre as resistências obtidas experimentalmente por meio do BS EN 383:2007 e calculadas por meio do CEN EUROCODE 5:2004 para a direção perpendicular às fibras. Verifica-se que, para todas as espécies e diâmetros avaliados, os valores calculados pelo CEN EUROCODE 5:2004 são mais próximos dos resultados experimentais que os calculados pela ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 20 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras ensaiadas pelo BS EN 383:2007 e calculadas pelo CEN EUROCODE 5:2004

Espécie	f_{e90} (MPa)	Diâmetro (mm)				
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	52,02	48,24	45,94	43,77	41,61
	(2)/(1)	55%	86%	89%	98%	110%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
	CEN EUROCODE 5:2004 (calculada) (2)	32,04	30,15	28,96	27,83	26,67
	(2)/(1)	43%	66%	74%	82%	95%

Fonte: Autoria própria (2018).

A tabela 21 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras experimental e calculada por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011) (equação 33), que, assim como a equação do CEN EUROCODE 5:2004, usa como parâmetros a densidade aparente, em kg/m^3 , e o diâmetro do pino metálico, em mm . Para efetuar a comparação com os valores experimentais, foi utilizada a densidade aparente média (ρ_m). Além disso, por ser na direção perpendicular às fibras, Franke e Quenneville (2011) indicam a equação 20 para o cálculo de f_{e90} , com k_{90} igual a 2,0 para a espécie avaliada *Radiata pine*. No entanto, como foram realizados ensaios com outras espécies, utilizou-se o k_{90} calculado de acordo com a indicação do CEN EUROCODE 5:2004 (equações 23 e 24).

Tabela 21 – Relação entre as resistências ao embutimento na direção perpendicular às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Franke e Quenneville (2011)

Espécie	f_{e90} (MPa)	Diâmetro (mm)				
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	46,75	44,38	42,93	41,57	40,21
	(2)/(1)	49%	79%	83%	93%	107%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
	Franke e Quenneville (2011) (calculada) (2)	28,80	27,73	27,07	26,43	25,78
	(2)/(1)	39%	61%	70%	78%	91%

Fonte: Autoria própria (2018).

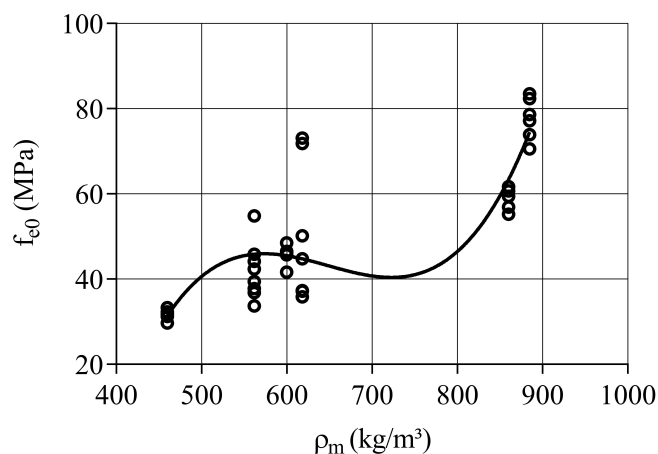
Os valores de f_{e90} obtidos pela equação do CEN EUROCODE 5:2004 foram mais próximos dos obtidos experimentalmente do que os calculados pela equação proposta por Franke e Quenneville (2011) para quase todos os diâmetros das duas espécies avaliadas nessa direção.

O documento normativo ANSI/AWC NDS:2015 também fornece duas equações distintas para o cálculo de f_{e90} . Para diâmetros menores que $6,35 \text{ mm}$, a equação é idêntica para o cálculo da resistência tanto na direção paralela quanto perpendicular às fibras. Por isso, os valores estimados para os pinos metálicos com diâmetros iguais a $3,00$ e $5,90 \text{ mm}$ são idênticos para ambas as direções. Ademais, dentre as três equações fornecidas pela norma americana, apenas a utilizada para estimar f_{e90} para d maior ou igual a $6,35 \text{ mm}$ fornece valores que decrescem com o aumento do diâmetro do pino.

7.2 Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e densidade aparente

As figuras 44 e 45 apresentam a relação entre a densidade aparente média (ρ_m) e f_{e0} e f_{e90} , respectivamente. Para avaliar a tendência, foram inseridos, em ambos os gráficos, os resultados dos ensaios realizados com diâmetro de pino metálico igual a $11,70 \text{ mm}$. As equações foram indicadas nos gráficos para mostrar a correlação entre f_e e ρ_m , mas não podem ser utilizadas para prever a resistência ao embutimento.

Figura 44 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e densidade aparente média para o diâmetro igual a $11,70 \text{ mm}$

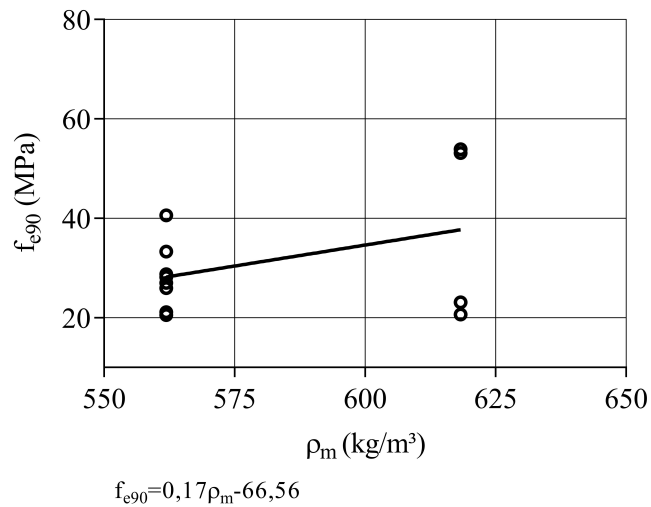


$$f_{e0} = 3,35e-6\rho_m^3 - 6,52e-3\rho_m^2 + 4,17\rho_m - 833,30$$

$$R^2 = 0,75$$

Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 45 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e densidade aparente média para o diâmetro igual a 11,70 mm



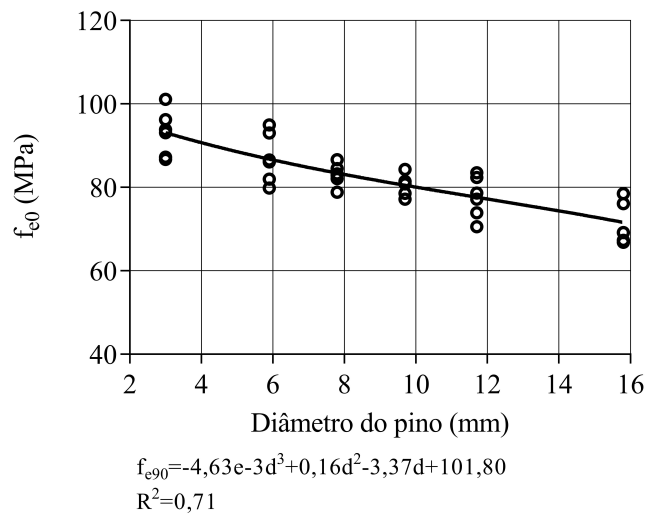
Fonte: Autoria própria (2018).

É evidente que a resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras aumenta com o aumento da densidade aparente da madeira para o diâmetro analisado. Tais resultados concordam com as conclusões de Ehlbeck e Werner (1992), Sawata e Yasumura (2002) e com as equações indicadas pelo CEN EUROCODE 5:2004. Ademais, a mesma tendência é verificada para os outros diâmetros de pino metálico.

7.3 Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e diâmetro do pino metálico

A figura 46 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, em MPa, e o diâmetro de pino metálico, em mm. Para avaliar a tendência, inseriu-se em um gráfico todos os resultados dos ensaios com a espécie Garapeira na direção paralela às fibras.

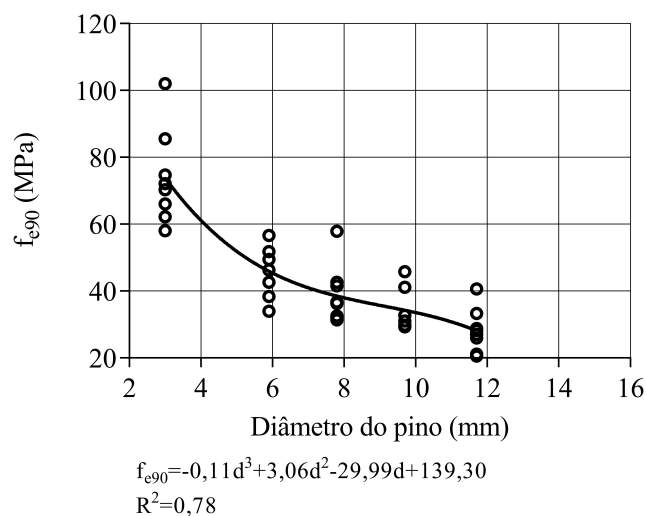
Figura 46 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e diâmetro do pino metálico para a espécie Garapeira



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 47 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras, em MPa, e o diâmetro de pino metálico, em *mm*. Para avaliar a tendência, inseriu-se em um gráfico todos os resultados dos ensaios com a espécie *Pinus elliottii* na direção perpendicular às fibras.

Figura 47 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e diâmetro do pino metálico para a espécie *Pinus elliottii*



Fonte: Autoria própria (2018).

É notável que, para as duas espécies analisadas, nas direções paralela e perpendicular às fibras, há tendência de decréscimo da resistência ao embutimento com o aumento do diâmetro

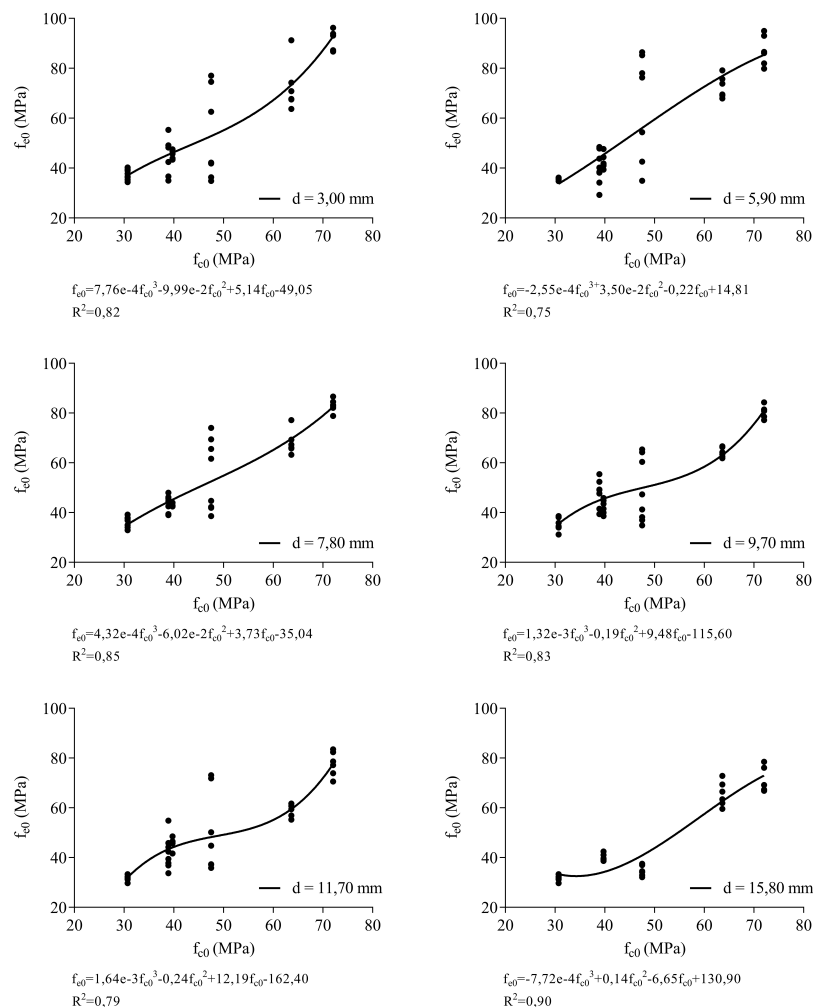
do pino metálico utilizado. A tendência é a mesma obtida por Ehlbeck e Werner (1992), Smith, Whale e Larsen (1987) e Sawata e Yasumura (2002). Além disso, a mesma tendência é verificada para as outras espécies ensaiadas.

As equações foram indicadas nos gráficos para mostrar a correlação entre f_e e d , mas não podem ser utilizadas para prever a resistência ao embutimento.

7.4 Comparação entre os valores de resistência ao embutimento e resistência à compressão paralela às fibras

A figura 48 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras para todos os diâmetros de pino metálico avaliados.

Figura 48 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras

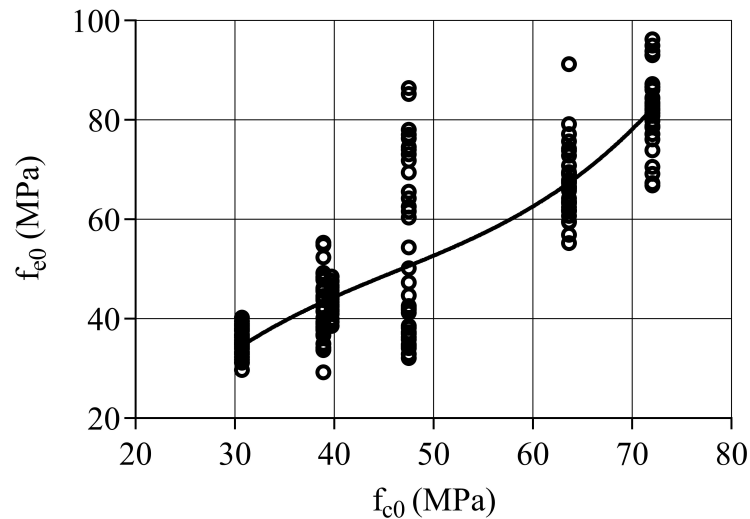


Fonte: Autoria própria (2018).

É evidente que há correlação entre os valores de f_{e0} e f_{c0} . Ademais, nota-se que há tendência de aumento de f_{e0} com o aumento de f_{c0} , o que concorda com os resultados experimentais obtidos por Trayer (1932), Kuipers e Vermeyden (1965), Larsen e Sorensen (1973), Rammer e Winistorfer (2001) e Sawata e Yasumura (2002).

A figura 49 apresenta a relação entre f_{e0} e f_{c0} agrupando os ensaios com todos os diâmetros de pino metálico em um mesmo gráfico. Como esperado, nota-se que há tendência de aumento de f_{e0} com o aumento de f_{c0} .

Figura 49 – Comparação entre a resistência ao embutimento paralela às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras para todos os diâmetros avaliados



$$f_{e0} = 6,76e-4f_{c0}^3 - 9,35e-2f_{c0}^2 + 5,12f_{c0} - 54,15$$

$$R^2 = 0,76$$

Fonte: Autoria própria (2018).

As equações foram indicadas nos gráficos para mostrar a correlação entre f_{e0} e f_{c0} , mas não podem ser utilizadas para prever a resistência ao embutimento.

A tabela 22 apresenta os valores de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras calculados por meio das equações propostas por diversos autores (equações 7, 8, 9, 10 e 11). Todos propuseram equações para estimar f_{e0} a partir do valor de f_{c0} .

Tabela 22 – Valores de resistência ao embutimento paralela às fibras calculados pelas equações propostas

Espécie	f_{e0} (MPa)	Autores	f_{e0} (MPa)
Caixeta	30,72	Trayer (1932)	19,66
		Kuipers e Vermeyden (1965)	24,43
		Larsen e Sorensen (1973)	21,50
		Rammer e Winistorfer (2001)	25,35
		Sawata e Yasumura (2002)	27,65
Cedrinho	39,76	Trayer (1932)	25,45
		Kuipers e Vermeyden (1965)	29,86
		Larsen e Sorensen (1973)	27,83
		Rammer e Winistorfer (2001)	29,31
		Sawata e Yasumura (2002)	35,78
Eucalipto-grandis	47,53	Trayer (1932)	30,42
		Kuipers e Vermeyden (1965)	34,52
		Larsen e Sorensen (1973)	33,27
		Rammer e Winistorfer (2001)	32,72
		Sawata e Yasumura (2002)	42,78
Garapeira	72,05	Trayer (1932)	46,11
		Kuipers e Vermeyden (1965)	49,23
		Larsen e Sorensen (1973)	50,44
		Rammer e Winistorfer (2001)	43,45
		Sawata e Yasumura (2002)	64,85
Itaúba	63,64	Trayer (1932)	40,73
		Kuipers e Vermeyden (1965)	44,18
		Larsen e Sorensen (1973)	44,55
		Rammer e Winistorfer (2001)	39,77
		Sawata e Yasumura (2002)	57,28
Pinus elliottii	38,92	Trayer (1932)	24,91
		Kuipers e Vermeyden (1965)	29,35
		Larsen e Sorensen (1973)	27,24
		Rammer e Winistorfer (2001)	28,94
		Sawata e Yasumura (2002)	35,03

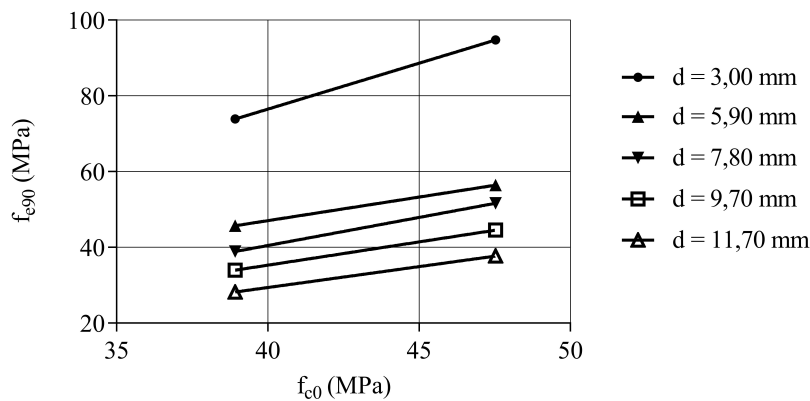
Fonte: Autoria própria (2018).

Além de não levar em consideração o diâmetro do pino metálico, as equações propostas pelos autores fornecem valores de f_{e0} menores que os calculados por meio da equação da ABNT NBR 7190:1997, que iguala f_{e0} e f_{c0} . Além disso, as equações propostas subestimam f_{e0} para quase todos os diâmetros de todas as espécies avaliadas. A equação proposta por Sawata e Yasumura (2002) é a que gera valores de f_{e0} mais próximos dos obtidos experimentalmente pelo BS EN 383:2007.

A figura 50 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras. Como apenas duas espécies foram avaliadas na

direção perpendicular às fibras (*Eucalypto-grandis* e *Pinus elliottii*), optou-se por agrupar todos os diâmetros avaliados em apenas um gráfico. A fim de facilitar a leitura, também optou-se por mostrar apenas o valor médio de resistência ao embutimento em vez dos valores de cada ensaio, como na figura 48.

Figura 50 – Comparação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2018).

Assim como na direção paralela às fibras, também é notável que há correlação entre os valores de f_{e90} e f_{c0} . Ademais, nota-se que há tendência de aumento de f_{e90} com o aumento de f_{c0} , o que concorda com os resultados experimentais de Sawata e Yasumura (2002). Além disso, f_{e90} decresce com o aumento de d , tal como indicado pela equação proposta por Sawata e Yasumura (2002) (equação 12).

A tabela 23 apresenta a relação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras obtida experimentalmente e a calculada por meio da equação 12, proposta por Sawata e Yasumura (2002). Para isso, utilizou-se f_{c0} obtida experimentalmente e os diâmetros dos pinos metálicos, em *mm*. Todas as resistências apresentadas na tabela 23 estão em MPa.

Tabela 23 – Relação entre a resistência ao embutimento perpendicular às fibras obtida experimentalmente e por meio da equação proposta por Sawata e Yasumura (2002)

Espécie	f_{e90} (MPa)	Diâmetro (mm)				
		3,00	5,90	7,80	9,70	11,70
Eucalipto-grandis	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	94,75	56,42	51,64	44,54	37,70
	Sawata e Yasumura (2002) (calculada) (2)	33,13	30,92	29,48	28,03	26,51
	(2)/(1)	35%	55%	57%	63%	70%
Pinus elliottii	BS EN 383:2007 (experimental) (1)	73,87	45,70	38,88	33,96	28,19
	Sawata e Yasumura (2002) (calculada) (2)	27,13	25,32	24,14	22,96	21,71
	(2)/(1)	37%	55%	62%	68%	77%

Fonte: Autoria própria (2018).

Verifica-se que a equação proposta do Sawata e Yasumura (2002) subestima f_{e90} para a maioria das espécies e diâmetros avaliados. Também é notável que, quanto maior o valor de d , mais próximos ficam os valores de f_{e90} experimental e f_{e90} estimada pela equação proposta por Sawata e Yasumura (2002). Tal tendência é explicada pelo fato dos autores terem utilizado diâmetros maiores (8, 12, 16 e 20 mm) nos seus ensaios.

7.5 Análise dos modos de falha dos ensaios de embutimento

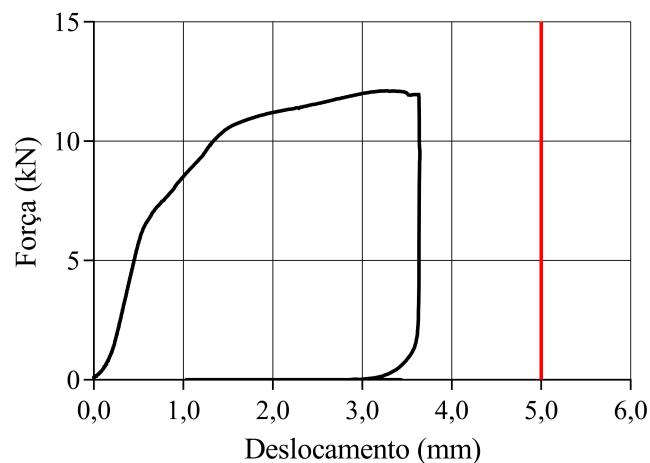
7.5.1 Descrição dos modos de falha obtidos nos ensaios

De acordo com o documento normativo BS EN 383:2007, a resistência ao embutimento (f_e) é dada por meio da relação entre a força que causa deslocamento relativo de 5 mm (convencional) entre o corpo de prova e o pino metálico (F_{5mm}) ou a máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{máx}$) e a área de contato entre o pino e a madeira. Portanto, a força de embutimento (F_e) é obtida a partir do diagrama de força de embutimento x deslocamento.

A partir dos ensaios de embutimento realizados, foi possível distinguir três tipos de modos de falha, nomeados arbitrariamente de modo de falha 1, 2 e 3. No primeiro, a força máxima é obtida para um deslocamento inferior a 5 mm e o corpo de prova não atinge o deslocamento limite convencional até o fim do ensaio. No segundo, a força máxima também é obtida para um deslocamento inferior a 5 mm, mas o corpo de prova atinge o deslocamento limite convencional até o fim do ensaio. No terceiro, por sua vez, a força máxima é obtida para um deslocamento de 5 mm e o corpo de prova atinge deslocamentos maiores que o limite convencional.

A figura 51, que representa o modo de falha 1, mostra o diagrama de força de embutimento x deslocamento obtido para um ensaio com a espécie Itaúba, na direção paralela às fibras e com um diâmetro de 9,70 mm. Nota-se que a força máxima foi obtida com um deslocamento de aproximadamente 3,4 mm. Além disso, o corpo de prova não atingiu o deslocamento limite convencional de 5 mm.

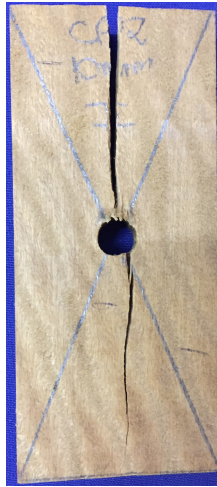
Figura 51 – Comportamento característico do modo de falha 1



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 52 apresenta o corpo de prova ensaiado da espécie Itaúba referente ao gráfico da figura 51. A partir da análise visual do CP, observa-se que a força máxima foi atingida antes do deslocamento convencional devido ao surgimento de fissuras (*splitting*) nas regiões acima e abaixo do parafuso. Tal modo de ruptura também foi descrito por Rammer (2001) em seus ensaios na direção paralela às fibras. No entanto, nem sempre há o surgimento de fissuras para o modo de falha 1.

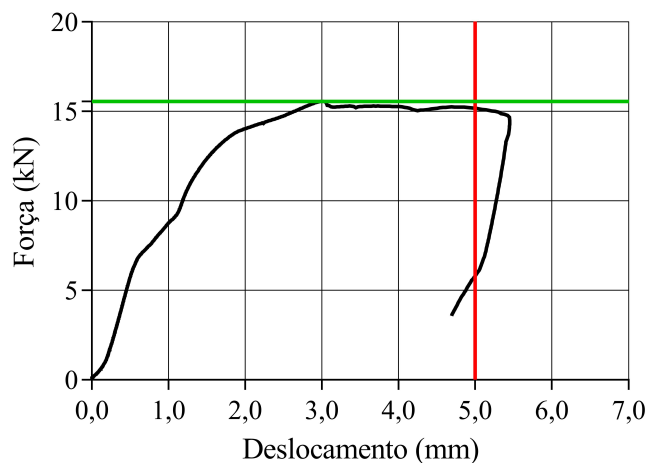
Figura 52 – Corpo de prova ensaiado da espécie Itaúba, na direção paralela às fibras e diâmetro de 9,70 mm (modo de falha 1)



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 53, que representa o modo de falha 2, mostra o diagrama de força de embutimento x deslocamento obtido para um ensaio com a espécie Garapeira, na direção paralela às fibras e com um diâmetro de 9,70 mm. Para esse ensaio, a força máxima foi obtida com um deslocamento de aproximadamente 3,0 mm. No entanto, diferentemente do modo de falha 1, o corpo de prova ultrapassa o deslocamento limite convencional de 5 mm.

Figura 53 – Comportamento característico do modo de falha 2



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 54 apresenta o corpo de prova ensaiado da espécie Garapeira referente ao gráfico da figura 53. Nota-se que o modo de falha 2 é caracterizado pelo esmagamento localizado (*bearing*) na região do pino metálico por compressão. Ademais, percebe-se que, para esse CP,

surgiu uma pequena fissura na região do pino. No entanto, isso não é comum para o modo de falha 2.

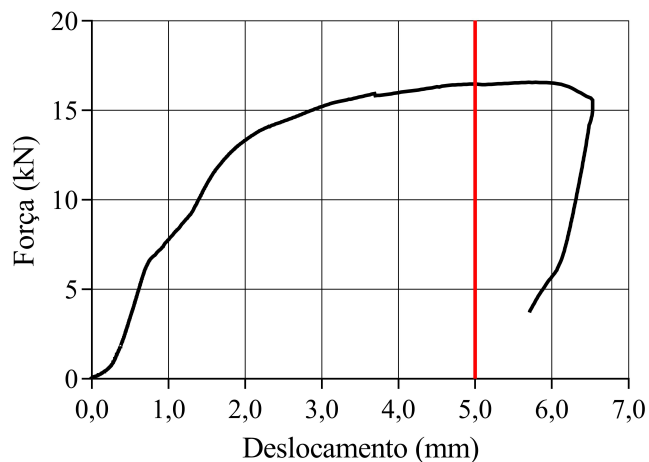
Figura 54 – Corpo de prova ensaiado da espécie Garapeira, na direção paralela às fibras e diâmetro de $9,70\text{ mm}$ (modo de falha 2)



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 55, que representa o modo de falha 3, mostra o diagrama de força de embutimento x deslocamento obtido para um ensaio com a espécie Caixeta, na direção paralela às fibras e com um diâmetro de $15,80\text{ mm}$. Para esse ensaio, o corpo de prova atingiu um deslocamento de aproximadamente $6,4\text{ mm}$. Entretanto, conforme a indicação da norma BS EN 383:2007, a força máxima adotada é a que causa deslocamento igual a 5 mm .

Figura 55 – Comportamento característico do modo de falha 3



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 56 apresenta o corpo de prova ensaiado da espécie Caixeta referente ao gráfico da figura 55. Nota-se que houve considerável esmagamento localizado (*bearing*) na região do pino metálico por compressão. Esse modo de ruptura também foi descrito por Rammer (2001) em seus ensaios na direção paralela às fibras.

Figura 56 – Corpo de prova ensaiado da espécie Caixeta, na direção paralela às fibras e diâmetro de 15,80 *mm* (modo de falha 3)



Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 57 apresenta um corpo de prova da espécie Eucalipto-grandis ensaiado na direção perpendicular às fibras e com diâmetro igual a 3,00 *mm*. Por meio da análise visual do CP, percebe-se que houve um pequeno esmagamento localizado (*bearing*) na região do pino metálico por compressão. Tal modo de ruptura também foi descrito por Rammer (2001).

Figura 57 – Corpo de prova ensaiado da espécie Eucalipto-grandis, na direção perpendicular às fibras e diâmetro de 3,00 *mm* (modo de falha 3)

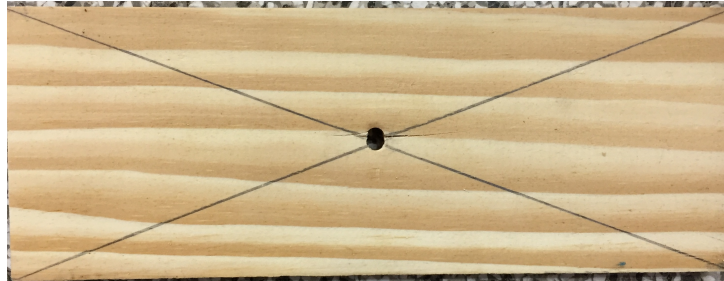


Fonte: Autoria própria (2018).

A figura 58 apresenta um corpo de prova da espécie Pinus elliottii ensaiado na direção perpendicular às fibras e com diâmetro igual a 9,70 *mm*. Por meio da análise visual do CP,

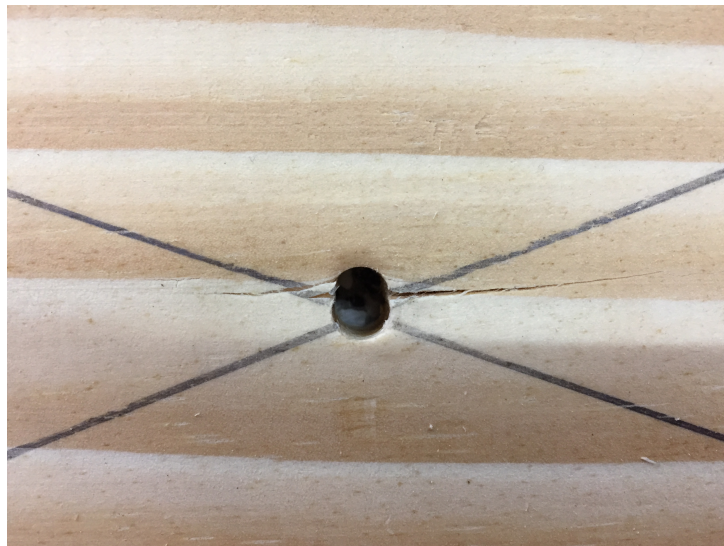
nota-se o surgimento de fissuras (*peeling*) na região do pino metálico. A figura 59 mostra o aparecimento das fissuras em detalhe.

Figura 58 – Corpo de prova ensaiado da espécie *Pinus elliottii*, na direção perpendicular às fibras e diâmetro de 9,70 mm (modo de falha 3)



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 59 – Detalhe do aparecimento de fissuras (*peeling*)

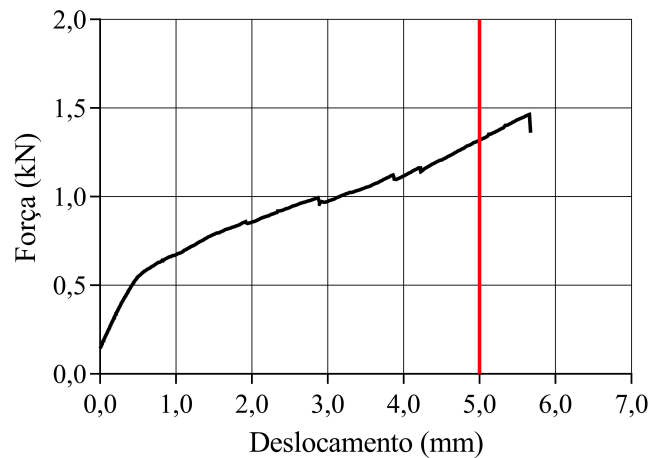


Fonte: Autoria própria (2018).

Rammer (2001) descreveu o modo de ruptura (*peeling*) como o surgimento de fissuras na lateral do corpo de prova ensaiado na direção perpendicular às fibras. Entretanto, no CP das figuras 58 e 59, as fissuras surgiram na região do pino metálico. A diferença pode ser explicada porque o autor utilizou a norma de ensaio ASTM D5764 (*half hole*) em vez da norma europeia (BS EN 383:2007).

A figura 60 apresenta o diagrama de força de embutimento x deslocamento para um ensaio com a espécie *Pinus elliottii*, na direção perpendicular às fibras e com um diâmetro de 3,00 mm.

Figura 60 – Comportamento característico dos ensaios na direção perpendicular às fibras



Fonte: Autoria própria (2018).

Nota-se que a força máxima foi obtida com o deslocamento limite convencional de 5 *mm* (modo de falha 3). Além disso, é evidente que o comportamento da curva é diferente dos ensaios na direção paralela às fibras. O diagrama apresenta, nesse caso, um trecho de plastificação com ganho de resistência considerável (*hardening behaviour*). Tal comportamento também foi constatado por Sawata e Yasumura (2002) e Franke e Magnière (2014) e ocorreu para a maioria dos ensaios na direção perpendicular às fibras.

7.5.2 Análise da incidência dos modos de falha obtidos nos ensaios de embutimento

As tabelas 24 e 25 apresentam, em porcentagem, a incidência dos modos de falha nos ensaios realizados nas direções paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, para cada um dos seis diâmetros avaliados.

Tabela 24 – Incidência dos modos de falha para ensaios na direção paralela às fibras

Diâmetro (mm)	Número de ensaios	Modo de falha		
		1	2	3
3,00	39	46%	26%	28%
5,90	42	17%	33%	50%
7,80	42	24%	43%	33%
9,70	42	24%	33%	43%
11,70	42	10%	24%	66%
15,80	31	16%	10%	74%

Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 25 – Incidência dos modos de falha para ensaios na direção perpendicular às fibras

Diâmetro (mm)	Número de ensaios	Modo de falha		
		1	2	3
3,00	16	31%	0%	69%
5,90	16	31%	0%	69%
7,80	16	19%	0%	81%
9,70	12	0%	0%	100%
11,70	12	0%	0%	100%

Fonte: Autoria própria (2018).

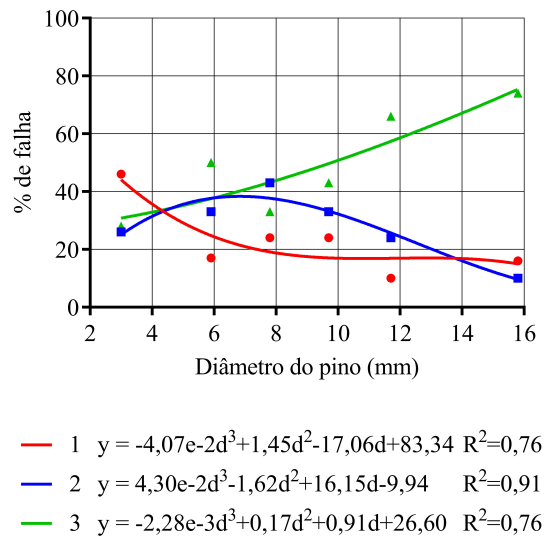
Para os ensaios de embutimento na direção paralela às fibras, nota-se que há uma maior incidência do modo de falha 3 em diâmetros maiores. Ademais, para o menor diâmetro avaliado, houve maior incidência do modo de falha 1. Como o parafuso de 3,00 *mm* é muito fino, houve maior ocorrência de surgimento de fissuras na região próxima ao pino (*splitting*). Tal modo de ruptura está associado, na maioria das vezes, ao modo de falha 1. Para o diâmetro de 7,80 *mm*, houve maior incidência do modo de falha 2. Para os quatro menores diâmetros, a força máxima foi atingida, na maior parte dos corpos de prova, para deslocamentos menores que 5 *mm*, conforme indicado por Leijten, Köhler e Jorissen (2004).

Para os ensaios de embutimento na direção perpendicular às fibras, houve maior incidência do modo de falha 3 para todos os diâmetros avaliados. Tais resultados concordam com a constatação de Leijten, Köhler e Jorissen (2004). Para os dois maiores diâmetros avaliados, todos os corpos de prova romperam com o modo de falha 3. De todos os ensaios na direção perpendicular às fibras, nenhum rompeu com o modo de falha 2.

Para ambas as direções, a maioria dos ensaios com diâmetros maiores atingiram deslocamentos superiores ao convencional de 5 *mm* (modo de falha 3).

A figura 61 apresenta a incidência de cada modo de falha, em porcentagem, pelo diâmetro de pino metálico (*d*) para os ensaios realizados na direção paralela às fibras.

Figura 61 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação ao diâmetro do pino

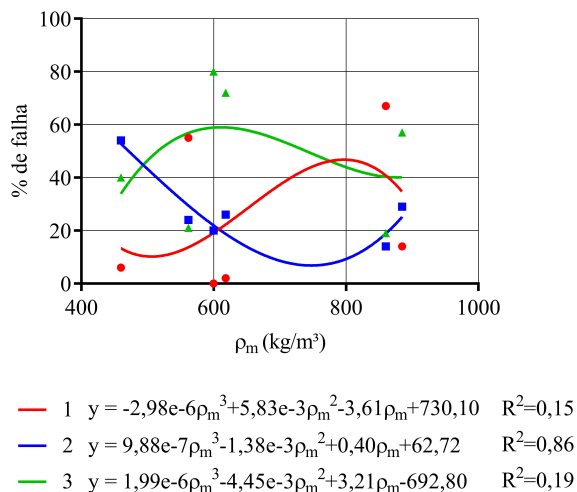


Fonte: Autoria própria (2018).

É evidente que há correlação entre o diâmetro do pino metálico e o respectivo modo de falha. Para diâmetros menores, há maior tendência de ocorrer o modo de falha 1. Para diâmetros intermediários, há maior tendência de ocorrer o modo de falha 2. Já para diâmetros maiores, há maior tendência de ocorrer o modo de falha 3.

A figura 62 apresenta a incidência de cada modo de falha, em porcentagem, pela densidade aparente média (ρ_m) da madeira para os ensaios realizados na direção paralela às fibras.

Figura 62 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação à densidade aparente média

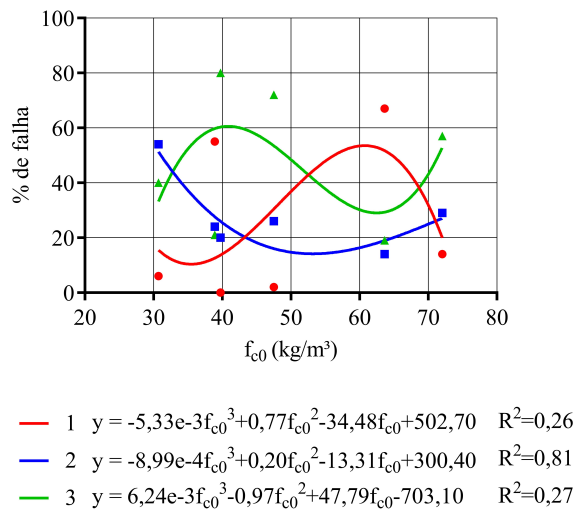


Fonte: Autoria própria (2018).

Nota-se que não há correlação entre a ρ da madeira e o modo de falha obtido no ensaio de embutimento.

A figura 63 apresenta a incidência de cada modo de falha, em porcentagem, pela resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) para os ensaios realizados na direção paralela às fibras.

Figura 63 – Incidência dos modos de falha nos ensaios realizados na direção paralela às fibras em relação à resistência à compressão paralela às fibras

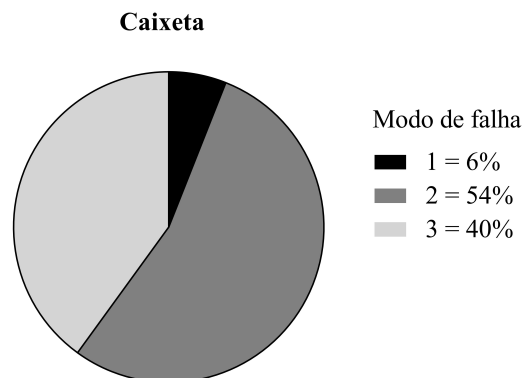


Fonte: Autoria própria (2018).

Nota-se que não há correlação entre f_{c0} da madeira e o modo de falha obtido no ensaio de embutimento.

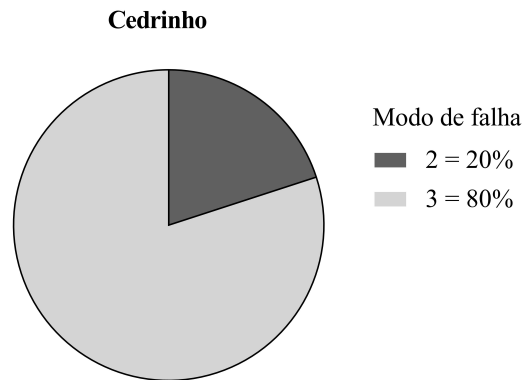
As figuras 64 a 69 apresentam a incidência dos modos de falha para as seis espécies avaliadas na direção paralela às fibras.

Figura 64 – Incidência dos modos de falha para a espécie Caixeta ensaiada na direção paralela às fibras



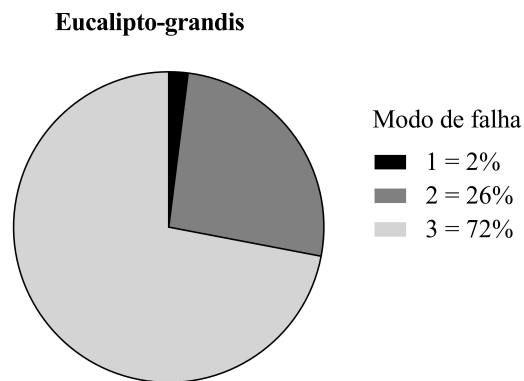
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 65 – Incidência dos modos de falha para a espécie Cedrinho ensaiada na direção paralela às fibras



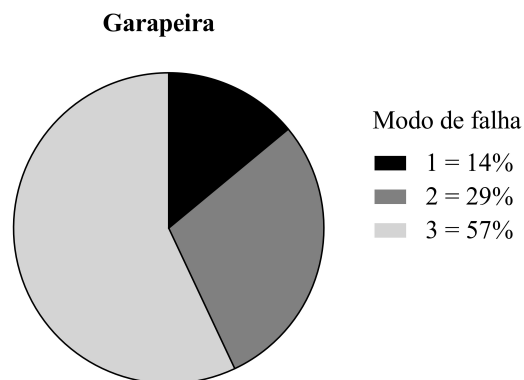
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 66 – Incidência dos modos de falha para a espécie Eucalpto-grandis ensaiada na direção paralela às fibras



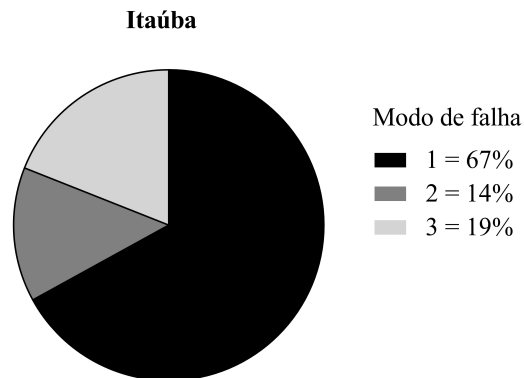
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 67 – Incidência dos modos de falha para a espécie Garapeira ensaiada na direção paralela às fibras



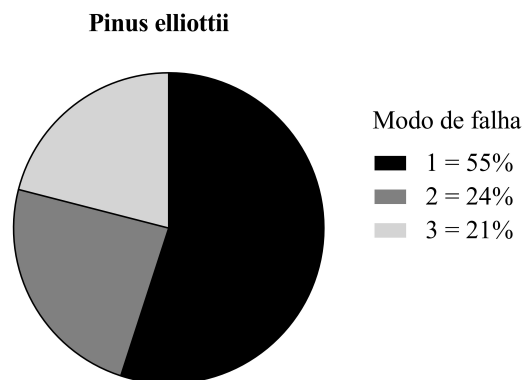
Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 68 – Incidência dos modos de falha para a espécie Itaúba ensaiada na direção paralela às fibras



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 69 – Incidência dos modos de falha para a espécie Pinus elliottii ensaiada na direção paralela às fibras

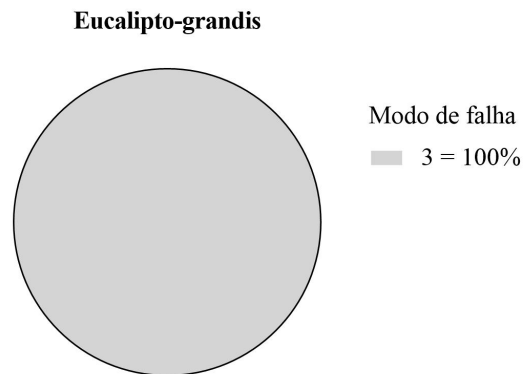


Fonte: Autoria própria (2018).

Com base na incidência dos modos de falha para cada madeira avaliada, percebe-se que a espécie Itaúba possui maior tendência para a ocorrência do modo de falha 1 dentre as seis espécies. Isso ocorre devido à alta ocorrência de fissuração (*splitting*) para a espécie, conforme pode ser observado por meio da análise visual dos corpos de prova ensaiados. Tal comportamento pode explicar as resistências ao embutimento menores em relação à espécie Garapeira, apesar de ambas possuírem densidades aparentes próximas. O Pinus elliottii é a segunda espécie com maior incidência do modo de falha 1. Apesar disso, não há grande incidência de fissuração. As espécies Caixeta, Cedrinho e Eucalipto-grandis, por outro lado, apresentaram pequena incidência do modo de falha 1. A espécie Cedrinho apresentou a maior incidência do modo de falha 3 (deslocamento limite convencional).

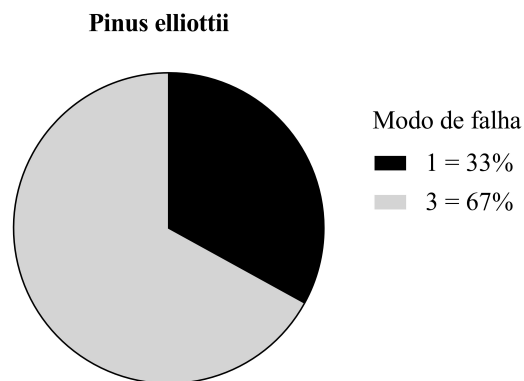
As figuras 70 e 71 apresentam a incidência dos modos de falha para as duas espécies avaliadas na direção perpendicular às fibras.

Figura 70 – Incidência dos modos de falha para a espécie *Eucalipto-grandis* ensaiada na direção perpendicular às fibras



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 71 – Incidência dos modos de falha para a espécie *Pinus elliottii* ensaiada na direção perpendicular às fibras



Fonte: Autoria própria (2018).

Conforme já mencionado, nenhuma das duas espécies avaliadas na direção perpendicular às fibras apresentaram o modo de falha 2. Ademais, para a espécie *Eucalipto-grandis*, houve somente incidência do modo de falha 3 (deslocamento limite convencional). Por meio dos resultados da incidência dos modos de falha para as espécies *Eucalipto-grandis* e *Pinus elliottii*, que foram ensaiadas nas direções paralela e perpendicular às fibras, percebe-se que a direção de análise também influencia nos modos de falha obtidos.

O modo de falha é característica intrínseca de cada espécie, e não tem correlação com a densidade aparente ou resistência à compressão paralela às fibras. Ademais, o modo de falha também é influenciado pelo diâmetro do pino metálico.

8 Conclusões

A resistência da madeira ao embutimento é um fenômeno complexo que depende de diversos fatores, dentre eles o diâmetro do pino metálico utilizado na ligação e a densidade aparente média, bem como outras características intrínsecas da madeira.

Os resultados dos ensaios indicaram que a resistência ao embutimento em ambas as direções paralela e perpendicular às fibras avaliada experimentalmente decresce com o aumento do diâmetro do pino metálico. Ademais, a resistência da madeira ao embutimento aumenta com o aumento da densidade aparente e com o aumento da resistência à compressão paralela às fibras da madeira para ambas as direções avaliadas.

Os valores de resistência ao embutimento obtidos experimentalmente por meio do BS EN 383:2007 foram maiores que as resistências calculadas por meio ABNT NBR 7190:1997 para a maioria dos ensaios realizados. Também é evidente que, quanto menor o diâmetro do pino metálico, mais a norma brasileira subestima a resistência ao embutimento.

Para a maioria dos diâmetros avaliados, a resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras foi menor que na direção paralela às fibras para as espécies avaliadas. No entanto, para os dois diâmetros menores, a resistência perpendicular às fibras foi superior à paralela. Portanto, é importante a realização de mais estudos para avaliar o embutimento da madeira com diâmetros menores que 6 *mm*.

Os ensaios de embutimento realizados de acordo com o documento normativo europeu BS EN 383:2007 resultaram em três tipos de modo de falha. No primeiro, a força máxima é obtida para um deslocamento inferior a 5 *mm* e o corpo de prova não atingiu o deslocamento limite convencional até o fim do ensaio. No segundo, a força máxima também é obtida para um deslocamento inferior a 5 *mm*, mas o corpo de prova atinge o deslocamento limite convencional antes da ruptura completa. No terceiro, por fim, a força máxima é obtida para um deslocamento de 5 *mm* e o corpo de prova atinge deslocamentos maiores que o limite convencional imposto pelo documento normativo europeu.

Para diâmetros menores, há maior ocorrência do modo de falha 1. Para diâmetros intermediários, há maior incidência do modo de falha 2. Já para diâmetros maiores, o modo de falha 3 ocorre na maioria dos ensaios. Além do diâmetro do pino metálico, algumas características intrínsecas de cada espécie de madeira e a direção de análise em relação às fibras influenciam no modo de falha obtido nos ensaios. Também é evidente que a densidade aparente e a resistência à

compressão paralela às fibras não possuem correlação com o modo de falha obtido nos ensaios de embutimento.

As equações para o cálculo da resistência ao embutimento indicadas pelo documento normativo ANSI/AWC NDS:2015 não forneceram valores próximos dos obtidos experimentalmente. Ademais, a norma americana para o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras não possui como parâmetro o diâmetro do pino metálico.

Os resultados experimentais também indicam que, ao menos para as espécies avaliadas, o modelo analítico europeu (CEN EUROCODE 5:2004), com sua respectiva metodologia de ensaio (BS EN 383:2007), é mais adequado que o atual modelo da norma brasileira (ABNT NBR 7190:1997) para avaliar a resistência ao embutimento.

Referências

- ALMEIDA, D. H.; DIAS, A. A. Comparison between test methods to determine wood embedment strength parallel to the grain. *Revista Árvore*, v. 40, n. 4, p. 741–748, 2016. ISSN 1806-9088.
- ALMEIDA, P. A. O. *Uniões pregadas de madeira*. 174 p. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D5764 - 97a - Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products*. West Conshohocken, PA, 2013.
- ANSI/AWC. *NDS: National design specification for wood construction*. Washington, D.C., 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997.
- AUNE, P.; PATTON-MALLORY, M. *Lateral load-bearing capacity of nailed joints based on the yield theory*. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper (FPL-469). Madison, 1986.
- BLASS, H. J. *Timber engineering. Step 1: Basis of design, material properties, structural components and joints*. Holanda: Centrum Hout, 1995.
- BRITISH STANDARD. *EN 383: Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*. Bruxelas, 2007.
- CALIL, C. J.; LARH, F. A. R.; DIAS, A. A. *Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira*. Barueri: Manole, 2003. ISBN 85-204-1515-6.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. *EUROCODE 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. Bruxelas, 2004.
- DUARTE, R. d. S. *Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC*. 228 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- EHLBECK, J.; WERNER, H. Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners. In: CIB-W18. Åhus, Suécia, 1992.
- FAHLBUSCH, H. *A contribution to the problem of the bearing strength of bolts in wood under static loads*. Institute for Mechanical Construction and Carpentry, Technical School Braunschweig, Report 49-09, Brunsvique, 1949.
- FOREST PRODUCT LABORATORY. *Wood Handbook - wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190*. Madison, 2010.
- FRANKE, S.; MAGNIÈRE, N. Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behavior of connections. In: INTERNATIONAL NETWORK ON TIMBER ENGINEERING RESEARCH - INTER/47-7-1. Bath, Reino Unido, 2014.

FRANKE, S.; MAGNIÈRE, N. The embedment failure of european beech compared to spruce wood and standards. In: *Materials and Joints in Timber Structures*. [S.l.]: Springer Netherlands, 2014. p. 221–229.

FRANKE, S.; QUENNEVILLE, P. Bolted and dowelled connections in Radiata pine and laminated veneer lumber using the european yield model. *Australian Journal of Structural Engineering*, v. 12, n. 1, p. 13–27, 2011.

HÜBNER, U. Embedding strength of european hardwoods. In: CIB-W18. St. Andrews, Canadá, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *4016 – Hexagon head bolts – Product grade C*. Berlim, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *898-1 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread*. Berlim, 2013.

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

KOPONEN, S. *Embedding characteristics of wood in the grain direction*. Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Helsinki University of Technology. Hensinque, 1991.

KUIPERS, J.; VERMEYDEN, P. The ratio between strength and allowable loads on timber joints. In: *International Symposium on Joints in Timber Structures*. Londres: [s.n.], 1965.

LARSEN, H. J.; SORENSEN, E. Joints with conical steel pins. In: *IUFRO-5 Meeting*. África do Sul: [s.n.], 1973. v. 2, p. 661–671.

LEIJTEN, A.; KÖHLER, J.; JORISSEN, A. Review of probability data for timber connections with dowel-type fasteners. In: CIB-W18. Edinburgh, Reino Unido, 2004.

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*, SciELO Brasil, v. 70, n. 1, p. 9–17, 2017.

OLIVEIRA, M. A. M. *Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira*. 137 p. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PFEIL, W.; PFEIL, M. *Estruturas de Madeira*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 978-85-216-1385-5.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. *Structural Timber Design to Eurocode 5*. [S.l.]: Blackwell, 2007. ISBN 978-14051-4638-8.

RAMMER, D. R. *Effect of moisture content on nail bearing strength*. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Reserarch 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.

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

SILVA, J. J. *Avaliação experimental da resistência de ligações em corte duplo em madeira com parafusos passantes*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

SMITH, I.; WHALE, L. R. J. The influence of orientation of mechanical joints on their mechanical behaviour. In: CIB-W18. St. Andrews, Canadá, 1985.

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

SMITH, I.; WHALE, L. R. J.; LARSEN, H. J. Design of nailed and bolted joints proposals for the revision of the existing formulae in draft eurocode 5 and the cib code. In: CIB-W18. Dublin, Irlanda, 1987.

SOLTIS, L. A.; HUBBARD, F. K.; WILKINSON, T. L. Bearing strength of bolted timber joints. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 112, n. 9, p. 2141–2154, 1986.

STAMATO, G. C.; CALIL, C. J. Resistência ao embutimento da madeira compensada. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, n. 18, p. 49–76, 2002.

STANDARDS AUSTRALIA. *AS1720.1-2010 Timber Structures - Part 1: Design methods*. Sydney, Austrália, 2002.

STANDARDS NEW ZEALAND. *NZS 3603:1993 Timber Structures Standard*. Wellington, Nova Zelândia, 1993.

TRAYER, G. W. *The bearing strength of wood under bolts*. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Technical Bulletin 332. Madison, 1932.

WILKINSON, T. L. *Dowel bearing strength*. [S.l.]: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. v. 505.

WINISTORFER, S. G. Validation of the european yield model for nailed connections. In: STRUCTURES CONGRESS. *American Society of Civil Engineers*. Atlanta, 1994.

XU, B. et al. Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners. *Journal of wood science*, Springer, v. 59, n. 1, p. 17–23, 2013.