

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

FELIPE PENAZZO JOHANNIS

**Avaliação de parâmetros de resistência e de rigidez para o
dimensionamento de ligações com parafusos passantes em
estruturas de madeira**

SÃO CARLOS

2020

FELIPE PENAZZO JOHANNNS

Avaliação de parâmetros de resistência e de rigidez para o dimensionamento de ligações com parafusos passantes em estruturas de madeira

VERSÃO CORRIGIDA

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

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

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

SÃO CARLOS

2020

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

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

J65a Johanns, Felipe Penazzo
 Avaliação de parâmetros de resistência e de rigidez para o dimensionamento de ligações com parafusos passantes em estruturas de madeira / Felipe Penazzo Johns; orientador Antonio Alves Dias. São Carlos, 2020.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

 1. Ligações parafusadas. 2. Efeito de corda. 3. Módulo de deslizamento. 4. Resistência ao embutimento.
 I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **FELIPE PENAZZO JOHANNIS**.

Título da dissertação: "Avaliação de parâmetros de resistência e de rigidez para o dimensionamento de ligações com parafusos passantes em estruturas de madeira".

Data da defesa: 06/04/2020

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Antonio Alves Dias**
(Orientador)

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

APROVADO

Prof. Dr. **André Luis Christoforo**

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **Jorge Luís Nunes de Góes**

(Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR)

APROVADO

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

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

- Ao professor Antonio Alves Dias, pelos valorosos ensinamentos, excelente orientação e amizade.
- Ao professor Francisco Antonio Rocco Lahr, pelas contribuições e amizade.
- Aos professores André Luis Christoforo e Jorge Luís Nunes de Góes, pela participação na banca de defesa da dissertação.
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial aos funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM).
- À minha esposa Bianca, pela dedicação e companheirismo. Seu auxílio foi de fundamental importância para a conclusão deste trabalho.
- Aos meus pais e irmã, pelo apoio e incentivo.
- À todos os amigos que fiz na Escola de Engenharia de São Carlos.
- À Capes e ao CNPq.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

JOHANNIS, F. P. **Avaliação de parâmetros de resistência e de rigidez para o dimensionamento de ligações com parafusos passantes em estruturas de madeira.** 2020. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A revisão da ABNT NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira encontra-se em fase de conclusão, e o critério de dimensionamento de ligações com parafusos passantes apresentado no texto do projeto de norma foi baseado no modelo de cálculo utilizado pelo Eurocode 5. Nesse contexto, foram avaliados experimentalmente alguns dos parâmetros envolvidos no dimensionamento desse tipo de ligação: resistência ao embutimento nas direções paralela e perpendicular as fibras da madeira, ganho de resistência proveniente do uso de porcas e arruelas (efeito de corda) e módulo de deslizamento. As resistências ao embutimento na direção paralela às fibras de dez espécies folhosas brasileiras (Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo, Eucalipto grandis, Goiabão e Roxinho) foram determinadas experimentalmente para três diâmetros de pino diferentes (10 mm, 12,5 mm e 16 mm), e os resultados obtidos foram comparados aos estimados por meio do projeto de revisão. O mesmo foi realizado para direção perpendicular às fibras, em que seis espécies foram estudadas (Caucho, Caroba, Catuaba, Catanudo, Goiabão e Roxinho). Protótipos de ligação confeccionados a partir das espécies Caixeta e Roxinho foram testados para parafusos com 10 mm e 12,5 mm de diâmetro. Os testes foram conduzidos para protótipos com e sem porcas e arruelas, possibilitando avaliar o ganho de resistência associado ao uso de tal artifício. Com relação a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras das espécies Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo, Eucalipto grandis, a análise estatística indicou que existem diferenças entre os valores estimados e os valores obtidos experimentalmente. Contudo, notou-se que ambos apresentavam boa concordância, sobretudo para as espécies de menor densidade: Paricá, Caixeta, Caucho e Caroba. No caso das espécies Goiabão e Roxinho, foram observados resultados conservadores. No que diz respeito à resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras, os valores teóricos foram inferiores aos experimentais para as espécies Caucho, Caroba e Catuaba, e conservadores para as espécies Catanudo, Goiabão e Roxinho. Para os protótipos de ligação, foram observados resultados conservadores quanto à segurança estrutural no caso de Estados Limites Últimos. Quanto ao módulo de deslizamento, os resultados experimentais obtidos para a espécie Caixeta foram sempre inferiores aos

previstos pelo critério da proposta de norma, enquanto que para a espécie Roxinho, os valores estimados foram sempre inferiores aos experimentais.

Palavras-chave: Ligações parafusadas. Efeito de corda. Módulo de deslizamento. Resistência ao embutimento.

ABSTRACT

JOHANNIS, F. P. **Evaluation of resistance and stiffness parameters for the design of bolted connections in timber structures**. 2020. 65 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

The revision of ABNT NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira is nearing conclusion, and the design criteria of bolted connections was based on Eurocode 5. In this context, parameters related with design of this kind of connection were experimentally evaluated: parallel and perpendicular embedment strength, resistance gain from the use of nuts and washers (rope effect) and slip modulus. Parallel embedment strength of ten Brazilian hardwood species (Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo, Eucalipto grandis, Goiabão e Roxinho) were experimentally determined for three bolt diameters (10 mm, 12.5 mm and 16 mm), and the results were compared to those estimated by the standard proposal. The same was done for the perpendicular direction for six timber species (Caucho, Caroba, Catuaba, Catanudo, Goiabão e Roxinho). Connections prototypes were tested for Caixeta and Roxinho species and for 10 mm and 12.5 mm bolt diameters. The tests were carried out for prototyped whose bolts were endowed and non-endowed with nuts and washers, which allowed evaluating the resistance gain from their use. With regard to parallel embedment strength of Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo and Eucalipto grandis species, the statistical analysis indicated that there are differences between estimated and experimental values. However, it was noted a good agreement between both values, especially for lower density species: Paricá, Caixeta, Caucho and Caroba. For Goiabão and Roxinho species, conservative values were observed. With respect to perpendicular embedment strength, theoretical values were lower than experimental ones for Caucho, Caroba and Catuaba species and conservative for Catanudo, Goiabão and Roxinho species. For connection prototypes, conservative values were observed with relation to structural safety in the case of Ultimate Limit States. Regarding to slip modulus, the experimental results for Caixeta specie were lower than theoretical ones, while for Roxinho specie, estimated values were always lower than experimental ones.

Keywords: Bolted connections. Rope effect. Slip modulus. Embedment strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modos de ruptura para situação de corte simples: (a) embutimento do pino na madeira; (b) flexão do pino.	19
Figura 2 – Modos de ruptura para situação de corte duplo: (a) embutimento do pino nas peças externas; (b) embutimento do pino na peça interna; (c) flexão do pino na peça interna; (d) flexão do pino nas peças externas e interna.	20
Figura 3 – Modos de ruptura relativos ao embutimento: (a) embutimento do pino em ambas as peças de madeira; (b) embutimento do pino na peça à esquerda; (c) embutimento do pino na peça à direita.	22
Figura 4 – Modos de ruptura adicionais relativos à flexão do pino: (a) flexão do pino na peça à direita; (b) flexão do pino na peça à esquerda; flexão do pino em ambas as peças.	23
Figura 5 – Espaçamentos mínimos entre os pinos e distâncias mínimas entre os pinos e as bordas dos elementos de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.	28
Figura 6 – Espaçamentos mínimos entre os parafusos e distâncias mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento de acordo com o Eurocode 5:2004.	34
Figura 7 – Comparação entre as resistências ao embutimento teórica e experimental.	35
Figura 8 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Almeida (2014): (a) Jatobá; (b) Cupiúba.	36
Figura 9 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Terrin, Góes e Pletz (2018): (a) Garapeira; (b) Itaúba.	37
Figura 10 – Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras.	44
Figura 11 – Ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras.	45
Figura 12 – Dimensões nominais dos protótipos de ligação em cm.	46
Figura 13 – Ensaio de protótipo de ligação da espécie Roxinho confeccionado para parafusos com diâmetros de 12,5 mm providos de porcas e arruelas.	47
Figura 14 – Valores médios de F_{EXP} e F_{TEO}	59
Figura 15 – Valores médios de $K_{SER,TEO}$ e $K_{SER,EXP}$	61
Figura 16 – Modos de ruptura dos protótipos de ligação: (a) Caixeta, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas; (b) Caixeta, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas; (c) Caixeta, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas; (d) Caixeta, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas; (e) Roxinho, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas; (f) Roxinho, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas; (g) Roxinho, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas; (h) Roxinho, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas.	61

Figura 17 – Fendilhamento dos protótipos de ligação da espécie Roxinho e diâmetro igual a 12,5 mm: sem porcas e arruelas à esquerda e com porcas e arruelas à direita.	62
Figura 18 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Caixeta, d = 10 mm, sem porcas e arruelas.	62
Figura 19 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Caixeta, d = 10 mm, com porcas e arruelas.	63
Figura 20 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Caixeta, d = 12,5 mm, sem porcas e arruelas.	63
Figura 21 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Caixeta, d = 12,5 mm, com porcas e arruelas.	63
Figura 22 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, d = 10 mm, sem porcas e arruelas.	64
Figura 23 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, d = 10 mm, com porcas e arruelas.	64
Figura 24 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, d = 12,5 mm, sem porcas e arruelas.	65
Figura 25 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, d = 12,5 mm, com porcas e arruelas.	65
Figura 26 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Caixeta, d = 10 mm.	66
Figura 27 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Caixeta, d = 12,5 mm.	66
Figura 28 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Roxinho, d = 10 mm.	66
Figura 29 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Roxinho, d = 12,5 mm.	67
Figura 30 – Relação entre densidade aparente e $(f_{h0,TEO} - f_{h0,EXP})$	69
Figura 31 – Relação entre densidade aparente e $(f_{h90,TEO}$ e $f_{h90,EXP})$	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente α_e em função do diâmetro do pino metálico.	27
Tabela 2 – Valores dos espaçamentos mínimos entre os parafusos e distância mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento de acordo com o Eurocode 5:2004.	34
Tabela 3 – Resistências teórica e experimental de ligações com parafusos passantes submetidos a corte duplo.	37
Tabela 4 – Espécies de madeiras folhosas brasileiras empregadas.	41
Tabela 5 – Dimensões das arruelas lisas DIN 440-R.	42
Tabela 6 – Distribuição dos corpos de prova por peça.	43
Tabela 7 – Valor de t_{crit} para um nível de significância igual a 10% (teste t de Student bicaudal).	48
Tabela 8 – Resultados experimentais de f_{c0}	49
Tabela 9 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 10 mm.	50
Tabela 10 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 12,5 mm.	51
Tabela 11 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 16 mm.	52
Tabela 12 – Valores médios de $f_{h0,EXP}$	52
Tabela 13 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 10 mm.	53
Tabela 14 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 12,5 mm.	53
Tabela 15 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 16 mm.	54
Tabela 16 – Valores médios de $f_{h0,TEO}$	54
Tabela 17 – Valores de $f_{h90,EXP}$	55
Tabela 18 – Valores médios de $f_{h90,EXP}$	55
Tabela 19 – Valores de $f_{h90,TEO}$	56
Tabela 20 – Valores médios de $f_{h90,TEO}$	56
Tabela 21 – Caracterização quanto à f_{h0}	57
Tabela 22 – Caracterização quanto à f_{c0}	57
Tabela 23 – Valores de F_{EXP}	58
Tabela 24 – Valores de F_{TEO}	58
Tabela 25 – Valores médios de F_{EXP}	58
Tabela 26 – Valores médios de F_{TEO}	58
Tabela 27 – Valores de $K_{SER,EXP}$	59
Tabela 28 – Valores de $K_{SER,TEO}$	60
Tabela 29 – Valores médios de $K_{SER,EXP}$	60

Tabela 30 – Valores médios de $K_{SER,TEO}$	60
Tabela 31 – Análise estatística de $(f_{h0,TEO} - f_{h0,EXP})$	70
Tabela 32 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 10 mm.....	70
Tabela 33 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 12,5 mm.....	71
Tabela 34 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 16 mm.....	71
Tabela 35 – Análise estatística de $(f_{h90,TEO} - f_{h90,EXP})$	72
Tabela 36 – Relação $f_{h90,TEO}/f_{h90,EXP}$	73
Tabela 37 – Relações F_{TEO}/F_{EXP}	74
Tabela 38 – Análise das diferenças entre os valores de F_{TEO}/F_{EXP} com relação ao uso de porcas e arruelas.....	74
Tabela 39 – Análise das diferença entre os valores de F_{TEO}/F_{EXP} com relação à espécie.	74
Tabela 40 – Relação F_{COM}/F_{SEM}	75
Tabela 41 – Relação $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$	76
Tabela 42 – Análise das diferenças entre os valores de $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$ com relação ao uso de porcas e arruelas.	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 TEORIA INICIAL DESENVOLVIDA POR JOHANSEN (1949)	19
2.2 EXPANSÃO DA TEORIA DE JOHANSEN	21
2.3 ABORDAGEM DA ABNT NBR 7190:1997	25
2.3.1 Resistência ao embutimento da madeira	26
2.3.2 Dimensões de parafusos e arruelas	27
2.3.3 Espaçamentos mínimos e distâncias mínimas até as bordas	28
2.3.4 Número convencional de parafusos	28
2.4 ABORDAGEM DO EUROCODE 5:2004.....	29
2.4.1 Resistência ao embutimento da madeira	31
2.4.2 Momento fletor resistente de parafusos passantes	32
2.4.3 Efeito de corda em parafusos passantes	32
2.4.4 Módulo de deslizamento de parafusos passantes	33
2.4.5 Espaçamentos mínimos e distâncias mínimas até as bordas	33
2.4.6 Ligações com mais de um parafuso	34
2.5 ESTUDOS RELACIONADOS	35
2.6 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
3.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA.....	42
3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO NA DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DA MADEIRA	44
3.5 ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO.....	45
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	47
4 RESULTADOS OBTIDOS	49
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS).....	49
4.2 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS).....	50

4.3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS) .	54
4.4 EFEITO DE CORDA E MÓDULO DE DESLIZAMENTO	57
5 ANÁLISES E DISCUSSÕES	69
5.1 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS).....	69
5.2 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS) .	71
5.3 CAPACIDADE RESISTENTE DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO	73
5.4 MÓDULO DE DESLIZAMENTO DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO.....	75
6 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Por serem regiões submetidas a esforços localizados, as ligações possuem fundamental importância na segurança estrutural e, por esse motivo, necessitam de atenção especial.

No que diz respeito às ligações realizadas com parafusos passantes, é estabelecido no Eurocode 5:2004 – *Design of timber structures* modos de ruptura relacionados à resistência ao embutimento da madeira e ao momento resistente do pino metálico. Além disso, quando a ruptura ocorre por meio da flexão de parafusos metálicos cujas extremidades encontram-se ancoradas por meio de porcas e arruelas, um efeito de segunda ordem denominado efeito de corda manifesta-se na ligação, elevando sua resistência.

Como o projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, atualmente em fase de conclusão, teve seus critérios de dimensionamento de ligações baseados no Eurocode 5:2004, estudos direcionados à determinação da aplicabilidade do modelo de cálculo proposto pela norma europeia no âmbito das espécies de madeiras brasileiras tornam-se relevantes, sobretudo em relação às expressões advindas de análises experimentais. Nesse ponto, ressalta-se que muitas espécies de madeiras brasileiras apresentam densidade e resistência muito superiores às de madeiras europeias.

Com base no exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar parâmetros como resistência ao embutimento da madeira e módulo de deslizamento de ligações realizadas entre peças de madeira por meio de parafusos passantes, os quais são estimados pelo Eurocode 5:2004 por meio de equações advindas de análises experimentais. A contribuição da parcela de resistência proveniente do efeito de corda também foi avaliada.

1.1 JUSTIFICATIVA

O modelo de dimensionamento de ligações realizadas com parafusos passantes apresentado no Eurocode 5:2004 foi adotado pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997. No entanto, as espécies de madeiras utilizadas na Europa possuem densidade e resistência que diferem das apresentadas por várias espécies de madeiras brasileiras.

Nota-se, portanto, que estudos direcionados a avaliar a aplicabilidade dos critérios estabelecidos pela norma europeia, como é o caso desta proposta, são necessários, pois parâmetros como resistência ao embutimento e módulo de deslizamento são estimados por meio de equações advindas de análises experimentais. Outro aspecto importante diz respeito à parcela

de resistência proveniente do efeito de corda, cuja contribuição pode não ser tão significativa para ligações realizadas com as espécies de madeiras existentes no Brasil.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é investigar experimentalmente parâmetros de dimensionamento de ligações parafusadas adotados pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997, como a resistência ao embutimento, o efeito de corda e o módulo de deslizamento.

Para tanto, os objetivos específicos listados a seguir devem ser atingidos.

- Determinar experimentalmente a resistência ao embutimento de espécies de madeiras folhosas brasileiras nas direções paralela e perpendicular às fibras;
- Comparar as estimativas de resistência ao embutimento obtidas por meio das equações do Eurocode 5 com os valores experimentais;
- Determinar experimentalmente a capacidade de carga de protótipos de ligação confeccionados com parafusos providos e desprovidos de porcas e arruelas;
- Comparar os valores experimentais de capacidade de carga das ligações com os valores teóricos calculados com o critério de dimensionamento do Eurocode 5;
- Determinar experimentalmente o módulo de deslizamento dos protótipos de ligação;
- Comparar os valores teóricos estimados por meio do Eurocode 5 com os valores experimentais obtidos;
- Caracterizar as espécies de madeiras empregadas quanto a densidade e resistência à compressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

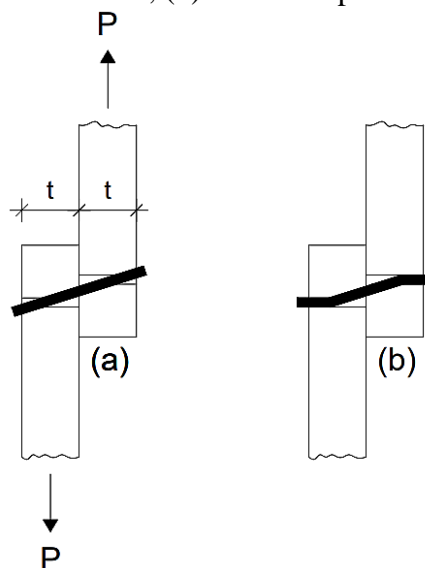
Haja vista que a proposta desse trabalho possui relação com o uso de parafusos passantes nas uniões entre elementos de madeira, os itens subsequentes possuem a finalidade de trazer ao corpo do texto os estudos pertinentes ao tema e as recomendações normativas das normas ABNT NBR 7190:1997 e Eurocode 5:2004.

2.1 TEORIA INICIAL DESENVOLVIDA POR JOHANSEN (1949)

O modelo de cálculo utilizado atualmente pela norma europeia para estimar a capacidade de carga de ligações entre peças de madeira realizadas por meio de pinos metálicos está fundamentado sobre o estudo desenvolvido inicialmente por Johansen (1949). A teoria proposta prevê modos de ruptura governados pela resistência ao embutimento da madeira e pelo momento resistente do conector.

Quando o pino metálico apresenta rigidez suficiente para que o esgotamento da capacidade resistente da ligação se dê por meio de seu embutimento nas peças de madeira, o modo de ruptura associado a situação de corte simples ocorre conforme mostrado na Figura 1 (a). Por outro lado, em situações onde o pino metálico possui menor rigidez, a ruptura da ligação pode ocorrer através da formação de rótulas plásticas ao longo do conector, como ilustrado na Figura 1 (b).

Figura 1 – Modos de ruptura para situação de corte simples: (a) embutimento do pino na madeira; (b) flexão do pino.



Fonte: adaptado de Johansen (1949).

No caso (a), considera-se que o pino metálico não deforma, e a força máxima (P) associada ao modo de ruptura em questão é calculada por meio da Equação 1. A força máxima relativa ao caso (b), por sua vez, pode ser calculada por meio da Equação 2, em que Johansen (1949) admite um comportamento perfeitamente plástico da madeira e o momento resistente do pino metálico é referente ao limite elástico do material.

$$P = (\sqrt{2} - 1) f_h t d \quad (1)$$

$$P = \frac{d^2}{4} \sqrt{\pi f_h f_y} \quad (2)$$

Em que:

f_h : resistência ao embutimento da madeira;

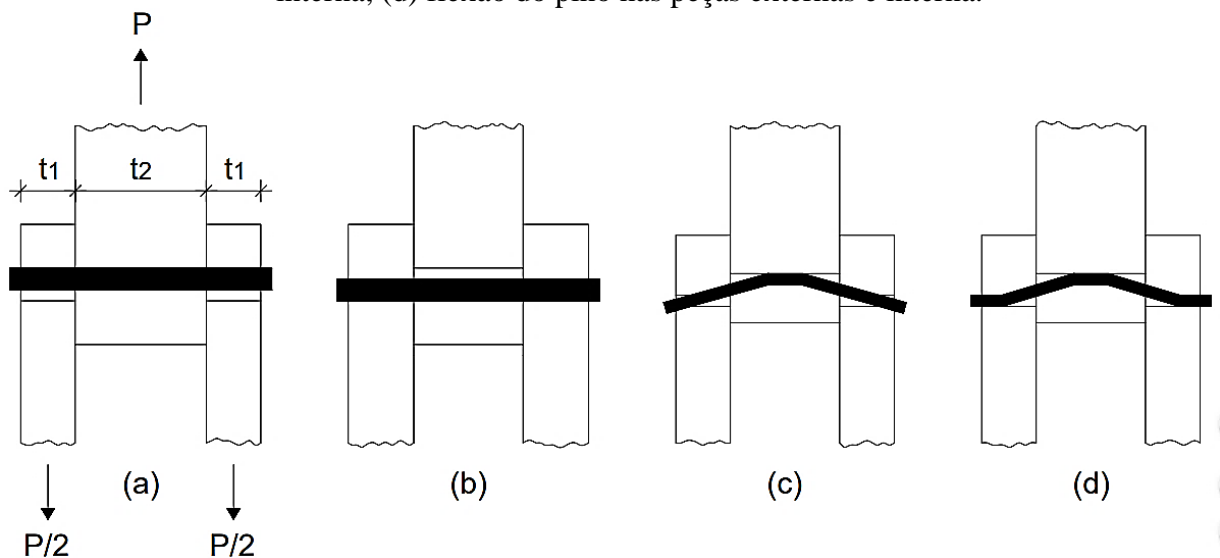
f_y : resistência ao escoamento do pino metálico;

t : espessura dos elementos de madeira;

d : diâmetro do pino metálico.

Para situações de corte duplo, Johansen (1949) considera quatro modos de ruptura. Os casos (a) e (b) da Figura 2 representam o esgotamento da capacidade resistente ocasionado pelo embutimento do conector nas peças de madeira, e os casos (c) e (d) estão associados à flexão do pino metálico.

Figura 2 – Modos de ruptura para situação de corte duplo: (a) embutimento do pino nas peças externas; (b) embutimento do pino na peça interna; (c) flexão do pino na peça interna; (d) flexão do pino nas peças externas e interna.



Fonte: adaptado de Johansen (1949).

As forças máximas relativas aos modos de ruptura (a), (b), (c) e (d) apresentados na Figura 2 podem ser calculadas por meio das Equações 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

$$P = 2 f_h t_1 d \quad (3)$$

$$P = f_h t_2 d \quad (4)$$

$$P = \frac{2 f_h d t_1}{3} \left(\sqrt{4 + \frac{3\pi f_y d^2}{8 f_h t_1^2}} - 1 \right) \quad (5)$$

$$P = \frac{d^2}{2} \sqrt{\pi f_h f_y} \quad (6)$$

Em que:

t_1 : espessura dos elementos externos de madeira;

t_2 : espessura do elemento interno de madeira;

Inicialmente, a teoria elaborada por Johansen (1949) não contemplava a elaboração de ligações com peças de madeira que apresentassem diferentes resistências ao embutimento.

Além disso, no caso de parafusos, o confinamento gerado pelas porcas e arruelas introduz uma parcela adicional de resistência que, embora tenha sido mencionada pelo autor, não foi abordada de forma aprofundada em seu trabalho. Tal fenômeno manifesta-se após o escoamento do pino metálico, pois os deslocamentos assumem valores significativos e um esforço de tração surge ao longo do conector, elevando a capacidade de carga da ligação. Trata-se, portanto, de um efeito de segunda ordem proveniente da não linearidade do problema.

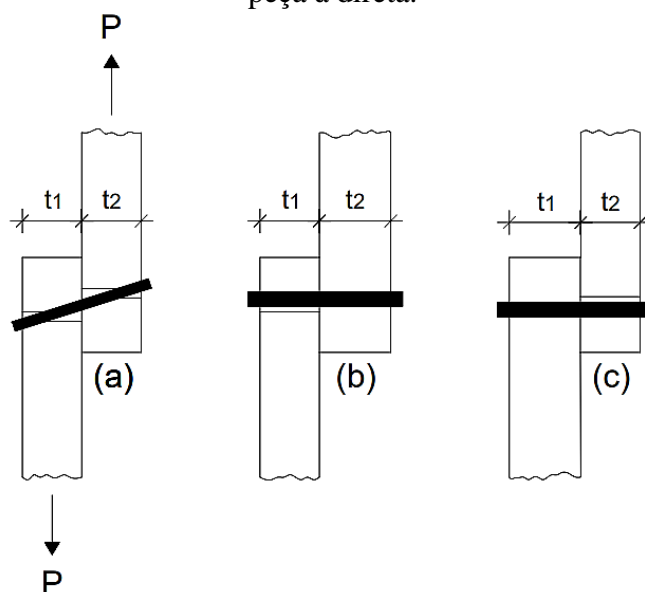
2.2 EXPANSÃO DA TEORIA DE JOHANSEN

Tendo em vista as limitações da teoria inicial proposta por Johansen (1949), Möller¹ (1951 *apud* Meyer, 1957) estendeu a abrangência do método, tornando possível a utilização de peças de madeira com diferentes resistências ao embutimento para compor uma mesma ligação.

Em situações de corte simples, o autor considera que a falha por embutimento pode ocorrer de acordo com os modos de ruptura (a), (b) e (c), ilustrados na Figura 3.

¹ MÖLLER, T.(1950). En ny metod för beräkning av spikförband (New method of estimating the bearing strength of nailed wood connections). Sweden, Transaction of Chalmers University of Technology, Report N° 117.

Figura 3 – Modos de ruptura relativos ao embutimento: (a) embutimento do pino em ambas as peças de madeira; (b) embutimento do pino na peça à esquerda; (c) embutimento do pino na peça à direita.



Fonte: adaptado de Johansen (1949).

As forças máximas associadas aos modos de ruptura (a), (b) e (c) apresentados na Figura 3 podem ser calculadas por intermédio das Equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$P = \frac{f_{h,1} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (7)$$

$$P = f_{h,1} t_1 d \quad (8)$$

$$P = f_{h,2} t_2 d \quad (9)$$

Em que:

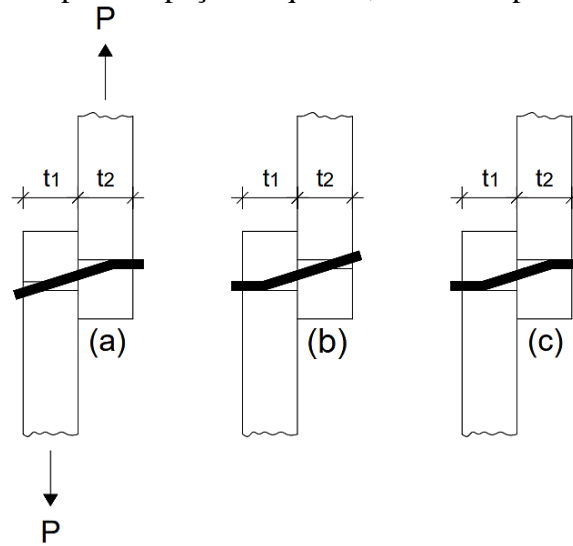
$f_{h,1}$: resistência ao embutimento da peça madeira com espessura t_1 ;

$f_{h,2}$: resistência ao embutimento da peça madeira com espessura t_2 .

A falha da ligação devida à flexão do pino metálico pode ocorrer, segundo Möller² (1951 *apud* Meyer, 1957), de três modos distintos, representados pelos casos (a), (b) e (c) da Figura 4.

² MÖLLER, T.(1950). En ny metod för beräkning av spikförband (New method of estimating the bearing strength of nailed wood connections). Sweden, Transaction of Chalmers University of Technology, Report N° 117.

Figura 4 – Modos de ruptura adicionais relativos à flexão do pino: (a) flexão do pino na peça à direita; (b) flexão do pino na peça à esquerda; flexão do pino em ambas as peças.



Fonte: adaptado de Johansen (1949).

As forças máximas relativas aos casos (a), (b) e (c) mostrados na Figura 4 podem ser calculadas por meio das Equações 10, 11 e 12, respectivamente.

$$P = \frac{f_{h,1} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - \beta \right] \quad (10)$$

$$P = \frac{f_{h,2} t_2 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_y}{f_{h,2} d t_2^2}} - \beta \right] \quad (11)$$

$$P = \sqrt{\frac{2 \beta}{(1 + \beta)}} \sqrt{2 M_y f_{h,1} d} \quad (12)$$

Em que:

M_y : momento resistente do pino metálico.

O parâmetro adimensional β presente nas Equações 7, 10, 11 e 12 representa a relação entre a resistência ao embutimento da peça de madeira com espessura t_1 e a resistência ao embutimento da peça de madeira com espessura t_2 , conforme mostrado na Equação 13.

$$\beta = \frac{f_{h,2}}{f_{h,1}} \quad (13)$$

Destaca-se que, para Möller³ (1951 *apud* Meyer, 1957), o momento resistente do pino metálico é relativo à plastificação total da seção transversal e seu valor pode ser obtido por intermédio da Equação 14.

$$M_y = \frac{f_y d^3}{6} \quad (14)$$

O autor também reescreve a formulação de Johansen (1949) para as situações de corte duplo. As forças máximas referentes aos modos de ruptura (a), (b), (c) e (d) apresentados na Figura 2 podem ser calculadas utilizando-se as Equações 15, 16, 17 e 18, respectivamente.

$$P = 2 f_{h,1} t_1 d \quad (15)$$

$$P = f_{h,2} \cdot t_2 \cdot d \quad (16)$$

$$P = 2 \frac{f_{h,1} d t_1}{2 + \beta} \left(\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_y}{f_{h,1} d t_1^2}} - \beta \right) \quad (17)$$

$$P = 2 \sqrt{\frac{2 \beta}{(1 + \beta)}} \sqrt{2 M_y f_{h,1} d} \quad (18)$$

No tocante aos efeitos de segunda ordem, Meyer (1957) mostrou que as componentes vertical e horizontal da força normal (N) que atuam no pino metálico após a sua flexão conduzem a um acréscimo na resistência da ligação, desde que o conector esteja devidamente ancorado. Enquanto a componente horizontal contribui por meio do atrito gerado entre as peças de madeira, a componente vertical é somada diretamente à capacidade de carga do conjunto, e o acréscimo de resistência (P') é obtido por meio da Equação 19.

$$P' = N \cdot (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha \cdot \mu) \quad (19)$$

Em que:

α : ângulo formado entre o eixo longitudinal do pino metálico e a direção horizontal;

μ : coeficiente de atrito entre as peças de madeira.

³ MÖLLER, T.(1950). En ny metod för beräkning av spikförband (New method of estimating the bearing strength of nailed wood connections). Sweden, Transaction of Chalmers University of Technology, Report N° 117.

2.3 ABORDAGEM DA ABNT NBR 7190:1997

No texto da ABNT NBR 7190:1997, as ligações entre peças de madeira realizadas por meio de pinos metálicos são abordadas por meio de um critério de dimensionamento em que dois modos de ruptura são contemplados: embutimento do conector nas peças de madeira e flexão do pino metálico.

Em situações de corte simples, o valor de cálculo da força máxima (P_d), relativa ao esgotamento da capacidade resistente da ligação por embutimento do pino metálico nas peças de madeira, pode ser estimado por intermédio da Equação 20. Observa-se que, como o critério adotado pela norma brasileira vigente fundamenta-se sobre a teoria inicial desenvolvida por Johansen (1949), a composição de uma ligação com peças de madeira que possuem diferentes resistências ao embutimento não é contemplada de forma direta.

$$P_d = 0,4 \frac{t^2}{\beta} f_{h,d} \quad (20)$$

Em que:

$f_{h,d}$: valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira.

O valor de cálculo da força máxima relativa à falha por flexão do pino metálico é estimado por meio da Equação 21.

$$P_d = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d} \quad (21)$$

Em que:

$f_{y,d}$: valor de cálculo da resistência ao escoamento do pino metálico.

As situações de corte duplo são contempladas no texto da ABNT NBR 7190:1997 através das Equações 20 e 21, assumindo-se, no entanto, que t é o menor valor entre t_1 e $t_2/2$. Nesse caso, a capacidade de carga da ligação é obtida multiplicando-se o valor encontrado por dois.

A ocorrência de cada modo de ruptura está vinculada aos parâmetros β e β_{lim} . Quando β assume valores inferiores a β_{lim} , a falha da ligação ocorre por embutimento do conector na madeira, do contrário a ruptura acontece por flexão do pino metálico.

O parâmetro β é definido com sendo a relação entre a espessura convencional e o diâmetro do pino metálico, conforme mostrado na Equação 22.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (22)$$

O parâmetro β_{lim} pode ser calculado por meio da Equação 23.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{h,d}}} \quad (23)$$

As recomendações normativas relacionadas à estimativa da resistência ao embutimento da madeira, às dimensões de parafusos e arruelas e à ligações realizadas com oito ou mais parafusos serão apresentadas nos tópicos seguintes. Espaçamentos mínimos entre os parafusos e distâncias mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento de madeira também serão abordados.

2.3.1 Resistência ao embutimento da madeira

Conforme apresentado no texto da ABNT NBR 7190:1997, a resistência ao embutimento da madeira deve ser determinada por meio de ensaio padronizado constante no Anexo B dessa mesma norma, em que essa é definida como sendo a razão entre a força que causa uma deformação específica residual de 2 % (F_e) e a área de embutimento (produto entre a espessura do corpo de prova e o diâmetro do pino metálico).

Na impossibilidade de determinação experimental de tal propriedade, podem ser admitidos valores de cálculo aproximados estimados por meio das Equações 24 e 25. Esses valores são calculados em função da resistência à compressão paralela às fibras.

$$f_{h0,d} = f_{c0,d} \quad (24)$$

$$f_{h90,d} = 0,25 f_{c0,d} \alpha_e \quad (25)$$

Em que:

$f_{h0,d}$: valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira na direção paralela às fibras;

$f_{h90,d}$: valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira na direção perpendicular às fibras;

$f_{c0,d}$: valor de cálculo da resistência à compressão da madeira na direção paralela às suas fibras.

A influência que o diâmetro do pino metálico exerce sobre resistência ao embutimento da madeira na direção perpendicular às suas fibras é contabilizada por meio do parâmetro α_c , cujo valor é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores do coeficiente α_c em função do diâmetro do pino metálico.

d (cm)	≤ 0,64	0,95	1,27	1,59	1,91	2,22	2,54	3,18	3,81	4,45	5,08	≥ 7,62
α_c	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.

Por meio da fórmula de Hankinson (Equação 26), é possível estimar a resistência ao embutimento em outras direções.

$$f_{h\theta,d} = \frac{f_{h0,d} f_{h90,d}}{f_{h0,d} \sin^2\theta + f_{h90,d} \cos^2\theta} \quad (26)$$

Em que:

θ : ângulo formado entre a direção da solicitação e às fibras da madeira.

2.3.2 Dimensões de parafusos e arruelas

O diâmetro dos parafusos não pode ser inferior a 10 mm, não devendo, ainda, apresentar valor superior a metade da menor espessura convencional. Além disso, a elaboração de ligações que empreguem apenas um conector também é vetada.

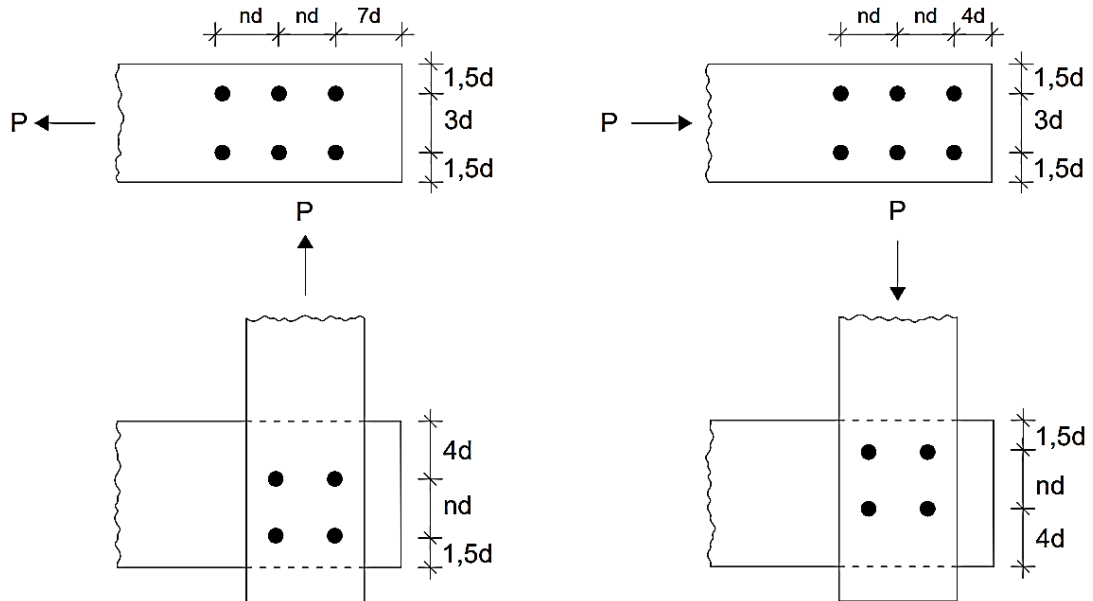
Outra recomendação importante diz respeito à pré-furação. Para que as ligações parafusadas sejam consideradas rígidas, a pré-furação deve ser realizada com diâmetro não maior que o diâmetro do parafuso, acrescido de 0,5 mm. Caso sejam empregados diâmetros de pré-furação superiores, a ligação deverá ser considerada deformável.

O diâmetro externo das arruelas não pode ser inferior a três vezes o diâmetro do parafuso empregado. A espessura mínima, por sua vez, deve ser igual a 9 mm no caso de pontes e 6 mm para estruturas em geral, não possuindo, em nenhum dos casos, dimensão inferior a 1/8 do diâmetro externo da arruelas.

2.3.3 Espaçamentos mínimos e distâncias mínimas até as bordas

A fim de prevenir o fendilhamento, são estipulados valores mínimos de espaçamentos entre os pinos e de distâncias entre os pinos e as bordas do elemento. Tais valores são apresentados na Figura 5, onde n é igual a 6 para parafusos ajustados e 4 para os demais casos.

Figura 5 – Espaçamentos mínimos entre os pinos e distâncias mínimas entre os pinos e as bordas dos elementos de acordo com a ABNT NBR 7190:1997.



Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

2.3.4 Número convencional de parafusos

Caso a ligação realizada possua oito ou mais parafusos, deve-se considerar um número convencional de conectores (n_0), cujo valor pode ser obtido por meio da Equação 27.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (27)$$

Em que:

n : número total de parafusos.

2.4 ABORDAGEM DO EUROCODE 5:2004

No critério de dimensionamento apresentado no texto do Eurocode 5:2004, a estimativa capacidade resistente de ligações entre peças de madeira que apresentam diferentes resistências ao embutimento é contemplada por meio do parâmetro β , cujo valor é calculado através da relação estabelecida na Equação 28.

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (28)$$

Em que:

$f_{h,1,k}$: valor característico da resistência ao embutimento dos elementos de espessura igual a t_1 ;

$f_{h,2,k}$: valor característico da resistência ao embutimento dos elementos de espessura igual a t_2 ;

Para situações de corte simples, os seis modos de ruptura apresentados por Möller⁴ (1951 *apud* Meyer, 1957) são considerados. As Equações 29, 30 e 31 são referentes aos modos de ruptura (a), (b) e (c) da Figura 3, enquanto as Equações 32, 33 e 34 são referentes aos modos de ruptura (a), (b) e (c) da Figura 4. O valor característico da capacidade resistente da ligação ($F_{v,Rk}$) é tomado como sendo o menor valor obtido por intermédio dessas equações.

$$P_k = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right)} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (29)$$

$$P_k = f_{h,1,k} t_1 d \quad (30)$$

$$P_k = f_{h,2,k} t_2 d \quad (31)$$

$$P_k = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (32)$$

$$P_k = 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2 \beta} \left[\sqrt{2 \beta^2 (1 + \beta) + \frac{4 \beta (1 + 2 \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (33)$$

$$P_k = 1,15 \sqrt{\frac{2 \beta}{(1 + \beta)}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (34)$$

⁴ MÖLLER, T.(1950). En ny metod för beräkning av spikförband (New method of estimating the bearing strength of nailed wood connections). Sweden, Transaction of Chalmers University of Technology, Report N° 117.

Em que:

P_k : valor característico da força máxima associada a cada modo de ruptura;

$f_{h,1,k}$: valor característico da resistência ao embutimento dos elementos de espessura igual a t_1 ;

$f_{h,2,k}$: valor característico da resistência ao embutimento dos elementos de espessura igual a t_2 ;

$M_{y,Rk}$: valor característico do momento resistente do pino metálico;

$F_{ax,Rk}$: valor característico da resistência ao arrancamento do pino metálico.

Vale destacar que, ao contrário da norma brasileira vigente, a formulação proposta no texto do Eurocode 5:2004 utiliza os valores característicos das propriedades mecânicas, acarretando em uma melhor interpretação do fenômeno físico. Desse modo, o valor de cálculo da capacidade resistente da ligação ($F_{v,Rd}$) pode ser obtido por meio da Equação 35, em que o coeficiente de ponderação é igual a 1,3.

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{1,3} \quad (35)$$

No caso de ligações submetidas a corte duplo, os quatro modos de ruptura apresentados na Figura 2 são considerados. As Equações 36, 37, 38 e 39 fornecem, respectivamente, os valores característicos das forças máximas por plano de corte relativas aos casos (a), (b), (c) e (d). De modo análogo à situação de corte simples, o valor característico da capacidade resistente da ligação por plano de corte é tomado como sendo o menor valor obtido por intermédio das equações apresentadas.

$$P_k = f_{h,1,k} t_1 d \quad (36)$$

$$P_k = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (37)$$

$$P_k = 1,05 \frac{f_{h,1,k} d t_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (38)$$

$$P_k = 1,15 \sqrt{\frac{2 \beta}{(1 + \beta)}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (39)$$

A estimativa das propriedades mecânicas inerentes ao dimensionamento do modelo de ligação em questão e outras determinações normativas serão apresentadas nos tópicos subsequentes.

2.4.1 Resistência ao embutimento da madeira

No caso de ligações entre peças de madeira realizadas por meio de parafusos passantes com diâmetro não superior a 30 mm, a resistência ao embutimento da madeira na direção paralela às suas fibras pode ser estimada pela Equação 40, advinda do estudo experimental realizado por Whale e Smith (1986).

$$f_{h0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (40)$$

Em que:

$f_{h0,k}$: valor característico da resistência ao embutimento da madeira na direção paralela às suas fibras em MPa;

d : diâmetro do parafuso em mm;

ρ_k : valor característico da densidade da madeira em kg/m³.

Para outras direções, permite-se que a estimativa da resistência ao embutimento seja realizada por intermédio da Equação 41.

$$f_{h\theta,k} = \frac{f_{h0,k}}{k_{90} \text{sen}^2\theta + \text{cos}^2\theta} \quad (41)$$

A variável k_{90} é calculada utilizando-se as Equações 42 e 43 para coníferas e folhosas, respectivamente.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 d \quad (42)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 d \quad (43)$$

Em que:

d : diâmetro do parafuso em mm.

A resistência ao embutimento da madeira pode ainda ser determinada experimentalmente por meio de teste padronizado realizado de acordo com as prescrições da EN 383:2007, em que essa é definida como sendo a razão entre a força máxima obtida no ensaio (maior força registrada ou a força que provoca um deslocamento relativo entre o centro do pino metálico e a borda do corpo de prova igual a 5 mm) e a área de embutimento (produto entre a espessura do corpo de prova e o diâmetro do pino metálico).

2.4.2 Momento fletor resistente de parafusos passantes

Após vários ensaios, Jorissen (1998) observou que a rótula plástica formada em parafusos passantes na ocorrência de sua flexão não era completamente desenvolvida nas ligações entre peças de madeira, sobretudo quando o diâmetro dos parafusos era elevado. Em vista disso, Blass, Bienhaus e Krämer (2000) utilizaram os dados obtidos por Jorissen (1998) para desenvolver uma equação que estimasse o valor do momento resistente do parafuso em função de seu diâmetro. Atualmente, essa equação está presente no texto da norma europeia, e é apresentada na Equação 44.

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (44)$$

Em que:

$f_{u,k}$: valor característico da resistência a tração última do parafuso em MPa;

d : diâmetro do parafuso em mm.

2.4.3 Efeito de corda em parafusos passantes

Na formulação presente no texto do Eurocode 5:2004, o aumento da capacidade resistente da ligação proveniente dos efeitos de segunda ordem em ligações realizadas com parafusos passantes providos de porcas e arruelas é considerado.

A parcela de resistência proveniente do atrito gerado pela componente horizontal da força de tração que atua no parafuso após a sua flexão é levada em conta por meio de acréscimos de 5% e 15%, a depender do modo de ruptura (PORTEOUS e KERMANI, 2007).

Por outro lado, atribui-se à parcela de resistência advinda da componente vertical da força de tração a denominação de efeito de corda, cujo valor é dado por plano de corte. O efeito de corda é representado pelo termo $F_{ax,Rk}/4$ e a resistência ao arrancamento característica do parafuso passante pode ser determinada adotando-se o menor valor obtido por intermédio das Equações 45 e 46.

$$F_{ax,Rk} = f_{u,k} A_p \quad (45)$$

$$F_{ax,Rk} = 3 f_{c,90,k} A_c \quad (46)$$

Em que:

A_p : área da seção transversal do parafuso;

A_c : área de contato entre a peça de madeira e a arruela;

$f_{c,90,k}$: resistência à compressão da madeira na direção perpendicular às suas fibras.

No caso de parafusos passantes, o valor do efeito de corda não deve ser superior a 25% do valor proveniente da primeira parcela da equação.

No que diz respeito as arruelas, essas devem possuir diâmetro externo mínimo igual a três vezes o diâmetro do parafuso utilizado e sua espessura não deve ser inferior a 30% do diâmetro do conector. Além disso, as arruelas precisam estar completamente apoiadas sobre a superfície da madeira e os parafusos não podem possuir folga superior a 1 mm.

2.4.4 Módulo de deslizamento de parafusos passantes

Apesar de não ser utilizado para estimar a capacidade de carga de ligações realizadas entre peças de madeira, o módulo de deslizamento da ligação (K_{ser}) possui fundamental importância nas verificações relativas aos deslocamentos da estrutura e influencia diretamente na rigidez à flexão de vigas e pilares compostos.

No caso de ligações realizadas por meio de parafusos passantes, o valor do módulo de deslizamento por plano de corte por parafuso pode ser estimado por meio da Equação 47.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} d}{23} \quad (47)$$

Em que:

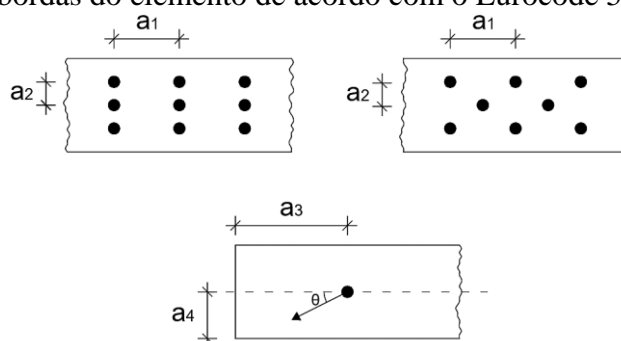
ρ_m : densidade média da madeira em kg/m^3 ;

d : diâmetro do parafuso em mm.

2.4.5 Espaçamentos mínimos e distâncias mínimas até as bordas

A fim de evitar o fendilhamento da madeira, são estabelecidos espaçamentos mínimos entre os parafusos e distâncias mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento, que podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Espaços mínimos entre os parafusos e distâncias mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento de acordo com o Eurocode 5:2004.



Fonte: adaptado de Eurocode 5:2004.

Os valores dos espaçamentos e distâncias ilustrados na Figura 3 são determinados em função do ângulo formado entre a solicitação e as fibras da madeira e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores dos espaçamentos mínimos entre os parafusos e distância mínimas entre os parafusos e as bordas do elemento de acordo com o Eurocode 5:2004.

	Ângulo	Espaçamentos e distâncias mínimas
a1	$0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	$(4 + \cos(\theta)) d$
a2	$0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	$4 d$
a3	$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	Máx { $7 d$; 80 mm }
	$90^\circ < \theta \leq 150^\circ$	$(1 + 6 \text{sen}(\theta)) d$
	$150^\circ < \theta \leq 210^\circ$	$4 d$
	$210^\circ < \theta \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \text{sen}(\theta)) d$
	$270^\circ < \theta \leq 360^\circ$	Máx { $7 d$; 80 mm }
a4	$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	Máx { $(2 + 2 \text{sen}(\theta))$; $3 d$ }
	$180^\circ < \theta \leq 360^\circ$	$3 d$

Fonte: adaptado de Eurocode 5:2004.

2.4.6 Ligações com mais de um parafuso

De acordo com o texto do Eurocode 5:2004, em situações onde existam dois ou mais parafusos em uma mesma linha paralela à solicitação, um número efetivo (n_{ef}) de parafusos deve ser utilizado para estimar a capacidade resistente da ligação.

Para peças de madeira solicitadas na direção paralela às suas fibras, o número efetivo de parafusos pode ser calculado por meio da Equação 48. Se o valor encontrado for superior ao número de parafusos utilizados (n), n_{ef} deve ser tomado igual a n .

$$n_{ef} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \quad (48)$$

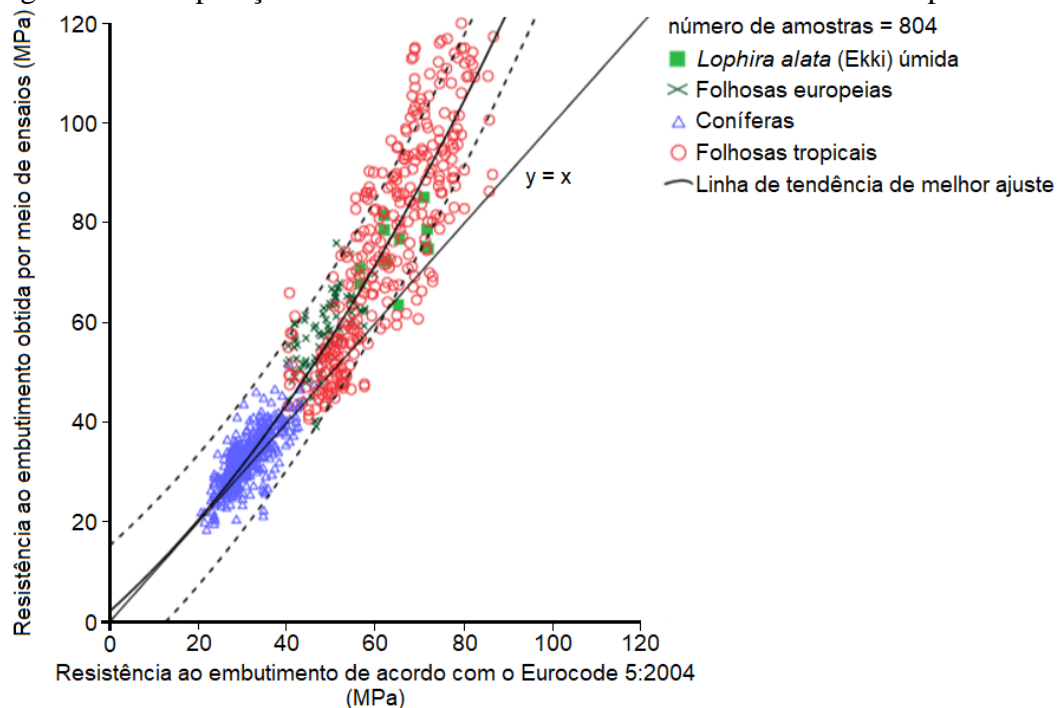
No caso de peças de madeira solicitadas na direção perpendicular às suas fibras, não existe alteração no número de parafusos utilizados e, portanto, o valor de n_{ef} deve ser tomado considerado igual a n . Para solicitações em direções intermediárias, o número efetivo de parafusos é calculado através de interpolação linear.

2.5 ESTUDOS RELACIONADOS

Como citado anteriormente, a equação presente no texto do Eurocode 5:2004, a qual é utilizada para estimar a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, é advinda de uma análise experimental. Após diversos ensaios, Whale e Smith (1986) propuseram a Equação 40 por meio de regressão linear. Em seu estudo, os autores ensaiaram quatro espécies de madeira coníferas e duas espécies de madeira folhosas, e empregaram parafusos com diâmetros que variavam entre 8 e 20 mm.

Todavia, autores como Hettiarachchi e Nawagamuwa (2005), Jumaat et al. (2006) e Sandhaas et al. (2010) observaram que, para espécies de madeira de maior densidade, os resultados experimentais de resistência ao embutimento tendem a ser superiores aos valores estimados por meio da equação da norma europeia e, quanto maior é a densidade da madeira, maior é a diferença entre os resultados teórico e experimental, conforme ilustrado na Figura 7.

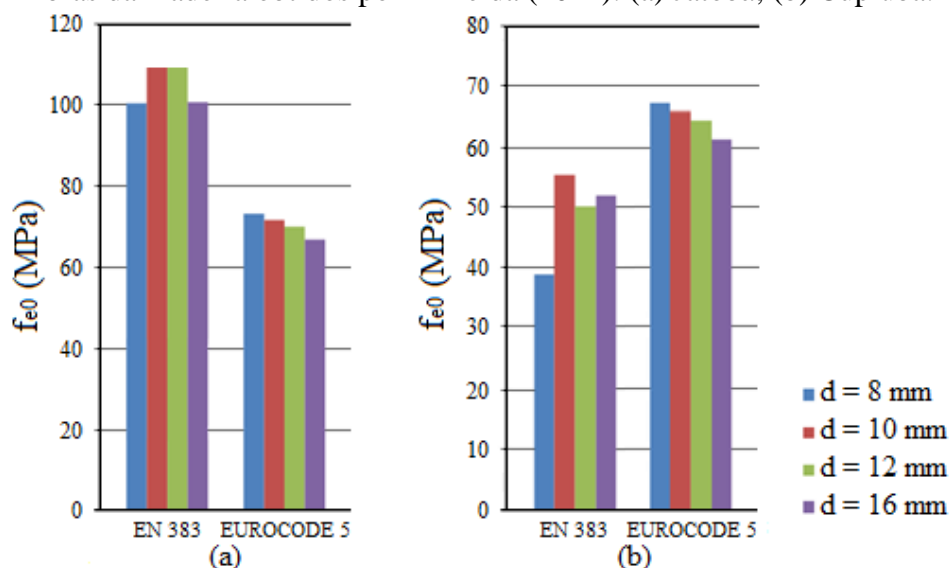
Figura 7 – Comparação entre as resistências ao embutimento teórico e experimental.



Fonte: adaptado de Sandhaas et al. (2010).

No Brasil, Almeida (2014) determinou experimentalmente a resistência ao embutimento de seis espécies de madeira, utilizando, para tal, quatro diâmetros de parafuso. Dentre os testes realizados, destaca-se os ensaios de embutimento conduzidos de acordo com a EN 383:2007, cujos resultados foram comparados aos valores teóricos calculados por meio do Eurocode 5:2004. Na Figura 8, o comparativo em questão é realizado para as espécies Jatobá (*Hymenaea spp.*) e Cupiúba (*Goupia glabra*), ambas folhosas nativas de alta densidade. Em ambos os casos, a resistência ao embutimento foi avaliada na direção paralela às fibras da madeira, sendo possível observar uma divergência entre os resultados experimentais e teóricos. Destaca-se ainda que, apesar de ser uma espécie de grande densidade, os valores de resistência ao embutimento da espécie Cupiúba foram inferiores aos estimados.

Figura 8 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Almeida (2014): (a) Jatobá; (b) Cupiúba.

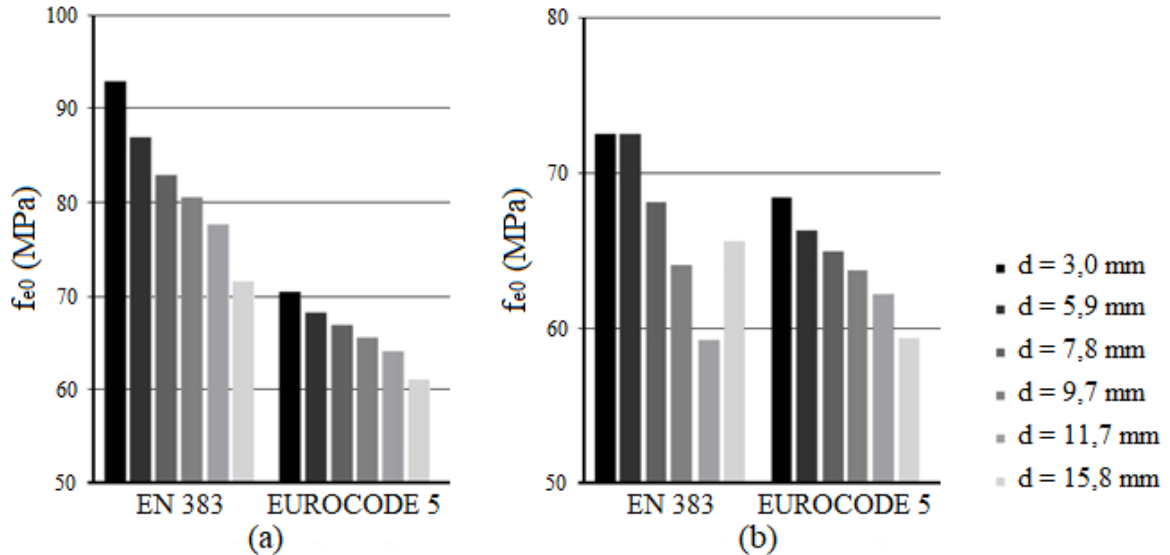


Fonte: Almeida (2014).

Terrin, Góes e Pletz (2018) apresentaram resultados de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira para quatro espécies de folhosas brasileiras, utilizando, para tal, seis diâmetros de pinos metálicos diferentes. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as prescrições da EN 383:2007, e os resultados para as duas espécies de maior densidade, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Itaúba (*Mezilaurus itauba*), são apresentados na Figura 9. O comparativo em questão é realizado entre os valores obtidos por intermédio das normas EN 383:2007 e Eurocode 5:2004 e, de forma similar à Figura 7, observa-se uma diferença entre a resistência ao embutimento estimada e seu valor experimental. Contudo, apesar de apresentarem densidades muito similares, a divergência entre os valores teóricos e

experimentais para a espécie Itaúba foi muito menor quando comparada aos resultados da espécie Garapeira.

Figura 9 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Terrin, Góes e Pletz (2018): (a) Garapeira; (b) Itaúba.



Fonte: Terrin, Góes e Pletz (2018).

No que diz respeito ao efeito de corda, protótipos de ligação foram ensaiados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) com o intuito de determinar a contribuição de tal parcela de resistência.

Silva Junior e Góes (2016) realizaram ensaios de protótipos de ligação com parafusos passantes submetidos a corte duplo. Os corpos de prova foram confeccionados a partir das espécies de madeira Garapeira e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*) e os parafusos possuíam 12 mm de diâmetro. Conforme apresentado na Tabela 3, o processo de cálculo apresentado no texto do Eurocode 5:2004 com a consideração do efeito de corda foi o que conduziu a resultados mais próximos dos valores experimentais.

Tabela 3 – Resistências teórica e experimental de ligações com parafusos passantes submetidos a corte duplo.

	ρ_{12}	Eurocode 5 (sem efeito de corda)	Eurocode 5 (com efeito de corda)	Resultado experimental
Garapeira	740,0 kg/m ³ CV = 1,4%	124,1 kN	153,5 kN	177,8 kN CV = 5,2%
Caixeta	410,0 kg/m ³ CV = 2,6%	63,2 kN	78,2 kN	108,5 kN CV = 2,7%

Fonte: Silva Junior e Góes (2016, p.13).

Maia e Góes (2017) estudaram ligações pregadas utilizando a espécie de madeira Garapeira para confeccionar os corpos de prova. O valor médio obtido por meio da equação presente no texto da norma europeia com a consideração do efeito de corda foi 13,8% inferior ao valor obtido experimentalmente.

Couto e Góes (2018) ensaiaram protótipos de ligação confeccionados a partir da espécie Garapeira, em que as peças de madeira externas foram substituídas por chapas de aço. O valor médio obtido experimentalmente foi 21,9% superior ao valor teórico médio.

2.6 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O modelo de calculado da norma brasileira vigente está embasado sobre o estudo inicial desenvolvida por Johansen (1949). Por se tratar de uma teoria simplificada, a aplicação da ABNT NBR 7190:1997 é limitada a alguns casos específicos, e determinados modos de ruptura são negligenciados.

Por outro lado, o modelo de cálculo presente no texto do Eurocode 5:2004, o qual foi adotado no projeto de revisão da norma brasileira, proporciona uma interpretação mais abrangente do problema, tornando possível a confecção de ligações entre peças de madeira que apresentem diferentes resistências ao embutimento. Como resultado, a formulação utilizada pela norma europeia contempla uma maior variedade de modos de falha.

Outro aspecto relevante diz respeito à aplicação dos coeficientes de segurança. No modelo de cálculo do Eurocode 5:2004, a estimativa da força limite relacionada a cada modo de ruptura é realizada a partir dos valores característicos das propriedades mecânicas envolvidas no problema, e o coeficiente é aplicado sobre a capacidade resistente da ligação. No caso da norma brasileira vigente, são utilizados os valores de cálculo dessas propriedades, acarretando em um erro de interpretação do fenômeno.

No que diz respeito a estimativa da resistência ao embutimento da madeira, a norma brasileira vigente permite que essa seja estimada através de relações com a resistência à compressão na direção paralela às fibras, e a influência que o diâmetro do pino metálico exerce sobre tal propriedade é considerada apenas para direções diferentes da paralela. Por outro lado, o Eurocode 5:2004 considera a resistência ao embutimento como uma propriedade do conjunto, ou seja, seu valor para qualquer direção depende não apenas da densidade da madeira, mas também do diâmetro do pino metálico empregado.

Outra importante diferença está relacionada ao momento resistente do parafuso. Ao considerar o limite elástico do aço, os valores teóricos de capacidade resistente da ligação calculados por meio do texto da norma brasileira vigente tornam-se significativamente inferiores aos estimados pelo modelo de cálculo da norma europeia, sobretudo para ligações com parafusos de diâmetro reduzido. Além disso, a formulação apresentada no texto do Eurocode 5:2004 também leva em consideração o acréscimo de resistência proveniente dos efeitos de segunda ordem.

Sobre a estimativa da resistência ao embutimento, os estudos realizados com madeiras folhosas brasileiras de alta densidade demonstram que os valores estimados por meio da equação da norma europeia são significativamente inferiores aos valores experimentais na maioria dos casos. No que diz respeito aos estudos de protótipos de ligação, observa-se valores teóricos conservadores em todos os casos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os itens subsequentes possuem a finalidade de apresentar o programa experimental que foi conduzido para realização da presente pesquisa, bem como o teste de hipótese utilizado para avaliar os resultados obtidos.

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Para execução do plano experimental, foram empregadas as 10 espécies de madeiras folhosas brasileiras apresentadas na Tabela 4. A possibilidade de avaliação do critério de dimensionamento de ligações por parafusos passantes que foi adotado no projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 quando aplicado à espécies de madeira de diferentes densidades foi o que motivou a escolha das mesmas.

Tabela 4 – Espécies de madeiras folhosas brasileiras empregadas.

Nome popular	Nome científico
Paricá	<i>Schizolobium amazonicum</i>
Caixeta	<i>Simarouba amara</i>
Caucho	<i>Maquira coriácea</i>
Caroba	<i>Jacaranda copaia</i>
Cedrinho	<i>Erisma uncinatum</i>
Catuaba	<i>Qualea albiflora</i> Warm.
Catanudo	<i>Chrysophyllum anomalum</i> Pires
Eucalipto grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>
Goiabão	<i>Planchonella pachycarpa</i> Pires
Roxinho	<i>Peltogyne</i> spp.

Fonte: autor.

Os pinos metálicos que foram utilizados nos ensaios de embutimento eram lisos e possuíam diâmetros nominais de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm.

Para os protótipos de ligação, foram fabricados dois modelos pinos metálicos: com e sem roscas em suas extremidades, contemplando os diâmetros de 10 mm e 12,5 mm. Em ambos os casos, os pinos foram confeccionados a partir de barras de aço SAE 1020. Também foram utilizadas arruelas lisas DIN 440-R fabricadas em aço SAE 1020, de modo a atender as dimensões mínimas estipuladas pelo Eurocode 5:2004. As dimensões nominais das arruelas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões das arruelas lisas DIN 440-R.

Diâmetro do parafuso (mm)	Diâmetro interno da arruela (mm)	Diâmetro externo da arruela (mm)	Espessura da arruela (mm)
10	11	34	3
12,5	14	45	4

Fonte: autor.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização quanto à resistência à compressão na direção paralela às fibras da madeira foi realizada para cada uma das peças utilizadas na confecção dos corpos de prova dos ensaios de embutimento na direção paralela às fibras e dos protótipos de ligação. Para tal, foi retirado um corpo de prova de cada peça, o qual foi ensaiado conforme as prescrições do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997

O teor de umidade e a densidade de cada corpo de prova foram determinados instantes após os ensaios seguindo as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, tanto para os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão, quanto para os corpos de prova submetidos aos ensaios de embutimento. A densidade aparente de cada corpo de prova, relativa ao teor de umidade de 12%, foi determinada utilizando-se o diagrama de Kollmann, constante no livro de Kollmann e Côté (1968).

O aço utilizado na confecção dos pinos metálicos foi caracterizado quanto à sua resistência última à tração por meio de testes realizados de acordo com as prescrições da ABNT NBR ISO 6892-1:2013 – Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Parte 1: Método de ensaio a temperatura ambiente. Ao todo, foram ensaiados seis corpos de prova, obtendo-se um valor médio de resistência última à tração igual a 652,75 MPa e um coeficiente de variação (CV) de 0,73%.

3.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA

A fim de se determinar a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira, foram confeccionados e ensaiados um total de 172 corpos de prova, abrangendo três diâmetros de pino diferentes: 10 mm, 12,5 mm e 16 mm.

Para as espécies Paricá, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Goiabão, seis corpos de prova para cada um dos diâmetros citados foram extraídos de nove peças de madeira

com comprimento aproximado de 55 cm, sendo que, de cada peça, foram retirados dois corpos de prova relativos à dois diâmetros de parafuso diferentes, conforme apresentado na Tabela 6. No caso da espécie Caixeta, devido a disponibilidade de peças, foram elaborados apenas cinco corpos de prova para os diâmetros de 12,5 mm e 16 mm. O mesmo ocorreu para a espécie Eucalipto grandis, para a qual foram confeccionados apenas corpos de prova relativos aos diâmetros de 10 mm e 12,5 mm.

Tabela 6 – Distribuição dos corpos de prova por peça.

Peça	Diâmetro de pino relacionado (mm)		
	Paricá, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Goiabão	Caixeta	E. grandis
1	10 e 12,5	10 e 12,5	10 e 12,5
2	10 e 12,5	10 e 12,5	10 e 12,5
3	10 e 12,5	10 e 12,5	10 e 12,5
4	12,5 e 16	12,5 e 16	10 e 12,5
5	12,5 e 16	12,5 e 16	10 e 12,5
6	12,5 e 16	10 e 16	10 e 12,5
7	10 e 16	10 e 16	-
8	10 e 16	10 e 16	-
9	10 e 16	-	-

Fonte: autor.

No caso do Roxinho, os corpos de prova foram extraídos de seis peças de madeira com comprimento aproximado de 3 m, a partir das quais, posteriormente, também foram confeccionados os protótipos de ligação. De cada peça, foram retirados três corpos de prova, um para cada diâmetro de pino.

Todos os corpos de prova possuíam dimensões compatíveis com as exigências da EN 383:2007 – *Timber structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners* e, considerando que a norma citada permite espessuras que variam entre 1,5d e 4d, optou-se por manter o valor da espessura nominal igual a 2d, que é o valor mínimo estipulado pela norma brasileira vigente.

Os testes foram conduzidos de acordo com as prescrições dessa mesma norma, e os deslocamentos relativos entre o parafuso metálico e a borda do corpo de prova foram medidos com o auxílio de um relógio comparador com resolução de 0,01 mm.

Na Figura 10 é ilustrado o ensaio de um corpo de prova da espécie Goiabão confeccionado para um diâmetro de 16 mm. Para medir o embutimento do parafuso na madeira, a base do relógio comparador e seu cursor foram fixados, respectivamente, nas bases inferior e superior da prensa hidráulica.

Figura 10 – Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras.



Fonte: autor.

3.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO NA DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DA MADEIRA

Para os ensaios relacionados à determinação da resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras da madeira, foram confeccionados e ensaiados um total de 54 corpos de prova, elaborados a partir de seis espécies de madeira, para três diâmetros de pinos: 10 mm, 12,5 mm e 16 mm.

As espécies utilizadas foram: Caucho, Caroba, Catuaba, Catanudo, Goiabão e Roxinho, sendo que, para cada espécie, foram retirados de nove peças de madeira três corpos de prova relativos a cada um dos diâmetros citados. As peças em questão não possuem relação com as peças que foram empregadas na produção dos corpos de prova relativos aos ensaios de embutimento na direção paralela às fibras.

As dimensões dos corpos de prova foram determinadas por meio do estabelecido na EN 383:2007, adotando-se uma espessura igual a $2d$, de modo similar ao realizado para a direção paralela às fibras.

Devido a limitações de equipamento, os testes foram conduzidos sem efetuar o ciclo de carga e descarga estipulado pela EN 383:2007, o que não modifica o valor da resistência ao embutimento obtido. Em todo caso, dois relógios comparadores foram posicionados conforme

ilustrado na Figura 11, de modo a interromper o teste caso o deslocamento limite entre o pino metálico e a borda do corpo de prova fosse igual a 5 mm, conforme estabelecido pela norma citada.

Figura 11 – Ensaio de embutimento na direção perpendicular às fibras.



Fonte: autor.

3.5 ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO

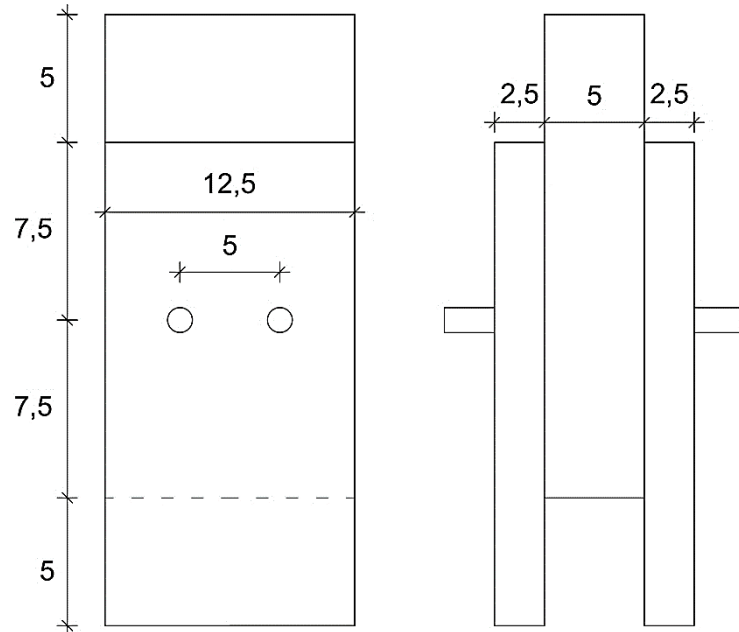
Para os ensaios dos protótipos de ligação, que possuem a finalidade de avaliar a contribuição da parcela de resistência proveniente do efeito de corda e o módulo de deslizamento, foram confeccionados corpos de prova para duas situações distintas: parafusos providos e desprovidos de porcas e arruelas. Para cada uma das situações citadas, foram elaborados seis corpos de prova para o diâmetro de 10 mm, e seis corpos de prova para o diâmetro de 12,5 mm.

Optou-se por utilizar as espécies de madeira Caixeta e Roxinho, pois essas representam dois extremos em termos de densidade. Os exemplares foram confeccionados a partir de 12 peças com comprimento aproximado de 3 m, sendo seis peças da espécie Caixeta, e seis peças da espécie Roxinho. As 12 peças foram caracterizadas quanto a sua resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira para os diâmetros de 10 mm e 12,5 mm, e o teor de umidade e densidade foram determinados após os ensaios.

Quanto as dimensões nominais dos protótipos, que são apresentadas na Figura 12, essas foram fixadas igualmente para os dois diâmetros de parafuso utilizados, de modo a atender, em ambos os casos, os espaçamentos mínimos entre parafusos e as distâncias mínimas entre os

parafusos e as bordas das peças de madeira requeridos pelo Eurocode 5:2004. Foram empregados apenas dois parafusos na ligação em questão, distribuídos em duas linhas paralelas a solicitação, para que o número efetivo de parafusos fosse igual a 2.

Figura 12 – Dimensões nominais dos protótipos de ligação em cm.



Fonte: autor.

Os protótipos foram ensaiados de acordo com as prescrições da EN 26891:1991 – *Timber structures – Joints made with mechanical fasteners – General principals for the determination of strength and deformation characteristics* para a direção paralela às fibras da madeira. Os deslocamentos relativos entre as peças de madeira laterais e central de cada corpo de prova foram medidos com o auxílio de dois relógios comparadores com resolução de 0,01 mm, posicionados em ambas as faces laterais do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Ensaio de protótipo de ligação da espécie Roxinho confeccionado para parafusos com diâmetros de 12,5 mm providos de porcas e arruelas.



Fonte: autor.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

O teste t de Student para amostras dependentes (teste t pareado) foi utilizado para comparar os valores teóricos e experimentais de resistência ao embutimento e avaliar a estimativa da capacidade resistente e do módulo de deslizamento dos protótipos de ligação quanto ao uso de porcas e arruelas.

O teste consiste em estabelecer uma hipótese nula (média populacional das diferenças igual a zero) e, por consequência, uma hipótese alternativa (média populacional das diferenças diferente de zero). A hipótese nula é testada, podendo ser rejeitada ou não. Para tal, calcula-se o valor do parâmetro t (Equação 49), que deve ser comparado ao valor de t_{crit} (Tabela 7). Caso $|t| > |t_{crit}|$, rejeita-se a hipótese nula, indicando que as médias populacionais em questão são diferentes. Caso $|t| < |t_{crit}|$, a hipótese nula não é rejeitada, o que significa que não foram encontradas evidências estatísticas de que exista diferença entre as médias populacionais.

$$t = \frac{\bar{X}_d - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} \quad (49)$$

Em que:

\bar{X}_d : média amostral das diferenças;

μ_d : média populacional das diferenças (valor tomado igual a zero sob a hipótese nula);

s_d : desvio padrão amostral das diferenças;

n : tamanho da amostra.

Tabela 7 – Valor de t_{crit} para um nível de significância igual a 10% (teste t de Student bicaudal).

(n - 1)	t_{crit}	(n - 1)	t_{crit}	(n - 1)	t_{crit}
2	2,920	13	1,771	24	1,711
3	2,353	14	1,761	25	1,708
4	2,132	15	1,753	26	1,706
5	2,015	16	1,746	27	1,703
6	1,943	17	1,740	28	1,701
7	1,895	18	1,734	29	1,699
8	1,860	19	1,729	30	1,697
9	1,833	20	1,725	40	1,684
10	1,813	21	1,721	60	1,671
11	1,796	22	1,717	120	1,658
12	1,782	23	1,714	∞	1,645

Fonte: Autor.

O valor do t_{crit} é determinado em função do nível de significância (α) adotado e dos graus de liberdade ($n - 1$). Neste trabalho, optou-se por utilizar um nível de significância igual a 10%.

Para avaliar a estimativa da capacidade resistente e do módulo de deslizamento dos protótipos de ligação no que diz respeito à espécie, foi empregado o teste t de Student bicaudal para amostras independentes de mesmo tamanho, cujo valor de t é calculado por meio da Equação 50. O valor de t_{crit} é obtido por meio da Tabela 7.

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \quad (50)$$

Em que:

\bar{X}_1 : média dos valores da amostra 1;

\bar{X}_2 : média dos valores da amostra 2;

$(\mu_1 - \mu_2)$: diferença entre os valores das médias de ambas as populações envolvidas na análise (valor tomado igual a zero sob a hipótese nula);

s_1^2 : variância dos valores da amostra 1;

s_2^2 : variância dos valores da amostra 2.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais e teóricos de resistência ao embutimento em ambas as direções e de capacidade de carga e módulo de deslizamento dos protótipos de ligação.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS)

Os resultados experimentais de resistência à compressão na direção paralela às fibras são apresentados na Tabela 8. A numeração dos corpos de prova (CP) segue a numeração das peças de onde foram retirados (Tabela 6). Os valores de resistência à compressão e densidade foram ajustados para um teor de umidade de 12%.

Tabela 8 – Resultados experimentais de f_{c0} .

Espécie/Propriedade		CP									Média	CV (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Paricá	f_{c0} (MPa)	25,3	31,1	29,9	36,1	24,1	27,7	*	31,5	26,5	29,0	13,5
	U (%)	9,9	9,6	9,9	9,9	9,2	10,0	*	9,9	10,2	9,8	3,1
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,29	0,34	0,40	0,39	0,36	0,31	*	0,35	0,29	0,34	12,4
Caixeta	f_{c0} (MPa)	35,8	33,4	37,0	43,7	34,9	35,0	37,1	35,0		36,5	8,6
	U (%)	10,5	10,0	10,1	9,9	10,1	10,9	10,2	10,7		10,3	3,5
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,38	0,40	0,42	0,49	0,40	0,43	0,45	0,40		0,42	8,4
Caucho	f_{c0} (MPa)	55,0	56,2	48,3	40,2	43,2	49,6	45,6	46,1	39,2	47,0	12,6
	U (%)	9,5	9,7	9,2	9,6	9,5	9,7	9,5	8,8	10,9	9,6	5,9
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,69	0,61	0,49	0,50	0,46	0,58	0,50	0,55	0,41	0,53	15,9
Caroba	f_{c0} (MPa)	38,4	32,0	30,5	35,8	40,3	38,8	40,0	33,7	32,2	35,7	10,5
	U (%)	9,7	9,7	11,5	10,7	9,9	10,2	10,1	10,6	11,0	10,4	6,0
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,48	0,44	0,39	0,45	0,47	0,46	0,47	0,44	0,42	0,45	6,3
Cedrinho	f_{c0} (MPa)	43,5	48,5	48,9	48,7	45,9	45,2	50,2	47,4	45,9	47,1	4,6
	U (%)	12,0	12,2	13,1	14,1	13,6	13,6	13,1	14,1	13,3	13,2	5,6
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,58	0,60	0,59	0,59	0,56	0,55	0,58	0,57	0,58	0,58	2,7
Catuaba	f_{c0} (MPa)	52,3	50,7	50,8	50,3	49,4	56,9	49,8	43,9	50,7	50,5	6,6
	U (%)	12,1	11,9	12,9	12,4	12,9	11,9	12,6	12,7	13,8	12,6	4,8
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,58	0,61	0,55	0,59	0,57	0,67	0,59	0,57	0,56	0,59	6,1
Catanudo	f_{c0} (MPa)	50,4	55,4	51,8	50,6	56,8	43,8	43,0	56,9	50,7	51,0	9,9
	U (%)	11,4	11,4	11,3	11,2	11,1	11,7	11,4	11,3	11,5	11,4	1,5
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,71	0,72	0,74	0,68	0,71	0,69	0,67	0,73	0,71	0,71	3,2
E. grandis	f_{c0} (MPa)	61,5	59,6	71,6	62,0	60,8	64,7				63,4	6,9
	U (%)	11,9	12,8	11,9	12,8	11,9	12,4				12,3	3,6
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,68	0,67	0,80	0,70	0,72	0,71				0,71	6,5
Goiabão	f_{c0} (MPa)	69,7	72,8	66,1	64,8	65,8	70,8	79,0	55,2	70,5	68,3	9,6
	U (%)	11,1	11,5	11,3	10,9	11,3	11,6	11,0	11,0	11,8	11,3	2,7
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,84	0,85	0,80	0,82	0,86	0,82	0,90	0,79	0,84	0,84	4,0
Roxinho	f_{c0} (MPa)	63,3	69,5	61,5	67,4	70,4	77,4				68,3	8,3
	U (%)	15,0	13,9	14,5	13,7	12,6	13,7				13,9	5,9
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,70	0,75	0,74	0,77	0,84	0,91				0,79	9,8

* Valores não obtidos

Fonte: autor.

4.2 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS)

Na Tabela 9, encontram-se os valores experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ($f_{h0,EXP}$) relativos ao diâmetro de 10 mm. A numeração dos corpos de prova foi realizada de acordo com a numeração das peças de onde foram retirados (Tabela 6). Os valores de resistência ao embutimento e densidade apresentados foram corrigidos para um teor de umidade de 12%.

Tabela 9 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 10 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm ³)	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm ³)
Paricá	1	19,9	9,4	0,32	7	20,2	8,9	0,30
	2	25,3	9,4	0,34	8	19,0	8,6	0,30
	3	22,0	8,5	0,37	9	21,3	8,8	0,32
Caixeta	1	31,7	9,5	0,42	6	26,1	9,4	0,41
	2	27,8	9,1	0,41	7	32,9	8,9	0,46
	3	32,5	9,1	0,45	8	28,9	9,3	0,42
Caucho	1	38,8	9,1	0,55	7	44,6	9,7	0,55
	2	43,8	9,0	0,62	8	43,0	8,9	0,61
	3	36,2	9,1	0,46	9	31,9	9,5	0,42
Caroba	1	33,7	9,1	0,46	7	36,9	9,0	0,48
	2	27,4	9,0	0,41	8	30,0	9,5	0,44
	3	25,1	9,6	0,38	9	33,3	9,2	0,46
Cedrinho	1	46,7	12,3	0,57	7	46,3	12,8	0,59
	2	48,1	11,9	0,58	8	43,0	13,6	0,57
	3	40,3	12,5	0,59	9	47,4	13,2	0,56
Catuaba	1	36,4	11,8	0,58	7	34,6	11,8	0,57
	2	36,5	11,5	0,60	8	37,5	11,5	0,57
	3	32,9	11,4	0,56	9	29,5	11,6	0,51
Catanudo	1	56,3	10,7	0,71	7	56,6	11,0	0,67
	2	53,8	10,8	0,69	8	54,8	10,9	0,72
	3	60,1	11,3	0,74	9	54,6	11,0	0,72
E. grandis	1	53,3	11,5	0,67	4	54,4	12,0	0,71
	2	51,4	12,0	0,67	5	51,2	11,5	0,69
	3	64,7	11,6	0,79	6	50,5	11,9	0,71
Goiabão	1	68,4	10,9	0,82	7	79,9	10,9	0,88
	2	74,4	11,1	0,82	8	77,2	10,7	0,79
	3	77,6	10,7	0,84	9	74,2	11,2	0,84
Roxinho	1	77,1	14,4	0,71	4	96,1	13,8	0,79
	2	86,7	13,3	0,76	5	84,2	12,2	0,79
	3	83,6	14,5	0,73	6	93,8	12,8	0,86

Fonte: autor.

Os resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras referentes ao diâmetro de 12,5 mm são apresentados na Tabela 10. Os valores de resistência ao embutimento e densidade foram ajustados para um teor de umidade de 12 %.

Tabela 10 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 12,5 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm³)	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm³)
Paricá	1	22,4	9,5	0,31	4	30,0	9,8	0,43
	2	25,1	9,1	0,32	5	21,3	9,6	0,32
	3	23,0	9,2	0,36	6	28,6	9,2	0,37
Caixeta	1	35,2	9,1	0,49	4	34,1	8,8	0,44
	2	27,3	9,1	0,40	5	28,4	9,4	0,38
	3	35,0	9,5	0,45				
Caucho	1	41,0	9,6	0,55	4	42,2	9,8	0,48
	2	49,9	9,4	0,60	5	35,9	9,6	0,46
	3	38,1	9,5	0,46	6	49,9	9,6	0,56
Caroba	1	33,4	9,8	0,46	4	32,7	10,5	0,42
	2	28,0	9,9	0,42	5	34,9	10,0	0,44
	3	26,0	10,5	0,39	6	36,2	10,0	0,46
Cedrinho	1	43,9	10,9	0,57	4	45,1	11,6	0,58
	2	44,3	11,3	0,58	5	45,3	12,2	0,56
	3	31,9	10,6	0,59	6	39,8	11,3	0,55
Catuaba	1	41,0	12,3	0,58	4	33,8	12,1	0,56
	2	39,8	12,1	0,60	5	37,1	11,9	0,57
	3	32,2	12,1	0,56	6	37,3	11,6	0,66
Catanudo	1	63,0	10,9	0,72	4	52,2	11,2	0,68
	2	55,6	10,9	0,72	5	63,9	10,9	0,73
	3	62,7	11,0	0,77	6	49,8	10,8	0,69
E. grandis	1	48,2	11,5	0,69	4	54,1	12,0	0,71
	2	49,3	11,6	0,67	5	52,3	12,1	0,68
	3	67,9	11,5	0,83	6	47,9	12,0	0,71
Goiabão	1	77,3	11,3	0,85	4	69,5	11,0	0,81
	2	80,3	11,4	0,83	5	87,1	11,3	0,87
	3	78,3	11,2	0,81	6	73,8	11,4	0,84
Roxinho	1	75,4	14,9	0,71	4	87,4	13,9	0,78
	2	89,6	12,8	0,80	5	84,9	12,7	0,75
	3	78,5	14,1	0,75	6	97,8	13,1	0,93

Fonte: autor.

Para o diâmetro de 16 mm, os resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras e densidade, ambos corrigidos para um teor de umidade de 12%, são exibidos na Tabela 11.

Os valores médios experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras e de densidade são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Valores de $f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 16 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm ³)	CP	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ_{12} (g/cm ³)
Paricá	4	30,3	9,0	0,42	7	20,2	9,0	0,32
	5	20,5	8,8	0,32	8	19,2	8,8	0,31
	6	25,2	8,5	0,37	9	20,2	9,3	0,32
Caixeta	4	31,1	8,8	0,45	7	34,4	9,0	0,45
	5	26,0	9,4	0,39	8	28,0	9,2	0,42
	6	26,5	9,7	0,41				
Caucho	4	38,6	9,4	0,46	7	44,6	9,1	0,56
	5	31,9	9,1	0,46	8	44,4	8,8	0,61
	6	51,1	9,3	0,58	9	30,8	9,6	0,43
Caroba	4	28,5	9,8	0,43	7	36,2	9,2	0,49
	5	32,1	9,3	0,44	8	27,8	9,4	0,44
	6	31,0	9,1	0,47	9	32,3	9,8	0,45
Cedrinho	4	48,9	12,7	0,59	7	49,5	11,7	0,58
	5	41,7	12,9	0,56	8	44,1	12,8	0,55
	6	42,2	12,3	0,55	9	47,0	12,7	0,58
Catuaba	4	38,5	11,7	0,58	7	42,2	12,2	0,58
	5	38,2	11,7	0,58	8	34,8	12,1	0,55
	6	41,4	12,1	0,64	9	36,9	11,9	0,54
Catanudo	4	49,6	11,6	0,70	7	46,7	12,0	0,67
	5	61,2	10,6	0,73	8	55,5	12,1	0,75
	6	55,5	12,0	0,69	9	58,4	12,8	0,71
Goiabão	4	65,1	11,5	0,80	7	*	*	*
	5	82,3	12,2	0,85	8	72,6	12,3	0,80
	6	77,9	12,9	0,82	9	76,2	12,7	0,84
Roxinho	1	70,5	13,1	0,80	4	90,1	13,0	0,86
	2	89,0	13,4	0,88	5	85,1	12,3	0,86
	3	72,8	14,0	0,78	6	85,2	12,4	0,97

* Valores não obtidos

Fonte: autor.

Tabela 12 – Valores médios de $f_{h0,EXP}$.

Espécie	d (mm)					
	10		12,5		16	
	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)
Paricá	21,3	0,33	25,1	0,35	22,6	0,34
(CV)	10,5%	8,1%	14,1%	13,0%	19,1%	12,7%
Caixeta	30,0	0,43	32,0	0,43	29,2	0,42
(CV)	9,3%	5,0%	12,0%	15,9%	12,1%	6,2%
Caucho	39,7	0,54	42,8	0,52	40,2	0,52
(CV)	12,6%	14,8%	13,8%	9,6%	19,8%	14,5%
Caroba	31,1	0,44	31,9	0,43	31,3	0,45
(CV)	14,1%	8,4%	12,6%	10,1%	9,7%	5,0%
Cedrinho	45,3	0,58	41,7	0,57	45,6	0,57
(CV)	6,7%	2,1%	12,5%	11,9%	7,4%	3,0%
Catuaba	34,6	0,57	36,9	0,59	38,7	0,58
(CV)	8,6%	5,3%	9,2%	10,9%	7,1%	6,0%
Catanudo	56,0	0,71	57,9	0,72	54,5	0,71
(CV)	4,0%	3,5%	10,6%	8,3%	9,9%	4,0%
E. grandis	54,3	0,71	53,3	0,72		
(CV)	9,8%	6,3%	14,2%	9,7%		
Goiabão	75,3	0,83	77,7	0,84	74,8	0,82
(CV)	5,3%	3,6%	7,7%	6,2%	8,6%	2,8%
Roxinho	86,9	0,77	85,6	0,79	82,1	0,86
(CV)	8,1%	6,9%	9,4%	3,4%	10,2%	7,8%

Fonte: autor.

Os valores teóricos de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ($f_{h0,TEO}$), obtidos por meio da Equação 40, são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, para os diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm, respectivamente. Para determiná-los, foram empregadas as densidades aparentes apresentadas nas Tabelas 9, 10 e 11 e os diâmetros dos pinos utilizados nos ensaios: 9,5 mm para o diâmetro de 10 mm, 12,6 mm para o diâmetro de 12,5 mm e 15,9 mm para o diâmetro de 16 mm.

Os valores médios teóricos de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras encontram-se na Tabela 16.

Tabela 13 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 10 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	CP	f_{h0} (MPa)	Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	CP	f_{h0} (MPa)
Paricá	1	23,8	7	22,3	Catuaba	1	43,1	7	42,3
	2	25,2	8	22,3		2	44,6	8	42,3
	3	27,5	9	23,8		3	41,6	9	37,9
Caixeta	1	31,2	6	30,4	Catanudo	1	52,7	7	49,7
	2	30,4	7	34,2		2	51,2	8	53,5
	3	33,4	8	31,2		3	54,9	9	53,5
Caucho	1	40,8	7	40,8	E. grandis	1	49,7	4	52,7
	2	46,0	8	45,3		2	49,7	5	51,2
	3	34,2	9	31,2		3	58,7	6	52,7
Caroba	1	34,2	7	35,6	Goiabão	1	60,9	7	65,3
	2	30,4	8	32,7		2	60,9	8	58,7
	3	28,2	9	34,2		3	62,4	9	62,4
Cedrinho	1	42,3	7	43,8	Roxinho	1	52,7	4	58,7
	2	43,1	8	42,3		2	56,4	5	58,7
	3	43,8	9	41,6		3	54,2	6	63,8

Fonte: autor.

Tabela 14 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 12,5 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	CP	f_{h0} (MPa)	Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	CP	f_{h0} (MPa)
Paricá	1	22,2	4	30,8	Catuaba	1	41,6	4	40,1
	2	22,9	5	22,9		2	43,0	5	40,9
	3	25,8	6	26,5		3	40,1	6	47,3
Caixeta	1	35,1	4	31,5	Catanudo	1	51,6	4	48,7
	2	28,7	5	27,2		2	51,6	5	52,3
	3	32,3				3	55,2	6	49,5
Caucho	1	39,4	4	34,4	E. grandis	1	49,5	4	50,9
	2	43,0	5	33,0		2	48,0	5	48,7
	3	33,0	6	40,1		3	59,5	6	50,9
Caroba	1	33,0	4	30,1	Goiabão	1	60,9	4	58,1
	2	30,1	5	31,5		2	59,5	5	62,4
	3	28,0	6	33,0		3	58,1	6	60,2
Cedrinho	1	40,9	4	41,6	Roxinho	1	50,9	4	55,9
	2	41,6	5	40,1		2	57,3	5	53,8
	3	42,3	6	39,4		3	53,8	6	66,7

Fonte: autor.

Tabela 15 – Valores de $f_{h0,TEO}$ para o diâmetro de 16 mm.

Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	Espécie	CP	f_{h0} (MPa)	Espécie	CP	f_{h0} (MPa)
Paricá	4	29,0	Caroba	4	29,7	Catanudo	4	48,3
	5	22,1		5	30,4		5	50,4
	6	25,5		6	32,4		6	47,6
	7	22,1		7	33,8		7	46,2
	8	21,4		8	30,4		8	51,7
	9	22,1		9	31,0		9	49,0
Caixeta	4	31,0	Cedrinho	4	40,7	Goiabão	4	55,2
	5	26,9		5	38,6		5	58,6
	6	28,3		6	37,9		6	56,6
	7	31,0		7	40,0		8	55,2
	8	29,0		8	37,9		9	57,9
			9	40,0				
Caucho	4	31,7	Catuaba	4	40,0	Roxinho	1	55,2
	5	31,7		5	40,0		2	60,7
	6	40,0		6	44,1		3	53,8
	7	38,6		7	40,0		4	59,3
	8	42,1		8	37,9		5	59,3
	9	29,7		9	37,3		6	66,9

Fonte: autor.

Tabela 16 – Valores médios de $f_{h0,TEO}$.

Espécie	d (mm)		
	10	12,5	16
	f_{h0} (MPa)	f_{h0} (MPa)	f_{h0} (MPa)
Paricá	24,2	25,2	23,7
(CV)	8,2%	12,9%	12,6%
Caixeta	31,8	31,0	29,2
(CV)	5,1%	10,0%	6,1%
Caucho	39,7	37,2	35,6
(CV)	14,9%	11,4%	14,6%
Caroba	32,6	31,0	31,3
(CV)	8,5%	6,3%	4,9%
Cedrinho	42,8	41,0	39,2
(CV)	2,1%	2,6%	3,1%
Catuaba	42,0	42,2	39,9
(CV)	5,3%	6,5%	6,0%
Catanudo	52,6	51,5	48,9
(CV)	3,5%	4,4%	4,0%
E. grandis	52,5	51,3	51,3
(CV)	6,4%	8,2%	8,2%
Goiabão	61,8	59,9	56,7
(CV)	3,6%	2,8%	2,7%
Roxinho	57,4	56,4	59,2
(CV)	6,9%	9,7%	7,8%

Fonte: autor.

4.3 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS)

Os resultados experimentais de resistência embutimento na direção perpendicular às fibras ($f_{h90,EXP}$) e de densidade encontram-se na Tabela 17. Ambos corrigidos para um teor de umidade igual a 12%.

Tabela 17 – Valores de $f_{h90,EXP}$.

Espécie/Propriedade	d (mm)									
	10			12,5			16			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Caucho	f_{h90} (MPa)	27,8	34,9	13,3	18,5	14,9	18,4	14,0	31,9	24,6
	U (%)	12,5	12,5	12,4	11,6	11,3	11,6	11,4	11,4	11,4
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,50	0,55	0,33	0,46	0,48	0,47	0,39	0,54	0,47
Caroba	f_{h90} (MPa)	12,2	13,5	18,2	16,4	13,4	13,6	21,4	20,3	19,3
	U (%)	12,2	12,2	11,8	11,7	11,9	12,6	12,8	12,7	12,3
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,39	0,41	0,44	0,44	0,48	0,47	0,47	0,46	0,41
Catuaba	f_{h90} (MPa)	33,5	29,8	31,6	22,5	21,7	25,3	32,6	33,8	27,4
	U (%)	14,2	14,6	14,1	13,5	13,9	13,8	14,0	14,1	13,2
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,58	0,59	0,59	0,59	0,60	0,58	0,59	0,60	0,61
Catanudo	f_{h90} (MPa)	52,7	53,2	62,0	42,7	46,0	44,5	55,8	56,2	57,9
	U (%)	12,8	13,0	13,1	12,1	12,9	12,8	12,5	12,5	12,6
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,80	0,79	0,68	0,73	0,71	0,68	0,70	0,74	0,70
Goiabão	f_{h90} (MPa)	65,7	86,8	62,8	61,7	62,3	64,3	74,5	64,5	63,5
	U (%)	12,7	12,4	13,8	12,2	13,0	12,9	13,6	13,0	12,9
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,83	0,95	0,80	0,88	0,86	0,88	0,89	0,84	0,85
Roxinho	f_{h90} (MPa)	73,9	85,1	92,5	57,4	62,8	68,1	66,5	77,9	64,6
	U (%)	13,4	13,2	13,5	12,0	12,9	13,1	13,4	12,8	13,4
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,74	0,78	0,77	0,80	0,87	0,87	0,75	0,79	0,77

Fonte: autor.

Os valores médios experimentais de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores médios de $f_{h90,EXP}$.

Espécie	d (mm)					
	10		12,5		16	
	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)	f_{h0} (MPa)	ρ_{12} (g/cm ³)
Caucho	25,3	0,46	17,3	0,47	23,5	0,47
	(CV) 43,5%	25,1%	11,9%	2,1%	38,3%	16,1%
Caroba	14,6	0,41	14,5	0,46	20,3	0,45
	(CV) 21,6%	6,1%	11,6%	4,5%	5,2%	7,2%
Catuaba	31,6	0,59	23,2	0,59	31,3	0,60
	(CV) 5,8%	1,0%	8,2%	1,7%	10,9%	1,7%
Catanudo	56,0	0,76	44,4	0,71	56,6	0,71
	(CV) 9,3%	8,8%	3,7%	3,6%	2,0%	3,2%
Goiabão	71,8	0,86	62,8	0,87	67,5	0,86
	(CV) 18,3%	9,2%	2,2%	1,3%	9,0%	3,1%
Roxinho	83,8	0,76	62,8	0,85	69,7	0,77
	(CV) 11,2%	2,7%	8,5%	4,8%	10,3%	2,6%

Fonte: autor.

Os valores teóricos de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras ($f_{h90,TEO}$) são apresentados na Tabela 19, e foram estimados por meio da Equação 41. As densidades aparentes apresentadas na Tabela 17 foram utilizadas, bem como os diâmetros dos pinos empregados nos ensaios: 9,5 mm para o diâmetro de 10 mm, 12,6 mm para o diâmetro de 12,5 mm e 15,9 mm para o diâmetro de 16 mm.

Tabela 19 – Valores de $f_{h90,TEO}$.

Espécie	d (mm)	CP	f_{h90} (MPa)	Espécie	d (mm)	CP	f_{h90} (MPa)
Caucho	10	1	35,6	Catanudo	10	1	57,0
		2	39,2			2	56,3
		3	23,5			3	48,5
	12,5	4	30,3		4	48,0	
		5	31,6		5	46,7	
		6	30,9		6	44,8	
	16	7	23,6		7	42,4	
		8	32,7		8	44,9	
		9	28,5		9	42,4	
Caroba	10	1	27,8	Goiabão	10	1	59,1
		2	29,2			2	67,7
		3	31,4			3	57,0
	12,5	4	29,0		4	57,9	
		5	27,6		5	56,6	
		6	29,6		6	57,9	
	16	7	28,5		7	53,9	
		8	27,9		8	50,9	
		9	24,9		9	51,5	
Catuaba	10	1	41,3	Roxinho	10	1	52,7
		2	42,0			2	55,6
		3	42,0			3	54,9
	12,5	4	38,8		4	52,6	
		5	39,5		5	57,3	
		6	38,2		6	57,3	
	16	7	35,8		7	45,5	
		8	36,4		8	47,9	
		9	37,0		9	46,7	

Fonte: autor.

Na Tabela 20 encontram-se os valores médios teóricos de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras.

Tabela 20 – Valores médios de $f_{h90,TEO}$.

Espécie	d (mm)		
	10	12,5	16
	f_{h0} (MPa)	f_{h0} (MPa)	f_{h0} (MPa)
Caucho	32,8	30,9	28,3
(CV)	25,1%	2,1%	16,1%
Caroba	29,5	28,7	27,1
(CV)	6,2%	3,6%	7,1%
Catuaba	41,8	38,8	36,4
(CV)	1,0%	1,7%	1,6%
Catanudo	53,9	46,5	43,2
(CV)	8,7%	3,5%	3,3%
Goiabão	61,3	57,5	52,1
(CV)	9,3%	1,3%	3,0%
Roxinho	54,4	55,7	46,7
(CV)	2,8%	4,9%	2,6%

Fonte: autor.

4.4 EFEITO DE CORDA E MÓDULO DE DESLIZAMENTO

Os resultados da caracterização das peças utilizadas na confecção dos protótipos quanto à resistência ao embutimento e à resistência à compressão, ambas na direção paralela às fibras da madeira, são apresentados nas Tabelas 21 e 22, respectivamente. Os valores de resistência ao embutimento, de resistência à compressão e de densidade não foram corrigidos para o teor de umidade de 12%, permitindo posterior comparação entre os resultados teóricos e experimentais de capacidade resistente e de módulo de deslizamento.

Tabela 21 – Caracterização quanto à f_{h0} .

Espécie	CP	d (mm)					
		10			12,5		
		f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ (g/cm ³)	f_{h0} (MPa)	U (%)	ρ (g/cm ³)
Caixeta	1	37,3	14,8	0,44	34,7	15,1	0,43
	2	35,0	14,6	0,40	33,5	15,2	0,39
	3	35,8	14,9	0,41	34,2	15,6	0,41
	4	33,7	14,9	0,40	29,1	15,1	0,41
	5	35,2	15,7	0,41	32,9	15,6	0,41
	6	33,2	14,9	0,40	30,3	15,8	0,39
Roxinho	1	71,9	14,4	0,73	69,4	14,9	0,73
	2	83,4	13,3	0,77	87,6	12,8	0,81
	3	77,7	14,5	0,75	73,9	14,1	0,77
	4	91,2	13,8	0,80	82,6	13,9	0,79
	5	83,6	12,2	0,80	83,2	12,7	0,90
	6	91,6	12,8	0,87	94,7	13,1	0,80

Fonte: autor.

Tabela 22 – Caracterização quanto à f_{c0} .

Espécie/Propriedade		Peça					
		1	2	3	4	5	6
Caixeta	f_{c0} (MPa)	33,3	29,5	31,8	30,6	30,4	29,3
	U (%)	14,2	14,4	14,2	14,7	15,0	15,5
Roxinho	f_{c0} (MPa)	58,0	65,8	57,2	64,2	69,0	73,6
	U (%)	15,0	13,9	14,5	13,7	12,6	13,7

Fonte: autor.

Os valores experimentais de capacidade de carga dos protótipos de ligação (F_{EXP}) são apresentados na Tabela 23. Os valores teóricos (F_{TEO}), por sua vez, encontram-se na Tabela 24, tendo sido calculados a partir dos valores experimentais de resistência ao embutimento e de resistência à compressão mostrados nas tabelas 21 e 22, respectivamente, e dos diâmetros dos pinos utilizados nos ensaios: 9,5 mm para o diâmetro de 10 mm, 12,6 mm para o diâmetro de 12,5 mm e 15,9 mm para o diâmetro de 16 mm.

Os valores médios de F_{EXP} e F_{TEO} são mostrados nas Tabelas 25 e 26, respectivamente.

Tabela 23 – Valores de F_{EXP} .

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$F_{EXP,SEM}$ (N)	$F_{EXP,COM}$ (N)	$F_{EXP,SEM}$ (N)	$F_{EXP,COM}$ (N)
Caixeta	1	26232	48739	42512	61439
	2	23781	43149	36579	52269
	3	24222	45797	40992	52171
	4	23046	42169	39227	50897
	5	23193	45895	40256	54231
	6	22506	43591	37265	47758
Roxinho	1	47415	92428	66685	135332
	2	58399	101499	74187	141706
	3	47072	87279	63155	129938
	4	58006	98067	74531	152003
	5	55015	108609	73942	162790
	6	60948	109099	83357	169165

Fonte: autor.

Tabela 24 – Valores de F_{TEO} .

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$F_{TEO,SEM}$ (N)	$F_{TEO,COM}$ (N)	$F_{TEO,SEM}$ (N)	$F_{TEO,COM}$ (N)
Caixeta	1	21143	26449	32568	40688
	2	20368	25085	31911	39325
	3	20516	25644	32038	39580
	4	19780	24762	29606	34058
	5	20045	25233	31322	38148
	6	19623	24458	29910	34931
Roxinho	1	34823	43581	51750	65106
	2	38707	48445	60458	75796
	3	36755	45738	54211	67901
	4	41561	52005	58477	73148
	5	38913	48543	58889	73530
	6	41639	51956	64322	80365

Fonte: autor.

Tabela 25 – Valores médios de F_{EXP} .

Espécie	d (mm)			
	10		12,5	
	F_{SEM} (N)	F_{COM} (N)	F_{SEM} (N)	F_{COM} (N)
Caixeta	23830	44890	39472	53128
(CV)	5,5%	5,3%	5,7%	8,7%
Roxinho	54476	99497	72643	148489
(CV)	10,9%	8,8%	9,7%	10,5%

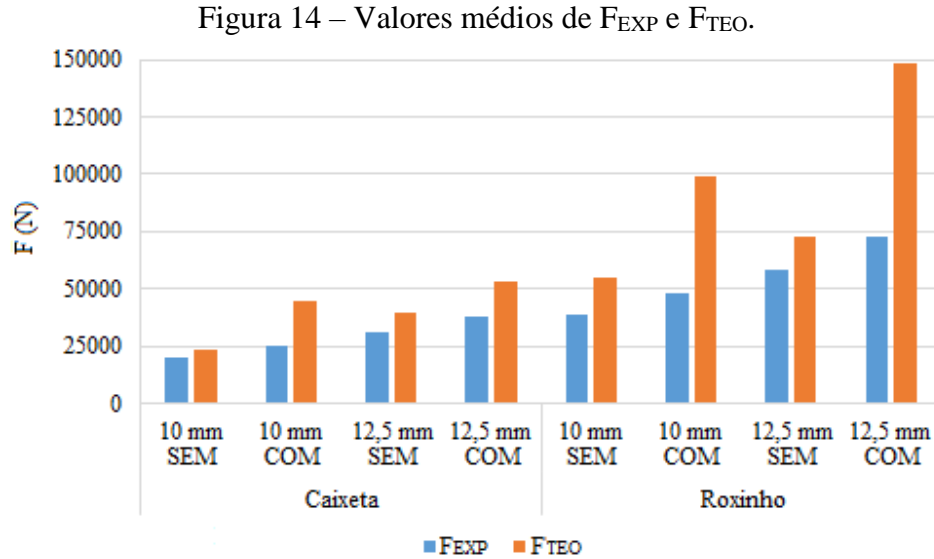
Fonte: autor.

Tabela 26 – Valores médios de F_{TEO} .

Espécie	d (mm)			
	10		12,5	
	F_{SEM} (N)	F_{COM} (N)	F_{SEM} (N)	F_{COM} (N)
Caixeta	20246	25272	31226	37788
(CV)	2,7%	2,8%	3,9%	7,1%
Roxinho	38733	48378	58018	72641
(CV)	6,9%	6,9%	7,7%	7,5%

Fonte: autor.

Um gráfico de barras com os valores médios experimentais e teóricos de capacidade resistente dos protótipos de ligação é apresentado na Figura 14.



Fonte: autor.

Os valores experimentais de módulo de deslizamento dos protótipos de ligação ($K_{SER,EXP}$) são apresentados na Tabela 27. Na Tabela 28, encontram-se os valores teóricos ($K_{SER,TEO}$), os quais foram calculados utilizando a densidade média de cada corpo de prova e o os diâmetros dos pinos utilizados nos ensaios: 9,5 mm para o diâmetro de 10 mm, 12,6 mm para o diâmetro de 12,5 mm e 15,9 mm para o diâmetro de 16 mm.

Os valores médios de $K_{SER,EXP}$ e $K_{SER,TEO}$ são mostrados nas Tabelas 29 e 30, respectivamente.

Tabela 27 – Valores de $K_{SER,EXP}$.

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$K_{SER,EXP,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,COM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,COM}$ (N/mm)
Caixeta	1	10816	14629	*	*
	2	7282	9356	12791	13737
	3	8969	13648	16743	13631
	4	7141	10941	11973	12475
	5	8756	13043	19068	15087
	6	7392	9356	11072	9861
Roxinho	1	30968	*	*	53982
	2	42029	39227	*	*
	3	31117	32241	*	34758
	4	28141	33432	65866	56811
	5	29690	29868	68953	60128
	6	29155	31805	64897	66432

* Valores não obtidos (Problemas durante a leitura dos deslocamentos relativos)

Fonte: autor.

Tabela 28 – Valores de $K_{SER,TEO}$.

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$K_{SER,TEO,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,COM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,COM}$ (N/mm)
Caixeta	1	16146	15670	21115	21508
	2	14559	13780	18679	19409
	3	14566	14902	19911	19589
	4	13873	14011	19236	19149
	5	13873	14533	19953	19615
	6	14628	14442	19158	18787
Roxinho	1	25611	25730	33940	34318
	2	26960	26677	36514	36143
	3	24700	24958	33576	33361
	4	27707	29956	36428	36778
	5	27707	28214	39040	39659
	6	27997	31629	42514	42735

Fonte: autor.

Tabela 29 – Valores médios de $K_{SER,EXP}$.

Espécie	d (mm)			
	10		12,5	
	$K_{SER,EXP,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,COM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,EXP,COM}$ (N/mm)
Caixeta	8393	11829	14329	12958
(CV)	17,0%	19,1%	23,9%	15,2%
Roxinho	31850	33315	66572	54422
(CV)	16,0%	10,6%	3,2%	1,9%

Fonte: autor.

Tabela 30 – Valores médios de $K_{SER,TEO}$.

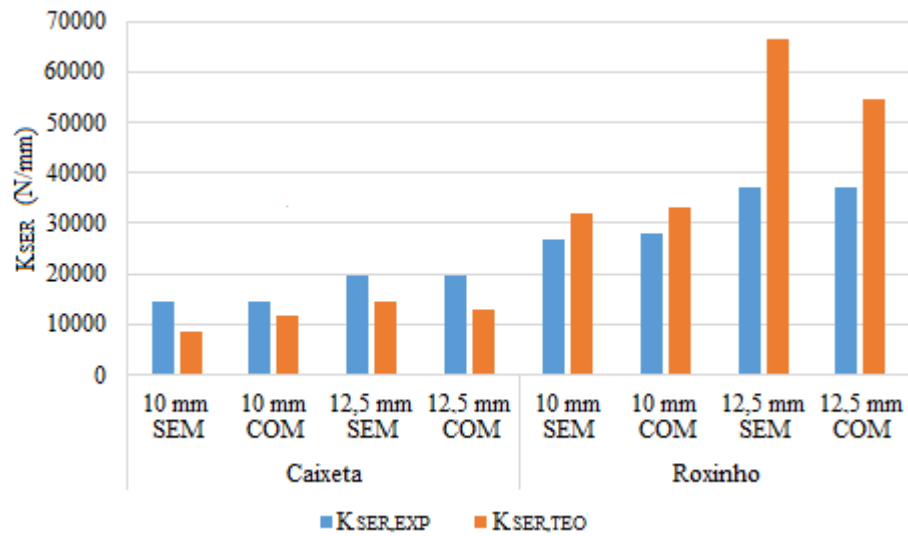
Espécie	d (mm)			
	10		12,5	
	$K_{SER,TEO,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,COM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,SEM}$ (N/mm)	$K_{SER,TEO,COM}$ (N/mm)
Caixeta	14608	14556	19675	19676
(CV)	5,7%	4,6%	4,3%	4,8%
Roxinho	26780	27861	37002	37166
(CV)	5,0%	9,2%	9,1%	9,4%

Fonte: autor.

Na Figura 15 é mostrado um gráfico de barras com os valores médios experimentais e teóricos de módulo de deslizamento dos protótipos de ligação.

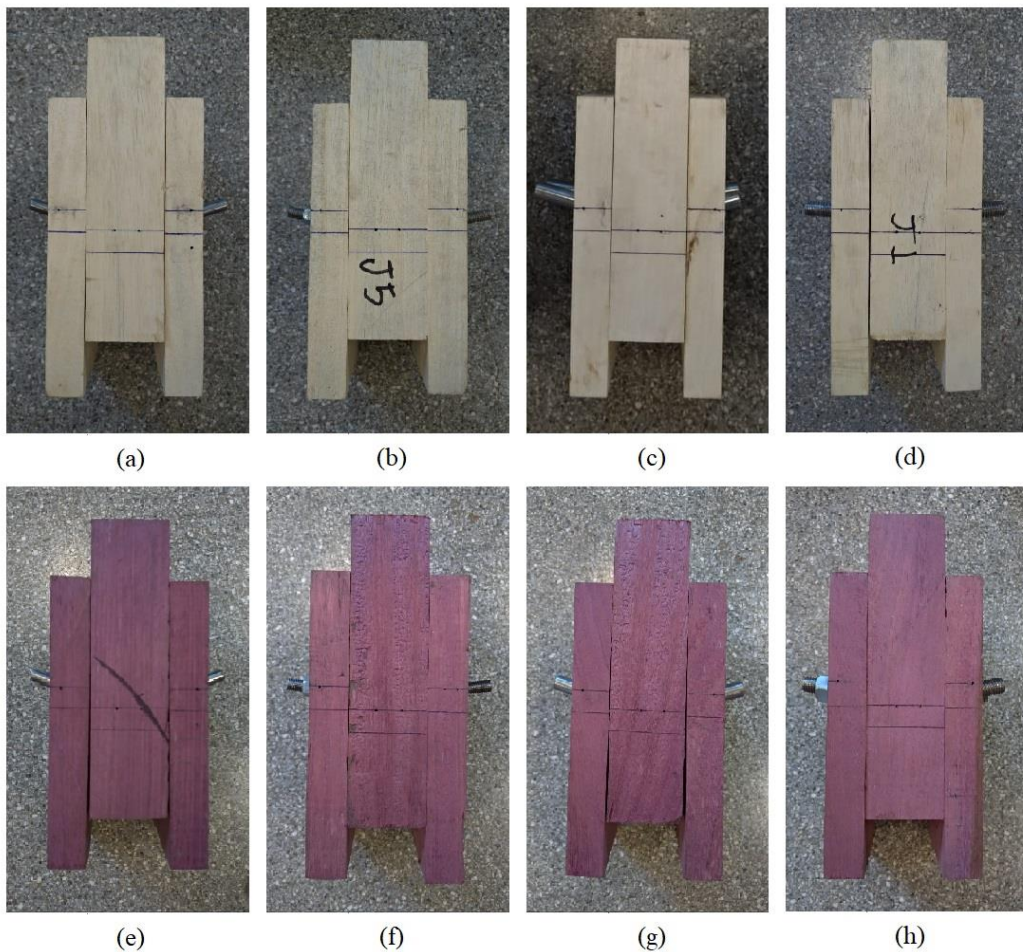
Com relação aos modos de ruptura dos protótipos de ligação, esses podem ser observados por meio da Figura 16. Em todos os casos, era previsto que a falha ocorreria devido a flexão dos pinos metálico, conforme o modo de ruptura (c) da Figura 2. As únicas exceções eram os protótipos elaborados a partir da espécie caixeta e parafusos com 12,5 mm de diâmetro providos de porcas e arruelas, cujo modo de ruptura associado era o embutimento dos parafusos na peça central.

Figura 15 – Valores médios de $K_{SER,TEO}$ e $K_{SER,EXP}$.



Fonte: autor.

Figura 16 – Modos de ruptura dos protótipos de ligação: (a) Caixeta, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas; (b) Caixeta, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas; (c) Caixeta, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas; (d) Caixeta, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas; (e) Roxinho, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas; (f) Roxinho, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas; (g) Roxinho, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas; (h) Roxinho, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas.



Fonte: autor.

Por meio da Figura 17, é possível observar que o espaçamento adotado, apesar de estar em concordância com o Eurocode 5:2004, não foi o suficiente para evitar o aparecimento do fendilhamento em alguns protótipos elaborados a partir da espécie Roxinho. Nota-se que o fendilhamento ocorreu em corpos de prova elaborados para pinos com diâmetro igual a 12,5mm, sendo esses providos de porcas e arruelas ou não.

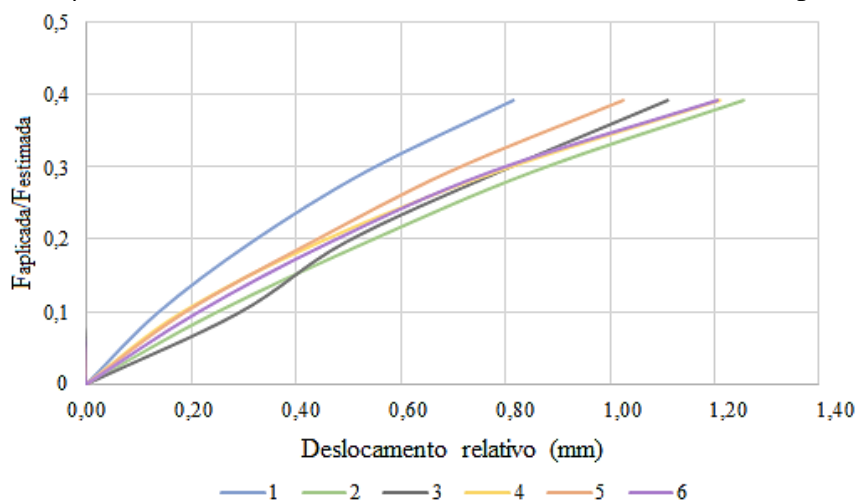
Figura 17 – Fendilhamento dos protótipos de ligação da espécie Roxinho e diâmetro igual a 12,5 mm: sem porcas e arruelas à esquerda e com porcas e arruelas à direita.



Fonte: autor.

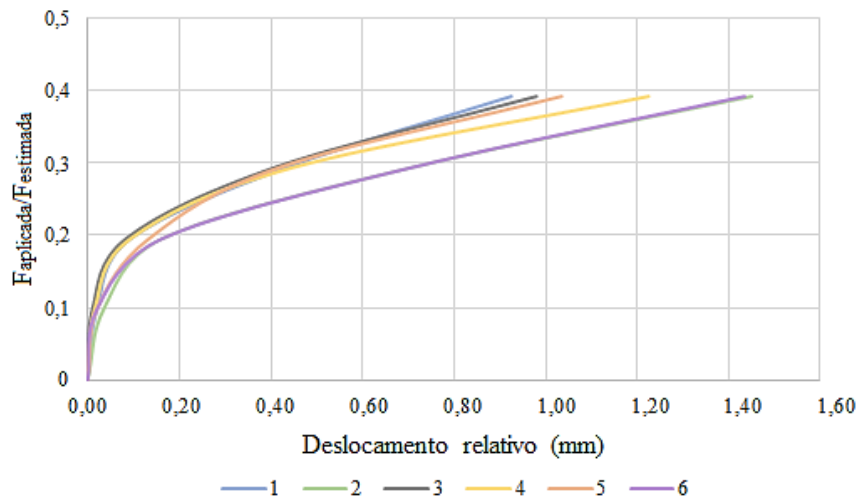
Nas Figuras 18, 19, 20 e 21, são apresentadas relações entre o deslocamento relativo e a razão $F_{aplicada}/F_{estimada}$ para cada um dos arranjos da espécie Caixeta testados. As relações mostradas são referentes ao primeiro ciclo de carregamento.

Figura 18 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Caixeta, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas.



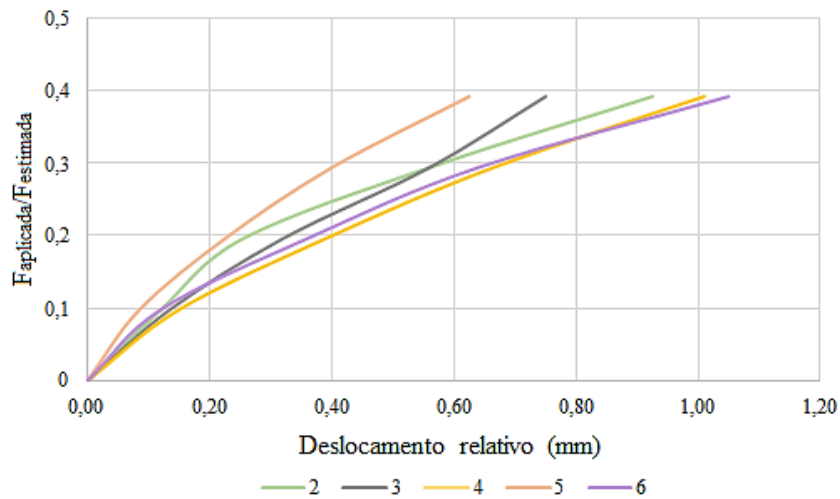
Fonte: autor.

Figura 19 – $F_{\text{aplicada}}/F_{\text{estimada}}$ x Deslocamento: Caixaeta, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas.



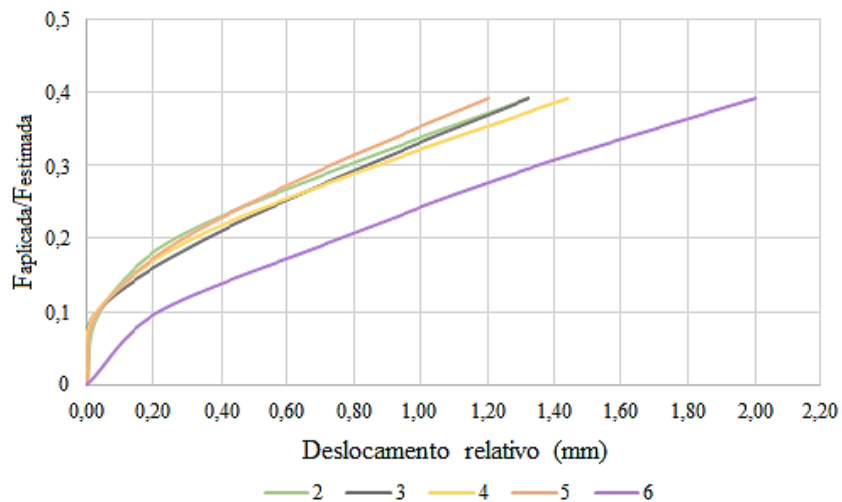
Fonte: autor.

Figura 20 – $F_{\text{aplicada}}/F_{\text{estimada}}$ x Deslocamento: Caixaeta, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas.



Fonte: autor.

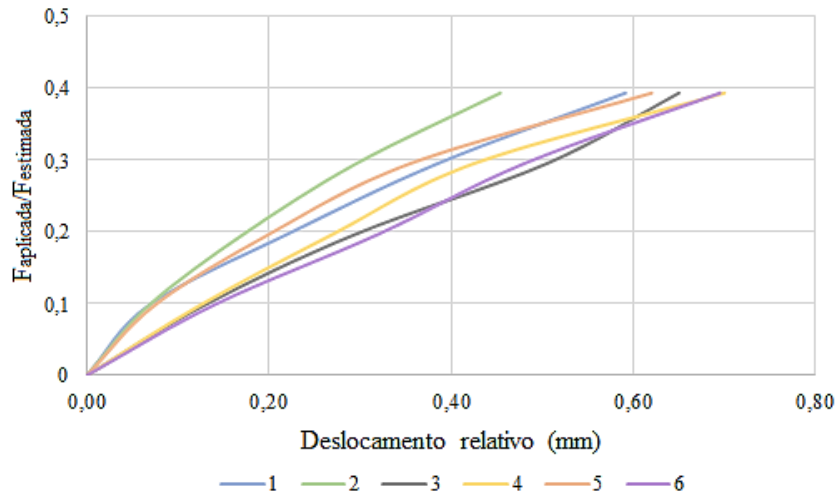
Figura 21 – $F_{\text{aplicada}}/F_{\text{estimada}}$ x Deslocamento: Caixaeta, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas.



Fonte: autor.

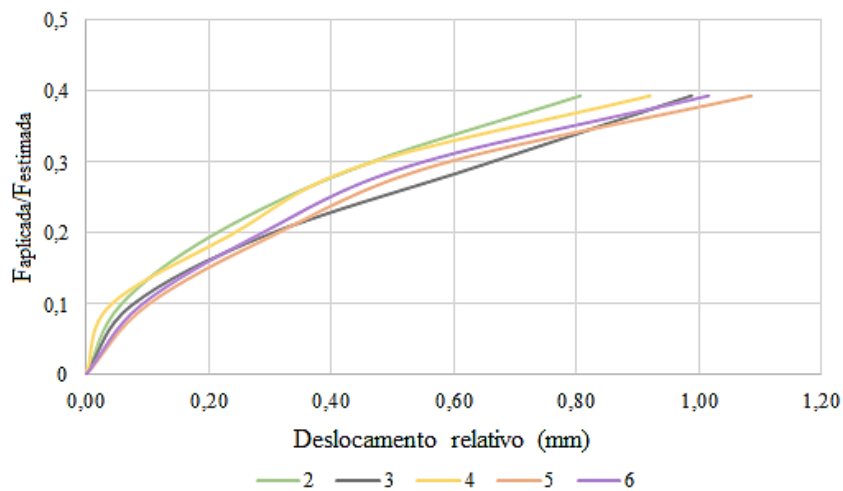
Relações entre o deslocamento relativo e a razão $F_{aplicada}/F_{estimada}$, referentes ao primeiro ciclo de carregamento dos protótipos da espécie Roxinho, são apresentadas nas Figura 22, 23, 24 e 25 para cada um dos arranjos testados.

Figura 22 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, $d = 10$ mm, sem porcas e arruelas.



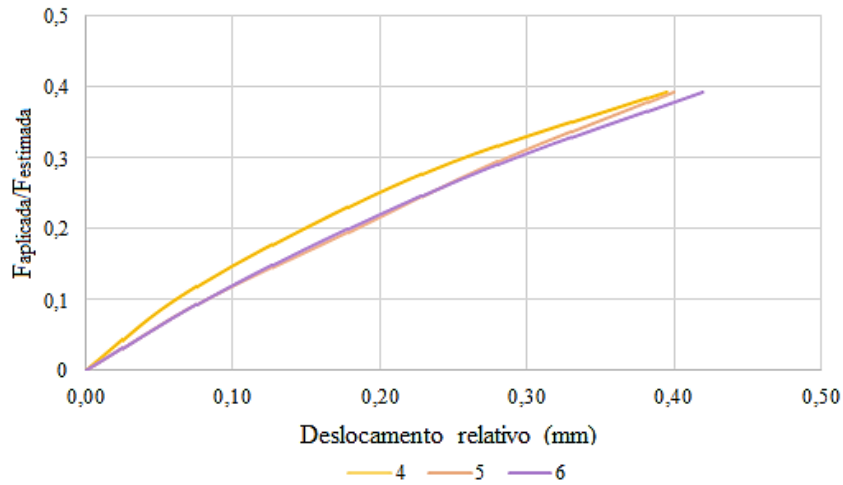
Fonte: autor.

Figura 23 – $F_{aplicada}/F_{estimada}$ x Deslocamento: Roxinho, $d = 10$ mm, com porcas e arruelas.



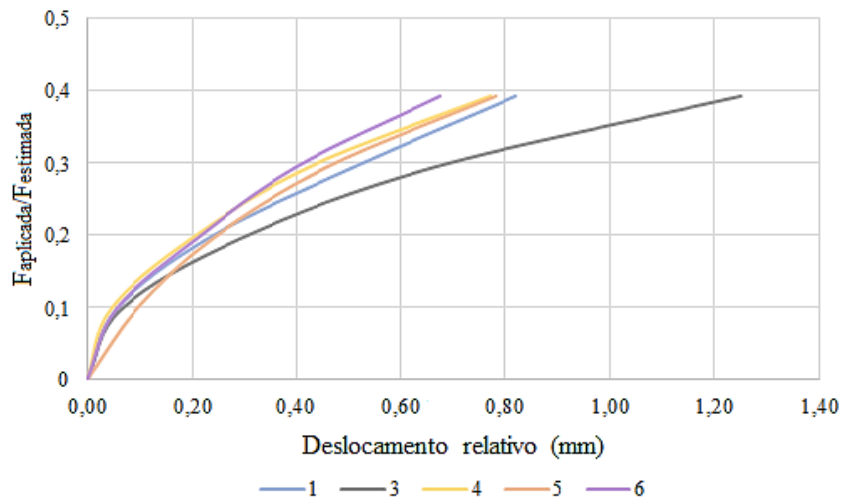
Fonte: autor.

Figura 24 – $F_{\text{aplicada}}/F_{\text{estimada}}$ x Deslocamento: Roxinho, $d = 12,5$ mm, sem porcas e arruelas.



Fonte: autor.

Figura 25 – $F_{\text{aplicada}}/F_{\text{estimada}}$ x Deslocamento: Roxinho, $d = 12,5$ mm, com porcas e arruelas.



Fonte: autor.

Nas Figuras 26, 27, 28 e 29, são apresentadas relações entre a força aplicada e o deslocamento relativo para cada diâmetro de pino e para cada espécie. Os gráficos apresentados são referentes ao primeiro ciclo de carregamento.

Figura 26 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Caixaeta, $d = 10$ mm.

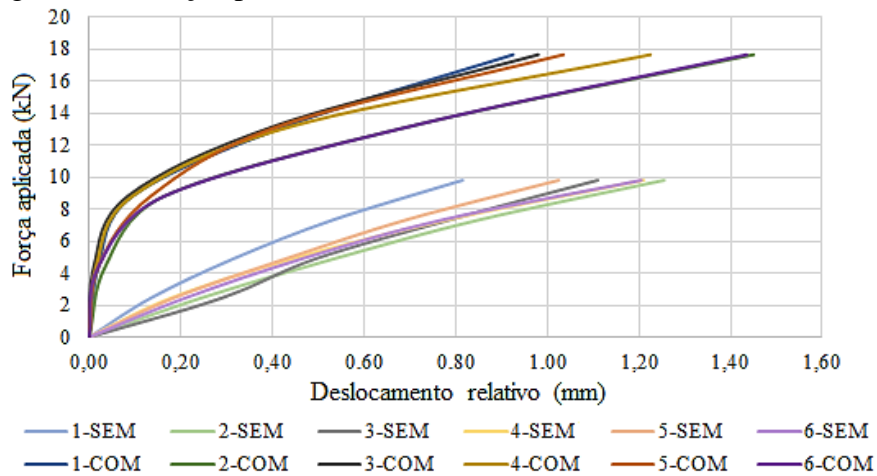


Figura 27 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Caixaeta, $d = 12,5$ mm.

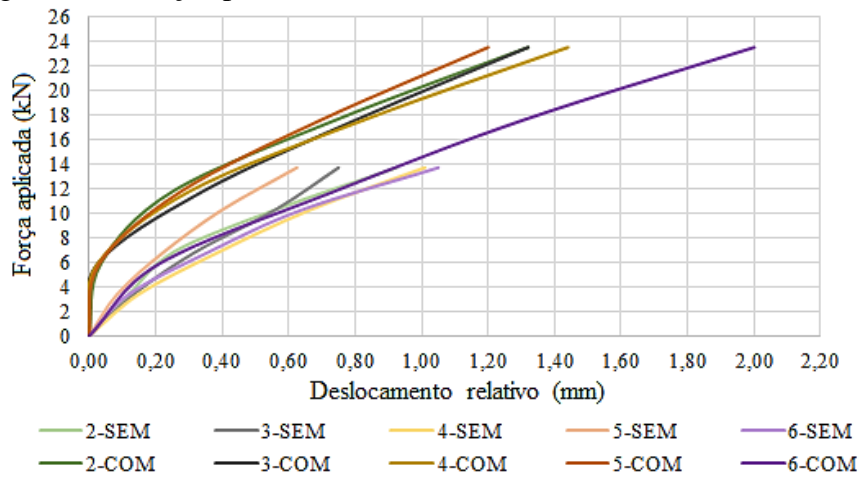


Figura 28 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Roxinho, $d = 10$ mm.

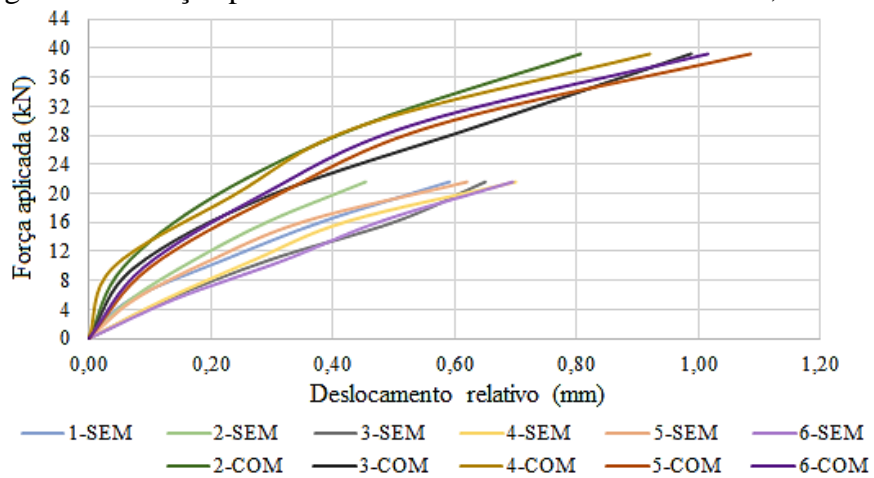
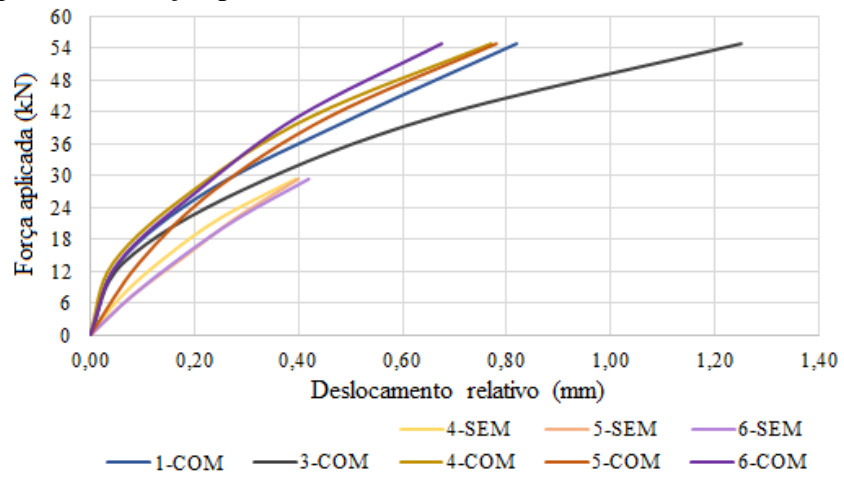


Figura 29 – Força aplicada x Deslocamento relativo: Roxinho, $d = 12,5$ mm.

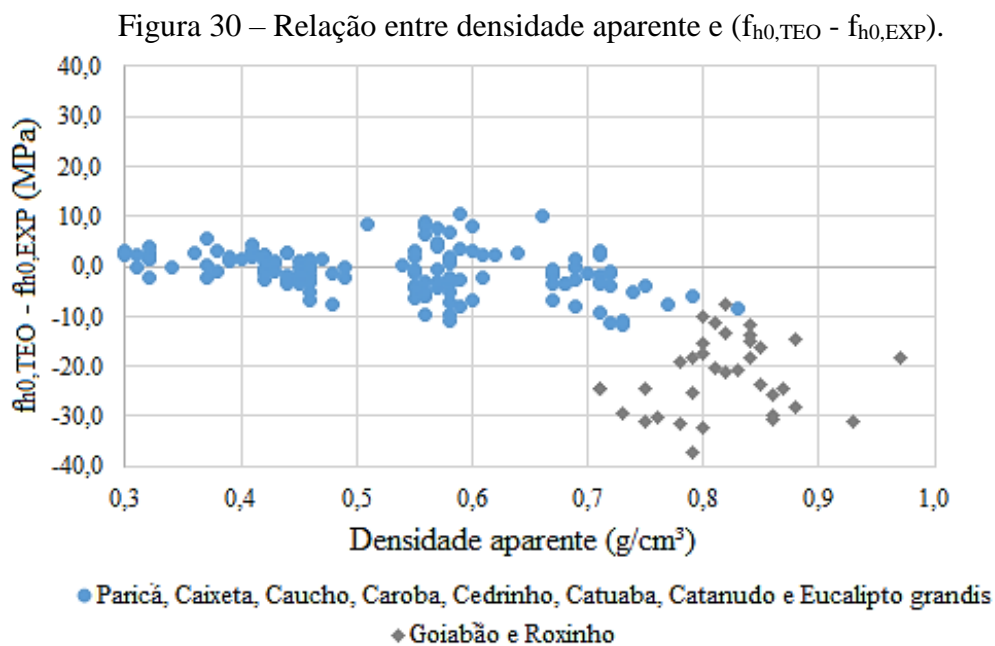
Fonte: autor.

5 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas comparações entre os resultados teóricos e experimentais de resistência ao embutimento em ambas as direções. Os resultados teóricos e experimentais de capacidade de carga e módulo de deslizamento dos protótipos de ligação também são avaliados.

5.1 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS)

Inicialmente, construiu-se um gráfico relacionando a densidade aparente de cada corpo de prova com a diferença entre os valores teórico ($f_{h0,TEO}$) e experimental ($f_{h0,EXP}$) de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, conforme mostrado na Figura 30.



Fonte: autor.

A partir da Figura 30, é possível observar que, para as espécies Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Eucalipto grandis, as diferenças entre os valores teóricos e experimentais de resistência ao embutimento são próximas a zero, o que não ocorre no caso das espécies Goiabão e Roxinho. Por esse motivo, uma análise estatística por meio do teste t de Student para amostras dependentes (teste t pareado) foi realizada separadamente para os conjuntos dos resultados desses dois grupos de espécies. A normalidade das distribuições foi verificada previamente por meio do teste de Anderson-Darling.

O resultado da análise estatística para ambos os grupos de espécies é apresentado na Tabela 31, em que um nível de significância de 10% foi adotado.

Tabela 31 – Análise estatística de ($f_{h0,TEO} - f_{h0,EXP}$).

Espécies	n	α (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	t	t _{crit}
Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Eucalipto grandis	136	10	-0,9	4,4	2,27	1,66
Goiabão e Roxinho	35	10	-22,0	7,5	17,25	1,69

Fonte: autor.

No caso das espécies Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Eucalipto grandis, o resultado do teste aponta para a existência de diferenças entre $f_{h0,TEO}$ e $f_{h0,EXP}$. Apesar disso, observa-se uma boa concordância entre ambos, tendo em vista que, na maior parte dos casos, os valores das diferenças são próximas a zero.

No que diz respeito às espécies Goiabão e Roxinho, constatou-se que os valores de $f_{h0,TEO}$ e $f_{h0,EXP}$ são, de fato, diferentes. No entanto, a estimativa realizada é conservadora, uma vez que os valores teóricos são sempre inferiores aos experimentais.

Nas Tabelas 32, 33 e 34, são apresentadas as relações entre as resistências ao embutimento teóricas e experimentais para os diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm, respectivamente.

Tabela 32 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 10 mm.

Espécie	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	Espécie	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$
Paricá	1	1,20	7	1,10	Catuaba	1	1,18	7	1,22
	2	1,00	8	1,17		2	1,22	8	1,13
	3	1,25	9	1,12		3	1,26	9	1,28
Caixeta	1	0,98	6	1,16	Catanudo	1	0,94	7	0,88
	2	1,09	7	1,04		2	0,95	8	0,98
	3	1,03	8	1,08		3	0,91	9	0,98
Caucho	1	1,05	7	0,91	E. grandis	1	0,93	4	0,97
	2	1,05	8	1,05		2	0,97	5	1,00
	3	0,94	9	0,98		3	0,91	6	1,04
Caroba	1	1,01	7	0,96	Goiabão	1	0,89	7	0,82
	2	1,11	8	1,09		2	0,82	8	0,76
	3	1,12	9	1,03		3	0,80	9	0,84
Cedrinho	1	0,91	7	0,95	Roxinho	1	0,68	4	0,61
	2	0,90	8	0,98		2	0,65	5	0,70
	3	1,09	9	0,88		3	0,65	6	0,68

Fonte: autor.

Tabela 33 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 12,5 mm.

Espécie	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	Espécie	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$
Paricá	1	0,99	4	1,03	Catuaba	1	1,01	4	1,19
	2	0,91	5	1,08		2	1,08	5	1,10
	3	1,12	6	0,93		3	1,25	6	1,27
Caixeta	1	1,00	4	0,92	Catanudo	1	0,82	4	0,93
	2	1,05	5	0,96		2	0,93	5	0,82
	3	0,92				3	0,88	6	0,99
Caucho	1	0,96	4	0,82	E. grandis	1	1,03	4	0,94
	2	0,86	5	0,92		2	0,97	5	0,93
	3	0,87	6	0,80		3	0,88	6	1,06
Caroba	1	0,99	4	0,92	Goiabão	1	0,79	4	0,84
	2	1,08	5	0,90		2	0,74	5	0,72
	3	1,08	6	0,91		3	0,74	6	0,82
Cedrinho	1	0,93	4	0,92	Roxinho	1	0,68	4	0,64
	2	0,94	5	0,89		2	0,64	5	0,63
	3	1,33	6	0,99		3	0,69	6	0,68

Fonte: autor.

Tabela 34 – Relação $f_{h0,TEO}/f_{h0,EXP}$ para o diâmetro de 16 mm.

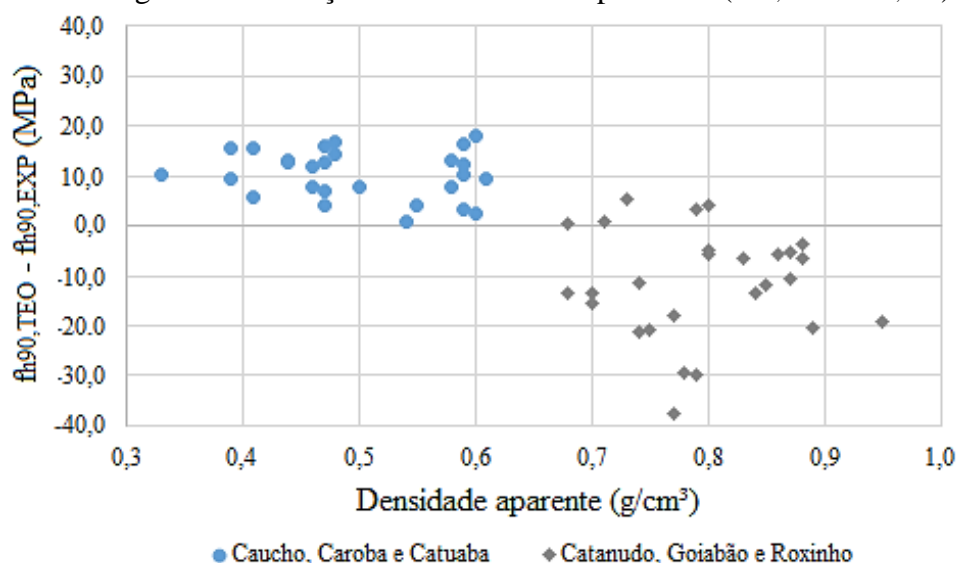
Espécie	CP	$\frac{f_{h0,TEO}}{f_{h0,EXP}}$	Espécie	CP	$\frac{f_{h0,EXP}}{f_{h0,TEO}}$	Espécie	CP	$\frac{f_{h0,EXP}}{f_{h0,TEO}}$
Paricá	4	0,96	Caroba	4	1,04	Catanudo	4	0,97
	5	1,08		5	0,95		5	0,82
	6	1,01		6	1,05		6	0,86
	7	1,09		7	0,93		7	0,99
	8	1,11		8	1,09		8	0,93
	9	1,09		9	0,96		9	0,84
Caixeta	4	1,00	Cedrinho	4	0,83	Goiabão	4	0,85
	5	1,03		5	0,93		5	0,71
	6	1,07		6	0,90		6	0,73
	7	0,90		7	0,81		7	*
	8	1,04		8	0,86		8	0,76
			9	0,85	9	0,76		
Caucho	4	0,82	Catuaba	4	1,04	Roxinho	1	0,78
	5	0,99		5	1,05		2	0,68
	6	0,78		6	1,07		3	0,74
	7	0,87		7	0,95		4	0,66
	8	0,95		8	1,09		5	0,70
	9	0,96		9	1,01		6	0,79

* Valor não obtido

Fonte: autor.

5.2 RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO (DIREÇÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS)

De forma similar ao realizado no anterior, uma análise preliminar das diferenças entre os valores teóricos ($f_{h90,TEO}$) e experimentais ($f_{h90,EXP}$) de resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras da madeira e foi realizada, a qual é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Relação entre densidade aparente e ($f_{h90,TEO}$ e $f_{h90,EXP}$).

Fonte: autor.

A análise estatística das diferenças entre $f_{h90,TEO}$ e $f_{h90,EXP}$ por meio do teste t pareado foi realizada separadamente para os dois grupos de espécies mostrados na Figura 31. O resultado da análise em questão encontra-se na Tabela 35, em que um nível de significância de 10% foi adotado e a normalidade da distribuição foi previamente avaliada por meio do teste de Anderson-Darling.

Tabela 35 – Análise estatística de ($f_{h90,TEO} - f_{h90,EXP}$).

Espécies	n	α (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	t	t _{crit}
Caucho, Caroba e Catuaba	27	10	10,3	4,8	11,14	1,71
Catanudo, Goiabão e Roxinho	27	10	- 11,6	10,8	5,56	1,71

Fonte: autor.

Em ambos os casos, o teste aponta para a existência de diferenças entre os valores de $f_{h90,TEO}$ e $f_{h90,EXP}$. Contudo, no caso das espécies Caucho, Caroba e Catuaba, os valores teóricos foram sempre superiores aos valores experimentais, caracterizando uma situação contra a segurança. O contrário é observado para as espécies Catanudo, Goiabão e Roxinho.

As relações $f_{h90,TEO}/f_{h90,EXP}$ para os diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm são apresentadas na Tabelas 36.

Tabela 36 – Relação $f_{h90,TEO}/f_{h90,EXP}$.

Espécie	d (mm)	CP	$\frac{f_{h90,TEO}}{f_{h90,EXP}}$	Espécie	d (mm)	CP	$\frac{f_{h90,TEO}}{f_{h90,EXP}}$
Caucho	10	1	1,28	Catanudo	10	1	1,08
		2	1,12			2	1,06
		3	1,77			3	0,78
	12,5	4	1,64		4	1,12	
		5	2,12		5	1,02	
		6	1,68		6	1,01	
	16	7	1,69		7	0,76	
		8	1,03		8	0,80	
		9	1,16		9	0,73	
Caroba	10	1	2,28	Goiabão	10	1	0,90
		2	2,16			2	0,78
		3	1,73			3	0,91
	12,5	4	1,77		4	0,94	
		5	2,06		5	0,91	
		6	2,18		6	0,90	
	16	7	1,33		7	0,72	
		8	1,37		8	0,79	
		9	1,29		9	0,81	
Catuaba	10	1	1,23	Roxinho	10	1	0,71
		2	1,41			2	0,65
		3	1,33			3	0,59
	12,5	4	1,72		4	0,92	
		5	1,82		5	0,91	
		6	1,51		6	0,84	
	16	7	1,10		7	0,68	
		8	1,08		8	0,61	
		9	1,35		9	0,72	

Fonte: autor.

5.3 CAPACIDADE RESISTENTE DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO

Na Tabela 37, são apresentadas as relações entre os valores das capacidades resistentes teóricas (F_{TEO}) e experimentais (F_{EXP}) dos protótipos de ligação. De modo geral, é possível observar que o critério de dimensionamento adotado pelo projeto de revisão da norma brasileira conduz a resultados conservadores, com valores teóricos sempre inferiores aos experimentais.

A partir dos dados constantes na Tabela 37, é possível verificar se existem diferenças significativas entre os valores de F_{TEO}/F_{EXP} para protótipos elaborados com e sem porcas e aruelas. O resultado da análise em questão é mostrado na Tabela 38, onde o teste t pareado foi empregado. Um nível de significância igual a 10% foi adotado e a normalidade de cada distribuição de diferenças foi verificada por meio do teste de Anderson-Darling.

Tabela 37 – Relações F_{TEO}/F_{EXP} .

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$\frac{F_{TEO,SEM}}{F_{EXP,SEM}}$	$\frac{F_{TEO,COM}}{F_{EXP,COM}}$	$\frac{F_{TEO,SEM}}{F_{EXP,SEM}}$	$\frac{F_{TEO,COM}}{F_{EXP,COM}}$
Caixeta	1	0,81	0,54	0,77	0,66
	2	0,86	0,58	0,87	0,75
	3	0,85	0,56	0,78	0,76
	4	0,86	0,59	0,75	0,67
	5	0,86	0,55	0,78	0,70
	6	0,87	0,56	0,80	0,73
Roxinho	1	0,73	0,47	0,78	0,48
	2	0,66	0,48	0,81	0,53
	3	0,78	0,52	0,86	0,52
	4	0,72	0,53	0,78	0,48
	5	0,71	0,45	0,80	0,45
	6	0,68	0,48	0,77	0,48

Fonte: autor.

Tabela 38 – Análise das diferenças entre os valores de F_{TEO}/F_{EXP} com relação ao uso de porcas e arruelas.

Espécie	d (mm)	n	α (%)	Média	Desvio Padrão	t	tcrit
Caixeta	10	6	10	-0,29	0,02	32,90	2,02
	12,5	6	10	-0,08	0,03	5,88	2,02
Roxinho	10	6	10	-0,23	0,04	14,85	2,02
	12,5	6	10	-0,31	0,02	30,38	2,02

Fonte: autor.

Para ambas as espécies e ambos os diâmetros de pino, é possível observar que os valores de $|t|$ forem sempre superiores aos valores de $|t_{crit}|$, indicando que os valores de F_{TEO}/F_{EXP} para protótipos confeccionados com e sem porcas e arruelas são diferentes. Assim, constata-se que o critério de dimensionamento adotado pelo projeto de revisão da norma brasileira é mais conservador quando aplicado à ligações realizadas com porcas e arruelas.

É possível, ainda, avaliar a existência de diferenças entre as relações F_{TEO}/F_{EXP} no que diz respeito à espécie. Para tal, o teste t de Student para amostras independentes é realizado, e o resultado da análise em questão encontra-se na Tabela 39. Um nível de significância igual a 10% foi adotado e a normalidade das distribuições dos conjuntos de dados de cada espécie foi verificada previamente através do teste de Anderson-Darling.

Tabela 39 – Análise das diferença entre os valores de F_{TEO}/F_{EXP} com relação à espécie.

	d (mm)	n	α (%)	Média Caixeta	Média Roxinho	Variância Caixeta	Variância Roxinho	t	tcrit
Sem porcas e arruelas	10	6	10	0,85	0,71	$4,60 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	7,22	2,02
	12,5	6	10	0,79	0,80	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	-0,38	2,02
Com porcas e arruelas	10	6	10	0,56	0,49	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$9,40 \cdot 10^{-4}$	5,13	2,02
	12,5	6	10	0,71	0,49	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-4}$	10,61	2,02

Fonte: autor.

Com exceção dos protótipos confeccionados para pinos com diâmetro igual a 12,5 mm sem porcas e arruelas, observa-se que o critério de dimensionamento adotado no projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 foi mais conservador quando aplicado à espécie Roxinho, cujas relações F_{TEO}/F_{EXP} foram inferiores às apresentadas pela espécie Caixeta.

Na Tabela 40, são apresentadas relações entre os valores da capacidade resistente de protótipos confeccionados com (F_{COM}) e sem (F_{SEM}) porcas e arruelas. Essas relações permitem avaliar os ganhos experimentais e teóricos de resistência quando porcas e arruelas são utilizadas.

Tabela 40 – Relação F_{COM}/F_{SEM} .

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$\frac{F_{COM,EXP}}{F_{SEM,EXP}}$	$\frac{F_{COM,TEO}}{F_{SEM,TEO}}$	$\frac{F_{COM,EXP}}{F_{SEM,EXP}}$	$\frac{F_{COM,TEO}}{F_{SEM,TEO}}$
Caixeta	1	1,86	1,25	1,45	1,25
	2	1,81	1,23	1,43	1,23
	3	1,89	1,25	1,27	1,24
	4	1,83	1,25	1,30	1,15
	5	1,98	1,26	1,35	1,22
	6	1,94	1,25	1,28	1,17
Roxinho	1	1,95	1,25	2,03	1,26
	2	1,74	1,25	1,91	1,25
	3	1,85	1,24	2,06	1,25
	4	1,69	1,25	2,04	1,25
	5	1,97	1,25	2,20	1,25
	6	1,79	1,25	2,03	1,25

Fonte: autor.

As relações apresentados na Tabela 40 são superiores para valores experimentais, o que pode ser explicado pela limitação imposta aos valores teóricos do termo $F_{ax,Rk}/4$, relativo ao acréscimo de capacidade de carga proveniente do efeito de corda. Nota-se ainda que, devido ao modo de ruptura teórico associado aos protótipos cujos parafusos são providos de porcas e arruelas (embutimento do parafuso na peça de madeira central), os valores de $F_{COM,TEO}/F_{SEM,TEO}$ para os corpos de prova da espécie Caixeta com diâmetro de 12,5 mm são inferiores a 25%.

5.4 MÓDULO DE DESLIZAMENTO DOS PROTÓTIPOS DE LIGAÇÃO

Na Tabela 41, são apresentadas as relações entre os valores teóricos ($K_{SER,TEO}$) e experimentais ($K_{SER,EXP}$) dos módulos de deslizamento. Nota-se que, para a espécie Caixeta, os

valores de $K_{SER,TEO}$ são sempre superiores aos valores de $K_{SER,EXP}$, caracterizando uma situação contra a segurança. O contrário é observado para a espécie Roxinho.

Tabela 41 – Relação $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$.

Espécie	CP	d (mm)			
		10		12,5	
		$\frac{K_{SER,TEO,SEM}}{K_{SER,EXP,SEM}}$	$\frac{K_{SER,TEO,COM}}{K_{SER,EXP,COM}}$	$\frac{K_{SER,TEO,SEM}}{K_{SER,EXP,SEM}}$	$\frac{K_{SER,TEO,COM}}{K_{SER,EXP,COM}}$
Caixeta	1	1,49	1,07	*	*
	2	2,00	1,47	1,46	1,41
	3	1,62	1,09	1,19	1,44
	4	1,94	1,28	1,61	1,53
	5	1,58	1,11	1,05	1,30
	6	1,98	1,54	1,73	1,91
Roxinho	1	0,83	*	*	0,64
	2	0,64	0,68	*	*
	3	0,79	0,77	*	0,96
	4	0,98	0,90	0,55	0,65
	5	0,93	0,94	0,57	0,66
	6	0,96	0,99	0,66	0,64

Fonte: autor.

Uma análise estatística das diferenças entre as relações $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$ de protótipos confeccionados com e sem porcas e arruelas pode ser realizada por meio do teste t pareado, adotando-se um nível de significância igual a 10%. O teste foi realizado separadamente para cada espécie e diâmetro, e os resultados são apresentados na Tabela 42. A aderência das distribuições das diferenças à distribuição normal foi verificada previamente por meio do teste de Anderson-Darling.

Tabela 42 – Análise das diferenças entre os valores de $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$ com relação ao uso de porcas e arruelas.

Espécie	d (mm)	n	α (%)	Média	Desvio Padrão	t	tcrit
Caixeta	10	6	10	-0,51	0,09	14,30	2,02
	12,5	6	10	0,11	0,16	1,51	2,13
Roxinho	10	6	10	-4.10^{-3}	0,05	0,19	2,13
	12,5	6	10	0,06	0,07	1,47	2,92

Fonte: autor.

Com exceção dos protótipos da espécie Caixeta e pinos com 10 mm de diâmetro, o resultado do teste indicou que não existem diferenças entre os valores das relações $K_{SER,TEO}/K_{SER,EXP}$ para corpos de prova com e sem porcas e arruelas. O resultado em questão já era esperado, tendo em vista que, após superado o atrito inicial imposto pelo aperto das porcas, a relação entre a força aplicada e o deslocamento relativo tende a ser igual em ambos os casos, conforme mostrado nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

A diferença observada nos corpos de prova da espécie Caixeta e pinos com diâmetro igual a 10 mm pode ser explicada pela forma com que o valor teórico do módulo de deslizamento é estimado. O cálculo é realizado tomando-se as diferenças entre as forças e os deslocamentos relativos dos pontos referentes à 10% e 40% da força máxima estimada (F_{est}) para o ensaio e, no caso em questão, o atrito gerado pelo aperto das porcas ainda atuava quando a carga aplicada era igual a 10% de F_{est} (Figura 19).

6 CONCLUSÕES

Quanto aos ensaios de embutimento:

A análise estatística indicou que os valores teóricos e experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras são diferentes para as espécies Paricá, Caixeta, Caucho, Caroba, Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Eucalipto grandis. Contudo, apesar da conclusão apontada pelo teste, é possível notar uma boa concordância entre a estimativa realizada por meio da equação do projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 e os valores experimentais, tendo em vista que a distribuição das diferenças ocorreu com média próxima a zero. Além disso, observou-se que as diferenças são maiores para as espécies Cedrinho, Catuaba, Catanudo e Eucalipto grandis, que são as espécies de maior densidade do grupo e, no caso da espécie Catanudo, os valores experimentais foram sempre inferiores aos teóricos.

Para as espécies Goiabão e Roxinho, foram constatados valores experimentais significativamente superiores aos teóricos, demonstrando um conservadorismo do critério adotado quando aplicado às espécies em questão. Recomenda-se, portanto, a ampliação do estudo para espécies de madeiras de maior densidade, de modo a obter uma equação mais apropriada para o caso das espécies brasileiras, proporcionando um uso mais racional do material.

Quanto à resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras, notou-se que, para as espécies Caucho, Caroba e Catuaba, os valores obtidos experimentalmente foram inferiores aos estimados pela equação do projeto de revisão. No caso das espécies Catanudo, Goiabão e Roxinho, foram observados resultados conservadores. Assim, recomenda-se a realização de um estudo com maior amplitude de espécies que possibilite a definição de uma equação apropriada para as espécies de madeira brasileiras, principalmente para as de menor densidade.

Quanto aos ensaios dos protótipos de ligação:

No caso dos ensaios dos protótipos de ligação, o critério de dimensionamento adotado no projeto de revisão da norma brasileira conduziu a valores de capacidade resistente inferiores aos obtidos experimentalmente, sobretudo para a espécie Roxinho. Assim, do ponto de vista da segurança quanto aos Estados Limites Últimos, os resultados indicaram que o critério de dimensionamento do projeto de revisão é adequado em relação ao caso estudado, isto é, forças na direção paralela às fibras.

Além disso, constatou-se que as diferenças entre os valores teóricos e experimentais de protótipos cujos parafusos são desprovidos de porcas e arruelas são inferiores às apresentadas por protótipos providos de tal artifício. Os ganhos de resistência provenientes do uso de porcas e arruelas foram superiores para os valores experimentais, o que pode ser explicado pela limitação imposta ao efeito de corda quanto ao valor a ser acrescido.

Quanto aos módulos de deslizamento dos protótipos de ligação, os valores teóricos estimados para a espécie Caixeta foram sempre superiores aos obtidos experimentalmente. O contrário observou-se para o Roxinho, cujos valores experimentais do módulo de deslizamento foram sempre superiores. O emprego de porcas e arruelas não alterou o valor do módulo de deslizamento.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paula, São Carlos, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- BLASS, H.J.; BIENHAUS, A.; KRÄMER, V. Effective bending capacity of dowel-type fasteners. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON JOINTS IN TIMBER STRUCTURES, 2000, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart, RILEM, 2000. p. 71-80.
- COUTO, N.G.; GÓES, J.L.N. Avaliação experimental da resistência de ligações madeira-aço com chapas laterais em corte duplo e parafusos sextavados passantes. In: XVI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA E III CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais...** São Carlos: 2018. 13 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 26891**: Timber structures; joints made with mechanical fasteners; general principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussels: CEN, 1991.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 383**: Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Brussels: CEN, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
- HETTIARACHCHI, M.T.P.; NAWAGAMUWA, A.D. Embedment strength of tropical timber species. **Engineering**: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, v. 38,n.1, p. 39-45. 2005.
- JOHANSEN, K.W. Theory of timber connections. **International Association for Bridge and Structural Engineering**, v.9, p.249-262, 1949.
- JORISSEN, A. **Double shear timber connections with dowel type fasteners**. Delft: Delft University Press, 1998. 264 p.
- JUMAAT, M.Z. et al. The determination of the embedment strength of Malaysian hardwood. In: 9th World Conference on Timber Engineering, 2006, Portland. **Proceedings...** Portland, WCTE, 2006, v.2, p. 908-911.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**: I Solid Wood. New York: Springer-Verlag, 1968. 592 p.

MAIA, B.B.; GÓES, J.L.N. Resistência de ligações pregadas em madeira. In: II CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA E II CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO. **Anais...** Buenos Aires: 2017. 12 p.

MEYER, A. Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei statischer Belastung. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.15, n.2, p. 96-109, Feb. 1957.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5**. Malden: Blackwell Publishing, 2007. 542 p.

SANDHASS, C. et al. Embedment test parallel-to-grain and ductility in tropical hardwood species. In: 11th World Conference on Timber Engineering, 2010, Trentino. **Proceedings...** Trentino, WCTE, 2010, v. 1, p. 482-491.

SILVA JUNIOR, J.; GÓES, J.L.N. Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes em corte duplo. In: XV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais...** Curitiba, 2016. 15 p.

TERRIN, M.V.P.; GÓES, J.L.N.; PLETZ, E. Avaliação experimental da resistência da madeira ao embutimento. In: XVI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais...** São Carlos, 2018. 13 p.

WHALE, L.R.J.; SMITH, I. The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5. In: CIB-W18 Meeting 19, 1986, Florence. **Proceedings...** Florence, 1986, paper 19-7-6.