

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSUÉ DA SILVA JUNIOR

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM
CORTE DUPLO EM MADEIRA COM PARAFUSOS PASSANTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2017

JOSUÉ DA SILVA JUNIOR

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM
CORTE DUPLO EM MADEIRA COM PARAFUSOS PASSANTES**

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

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO
2017



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM CORTE DUPLO EM MADEIRA COM PARAFUSOS PASSANTES

por

Josué da Silva Junior

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 11h00min do dia 26 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira
(UTFPR)

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
(UTFPR)
Orientador

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:
Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o amor, graça e fidelidade demonstradas em cada dia desses últimos anos. Pelas alegrias, tristezas, conquistas e pelos amigos feitos ao longo do caminho. Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas.

Aos meus pais Josué e Sandra, pelo amor e suporte incondicional. Vocês são meu maior exemplo nessa terra e eu espero ser como vocês um dia. A minha irmã Nicolly pela alegria, amor e companhia de todos os finais de semana. Ao Reverendo Giovanni, pastor e amigo, pelas palavras e pelo exemplo.

Aos primos Adriana e Jefferson, e ao Lorenzo, por me acolherem esses anos como parte da família. Eu nunca esquecerei o que vocês fizeram por mim. E a todos os demais primos e familiares pelas orações e palavras de encorajamento.

Ao amigo e professor Dr. Jorge Góes por toda paciência e incentivo ao longo desses anos. Suas palavras e conselhos serão sempre lembrados, você foi meu maior exemplo nessa universidade. Também ao amigo e técnico do Laboratório de Sistemas Estruturais, Maiko Sedoski. Sem vocês esse trabalho nunca seria realizado.

A todo o corpo docente da Coordenação de Engenharia Civil pelo esforço investido em minha formação e pela paixão em ensinar demonstrados. Ao Grupo PET pelas experiências e desafios.

Por fim aos amigos que, de perto ou de longe, me apoiaram todos os dias. Aos companheiros de jornada, Gustavo, Tainã, Matheus, Paulo Roberto, Tati, Pedroso, vocês são incríveis e merecem as melhores coisas desse mundo.

RESUMO

SILVA JUNIOR, Josué. **Avaliação experimental da resistência de ligações em corte duplo em madeira com parafusos passantes**. 2017, 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

As estruturas em madeira são uma alternativa importante à crescente demanda por sustentabilidade e diminuição do impacto ambiental por parte da indústria da construção civil. Um dos fatores limitantes da capacidade de carga dessas estruturas são as resistências das ligações entre os elementos que as compõe, sendo assim necessário o estudo profundo acerca do comportamento estrutural dessas ligações. Este trabalho tem por objetivo estudar diferentes modelos teóricos de cálculo para resistência de ligações por parafuso passante com porca e arruela em madeira, a citar, ABNT NBR 7190 (1997) e EUROCODE 5 (2008). Além disso, foram conduzidos ensaios de resistência de ligação em corpos de prova normatizados, utilizando duas espécies diferentes de madeira, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). Os resultados experimentais obtidos mostram que o modelo da norma europeia é mais adequado que o modelo da norma brasileira, para o cálculo de resistência das ligações parafusadas.

Palavras Chave: Ligações em madeira; Pinos metálicos; Estruturas de madeira; Parafuso passante.

ABSTRACT

SILVA JUNIOR, Josué. **Experimental evaluation of strength in double shear bolted timber connections.** 2017, 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

Wooden structures are an important alternative to growing demand for sustainability and reduced environmental impact from the construction industry. One of the limiting factors of carrying capacity of these structures are the strength of the connections between the elements that are composed, necessary to the deep study on the structural behavior of these connections. This paper presents to study different theoretical models of calculating connections strength through bolt with nut and washer in timber, quote, ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2008). Also it was conducted bond strength tests on standardized test specimens using two different species of wood, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) and Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). The experimental results show that the model of the European Standard is more appropriate than the Brazilian Standard model for calculating the strength of bolted connections.

Keywords: Timber connections; Metallic pins; Timber structures; Bolt.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Tipos de pregos: (a) prego com cabeça de fuste circular cilíndrico, (b) prego sem cabeça, (c) prego ardox, (d) prego telheiro, (e) prego com cabeça dupla, (f) prego anelado, (g) prego quadrado.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2 – Parafuso auto-atarraxante estrutural.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3 – Tipos de parafusos passantes: (a) parafuso sextavado rosca inteira, (b) parafuso sextavado com rosca parcial e (c) parafuso francês.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4 - (a) Comportamento mecânico da resistência ao embutimento da madeira e (b) comportamento mecânico de resistência à flexão de pino de aço.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5 – Gráfico dos modos de falha segundo o modelo de Johansen.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 - Limite proporcional para ligações com parafusos rígidos e delgados.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7 – Relação entre o limite proporcional de força de embutimento e a esbeltez do pino.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8 – Dependência do mecanismo de falha com a esbeltez do pino.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9 – Influência do espaçamento (a_1) na capacidade de carga para $n=5$ e diferentes valores de esbeltez (λ).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10 – Espaçamento em ligações com pinos.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11 – Definição do espaçamento e distância para ligações.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12 – Efeito do numero de pinos na capacidade resistente da ligação.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13 – Tensões provocadas pela arruela na madeira.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14 – (a) Comparação entre o comportamento real e idealizado da madeira; (b) Comparação entre o comportamento real e idealizado do aço.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15 – Ligações com tração normal às fibras.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16 – Pinos metálicos em corte simples.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17 – Pinos metálicos em corte duplo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 18 - Força combinada agindo em um ângulo as fibras.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20 – Diagrama de carregamento do ensaio de compressão paralela às fibras.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21 – Ensaio de compressão paralela às fibras.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22 – Corpo de prova para ensaio de embutimento. (a) Dimensões de acordo com EN383 (b) Dimensões utilizadas no trabalho.....</i>	<i>50</i>

<i>Figura 23 – Diagrama de carregamento do ensaio de embutimento da madeira na direção paralela às fibras.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24 – Ensaio de embutimento da madeira na direção paralela as fibras.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 25 – Corpo de prova para caracterização de umidade e densidade.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 26 – Corpos de prova para determinação da umidade e densidade aparente.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 27 – Parafusos M12 sextavados de rosca parcial (dimensões).</i>	<i>54</i>
<i>Figura 28 – Corpo de prova para ensaio de ligações mecânicas.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 29 – Conectores utilizados nos corpos de prova.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 30 – Dimensões dos corpos de prova deste trabalho.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31 – Pré-furação dos corpos de prova.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 32 – Corpo de prova com relógios comparadores.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 33 – Procedimento de carga.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 34 – Diagrama idealizado força-deformação.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 35 – Corpos de prova de umidade e densidade.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36 – Corpos de prova de compressão paralela Garapeira.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 37 – Corpos de prova de compressão paralela Caixeta.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 38 – Corpos de prova de embutimento</i>	<i>62</i>
<i>Figura 39 – Corpos de prova de tração no pino.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 39 – Modelo de ruptura dos ensaios de ligação.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 41 – Comparação de resistência da ligação teórica e experimental.</i>	<i>67</i>

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 - Materiais usados em parafusos</i>	<i>20</i>
<i>Quadro 2 - Dimensões dos parafusos segundo ISO 4016 e porcas segundo ISO 4034</i>	<i>21</i>
<i>Quadro 3 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R</i>	<i>21</i>
<i>Quadro 4 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440V</i>	<i>22</i>
<i>Quadro 5 - Dimensões da norma DIN 436</i>	<i>22</i>
<i>Quadro 6 – Modelos de falha e equações de Johansen para uma seção de corte...</i>	<i>24</i>
<i>Quadro 7 – Modelos de falha e equações de Johansen para duas seções de corte.....</i>	<i>25</i>
<i>Quadro 8 – Valores de αe para diferentes diâmetros de pino (d).....</i>	<i>28</i>
<i>Quadro 9 – Espaçamento e distâncias mínimas para parafusos</i>	<i>36</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Umidade e densidade.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 2 – Resistencia à compressão paralela às fibras.</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 3 – Resistência ao embutimento.</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 4 – Tensão dos parafusos e momentos calculados.</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5 – Resistência das ligações com madeira Garapeira.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 6 – Resistência das ligações com madeira Caixeta.</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 7 – Parâmetros utilizados para alimentar os modelos teóricos de cálculo</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 8 – Comparação de resistência da ligação teórica e experimental.</i>	<i>66</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

f_y	<i>Tensão de escoamento do pino.</i>
f_u	<i>Tensão última do pino.</i>
t_1	<i>Espessura da secção 1 de madeira.</i>
t_2	<i>Espessura da secção 2 de madeira.</i>
β	<i>Coefficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira, para as equações de Johansen e EUROCODE 5 (2004).</i>
f_e	<i>Resistência de embutimento.</i>
f_{e0}	<i>Resistência de embutimento na direção paralela.</i>
f_{e90}	<i>Resistência de embutimento na direção normal.</i>
$f_{e\alpha}$	<i>Resistência de embutimento em uma direção qualquer.</i>
α	<i>Ângulo de inclinação em relação às fibras.</i>
f_h	<i>Resistência de embutimento para ligações com parafusos de até 3 cm de diâmetro, segundo o EUROCODE 5 (2004).</i>
ρ_k	<i>Densidade aparente característica.</i>
f_{c0}	<i>Resistência à compressão paralela às fibras.</i>
α_e	<i>Parâmetro de relação entre resistência a compressão na direção paralela e resistência de embutimento na direção normal, segundo ABNT NBR (1997).</i>
F_v	<i>Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.</i>
d	<i>Diametro do pino.</i>
M_y	<i>Momento resistente do pino.</i>
ρ_k	<i>Densidade aparente característica.</i>
λ	<i>Esbeltez do pino.</i>
λ_{gr}	<i>Esbeltez do pino segundo a equação de Fahlbusch (1949).</i>

d_o	<i>Diâmetro do furo.</i>
$F_{ax,Rk}$	<i>Numero de pinos.</i>
n_{ef}	<i>Numero efetivo de pinos.</i>
n_o	<i>Numero convencional de pinos.</i>
R_d	<i>Resistência da ligação, segundo ABNT NBR 7190 (1997).</i>
R_k	<i>Resistência da ligação, segundo EUROCODE 5 ().</i>
$F_{ax,Rk}$	<i>Efeito de corda (rope effect).</i>
U	<i>Umidade da madeira.</i>
m_i	<i>Massa inicial da madeira.</i>
m_s	<i>Massa seca da madeira.</i>
V_i	<i>Volume inicial da madeira.</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	13
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA POR PINOS METÁLICOS.....	15
3.1.1 Pregos.....	16
3.1.2 Parafusos.....	18
3.1.2.1 Parafusos auto-atarraxantes (screws).....	18
3.1.2.2 Parafusos passantes (bolts)	19
3.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS	22
3.3 FATORES QUE INTERFEREM NO DESEMPENHO DAS LIGAÇÕES	26
3.3.1 Resistência ao embutimento do pino metálico na madeira (f_e).....	27
3.3.2 Diâmetro do pino (d).....	29
3.3.3 Esbeltez do pino (λ).....	30
3.3.4 Momento resistente do pino (M_y).....	32
3.3.5 Espaçamento entre pinos (a)	33
3.3.6 Diâmetro do furo (d_o).....	36
3.3.7 Numero efetivo de parafusos (n_{ef}).....	37
3.3.8 Atrito e efeito de corda	39
3.3.9 Comportamento mecânico do aço e da madeira.....	40
3.4 DOCUMENTOS NORMATIVOS	40
3.4.1 ABNT NBR 7190 (1997).....	40
3.4.1.1 Resistência das ligações com pinos metálicos.....	42
3.4.2 EUROCODE 5.....	44
3.4.2.1 Resistência das ligações com parafusos passantes.....	45
3.5 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	48
4.2 ENSAIO DE EMBUTIMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	50
4.3 ENSAIO DE DENSIDADE E TEOR DE UMIDADE	52
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO NO PARAFUSO	53
4.5 CONFECÇÃO E ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA DE LIGAÇÃO.....	54
5. RESULTADOS	60
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	60
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PARAFUSOS	63
5.3 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES.....	63
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
7. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A – DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE JOHANSEN.....	72

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O uso da madeira em estruturas representa uma das mais promissoras soluções à urgente necessidade por sustentabilidade e diminuição da degradação ambiental causada pela indústria da construção civil. Países da América do Norte e Europa tradicionalmente utilizam construções em madeira e, ao longo dos anos, foram conduzidas pesquisas científicas para conhecimento e aperfeiçoamento de técnicas construtivas com o material. Com o crescimento e popularização da madeira no Brasil, tornam-se necessários mais estudos acadêmicos sobre o tema.

A execução de grandes estruturas de madeira requer peças maciças com dimensões dificilmente encontradas. Para viabilização dessas estruturas, é necessário efetuar uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança.

A ligação com pinos metálicos é a mais utilizada, inclusive no Brasil, devido ao baixo custo e facilidade de aplicação. Os pinos metálicos podem ser pregos, parafusos sextavados com porcas e arruelas, parafusos auto-atarraxantes ou ainda barras de aço lisas.

A maioria dos estudos conduzidos sobre o tema, assim como as normatizações referentes ao cálculo de ligações, utilizam como base o modelo de Johansen desenvolvido em 1949. A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) – Projeto de Estruturas de Madeira – apresenta recomendações específicas de cálculo para ligações com adesivos, com pinos metálicos, cavilhas e conectores.

A metodologia especificada pela norma nacional para cálculo de resistência de ligações com pinos metálicos, apesar de ser baseada na teoria de Johansen, é simplificada e restrita a algumas configurações específicas de peças. Além disso, a norma não contempla alguns efeitos não lineares que possuem influência direta na resistência última da ligação.

Assim, torna-se providencial um estudo comparativo entre os modelos analíticos de documentos normativos, nacionais e internacionais, e resultados de ensaios experimentais, a fim de avaliar a adequação desses modelos de ligações parafusadas. Somando-se a isso, ressalta-se que atualmente a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) está em fase de revisão e diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no país para subsidiar possíveis revisões no texto.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar modelos de resistência de ligações em madeira com parafusos passantes com porcas e arruelas, comparando resultados teóricos obtidos por meio de documentos normativos nacionais e internacionais e resultados experimentais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os modelos teóricos de cálculo para resistência de ligações por parafuso passante com porca e arruela em madeira;
- Avaliar resistências últimas de ligações através de ensaios normatizados em corpos de prova de ligação em escala real;
- Comparar resultados obtidos experimentalmente com os resultados teóricos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O renascimento do interesse pela utilização da madeira como elemento estrutural ocorrido nos últimos anos se deve a diversos fatores, destacando-se especialmente as razões ambientais, tendo em vista a madeira ser um material renovável e de baixo consumo energético para sua produção e utilização. Pode-se citar também o maior conhecimento adquirido ao longo dos anos em relação às propriedades mecânicas das diferentes espécies de madeira, que permitem cálculos mais precisos e execução de detalhes construtivos que aumentam a durabilidade das construções de madeira. Outro fator importante é o avanço da tecnologia para a execução de ligações, considerado um dos pontos críticos no dimensionamento e execução das estruturas de madeira.

De acordo com Porteous e Kermani (2007) a resistência da estrutura é normalmente determinada pela resistência das ligações, além disso, as dimensões dos elementos estruturais são muitas vezes determinadas pelo número e as características físicas do tipo de conector a ser usado.

De acordo com TIMBER ENGINEERING STEP 1 (1995) para estruturas de madeira, a manutenção e a durabilidade da estrutura dependem, principalmente, do projeto das ligações entre os elementos. Segundo Branco (2003), as ligações entre os elementos nas estruturas de madeira representam, geralmente, os pontos mais críticos da estrutura, podendo condicionar o comportamento do conjunto no que diz respeito aos Estados Limite Últimos, durabilidade e a resistência ao fogo.

3.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA POR PINOS METÁLICOS

A atual norma brasileira para projetos de estruturas de madeira, ABNT NBR 7190 (1997), aborda as ligações em madeira diferenciando tipos de ligações da seguinte forma: ligações por pinos metálicos (pregos e parafusos), cavilhas, conectores metálicos (anéis e CDE) e por fim as ligações coladas.

De acordo com Timber Engineering STEP 1 (1995), para as conexões comumente utilizadas, é feita uma distinção entre as ligações de carpintaria

(entalhes ou encaixes) e ligações mecânicas, que podem ser feitas a partir de diversos tipos de conectores. Ainda segundo STEP 1 (1995), as ligações mecânicas tradicionais são divididas em dois grupos dependendo de como as forças são transmitidas entre os membros da ligação, são eles:

- *Metal dowel type fasteners*, na qual o carregamento é transferido pela ação do elemento metálico de ligação. Neste tipo de ligação, o comportamento é regido pelos modos de falha de Johansen, com pequenas adaptações para os diferentes tipos de conectores. Pregos, parafusos, pinos metálicos e grampos pertencem a esse grupo;
- *Bearing-type connectors*, na qual o carregamento é transferido principalmente pela superfície próxima ao conector. Nestes casos a teoria de Johansen não se aplica. Os cálculos são geralmente determinados por tensões de cisalhamento e de compressão na madeira. Chapas de dentes estampados (CDE) e anéis metálicos pertencem a esse grupo.

O modelo teórico desenvolvido por Johansen (1949, apud Johnsson 2004), que atualmente serve de base para a maioria dos documentos normativos nacionais e internacionais, foi desenvolvida apenas para ligações com pinos metálicos. Os pinos metálicos podem ser classificados em *nails* que são os pregos, *dowels*, que são barras de aço lisas do diâmetro do furo ajustados, *bolts*, que são os parafusos passantes sextavados com porcas e arruelas ou do tipo francês, e *screws*, que são os parafusos auto-atarraxantes. A seguir são descritos detalhadamente os tipos de pinos metálicos e suas principais características relevantes para o projeto de ligações.

3.1.1 Pregos

Os pregos são os elementos de ligação mais comuns utilizados nas construções de madeira e provavelmente os mais tradicionais. São peças metálicas cravadas na madeira por meio de impacto. De acordo com ABNT NBR 7190 (1997) em uniões pregadas é obrigatória a pré-furação da madeira, com diâmetro da broca não maior que o diâmetro do prego, indicando o valor de 0,85 para madeira coníferas e 0,98 para folhosas. Somente em estruturas provisórias, admite-se o

emprego de ligações pregadas sem a pré-furação da madeira. Segundo Dias (2013) existem diversos tipos de pregos no mercado, cada qual com a sua função específica. Os modelos mais utilizados disponíveis no mercado nacional estão demonstrados na figura 1, são eles, prego com cabeça de fuste circular cilíndrico (a), prego sem cabeça (b), prego ardox (c), prego telheiro galvanizado (d), prego com cabeça dupla (e), prego anelado (f) e prego quadrado (g).

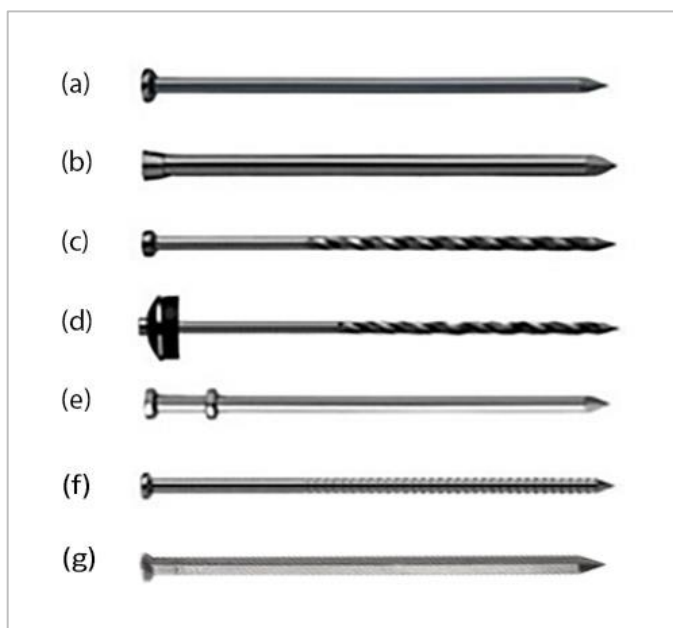


Figura 1 – Tipos de pregos: (a) prego com cabeça de fuste circular cilíndrico, (b) prego sem cabeça, (c) prego ardox, (d) prego telheiro, (e) prego com cabeça dupla, (f) prego anelado, (g) prego quadrado.

Os pregos com cabeça de fuste circular cilíndrico são geralmente usados em construção de casas, confecção de estruturas, construções pesadas, marcenaria, caixotaria e domésticas e possuem um maior rendimento por kg. O prego sem cabeça é empregado em marcenaria, assoalhos, rodapés, guarnições, portas e janelas.

Os pregos de cabeça dupla são utilizados em fechamento de fôrmas, fixação dos apuradores, escoramento de lajes, estruturas de bandejas e estruturas temporárias e não danifica a madeira, possui fácil arranque, desforma rápida e elimina etapas no fechamento das fôrmas. Os pregos ardox são empregados em madeiras de maior densidade, pallets, embalagens e suportes de madeiras, além disso, possuem melhor conexão da madeira, fácil penetração, maior resistência ao arranchamento, melhor relação custo x benefício e excelente poder de perfuração.

O prego telheiro pode ser utilizado em telhas de fibrocimento, aço, alumínio, folha de zinco com espessura até 5 mm e pequenas ondas até 39 mm sobre estrutura de madeira. Possui uma boa relação custo e benefício, possuem boa resistência ao arrancamento além de evitar vazamentos.

O prego anelado é empregado em madeiras de menor densidade (macias), caixotaria em geral, pallets, embalagens e móveis e possuem excepcional resistência ao arranchamento e melhor adaptação à fibra de madeira. Por fim, os pregos quadrados, ainda amplamente utilizados em países como Portugal, são empregados em cascos de embarcações, acabamento interno de embarcações, mata-burros e decks de piscinas.

3.1.2 Parafusos

Os parafusos são elementos de fixação empregados na união de peças, por sua facilidade de aplicação, e se diferenciam pela forma da rosca, da cabeça, da haste e do tipo de acionamento. Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995), os parafusos podem ser classificados em *bolts*, que são os parafusos passantes, e *screws*, que são os parafusos auto-atarraxantes. Pfeil e Pfeil (2003) também classificam os parafusos em duas categorias, os parafusos rosqueados auto-atarraxantes e os parafusos passantes.

3.1.2.1 Parafusos auto-atarraxantes (*screws*)

De acordo com Porteous e Kermani (2007), os parafusos auto-atarraxantes são usados no lugar dos pregos nas aplicações que requerem capacidades de carga mais elevadas, e em situações em que é necessária uma maior resistência ao arrancamento. Ainda segundo os autores, eles podem ser utilizados para ligações madeira-madeira, mas são especialmente adequadas para ligações aço-madeira. O tipo mais comum de parafuso auto-atarraxante é ilustrado na figura 2.



Figura 2 – Parafuso auto-atarraxante estrutural.
Fonte: Ciser 2014 (adaptado).

3.1.2.2 Parafusos passantes (*bolts*)

Os parafusos passantes atravessam as peças a serem unidas passando livremente nos furos. Possuem cabeça hexagonal ou semiesféricas e diâmetros variados de até 30 mm. De acordo com a necessidade do projeto, além das porcas, podem utilizar arruelas e contra porcas como acessórios. Esse tipo de parafuso, assim como as barras metálicas lisas (*dowels*), é utilizado em conexões que requerem uma carga maior do que a capacidade de carga lateral de pregos e parafusos auto-ararraxantes, (PORTEOUS E KERMANI, 2007). Os tipos comuns utilizados no país são demonstrados na figura 3: parafuso sextavado rosca inteira (a), parafuso sextavado com rosca parcial (b), e parafuso francês (c).

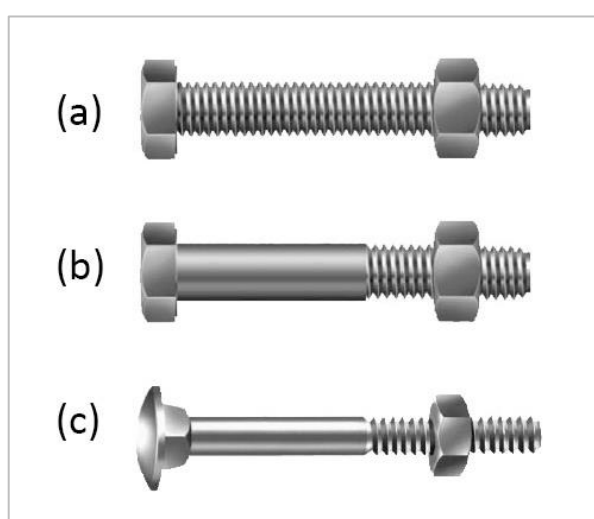


Figura 3 – Tipos de parafusos passantes: (a) parafuso sextavado rosca inteira, (b) parafuso sextavado com rosca parcial e (c) parafuso francês.
Fonte: Ciser 2014 (adaptado).

De acordo com Dias (2013), os parafusos instalados são ajustados nos furos de modo a não ultrapassar uma determinada folga de 0,5mm. Após a colocação dos parafusos, as porcas são apertadas comprimindo a madeira, com o esforço sendo transferido com o auxílio de arruelas.

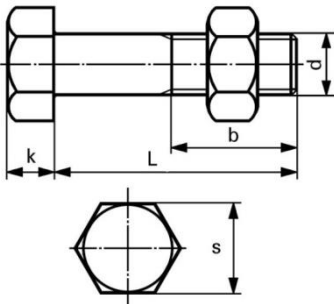
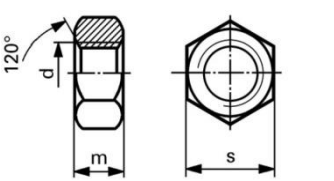
Os parafusos são especificados segundo a norma CEN ISO 4016 (2000) que define a geometria dos parafusos, e a norma CEN ISO 898-1 (1999) define as características do aço empregado no parafuso.

Os parafusos especificados segundo as normas ASTM A325a, ASTM A307 e ASTM A490 são, de um modo geral curtos, utilizados em estruturas metálicas, onde os elementos conectados possuem seções transversais esbeltas, quando comparadas com as ligações de madeira. Os valores mínimos de resistência ao escoamento e da resistência a ruptura, de acordo com as normas, estão indicados no quadro 1.

Especificação	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Tensão Última f_u (MPa)
ASTM A307	-	415
ISO 4016 Classe 4.6	235	400
ASTM A325 ^a	635	825
	560	725
ISO 4016 Classe 8.8	640	800
ASTM A490	895	1035
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000
^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.		

Quadro 1 - Materiais usados em parafusos.
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8800 (2008).

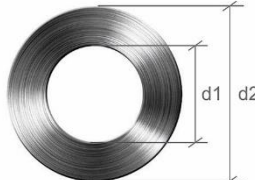
Os parafusos especificados pela norma CEN ISO 4016 (2000), bem como as porcas especificadas pela norma CEN ISO 4034 (1999) estão indicados no quadro 2. Apesar de existirem no mercado parafusos com diâmetro inferior a 10 mm, a norma ABNT NBR 7190 (1997) não permite o uso dos mesmos em estruturas de madeira.

	d	M10	M12	M16	M20	M24
	s	17	19	24	30	36
	k	6.4	7.5	10	12.5	15
	b (L=125)	26	30	38	46	54
	b (L>125)	32	36	44	52	60
	b (L>200)	45	49	57	65	73
	m_{min}	8	10.4	14.1	16.9	20.2
	m_{max}	9.5	12.2	15.9	19	22.3
	s	16	18	24	30	36
	Valores indicados em mm					

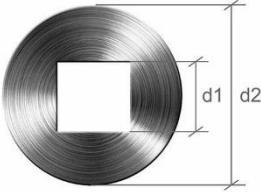
Quadro 2 - Dimensões dos parafusos segundo ISO 4016 e porcas segundo ISO 4034.
 Fonte: Adaptado de CEN ISO 4016 (2000) e CEN ISO 4034 (1999).

Os parafusos são encontrados no mercado com diversos tipos de acabamentos: galvanizado, enegrecido de têmpera, bicromatizado, zincado, etc. Apesar de não possuírem influência direta na resistência, os acabamentos tem importante função estética e de durabilidade.

As arruelas para parafusos em estruturas de madeira são especificadas segundo a norma DIN 440 (2001), sendo DIN 440R para arruelas redondas com furo central redondo e, DIN 440V para arruelas redondas com furo central quadrado. As arruelas quadradas são especificadas pela norma DIN 436 (1990). As arruelas e suas respectivas dimensões são indicadas nos quadros 3, 4 e 5 respectivamente.

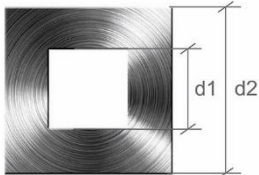
	Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)	Espessura (mm)
	M10	11,0	34,0	3
	M12	13,5	44,0	4
	M16	17,5	56,0	5
	M20	22,0	72,0	5
	M22	24,0	80,0	6
	M24	26,0	85,0	6
	M27	30,0	98,0	6
	M30	33,0	105,0	6
	M33	36,0	112,0	6
M36	39,0	125,0	6	

Quadro 3 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R.
 Fonte: Adaptado DIN 440 (2001).

	Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)	Espessura (mm)
	M10	11,0	34,0	3
	M12	13,5	44,0	4
	M16	17,5	56,0	5
	M20	22,0	72,0	5
M22	24,0	80,0	6	

Quadro 4 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440V.

Fonte: Adaptado DIN 440 (2001).

	Tipos de Arruelas	d1 (mm)	d2 (mm)	Espessura (mm)
	M10	11,0	30,0	3
	M12	13,5	40,0	4
	M16	17,5	50,0	5
	M20	22,0	60,0	5
	M22	24,0	70,0	6
	M24	26,0	80,0	6
	M27	30,0	90,0	6
M30	33,0	95,0	6	

Quadro 5 - Dimensões da norma DIN 436.

Fonte: Adaptado DIN 436 (1990).

3.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS

O trabalho de maior destaque na área de ligações com pinos metálicos em madeira (pregos, parafusos passantes ou parafusos auto-atarraxantes) foi desenvolvido por Johansen em 1949. O modelo proposto pelo autor e seus posteriores desenvolvimentos deram origem ao que hoje é conhecido por EYM (*European Yield Model*), modelo presente em vários documentos normativos, como por exemplo, a norma europeia EUROCODE 5 (2008) e a brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

Johansen (1949, apud Johnsson 2004) descreve a interação entre o pino metálico e as peças de madeira, considerando o comportamento mecânico totalmente plástico, tanto da madeira, quanto do aço, conforme ilustra a figura 4. Assumindo isso e utilizando o equilíbrio de forças e momentos, os modelos de falha básicos para a resistência de ligações por pinos metálicos são formulados.

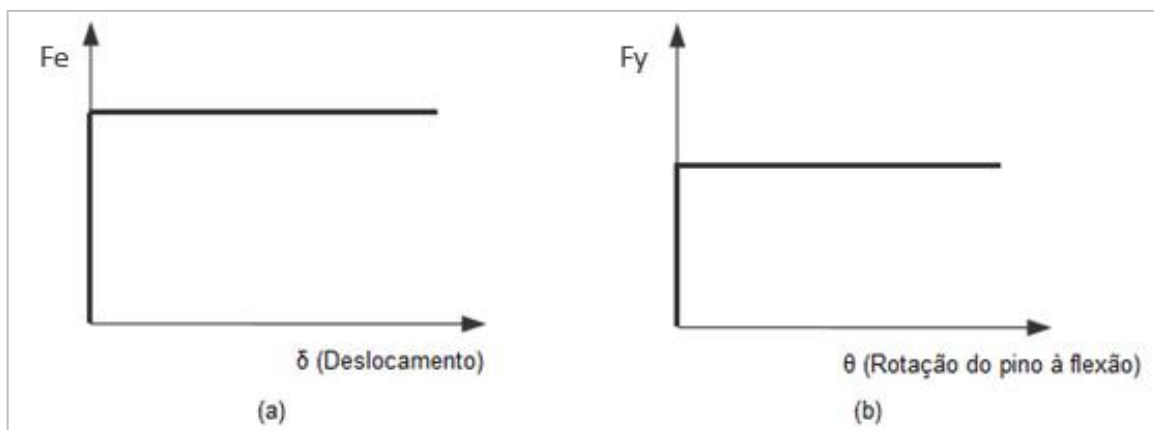


Figura 4 - (a) Comportamento mecânico da resistência ao embutimento da madeira e (b) comportamento mecânico de resistência à flexão de pino de aço.

Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).

Segundo Jorissen (1998), para desenvolvimento das equações, Johansen também adotou as seguintes simplificações: Todos os elementos de madeira possuem as mesmas características de resistência (resistência ao embutimento iguais), para ligações com apenas um plano de corte a espessura das duas peças de madeira são iguais ($t_1 = t_2$), para ligações com dois planos de corte a espessura das peças de madeira deve ser simétrica e, por fim, a resistência à flexão do pino metálico é admitida apenas ao seu limite elástico.

Em 1957 a teoria foi estendida por Meyer (1957, apud Jorissen 1998) para ligações com peças de madeira com diferentes espessuras e diferentes resistências, admitindo a capacidade plástica à flexão do pino metálico.

Os modelos de falha, bem como as equações segundo o modelo de Johansen (EYM) para uma seção de corte e para duas seções estão indicadas nos quadros 6 e 7 respectivamente. As deduções para as equações de cada modelo de falha são demonstradas no apêndice A. Para mais de duas seções com os mesmos elementos, Johansen recomenda que sejam utilizadas as equações para duas seções de corte e que seja multiplicado o valor de resistência mínimo encontrado para um plano de corte.

Para se calcular o coeficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira, utiliza-se a equação 1.

$$\beta = \frac{f_{e,k2}}{f_{e,k1}} \quad (1)$$

<p>(la) (lb) (lc) (IIa) (IIb) (III)</p>		
Modelo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.	
(la)	$F_v = f_e t_1 d$	(2)
(lb)	$F_v = f_e t_2 d \beta$	(3)
(lc)	$F_v = \frac{f_e t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$	(4)
(IIa)	$F_v = \frac{f_e t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_y}{f_e d t_1^2}} - \beta \right]$	(5)
(IIb)	$F_v = \frac{f_e t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_y}{f_e d t_2^2}} - \beta \right]$	(6)
(III)	$F_v = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_y f_e d}$	(7)
F_v é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.		

Quadro 6 – Modelos de falha e equações de Johansen para uma seção de corte.
Fonte: Adaptado Porteuo e Kermani (2007).

(Ia) (Ib) (II) (III)		
Modelo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.	
(Ia)	$F_v = f_e t_1 d$	(8)
(Ib)	$F_v = f_e t_2 d \beta$	(9)
(II)	$F_v = \frac{f_e t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_y}{f_e d t_1^2}} - \beta \right]$	(10)
(III)	$F_v = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_y f_e d}$	(11)
F_v é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.		

Quadro 7 – Modelos de falha e equações de Johansen para duas seções de corte.
Fonte: Porteu e Kermani (2007).

Nos modelos de falha “Ia” e “Ib”, tanto para uma seção de corte quanto para duas seções, ocorre embutimento da madeira sem ocorrência de deformação do pino metálico, já no caso “Ic” o embutimento da madeira ocorre nas duas peças simultaneamente devido ao giro do pino metálico, mas ainda sem deformação do mesmo. No modelo “IIa” e “IIb” ocorre embutimento da madeira nas duas peças e deformação do pino metálico devido à flexão em uma das peças, com a ocorrência de apenas uma rótula plástica, e por fim no modelo III ocorre deformação do pino metálico devido a flexão do pino e embutimento da madeira nas duas peças, com a formação de duas rótulas plásticas. Jorissen (1998) esboçou um gráfico das equações do modelo de Johansen, considerando o momento plástico ($M_y = \pi * d^3 * f_y / 6$) e resistências de embutimento iguais em cada uma das peças de madeira ($f_{e1} = f_{e2}$). O gráfico, figura 5, ilustra a ocorrência dos modelos de falha, de acordo com a variação da força aplicada à ligação e com a espessura das peças.

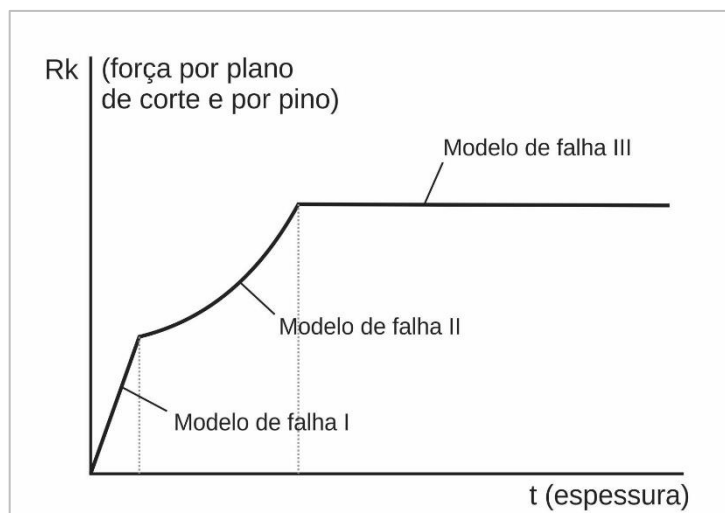


Figura 5 – Gráfico dos modos de falha segundo o modelo de Johansen.

Fonte: Adaptado Jorissen (1998).

3.3 FATORES QUE INTERFEREM NO DESEMPENHO DAS LIGAÇÕES

As ligações mecânicas entre elementos são pontos importantes de qualquer estrutura e por isso, ao longo dos anos, elas têm sido alvo de grande atenção por parte de pesquisadores. Durante anos os critérios de dimensionamento de ligações eram puramente empíricos. De acordo com Branco (2003), as primeiras ações de investigação centraram-se na determinação da capacidade resistente a partir de resultados de diversos trabalhos experimentais.

O modelo teórico de cálculo proposto por Johansen em 1949 baseia-se no equilíbrio das tensões aplicadas no conector inserido num elemento de madeira. A validade da Teoria de Johansen foi verificada através dos resultados de ensaios realizados por Wilkinson (1972), McLain (1983) e Soltis (1986), entre outros (Branco, 2011).

Apesar da ampla aceitação da teoria de Johansen, vários autores têm conduzido investigações acerca de outros efeitos não contemplados pelo modelo originalmente proposto pelo autor. Möller (1951, apud Ramskill 2002), por exemplo, concluiu em seus estudos sobre o tema, que outros efeitos devem ser considerados, a citar, o efeito de atrito entre as peças e a força axial no pino de ligação, conhecido como *“Rope Effect”* ou Efeito de Corda, que tende a confinar a ligação provocando

um acréscimo de resistência. Além desses, outros fatores que também interferem no desempenho das ligações são discutidos a seguir.

3.3.1 Resistência ao embutimento do pino metálico na madeira (f_e)

A resistência ao embutimento do pino metálico na madeira possui influência direta na resistência mecânica das ligações. Johansen (1949, apud Johnsson 2004), que realizou um dos primeiros estudos sobre o tema, afirmou que a resistência das ligações por pinos metálicos dependia particularmente da resistência da madeira ao embutimento, bem como da resistência do pino à flexão.

No Brasil, o primeiro estudo sobre o embutimento de pinos metálicos em ligações de madeira foi apresentado por Almeida (1987). O autor afirma que a pressão de contato aplicada pelo pino à parede do furo causa um estado múltiplo de tensões na região do entorno do furo, que tende a embutir o pino na madeira. Ainda segundo o autor, as tensões de embutimento podem decorrer da própria cravação do pino ou de uma ação externa, induzida pelo comportamento solidário das peças de madeira.

Smith (1982) afirma que a resistência ao embutimento é influenciada pelas características geométricas do corpo de prova, ressaltando que este deve ter altura e largura suficiente para evitar o aparecimento de pequenas fissuras. Jorissen (1998) demonstra que a esbeltez dos pinos, a densidade da madeira e o próprio diâmetro do pino podem alterar a resistência ao embutimento da madeira.

Para Valle et al. (2000) a resistência ao embutimento calculada pelo quociente entre a força de embutimento e a área resistente à esta solicitação não é uma propriedade unicamente do material, sendo este valor dependente de outros fatores como o diâmetro do pino metálico, do tratamento superficial do aço, do ângulo entre a força e a direção das fibras e dos métodos de introdução do pino na madeira.

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) as resistências ao embutimento na direção paralela (f_{e0}) e na direção normal (f_{e90}) podem ser obtidas a partir da resistência a compressão paralela às fibras conforme mostrado nas equações 12 e

13, respectivamente. Nesse último caso também é utilizado o parâmetro α_e dado pelo quadro 8 em função do diâmetro do pino.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (12)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (13)$$

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

Quadro 8 – Valores de α_e para diferentes diâmetros de pino (d).

Fonte: Adaptado ABNT ABNT NBR (1997).

Segundo ABNT NBR 7190 (1997) a resistência da madeira ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha}$), inclinada de um ângulo α em relação às fibras, pode ser calculada pela equação de Hankinson (equação 14), com base nas resistências de embutimento na direção paralela e normal.

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{e90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (14)$$

As resistências características de embutimento segundo o EUROCODE 5 (2004) para ligações com parafusos de até 3 cm de diâmetro, com forças aplicadas formando um ângulo α com a direção das fibras ($f_{h,\alpha,k}$) pode ser determinada pela equação 15.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (15)$$

Na direção paralela às fibras é calculada levando em consideração a densidade aparente característica (ρ_k) e o diâmetro do pino metálico (d), de acordo com a equação 16. Os valores de k_{90} são calculados para madeiras menos densas e mais densas em função do diâmetro do pino metálico (d), utilizando as equações 17 e 18 respectivamente, sendo as unidades utilizadas para o diâmetro do pino metálico e para a densidade aparente milímetros e Megapascal respectivamente.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (16)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (17)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (18)$$

Valle (1999), Stamato (2002) e Almeida (2011) utilizando as diretrizes das normas ABNT NBR 7190 (1997) e EN 383 (2007) encontraram valores médios de resistência ao embutimento maiores utilizando o método europeu quando comparado com o método descrito na norma brasileira, em várias direções em relação às fibras. Isso acontece porque, para a norma brasileira, a resistência ao embutimento é definida pela tensão máxima obtida no ensaio de embutimento que provoca deformação específica não maior que 2‰ e, para a norma europeia, essa resistência é definida pela tensão máxima obtida no ensaio de embutimento que provoca deslocamento não maior que 5mm.

Oliveira (2001) detectou através de ensaios experimentais, que o valor médio de resistência à compressão na direção paralela as fibras é diferente do valor médio de resistência ao embutimento na mesma direção, para todas as espécies de madeira e pinos metálicos utilizados. O autor concluiu que o fato da ABNT NBR 7190 (1997) igualar os valores das duas resistências pode gerar erros de dimensionamento de ligações.

3.3.2 Diâmetro do pino (d)

O dimensionamento de ligações é diretamente relacionado ao diâmetro do pino. Stamato (1998) concluiu através de análises estatísticas que o módulo de elasticidade no embutimento mostra grande correlação com o diâmetro do pino, havendo aumento do módulo de elasticidade em função do aumento do diâmetro do pino. Mack (1960, apud Almeida 1987), fazendo uma análise de seus resultados, concluiu que não só o diâmetro do prego tem influência na rigidez e na resistência

última da ligação, mas também as espessuras das peças de madeira que compõem o corpo de prova influenciam os resultados.

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) recomenda que pregos estruturais devam ser feitos de aço com resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 600 MPa, e devem ter diâmetro mínimo de 3 mm. Recomenda-se que os parafusos estruturais tenham diâmetros não menores que 10 mm e resistência característica de escoamento f_{yk} de pelo menos 240 MPa. O diâmetro mínimo de parafusos auto-atarraxantes não é especificado na norma.

3.3.3 Esbeltez do pino (λ)

A influência da esbeltez do pino no comportamento de ligações tem sido alvo de uma série de estudos nos últimos anos. De acordo com Jorissen (1998), que desenvolveu extensa pesquisa sobre o assunto, a esbeltez do pino metálico λ ($\lambda=t/d$) possui influência direta na tensão de embutimento da madeira e conseqüentemente na resistência da ligação.

A influência da esbeltez do pino metálico na determinação da resistência ao embutimento pode ser verificada na figura 6. Jorissen (1998) exemplifica o comportamento de fenômeno de embutimento do pino metálico na madeira apresentando duas curvas distintas, uma para pino esbelto e outra para pino rígido.

Nota-se a clara distinção de comportamento dos resultados, indicando que o pino com índice de esbeltez maior possui comportamento mais plástico e maior força de ruptura, entretanto, menor força no limite de proporcionalidade. O comportamento distinto entre os pinos com diferentes índices de esbeltez torna necessária uma padronização para a realização dos ensaios de determinação da resistência ao embutimento.

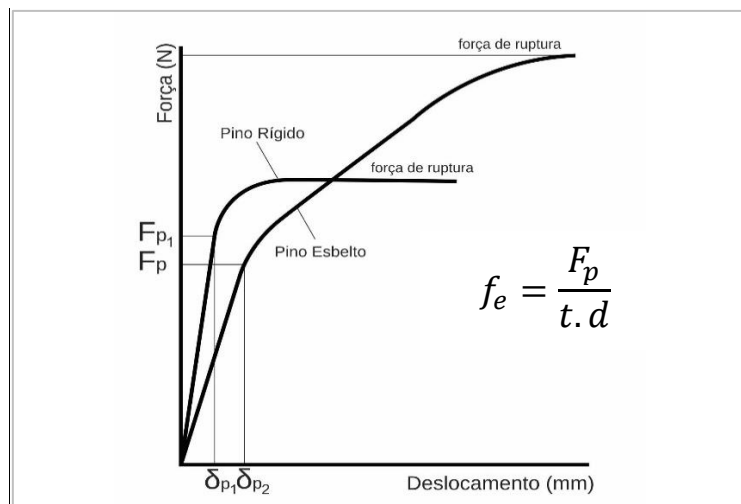


Figura 6 - Limite proporcional para ligações com parafusos rígidos e delgados.

Fonte: Adaptado Jorissen (1998).

Uma descrição similar da relação entre esbeltez do pino e tensão de embutimento foi desenvolvida por Trayer (apud Jorissen, 1998). O autor adota dois valores típicos para esbeltez ($\lambda=3$ e $\lambda=\lambda_{gr}$) e assume que a capacidade de carga não é afetada pela esbeltez do pino se λ é superior a λ_{gr} . A equação 19 indica o valor de λ_{gr} e foi proposta por Fahlbusch (1949). A figura 7 ilustra a influência da esbeltez do pino na determinação da resistência ao embutimento no limite proporcional.

$$\lambda_{gr} = \sqrt{2,6 \cdot \frac{f_y}{f_e}} \quad (19)$$

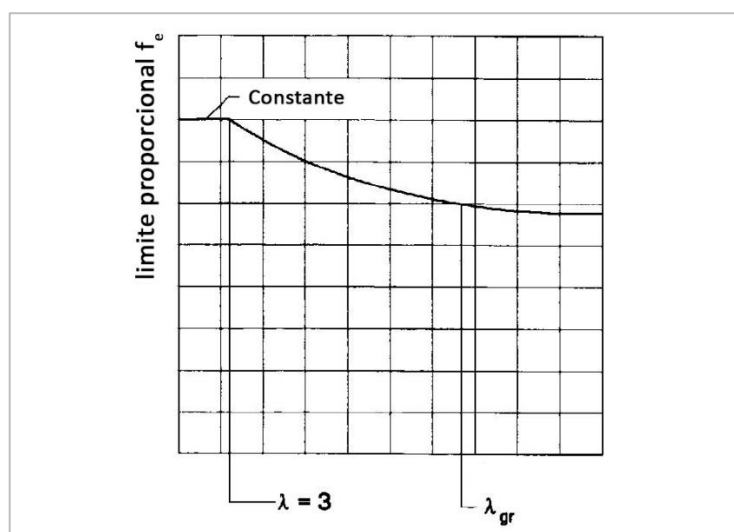


Figura 7 – Relação entre o limite proporcional de força de embutimento e a esbeltez do pino.

Fonte: Adaptado Jorissen (1998).

Para Schoenmakers (2011) a esbeltez do pino determina o modelo de falha da ligação. O autor traçou um diagrama, apresentado na figura 8, utilizando os modelos de cálculo do EYM (European Yield Model) para os valores de esbeltez λ_{crit} em seções duplas de corte. Através de resultados experimentais o autor concluiu que de acordo com a esbeltez do pino, o modelo de falha que governa a ligação é o modelo I ou III da teoria de Johansen (EYM).

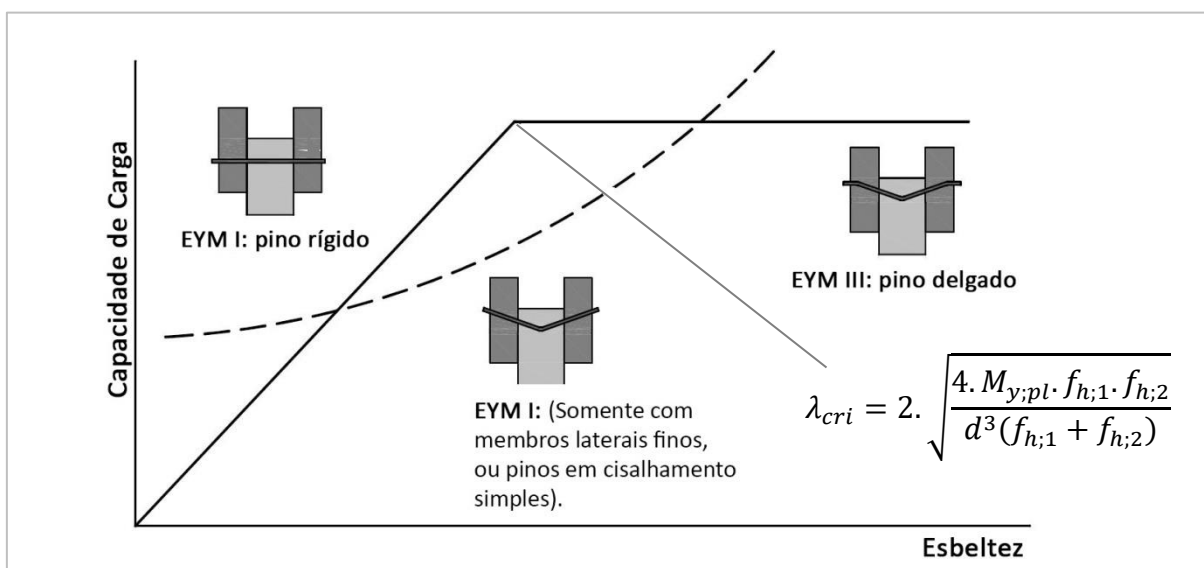


Figura 8 – Dependência do mecanismo de falha com a esbeltez do pino.
 Fonte: Adaptado Schoenmakers (2011).

3.3.4 Momento resistente do pino (M_y)

O momento resistente do pino à flexão foi um dos fatores apontados como diretamente responsável pelo valor da resistência final das ligações por pinos metálicos segundo Johansen (1949, apud Johnsson 2004). O autor adotou em sua teoria a resistência à flexão do pino metálico apenas ao seu limite elástico ($M_{y,k} = \pi * f_y * d^3/32$), no entanto, a resistência do pino permanece crescente até alcançar seu limite plástico.

Em 1957 a teoria de Johansen foi estendida por Meyer (1957, apud Jorissen 1998) admitindo a capacidade plástica à flexão do pino metálico ($M_{y,k} = \pi * d^3 * f_y / 6$).

Dos experimentos de ligações com pinos metálicos de Jorissen (1998), Blass & Krämer (2000) concluíram que os modos de falha II e III apresentam predominantemente deformação plástica do conector. No entanto, na maioria dos casos o momento plástico não é totalmente desenvolvido e, conseqüentemente, o momento plástico máximo do pino não é atingido.

Os autores também desenvolveram uma equação empírica simplificada para a capacidade de flexão do pino metálico para um deslocamento final de 15 mm em ligações madeira-madeira (equação 20). Segundo os autores, a capacidade de flexão de acordo com a equação proposta resulta em valores significativamente menores, especialmente para grandes diâmetros. A equação desenvolvida por Blass & Krämer (2000) é atualmente utilizada no EUROCODE 5.

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (20)$$

3.3.5 Espaçamento entre pinos (a)

Jorissen (1998) conduziu ensaios em corpos de prova de ligações com cinco pinos alinhados (n=5) com intuito de determinar a influencia do espaçamento, na direção do carregamento e das fibras, na capacidade de carga da ligação. Os resultados demonstrados na figura 9 mostram que, mais ou menos independente da esbeltez dos parafusos, quanto menor o espaçamento entre pinos, maior a importância do parâmetro. No entanto, sua influencia é reduzida conforme o espaçamento aumenta. O autor analisa que a capacidade de carga aumenta conforme os espaçamentos aumentam.

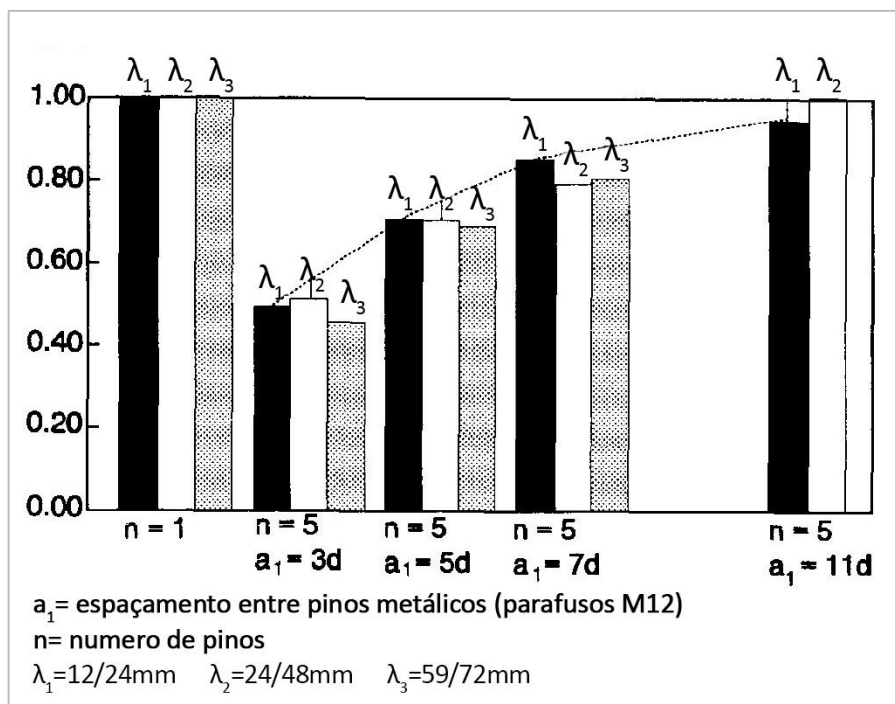


Figura 9 – Influência do espaçamento (a_1) na capacidade de carga para $n=5$ e diferentes valores de esbeltez (λ).
Fonte: Adaptado de Jorissen (1998).

Wilkinson & Rowlands (1981), baseados em ensaios em corpos de prova de madeira unidos por pinos metálicos, afirmam que, sob algumas condições, as tensões são fortemente influenciadas pela distância de extremidade. Contudo, os resultados numéricos e experimentais indicam que as tensões abaixo do pino são pouco alteradas para distâncias de extremidade maiores que $4d$.

Conforme especificado em Revisão ABNT NBR 7190 (2011), para ligações com pinos metálicos são feitas as seguintes recomendações:

- Entre o centro de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras: pregos, cavilhas e parafusos afastados $6d$; parafusos $4d$;
 - Do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas: $7d$;
 - Do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas: $4d$;
 - Entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicular às fibras: $3d$;
 - Do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicular às fibras, quando o esforço transmitido for paralelo às fibras: $1,5d$;
 - Do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de tração normal: $1,5d$;
 - Do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for normal às fibras, do lado onde atuam tensões de compressão normal: $4d$.
- Revisão ABNT NBR 7190 (2011).

Como descrito acima, os espaçamentos são ilustrados na Figura 10.

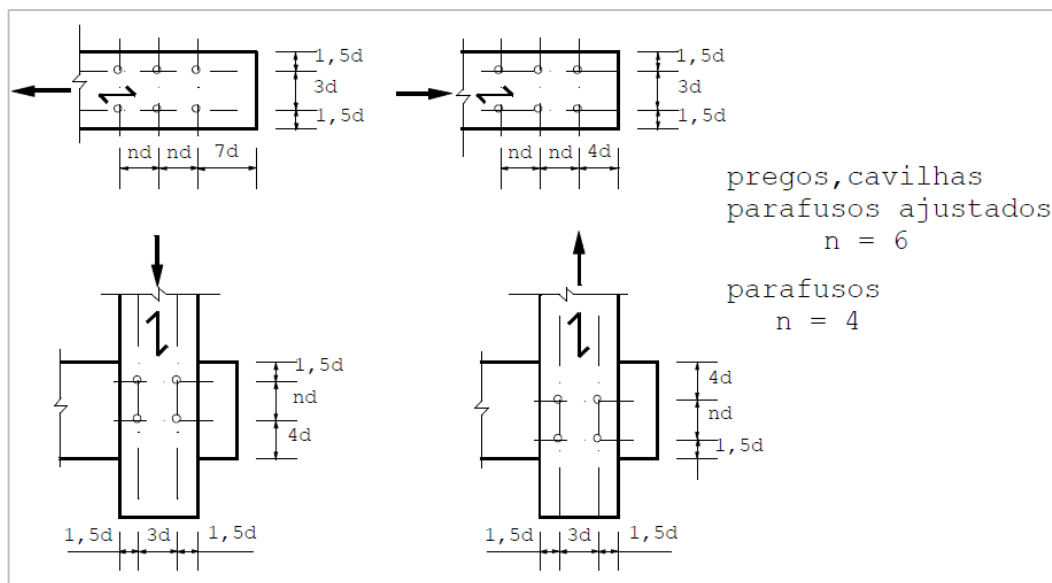


Figura 10 – Espaçamento em ligações com pinos.
Fonte: Adaptado Revisão ABNT NBR 7190 (2011).

Conforme EUROCODE 5 (2004), os espaços e distâncias para utilização dos parafusos são especificados conforme a Quadro 9, com seus símbolos definidos na Figura 11.

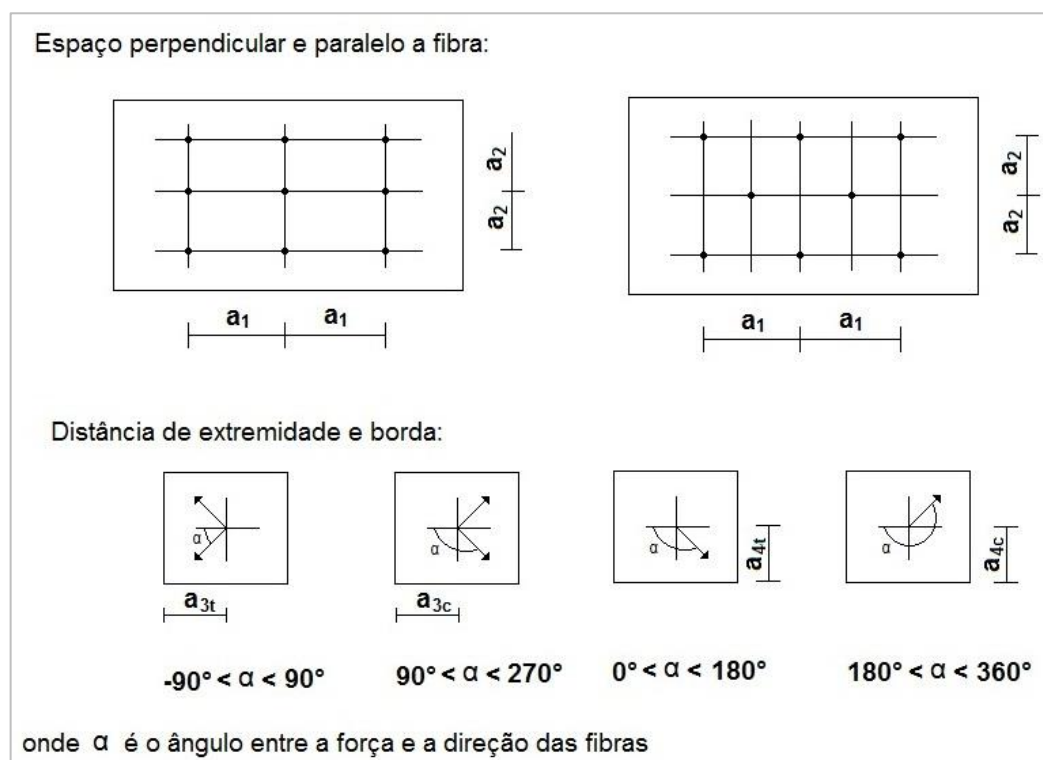


Figura 11 – Definição do espaçamento e distância para ligações.
Fonte: Adaptada EUROCODE 5 (2004).

a_1 (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \cos\alpha) d$
a_2 (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	máx. (7d ; 80mm)
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$(1 + 6 \sin\alpha) d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \sin\alpha) d$
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	máx. [(2 + 2 sin α) d ; 3d]
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Quadro 9 – Espaçamento e distâncias mínimas para parafusos.

Fonte: Adaptado de EUROCODE 5 (2004).

3.3.6 Diâmetro do furo (d_0)

De acordo com Stamato (1998) nas ligações pregadas, pequenas variações na relação entre o diâmetro do furo e o diâmetro do prego podem causar variações significativas nas tensões na vizinhança do furo. Decrescendo essa relação, a tensão no contato entre pino e furo é acrescida. O comportamento dessa ligação é altamente não linear, pois, com o aumento da carga, aumenta a área de contato devido à cravação do pino na madeira.

Segundo Wilkinson & Rowlands (1981), pequenas mudanças na relação entre o diâmetro do pino e pré-furação podem ter um efeito bastante significativo nas tensões na vizinhança do furo. Este, provavelmente, é o fator que provoca a maior variabilidade em resultados observados em ensaios de ligações por parafusos. Se a relação d/d_0 diminui, a tensão abaixo do furo aumenta.

A ABNT NBR 7190 (1997) recomenda que para ligações parafusadas a pré-furação deve ser feita com diâmetro (d_0) não maior que o diâmetro (d) do parafuso, acrescido de 0,5 mm. Já o EUROCODE 5 (2004) recomenda a pré-furação em peças de madeira deve ter um diâmetro (d_0) não superior a 1 mm maior do que o diâmetro do parafuso (d).

3.3.7 Numero efetivo de parafusos (n_{ef})

Smith (2006) conduziu ensaios experimentais utilizando LSL (*Laminated Strand Lumber*), LVL (*Laminated Veneer Lumber*) e *Eastern White Pine* (*Pinus strobus* L.). O autor concluiu que para LSL a resistência das ligações com seis pinos foi praticamente seis vezes a capacidade de carga de ligações com apenas um pino observando assim que o efeito de grupo pra LSL não é significativo. No entanto, para LVL e madeiras macias o fator de grupo é significante.

Schmid (2002) utilizou modelos teóricos de cálculo para demonstrar a influência do numero de pinos na resistência final de ligações. Os resultados para as cinco diferentes configurações de ligação estudadas pelo autor estão demonstrados na figura 12.

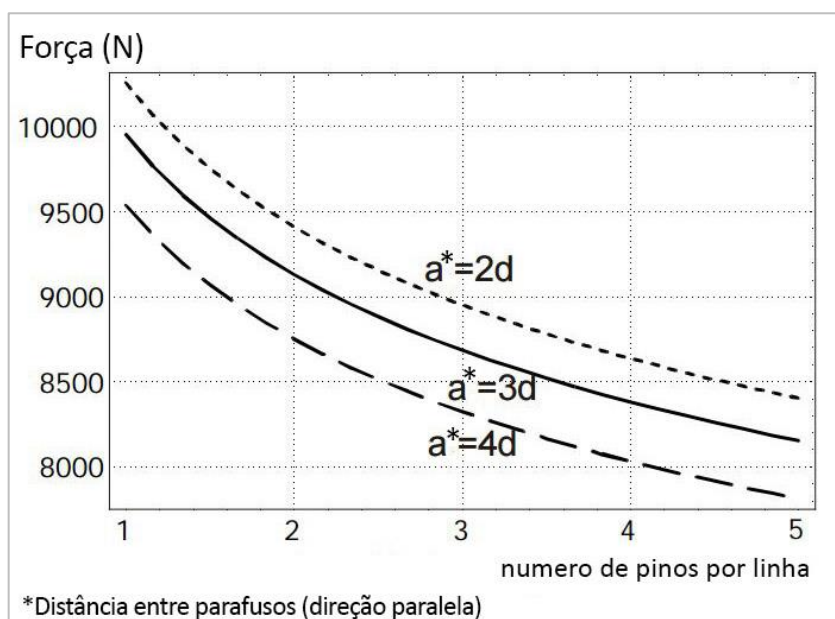


Figura 12 – Efeito do numero de pinos na capacidade resistente da ligação.

Fonte: Adaptado de Schmid (2002).

De acordo com Porteous e Kermani (2007), o número efetivo dos elementos de fixação em uma ligação é dependente do tipo de conector e da direção da força. Conforme descrito em EUROCODE 5 (2004), o número efetivo de parafusos para

uma linha com “n” parafusos na direção paralela as fibras, pode ser determinado conforme equação 21.

$$n_{ef} = \min. \begin{cases} n & \text{(Perpendicular)} \\ n^{0,94} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} & \text{(Paralelo)} \end{cases} \quad (21)$$

onde:

a_1	distância entre os parafusos na direção paralela
d	diâmetro do parafuso
n	número de parafusos
n_{ef}	número efetivo de parafusos

Se a linha com “n” parafusos estiver na direção perpendicular às fibras o numero efetivo de parafusos será igual ao numero de parafusos (equação 22). Para ligações com parafusos inclinados, o numero efetivo de parafusos deve ser determinado por uma interpolação linear entre as equações 21 e 22.

$$n_{ef} = n \quad (22)$$

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência total de um pino de ligação é dada pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte. Sendo assim, nas ligações com até oito pinos em linha, dispostos paralelamente ao esforço a ser transmitido, a resistência total é dada pela soma das resistências de cada um dos pinos. Nas ligações com mais de oito pinos, os pinos suplementares devem ser considerados com apenas 2/3 de sua resistência individual. Assim, com “n” sendo o número de pinos efetivos, temos o número convencional de pinos calculado conforme equação 23.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (23)$$

3.3.8 Atrito e efeito de corda

Posteriormente aos estudos de Johansen, Möller (1951, apud Ramskill, 2002) notou que outros efeitos devem ser considerados, a citar, o efeito de atrito entre as peças e a força de contenção lateral que o pino deformado provoca na ligação, conhecido como efeito de corda (*Rope Effect*). A norma europeia considera, para os efeitos de atrito, um acréscimo de 5% para os modos de falha II e 15% para os modos de falha III, e limita de forma conservadora o efeito de corda. O modelo de cálculo da atual norma brasileira não considera nenhum desses efeitos.

O efeito de corda é gerado pela compressão da madeira e pela da rotação do pino. Segundo Reichert (2009) esse efeito facilita o desenvolvimento da rótula plástica no pino, promovendo uma alteração no modo de falha da ligação, de frágil para mais dúctil.

Ainda segundo o autor, o efeito de corda ocorre quando o deslocamento entre as peças de madeira provoca rotação do pino metálico. As arruelas são comprimidas na superfície externa da ligação de madeira, aumentando a resistência da ligação. O incremento de resistência é função dos seguintes parâmetros: deslocamento relativo entre as peças de madeira, espessura dos elementos de madeira, diâmetro do pino metálico, força de arrancamento (para o caso de ligações pregadas) e resistência à compressão normal sob a arruela (para o caso de ligações parafusadas). A figura 13 ilustra o efeito.

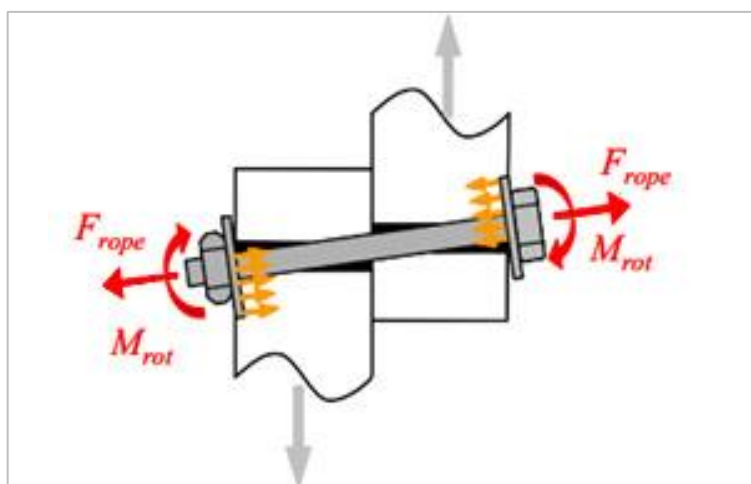


Figura 13 – Tensões provocadas pela arruela na madeira.
 Fonte: Adaptado de Reichert (2009).

3.3.9 Comportamento mecânico do aço e da madeira

O modelo europeu ainda considera outra simplificação ao idealizar o comportamento do aço e da madeira totalmente plásticos, que apesar de simplificar o equilíbrio de forças e momentos, durante o desenvolvimento das equações, só ocorre em alguns casos de arranjo de ligações, após grandes deslocamentos. Dessa forma o real modelo de falha de uma ligação é uma combinação dos três modos de falha propostos por Johansen, pois o aço e principalmente a madeira, não possuem na realidade comportamento perfeitamente plástico, idealizado. As Figuras 14a e 14b, mostram a comparação do comportamento real e do idealizado para o aço e para a madeira, respectivamente.

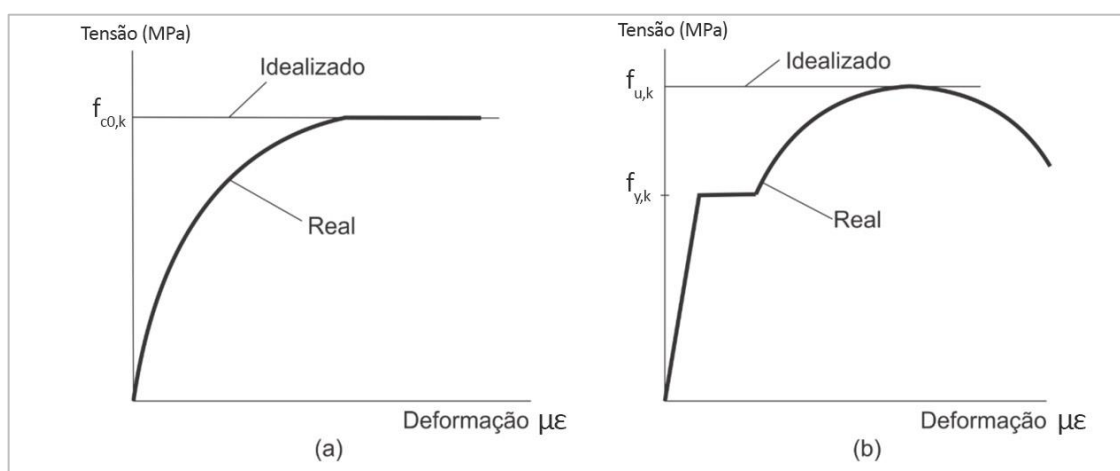


Figura 14 – (a) Comparação entre o comportamento real e idealizado da madeira; (b) Comparação entre o comportamento real e idealizado do aço.

Fonte: Adaptado Jorrisen (1998).

3.4 DOCUMENTOS NORMATIVOS

3.4.1 ABNT NBR 7190 (1997)

A norma para estruturas de madeiras ABNT NBR 7190 (1997) considera ligações apenas por pinos metálicos, cavilhas e conectores, sem fazer diferenças

entre pregos, parafusos passantes com porcas e arruelas e parafusos auto-atarraxantes. A norma também não leva em consideração o atrito entre as peças nem tampouco o possível efeito de corda, conforme discutido na seção anterior.

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), devem ser respeitados os espaçamentos especificados, bem como a pré-furação para evitar o fendilhamento da madeira em virtude da presença dos elementos de união. Deve-se fazer a verificação através da equação 24 para evitar a ruptura por tração normal às fibras em regiões de ligação, figura 15.

$$F \sin \alpha \leq f_{v,d} b_e t \quad (24)$$

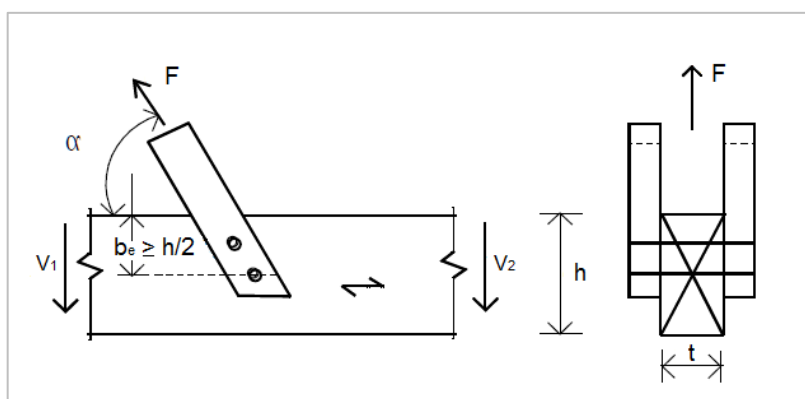


Figura 15 – Ligações com tração normal às fibras.
Fonte: Revisão ABNT NBR 7190 (2011).

onde:

- b_e é a distância do eixo do pino mais afastado à borda do lado da sollicitação, com $b_e \geq h/2$;
- t é a espessura da peça principal;
- $f_{v,d}$ é a resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras;
- α é o ângulo de inclinação da força F em relação às fibras;
- h é a altura total da seção transversal da peça principal.

De acordo com a especificação da ABNT NBR 7190 (1997), as arruelas usadas na fixação dos parafusos devem ter diâmetro ou comprimento do lado de pelo menos $3d$ (onde d é o diâmetro do parafuso) sob a cabeça e a porca. A norma ainda destaca a espessura mínima das arruelas de aço como sendo de 9 mm nas pontes de 6 mm em outras estruturas, não devendo em caso algum ser inferior a $1/8$ do lado, no caso de arruelas quadradas, ou do diâmetro, no caso de arruelas

circulares. De acordo com a norma, a área útil mínima das arruelas deve ser tal que permita utilizar todo o esforço de tração admissível no parafuso, sem exceder a resistência à compressão normal da madeira.

3.4.1.1 Resistência das ligações com pinos metálicos

Para uma seção de corte é levado em consideração à resistência ao embutimento (f_{wed}), a resistência ao escoamento do pino (f_{yd}), o diâmetro do pino (d) e a espessura convencional t , sendo o valor de tal espessura o menor entre t_1 e t_2 , como exposto na figura 16.

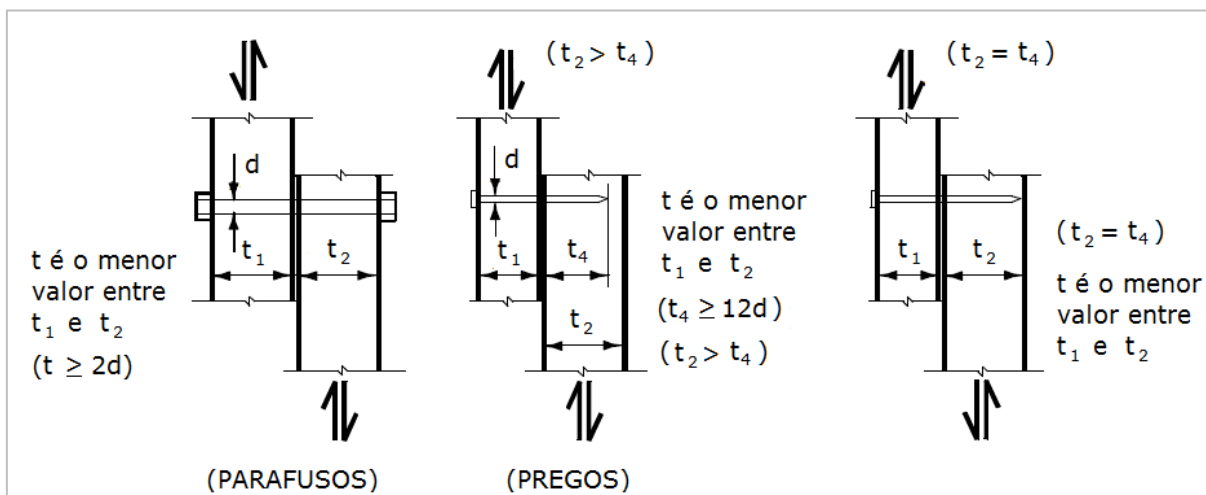


Figura 16 – Pinos metálicos em corte simples.

Fonte: Adaptado Revisão ABNT NBR 7190 (2011).

Em seções de corte duplo, a espessura convencional t é a menor espessura entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções e $t_2/2$ e t_3 na outra seção, mostrada na figura 17.

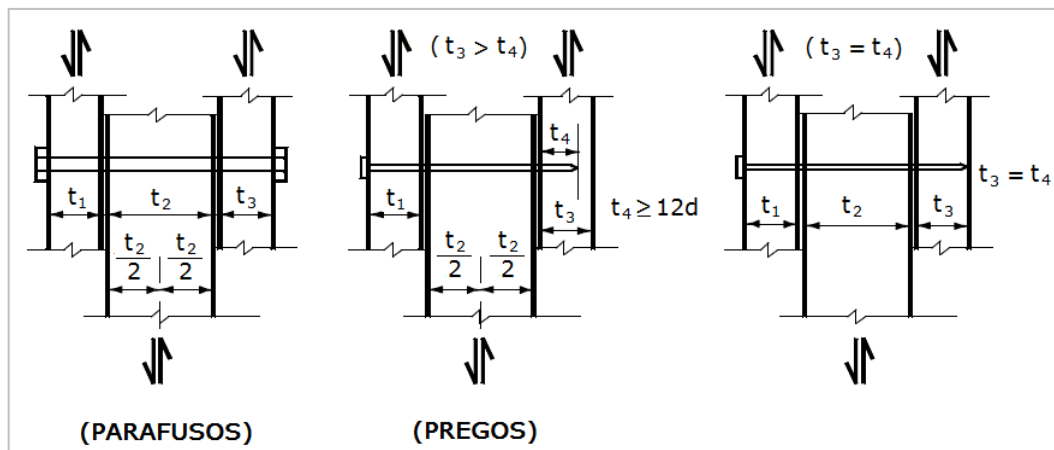


Figura 17 – Pinos metálicos em corte duplo.
Fonte: Adaptado Revisão ABNT NBR 7190 (2011).

Para a determinação da resistência da ligação (R_d) é necessário verificar os parâmetros apresentados:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (25)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (26)$$

onde:

- t é a espessura especificada nas Figuras 17 e 18;
 d é o diâmetro do pino metálico;
 $f_{y,k}$ é o valor da resistência de escoamento do pino
 $f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_s}$ é o valor da resistência de cálculo do escoamento do pino, com $\gamma_s = 1,1$

Os dois casos apresentados na ABNT NBR 7190 (1997) são:

- Equação 27 quando $\beta \leq \beta_{lim}$: ocorrência de embutimento na madeira.

$$R_d = 0,40 t d f_{e,d} \quad (27)$$

- Equação 28 quando $\beta \geq \beta_{lim}$: ocorrência de flexão do pino

$$R_d = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d} \quad (28)$$

3.4.2 EUROCODE 5

A norma européia para estruturas em madeira em vigência atualmente é mais completa que a nacional no sentido de que apresenta uma abordagem com equações diferentes em corte simples e corte duplo, abrangendo os modelos de falha descritos por Johansen, considerando ainda outros efeitos presentes na ligação como força de atrito entre as peças.

Para que não ocorra ruptura por tração normal as fibras, o EUROCODE 5 (2004) indica que deve ser verificada a seguinte condição (equações 29 e 30).

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (29)$$

$$F_{v,Ed} = \max. \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (30)$$

onde:

$F_{90,Rd}$ resistência de projeto ao fendilhamento;
 $F_{v,Ed,1}$, $F_{v,Ed,2}$ resistências de projeto ao cisalhamento de cada lado do conector.

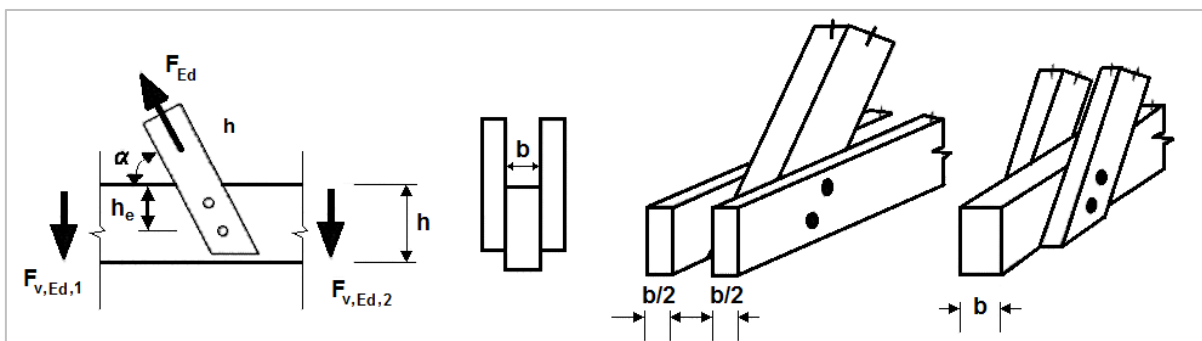


Figura 18 - Força combinada agindo em um ângulo as fibras.
 Fonte: EUROCODE 5 (2004).

Para se calcular a resistência à tração normal de madeiras com baixa densidade, deve-se utilizar a Equação 31, sendo “w” um fator de modificação igual a

1 para todos os tipos de conectores metálicos exceto chapas metálicas com dentes estampados.

$$F_{90,Rd} = 14bw \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad (31)$$

3.4.2.1 Resistência das ligações com parafusos passantes

O valor para a resistência das ligações com parafusos passantes entre as peças de madeira ou derivados de madeira deve ser o menor das equações seguintes:

- Uma seção de corte

$$R_k = \min. \left\{ \begin{array}{l} f_{e,k1} t_1 d \quad (32) \\ f_{e,k1} t_2 d \quad (33) \\ \frac{f_{e,k1} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (34) \\ 1,05 \frac{f_{e,k1} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (35) \\ 1,05 \frac{f_{e,d,1} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{e,k1} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (36) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e,k1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (37) \end{array} \right.$$

- Duas seções de corte

$$R_k = \min. \left\{ \begin{array}{l} f_{e,k1} t_1 d \quad (38) \\ 0,5 f_{e,k1} t_2 d \quad (39) \\ 1,05 \frac{f_{e,k1} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (40) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e,k1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (41) \end{array} \right.$$

Nas equações 34 a 37, 40 e 41, o primeiro termo é a capacidade de carga de acordo com a teoria de Johansen multiplicada por uma parcela de atrito (exceto a equação 34), enquanto o segundo termo ($F_{ax,Rk}/4$) é a contribuição do efeito de corda (*rope effect*). De acordo com EUROCODE 5 (2004), a contribuição para a capacidade de carga, devido ao efeito de corda deve ser o menor valor entre as equações 42 e 43, referentes à resistência de tração do pino e resistência ao embutimento da arruela na madeira, respectivamente. Além disso, a norma limita o valor do efeito a 25% da parcela de Johansen, para parafusos com porcas e arruelas.

$$\frac{\pi d^2}{4} f_{yd} \quad (42)$$

$$\left(\frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \right) 3 f_{ed} \quad (43)$$

A norma também leva em consideração um acréscimo de resistência nos modos de falha II e III de Johansen devido ao atrito entre as peças, por isso, o EUROCODE 5 (2004) tem os coeficientes 1,05 e 1,15, no início das equações.

Quando ocorre a flexão do pino o mesmo produz um momento característico, sendo que para parafusos de eixo redondos com o material em aço deve ser calculado conforme equação 44, sendo a resistência à tração (f_u) em N/mm².

$$M_d = 0,3 f_u d^{2,6} \quad (44)$$

3.5 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O claro entendimento do comportamento das ligações é essencial para a implantação de métodos eficientes de cálculos estruturais. Além disso, os recentes estudos acerca de outros fatores que influenciam o comportamento das ligações são de grande valia as futuras revisões de documentos normativos.

O modelo teórico desenvolvido por Johansen em 1949 ainda hoje é o mais utilizado como base para documentos normativos em todo o mundo. Os modelos teóricos para o cálculo da resistência de ligações com pinos metálicos, realizado tanto pela ABNT NBR 7190 (1997) quanto pelo EUROCODE 5 (1993), derivam do modelo de Johansen, porém existem diferenças entre os textos.

Na norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), o modelo de Johansen é simplificado para apenas dois modos de falha, que são o embutimento da madeira e flexão do pino metálico, diferente da norma europeia, onde Meyer (1957 apud JORISSEN 1998) estendeu o modelo de Johansen considerando dimensões e elementos distintos para todos os modos de falha.

Outra simplificação encontrada na norma ABNT NBR 7190 (1997) é acerca do cálculo de ligações com dupla seção de corte. A norma especifica que deve-se utilizar as mesmas equações deduzidas para uma seção de corte, multiplicando o valor encontrado pelo número de seções de corte, porém de acordo com o cálculo de Johansen para duas seções de corte ou mais, as equações e os modos de falha são distintos devido a ocorrência de rótula plástica no pino metálico.

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência de uma ligação em madeira por pino metálico é função da resistência à flexão do pino e da resistência ao embutimento da madeira. No entanto existem diversos outros fatores que influenciam no comportamento das ligações, dentre os mais importantes podemos citar o diâmetro e esbeltez do pino, o momento resistente do conector, o efeito de corda e atrito entre as peças entre outros.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para caracterização dos corpos de prova das duas espécies de madeiras utilizadas neste trabalho, a citar, *Apuleia leiocarpa* (Grapeira) e *Tabebuia cassinoides* (Caixeta), foram realizados os ensaios de compressão paralela às fibras, embutimento paralelo às fibras, bem como caracterização de densidade e teor de umidade. Para caracterização dos pinos metálicos foram realizados ensaios de tração no parafuso. Todos os corpos de prova e ensaios foram realizados segundo normativas nacionais e internacionais, e são detalhados a seguir.

4.1 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para os ensaios de compressão paralela às fibras, foram confeccionados seis corpos de prova de cada uma das espécies de madeira. As dimensões utilizadas foram 5 cm x 5 cm x 15 cm, (figura 19) e estão de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo B.

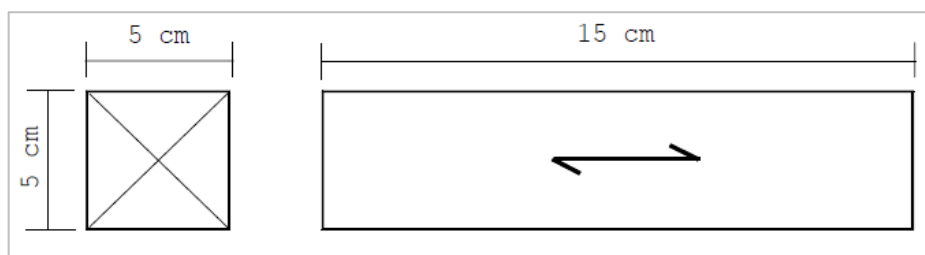


Figura 19 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo B.

Os procedimentos de ensaio foram realizados conforme descrito no anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), sendo determinada neste ensaio apenas a resistência à compressão da madeira. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC DL30000, do Laboratório de Sistemas Estruturais, aplicando-se dois ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama de carregamento da figura 20. Aplicou-se uma taxa de 10 MPa/min, até atingir a força máxima de ruptura do corpo de prova. A figura 21 apresenta o ensaio.

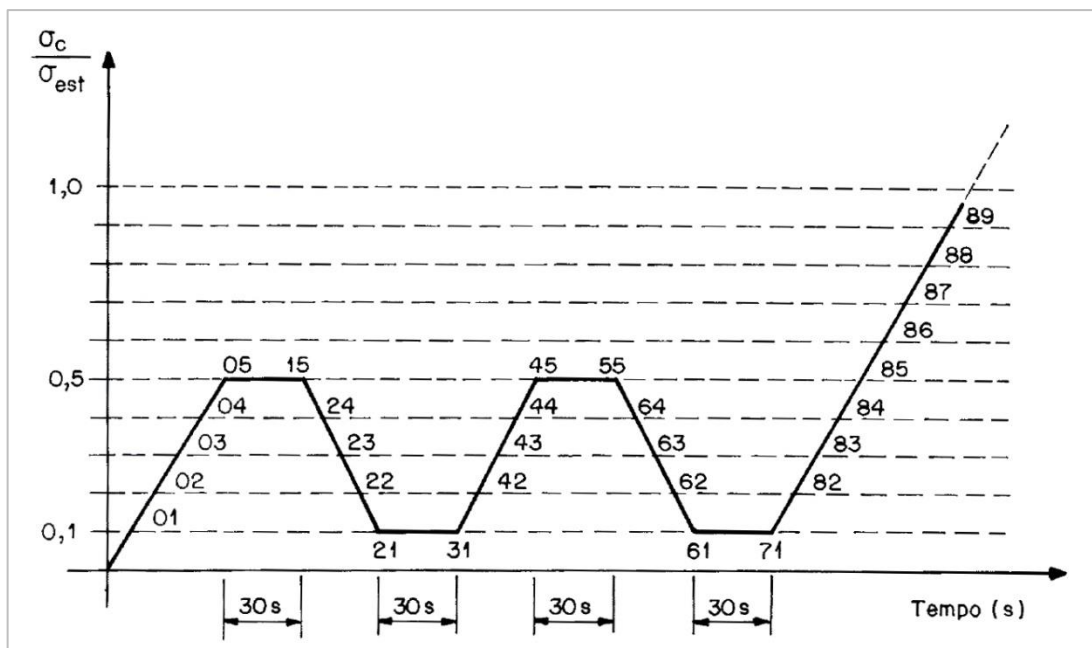


Figura 20 – Diagrama de carregamento do ensaio de compressão paralela às fibras.
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo B.

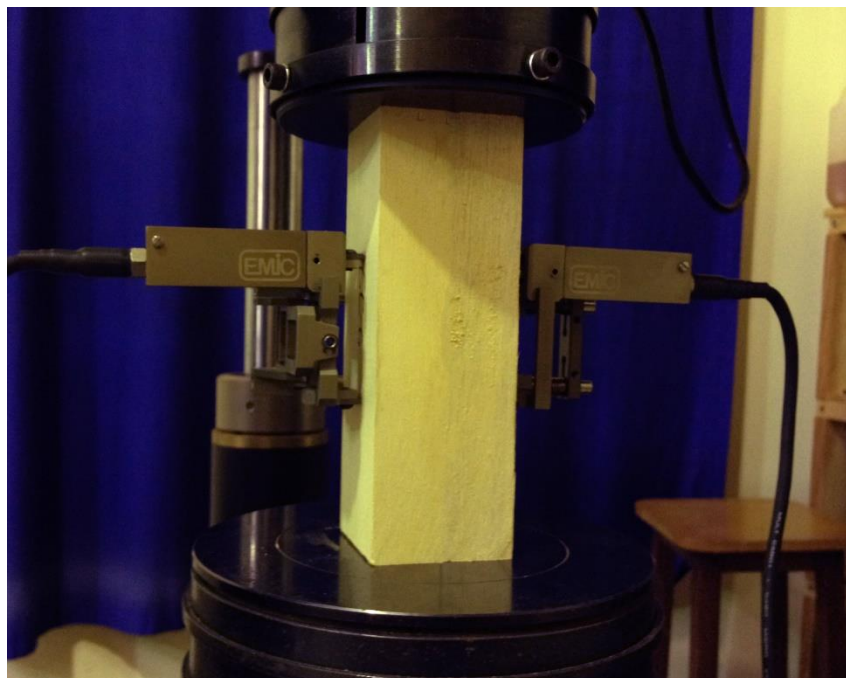


Figura 21 – Ensaio de compressão paralela às fibras.

4.2 Ensaio de embutimento paralelo às fibras

Para a determinação da resistência ao embutimento da madeira na direção paralela às fibras foram confeccionados sete corpos de prova da espécie Garapeira e oito corpos de prova da espécie Caixeta. As dimensões adotadas foram de 17 cm x 8 cm x 2,5 cm e estão de acordo com os valores mínimos definidos segundo a norma europeia EN 383 (2007) demonstrados na figura 22.

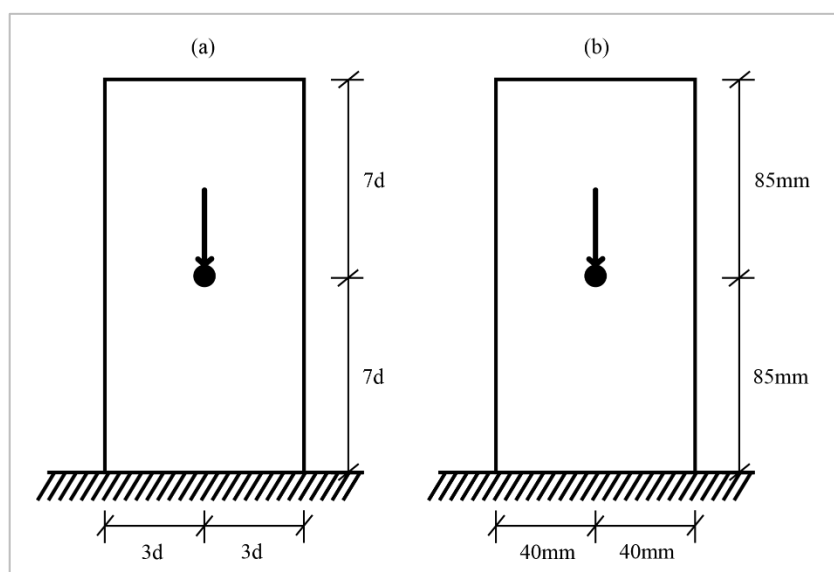


Figura 22 – Corpo de prova para ensaio de embutimento. (a) Dimensões de acordo com EN383 (b) Dimensões utilizadas no trabalho.

Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com a metodologia descrita na norma europeia EN 383 (2007), na máquina universal de ensaios EMIC DL30000, do Laboratório de Sistemas Estruturais. Segundo a norma, o ensaio deve seguir a sequência de carregamento apresentado na figura 23. A taxa de carregamento deve ser constante e ajustada de modo que a carga máxima seja atingida dentro de (300 ± 120) s. A figura 24 apresenta o ensaio.

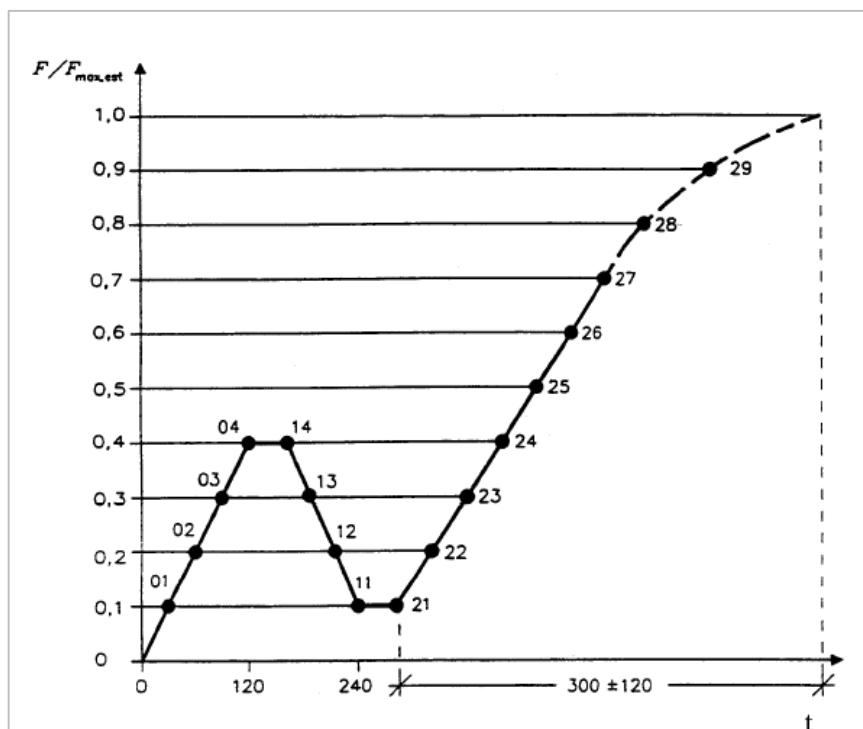


Figura 23 – Diagrama de carregamento do ensaio de embutimento da madeira na direção paralela às fibras.
Fonte: EN 383 (2007).

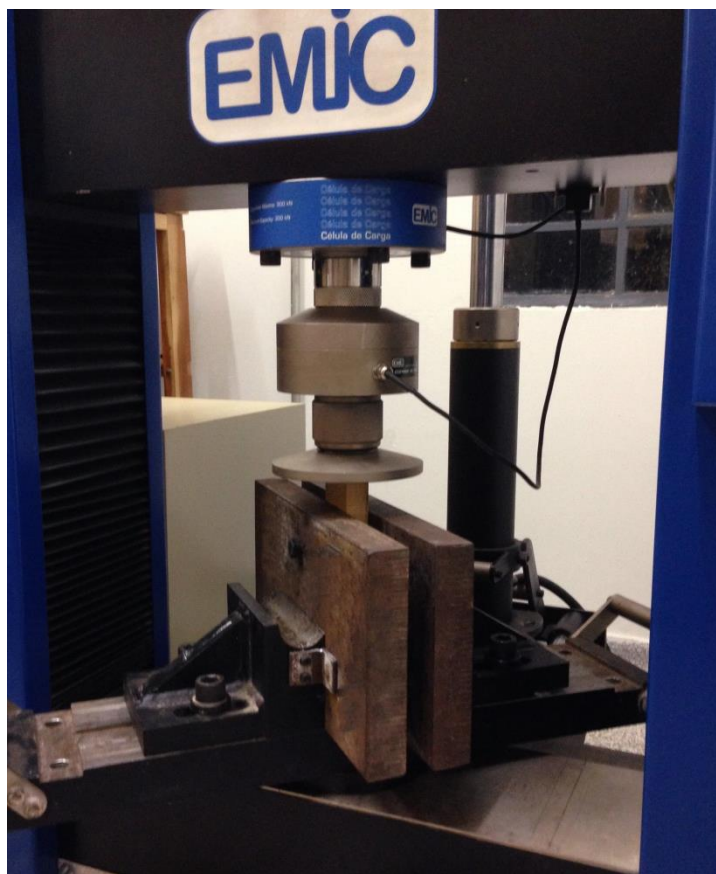


Figura 24 – Ensaio de embutimento da madeira na direção paralela as fibras.

4.3 Ensaio de densidade e teor de umidade

Para a determinação da umidade e densidade da madeira foram confeccionados 8 corpos de prova de cada espécie segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997), de acordo com a figura 25. Tais amostras foram extraídas com seção transversal de 3 cm x 2 cm x 5 cm. A figura 26 mostra os corpos de prova obtidos.

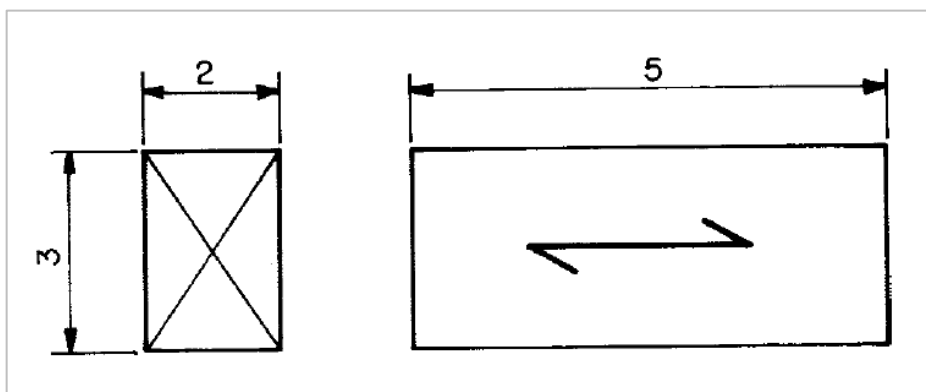


Figura 25 – Corpo de prova para caracterização de umidade e densidade.
Fonte: ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo B.



Figura 26 – Corpos de prova para determinação da umidade e densidade aparente

Para a determinação da umidade e densidade da madeira, segundo a ABNT NBR 7190 (1997), primeiramente determinou-se a massa inicial (m_i) dos corpos de prova com sensibilidade de 0,01 g. Posteriormente os mesmos foram colocados em

uma câmara de secagem com temperatura máxima de $100^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Por fim, a massa dos corpos de prova foi mensurada a cada 6 horas, até ocorrer uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida, sendo essa considerada a massa seca (m_s). Conhecida a massa seca e a massa inicial a umidade foi determinada pela equação 46.

$$U(\%) = \left(\frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (46)$$

Já para determinar a densidade da madeira, utilizou-se os mesmos corpos de prova do ensaio de umidade. A partir disso, foram coletados a massa inicial e o volume inicial dos corpos de prova, e através da equação 47 determinou-se a densidade.

$$\rho = \frac{m_i}{V_i} \quad (47)$$

4.4 Ensaio de tração no parafuso

Os parafusos utilizados, sextavados de rosca parcial com diâmetro de 12 mm (M12) produzidos em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8, foram caracterizados por meio de ensaios de tração conforme as recomendações da ABNT NBR ISO 6892 (2013). O método consiste na aplicação de uma carga axial crescente e contínua até que ocorra ruptura do corpo de prova. Os ensaios foram realizados na máquina geral de ensaios EMIC DL30000.

Foram realizados três ensaios de tração e os valores obtidos foram utilizados para o cálculo dos momentos resistentes do pino de acordo com a equação 44 do EUROCODE 5 (2004). A figura 27 apresenta as dimensões do pino utilizado nesse trabalho.

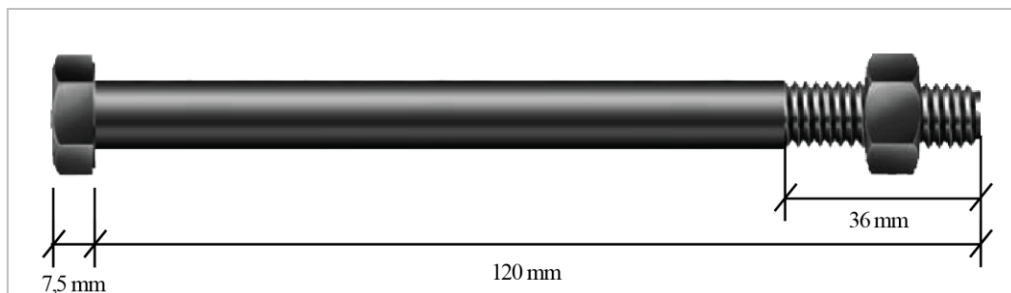


Figura 27 – Parafusos M12 sextavados de rosca parcial (dimensões).

4.5 Confeccção e ensaio dos corpos de prova de ligação

Para a investigação experimental das ligações foram confeccionados corpos de prova de ligação normatizados segundo ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo C (Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira), que define o comprimento da base de medida mínimo de acordo com a equação 45. Os espaçamentos entre pinos foram determinados atendendo as exigências mínimas presentes na norma, representadas na figura 28 bem como na seção 3.3.5 deste trabalho.

$$L_o = 2. (7. d) + n. (a) \quad (45)$$

onde:

L_o é o comprimento da base de medida, em milímetros;

d é o diâmetro do pino, em milímetros;

n é o número de espaçamentos entre os pinos segundo a direção paralela ao esforço;

a é o espaçamento entre pinos, medido de eixo a eixo na direção paralela ao esforço, em milímetros.

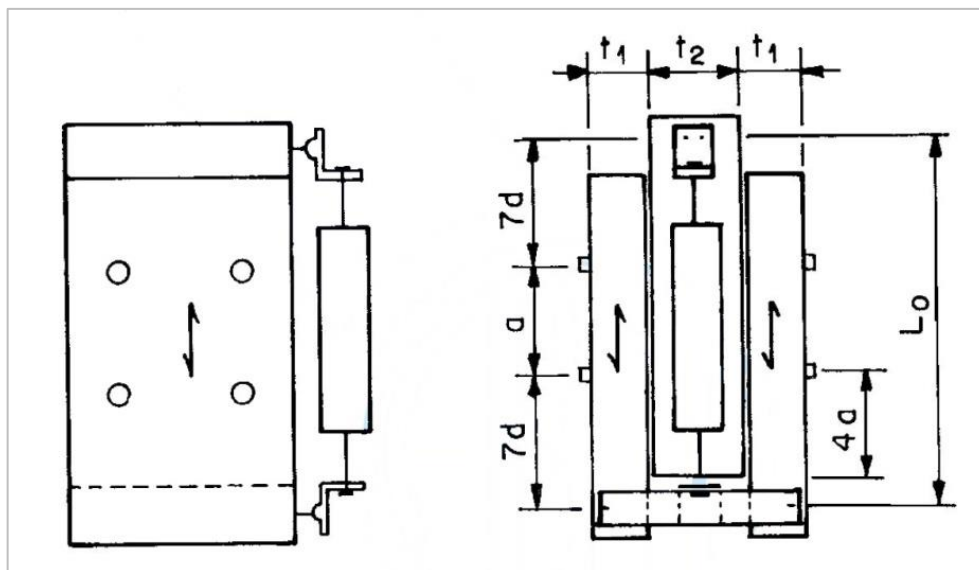


Figura 28 – Corpo de prova para ensaio de ligações mecânicas.
Fonte: Adaptado ABNT NBR 7190 (2011).

Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão (UTFPR) a partir de dois lotes de madeira de espécies diferentes, conforme mencionado anteriormente, *Apuleia leiocarpa* (Grapeira) e *Tabebuia cassinoides* (Caixeta), escolhidas por representarem classes de resistência e densidade distintas. A madeira para fabricação dos corpos de prova foi extraída aleatoriamente do lote a ser investigado, a partir de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão de sua seção transversal, mas nunca menos de 30 cm de acordo com as exigências da norma ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo C.

Os pinos utilizados foram parafusos sextavados de rosca parcial com diâmetro nominal de 12 mm (M12) produzidos em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8 especificado segundo a norma ISO 4016 (2000). Foram utilizadas porcas sextavadas (M12) especificadas de acordo com a norma ISO 4034 (1999). As arruelas utilizadas possuíam diâmetro interno (d_1) igual a 13,5 mm, diâmetro externo (d_2) igual a 44,0 mm e espessura de 4 mm, especificadas segundo a norma DIN 440R (2001). Os conectores são apresentados na figura 29.



Figura 29 – Conectores utilizados nos corpos de prova.

Foram confeccionados seis corpos de prova de cada espécie, de acordo com a exigência mínima para caracterização da resistência de uma ligação segundo a ABNT NBR 7190 (1997) – Anexo C. As dimensões adotadas para a confecção estão representadas na figura 30. Algumas medidas foram padronizadas acima do mínimo especificado em norma.

As espessuras “t” das peças foram estabelecidas conforme item 8.3.4 da ABNT NBR 7190 (1997) sendo utilizada a espessura padrão nominal de 25 mm para as cobrejuntas. As peças centrais foram construídas com o dobro da espessura das respectivas cobrejuntas.

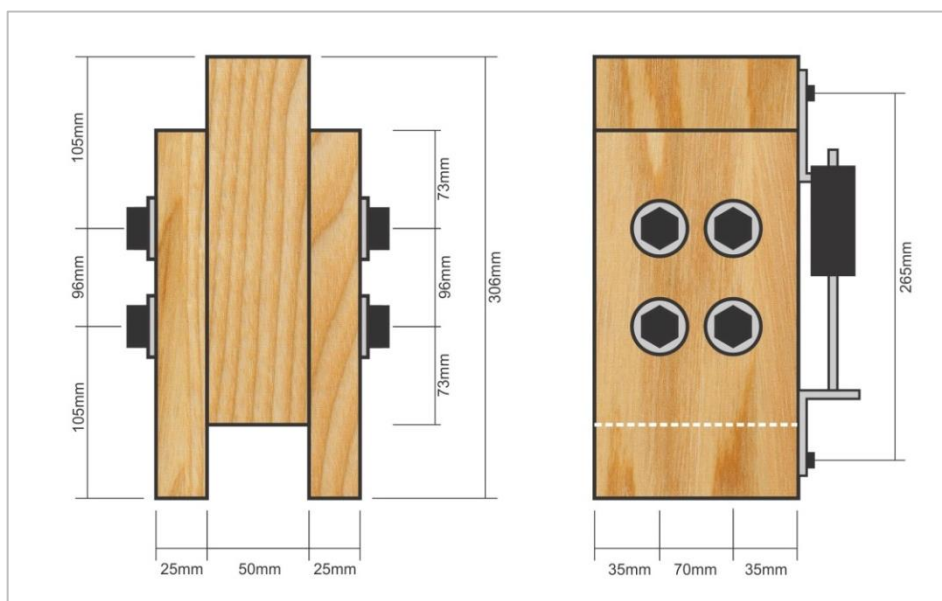


Figura 30 – Dimensões dos corpos de prova deste trabalho.

A numeração dos corpos de prova, nas duas séries de ensaios, foi feita utilizando um primeiro número, com um ou dois algarismos, para indicar a numeração sequencial das amostras de corpos de prova e, em seguida e entre parênteses, uma letra que indica a espécie de madeira. Os primeiros corpos de prova, para cada tipo de pino, foram utilizados para a determinação da força limite e, portanto, não aparecem nas tabelas de resultados. As letras G e C correspondem, respectivamente, às espécies Garapeira e Caixeta.

Os corpos de prova, para ensaio de ligação na direção paralela às fibras, foram montados obedecendo às dimensões e espaçamentos mínimos constantes na norma brasileira, utilizando-se quatro pinos e duas seções de corte.

Para a montagem dos corpos de prova, conforme mostrado na figura 31, foi usado um dispositivo tipo sargento para manter as peças em posição para receberem a pré-furação, procurando aproximar ao máximo dos valores recomendados pela ABNT NBR 7190. Mantendo o dispositivo, os parafusos, arruelas e porcas foram inseridos e apertados com a ajuda de um torquimetro para obtenção de um torque uniforme em todos os pinos.

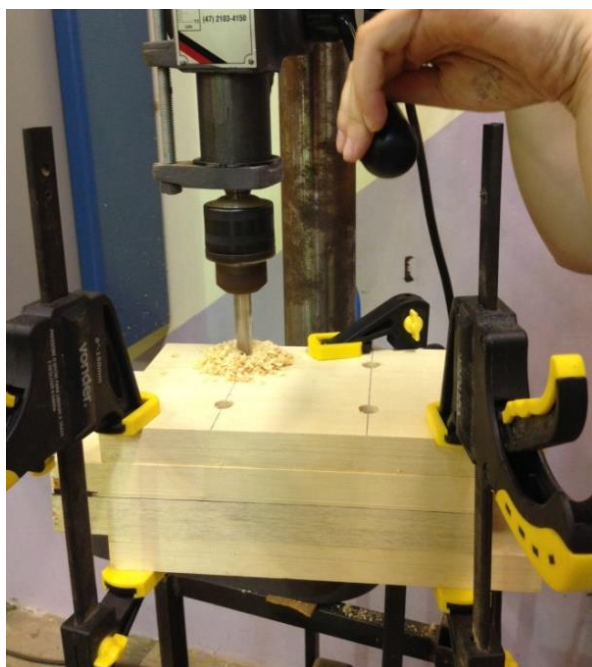


Figura 31 – Pré-furação dos corpos de prova.

Para as leituras das medidas de deslocamentos relativos, foram utilizados transdutores de deslocamento analógicos (relógios comparadores) com resolução de 0,01 mm, montados em dispositivos, constituídos de cantoneira metálica,

colocados nas duas faces laterais dos corpos de prova, conforme figura 32. Os deslocamentos foram medidos em relação a uma base de medida com comprimento L_0 definido na figura 30.



Figura 32 – Corpo de prova com relógios comparadores.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC DL30000 de acordo com a norma EN 26891 (1991). Segundo a norma, atingindo-se os 40 % da força estimada (F_{est}), com um incremento de carga de $0,2 F_{est}$ por minuto, esta carga deve ser mantida por 30 segundos. Após este período, deve-se proceder à descarga, mantendo o valor do incremento de carga anterior, agora negativo, até aos 10 % de F_{est} , os quais devem ser mantidos por mais 30 segundos. Sucede-se então a outro carregamento, ainda com o mesmo incremento, até aos 70 % de F_{est} . Acima deste valor, o incremento deve ser tal que a rotura seja alcançada ao fim de 3 a 5 minutos. Assim, o período de tempo destes ensaios deve situar-se nos 10 a 15 minutos. O diagrama de carregamentos adotados está representado na figura 33. Os dados obtidos nos ensaios permitiram a obtenção de diagramas equivalentes ao da figura 34.

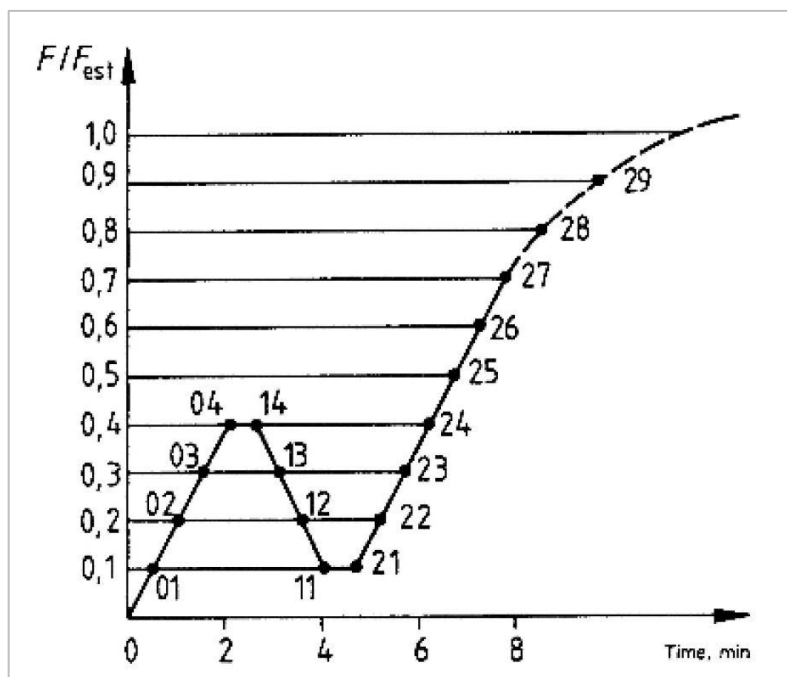


Figura 33 – Procedimento de carga.
Fonte: Adaptado EN 26891 (1991).

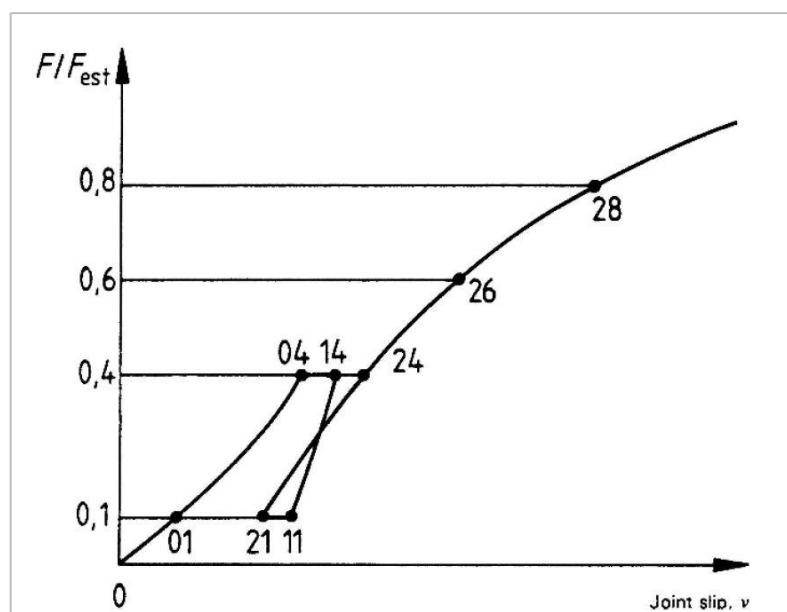


Figura 34 – Diagrama idealizado força-deformação.
Fonte: Adaptado EN 26891 (1991).

5. RESULTADOS

No item 5.1 são apresentados os resultados dos ensaios para caracterização da madeira e no item 5.2 são apresentados os resultados para resistência da ligação. Todos os ensaios foram conduzidos conforme descrito no capítulo 6 deste trabalho.

5.1 Caracterização da madeira

A tabela 1 apresenta os resultados de umidade e densidade para cada uma das espécies de madeira utilizada. A tabela 2 apresenta os resultados da resistência da madeira à compressão na direção paralela às fibras e por fim a tabela 3 apresenta os valores de resistência ao embutimento também na direção paralela as fibras. Ao final das tabelas 2 e 3 foram calculadas ainda a média, desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) dos valores obtidos para cada espécie. Esses ensaios de caracterização foram realizados nas mesmas condições de umidade dos ensaios de ligações. As figuras 35 a 38 mostram os corpos de prova ensaiados.

Tabela 1 – Umidade e densidade.

Propriedade	Garapeira	Caixeta
U	12,36 % (8CP) CV=1,82%	13,51 % (8CP) CV=2,47%
ρ	740 kg/cm ³ (8CP) CV=1,39%	410 kg/cm ³ (8CP) CV=2,57%



Figura 35 – Corpos de prova de umidade e densidade.

Tabela 2 – Resistencia à compressão paralela às fibras.

Garapeira		Caixeta	
CP	f_{c0} (MPa)	CP	f_{c0} (MPa)
G1	60,40	C1	28,57
G2	64,86	C2	27,67
G3	43,48	C3	31,05
G4	58,63	C4	29,19
G5	59,91	C5	29,01
G6	59,76	C6	29,74
Valor médio:	57,84	Média:	29,21
Desvio Padrão:	7,36	Desvio Padrão:	1,14
CV:	12,72 %	CV:	3,90 %



Figura 36 – Corpos de prova de compressão paralela Garapeira.



Figura 37 – Corpos de prova de compressão paralela Caixeta.

Tabela 3 – Resistência ao embutimento.

Garapeira		Caixeta	
CP	$f_{e,k1}$ (MPa)	CP	$f_{e,k1}$ (MPa)
G1	84,5	C1	31,46
G2	80,9	C2	26,77
G3	85,62	C3	30,36
G4	104,89	C4	26,66
G5	81,92	C5	26,87
G6	97,99	C6	26,92
G7	98,25	C7	27,65
		C8	30,36
Valor médio:	90,58	Valor médio:	28,38
Desvio Padrão:	8,85	Desvio Padrão:	1,86
CV:	9,77%	CV:	6,57%

**Figura 38 – Corpos de prova de embutimento**

5.2 Caracterização dos parafusos

Os resultados dos ensaios de tração dos parafusos são apresentados na tabela 4. Estes resultados foram utilizados para determinação dos valores de momentos resistentes do pino, calculados de acordo com a equação 44 do EUROCODE 5 (2004). Estes valores também estão descritos na tabela 4. A figura 39 mostra um corpo de prova após o ensaio.

Tabela 4 – Tensão dos parafusos e momentos calculados.

CP	Tensão (MPa)	Momento ($M_{y,k}$)
P1	860,60	165117,78
P2	879,90	168820,74
P3	877,00	168264,34
Valor médio:	872,50	167400,95
Desvio padrão:	8,50	1630,35
CV:	0,97%	0,97%



Figura 39 – Corpos de prova de tração no pino.

5.3 Resistência das ligações

Os resultados obtidos para resistência (R) das ligações estão apresentados nas tabelas 5 e 6. Os resultados foram obtidos a partir da força máxima para uma deformação de 15 mm de acordo com a norma EN 26891 (1991). Os valores de média e desvio padrão também estão indicados nas tabelas, além da força estimada

(f_{est}) para a ligação, usada nos ensaios. As figura 39 apresenta detalhes dos corpos de prova de ligação após o ensaio. Os CPs foram abertos após o ensaio para verificação do modo de falha.

Tabela 5 – Resistência das ligações com madeira Garapeira.

CP	Resistência (R)
1(C)	168000 N
2(C)	179710 N
3(C)	172100 N
4(C)	189640 N
5(C)	169800 N
6(C)	187330 N
Valor médio:	177763 N
Desvio padrão:	9243,12 N
CV:	5,19 %
F_{est}	170000 N

Tabela 6 – Resistência das ligações com madeira Caixeta.

CP	Resistência (R)
1(C)	113540 N
2(C)	104700 N
3(C)	109500 N
4(C)	108120 N
5(C)	107470 N
6(C)	107410 N
Valor médio:	108456 N
Desvio padrão:	2940,19 N
CV:	2,71 %
F_{est}	90000 N

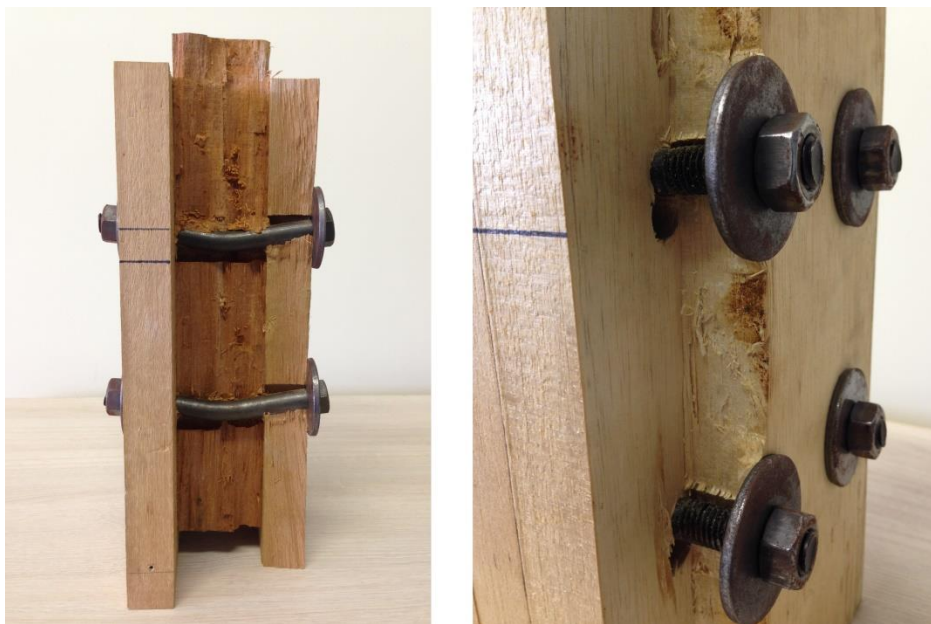


Figura 40 – Modelo de ruptura dos ensaios de ligação.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais foram utilizados para alimentar os modelos analíticos da norma brasileira e europeia e obter os valores de resistência máxima teórica da ligação, por esse motivo não foram corrigidos para valores padrão de umidade de 12%. A tabela 7 apresenta um resumo dos resultados de caracterização dos materiais e os demais parâmetros utilizados para alimentar os modelos teóricos de cálculo.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados para alimentar os modelos teóricos de cálculo

Madeira	Garapeira	Caixeta	Parafuso		Geometria da Ligação	
U	12,36 %	13,51 %	f_{u,m}	872,5 MPa	Φ	12 mm
ρ_{12%}	740 kg/cm ³	410 kg/cm ³			t₁	25 mm
f_{c0,m}	57,8 MPa	29,2 MPa			t₂	50 mm
f_{e0,m}	90,6 MPa	28,4 MPa			Nº pinos	4 parafusos

A tabela 8 e o gráfico da figura 41 apresentam os resultados das simulações teóricas, bem como os resultados dos ensaios de ligação conduzidos conforme descritos anteriormente.

Tabela 8 – Comparação de resistência da ligação teórica e experimental.

	NBR	EC5 (sem efeito de corda)	EC5 (com efeito de corda)	Exp.
Resistência média Ligação Garapeira	86,96 kN	124,08 kN	153,53 kN	177,76 kN (6CP) CV=5,2%
Resistência média Ligação Caixeta	27,24 kN	63,18 kN	78,22 kN	108,5 kN (6CP) CV=2,7%

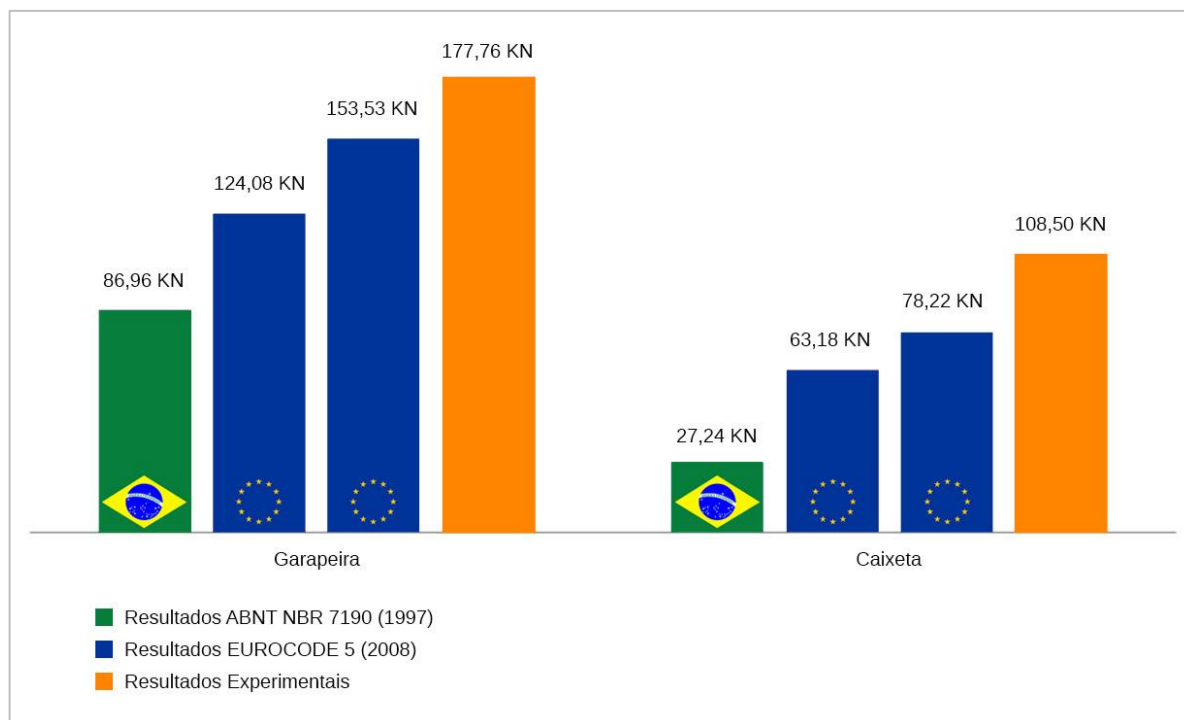


Figura 41 – Comparação de resistência da ligação teórica e experimental.

Ressalta-se que para efeito de comparação entre os resultados experimentais da capacidade das ligações as simulações dos modelos analíticos foram realizadas também com valores médios. Não foram utilizados quaisquer coeficientes de modificação e coeficientes de minoração das resistências tanto para o modelo da NBR quanto para o modelo do EC5.

Observando os valores apresentados na tabela 8 é possível destacar a grande diferença entre os resultados do modelo analítico da norma brasileira, para o resultado experimental, sendo 51,08% para a espécie Garapeira e 74,89% para a espécie Caixeta.

Os resultados das simulações utilizando o modelo analítico da norma europeia são mais coerentes com os resultados experimentais atingindo, para a madeira Garapeira, diferenças da ordem de 30,19% a 13,63%, sem o uso da parcela do efeito de corda e considerando a parcela, respectivamente.

7. CONCLUSÕES

O claro entendimento do comportamento das ligações é essencial para a implantação de métodos eficientes de cálculos estruturais, além disso, os recentes estudos acerca de outros fatores que influenciam o comportamento das ligações são de grande valia para as futuras revisões de documentos normativos. Com base nos resultados obtidos na pesquisa, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- O modelo simplificado na norma brasileira produz resultados de força máxima da ligação consideravelmente inferiores aos experimentais para ambas as espécies estudada. Conseqüentemente esses resultados geram um maior consumo de pinos e madeira, aumentando o peso próprio das estruturas, e diminuindo sua eficiência;
- O modelo analítico da norma europeia promove valores superiores de força máxima da ligação, se aproximando dos resultados experimentais, principalmente quando considerado o efeito de corda;
- Os resultados dos ensaios de embutimento demonstraram a necessidade de mais investigações sobre o assunto, pois para a espécie de baixa densidade Caixeta a resistência ao embutimento foi similar à resistência a compressão paralela, como recomenda a norma brasileira, mas no caso da espécie Garapeira houve uma grande discrepância entre os resultados.

Além disso, mais trabalhos devem ser realizados com o intuito de investigar a adequação do modelo analítico proposto pela norma europeia, para diferentes geometrias de ligação, diâmetros de parafusos, bem como diferentes espécies de madeira.

REFERÊNCIAS

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

_____. **Revisão NBR 7190: Projeto estruturas de madeiras**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8800: Projeto estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, P.A.O. **Uniões pregadas de madeira**. São Paulo, 1987. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BLASS, H. J.; KRAEMER, V. **Effective bending capacity of dowel-type fasteners**. In International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission CIB-W18, Stuttgart, 2001.

BRANCO, Jorge Manuel Gonçalves. **Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira – Betão**. Braga, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Do Minho.

CALIL JUNIOR, Carlito; LAHR, Francisco A. R.; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Baueri – São Paulo: Manole Ltda, 2003.

DIAS, Alan. **Ligações em Estruturas de Madeira**. Carpintaria: blog estruturas de madeira. Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2013_02_01_archive.html>. Acesso em: 20 março 2014.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. **DIN 436 – Square washers for use in timber constructions**. Berlin, (1990).

_____. **DIN 440 – Washers – With square hole, especially for timber construction.** Berlin, (2001).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures.** Brussels, (2008).

_____. **EN ISO 898-1 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs.** Brussels, (1999).

_____. **ISO 225 – Fasteners – Bolts, screws, studs and nuts – Symbols and descriptions of dimensions.** Brussels, (2010).

_____. **ISO 4016 – Hexagon head bolt – Product grade C.** Brussels, (2000).

GERDAU. **Pregos.** Disponível em: <https://www.amigosdocampo.com.br/arquivos/downloads/131015162846_CatalogoPregosGerdau.pdf>. Acesso em: 01 julho 2014.

JOHNSSON, Helena. **Plug shear failure in nailed timber connections.** Lulea, 2004. Dissertação (Doutorado) – Dept. of Civil and Environmental Engineering, Lulea University of Technology.

JORISSEN, André. **Double shear timber connections with dowel type fasteners.** Dissertação (doutorado), Technische Universiteit Delft, Delft University Press, Netherlands, 1998.

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

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy. **Structural timber design to Eurocode 5.** Blackwell Publishing, 2007.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro: LTC, 2003.

RAMSKILL, Thomas E. **Effect of Cracking on Lag Bolt Performance.** Dissertação. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2002.

REICHERT, Thomas. **Development Of 3d Lattice Models For Predicting Nonlinear Timber Joint Behaviour**. Dissertação (Doutorado). School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh, 2009.

Schoenmakers, Arnaud. **Study of simplified simulation models for slamming wave impact of floating/sailing composite structures**. Dissertação (Mestrado) - Universiteit Gent. 2010.

SMITH, I. **Short term load tests on whitewood embedment specimens with a single plain circular section steel connector in a hole of the same diameter**. High Wycombe, UK, Timber Research and Development Association (TRADA), 1982.

STAMATO, G. C., CALIL JÚNIOR. C. Resistência ao embutimento da madeira compensada. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos-SP, v. 4, n. 18, p.49-76, 2002.

TIMBER ENGINEERING STEP 1. **Basis of design, material properties, structural componentes and joints**. Holanda: Centrum Hout. 1995.

VALLE, Ângela do; KÖHLER, André Dalri; SZÜCS, Carlos Alberto; FUSCO, Pérciles Brasiliense. **Determinação experimental da resistência e da rigidez de embutimento de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminado colada**. Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas De Madeira – EBRAMEM – CD ROM. São Carlos, São Paulo, 2000.

WILKINSON, T. L., AND R. E. ROWLANDS. 1981a. Analysis of mechanical joints in wood. *Experimental Mechanics*. **Experimental Mechanics**, vol. 21, 1981.

APÊNDICE A – Dedução das Equações de Johansen

TIMBER ENGINEERING STEP 1 (1995), assume que tanto a madeira quanto o pino de ligação são ideais, ou seja, a madeira é considerada um material perfeitamente plástico e o pino metálico perfeitamente rígido. Esta aproximação simplifica a análise e segundo o documento tem pouca influência no resultado final.

- Corte simples

Para as ligações com corte simples, temos os seguintes modelos de falha derivados dos modelos de Johansen.

- Modelo de falha Ia e Ib

Ocorrência somente de embutimento na madeira em apenas uma das peças. Na Figura A.1a o embutimento ocorre apenas no elemento 1 de madeira, com espessura t_1 , e na Figura A.1b o embutimento ocorre no elemento 2, com espessura t_2 .

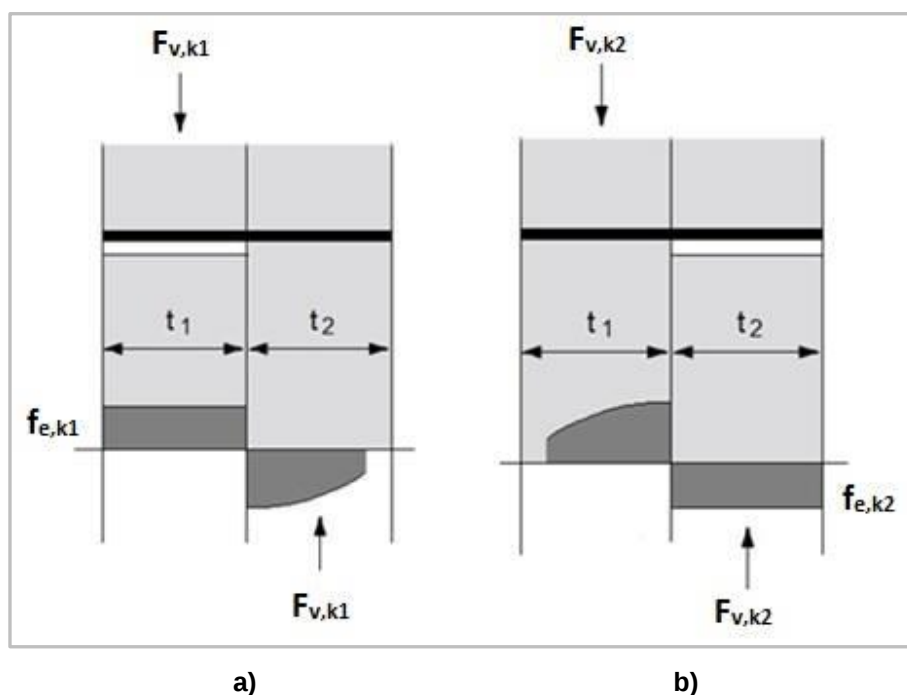


Figura A1 – a) Modelo de falha Ia; b) Modelo de falha Ib

A força da ligação para o modelo de falha Ia é demonstrado na Equação (A.1) para falha no elemento 1 e na Equação (A.2) temos o modelo de falha Ib onde a falha ocorre no elemento 2.

$$F_{v,k1} = f_{c0,k1} t_1 d \quad (\text{A.1})$$

$$F_{v,k2} = \begin{cases} f_{c0,k2} t_2 d \\ \beta f_{c0,k1} t_2 d \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

○ Modelo de falha Ic

Ocorrência de embutimento da madeira nos dois elementos de madeira simultaneamente e com giro no pino metálico, sem deformação do mesmo, como demonstrado na Figura A.2.

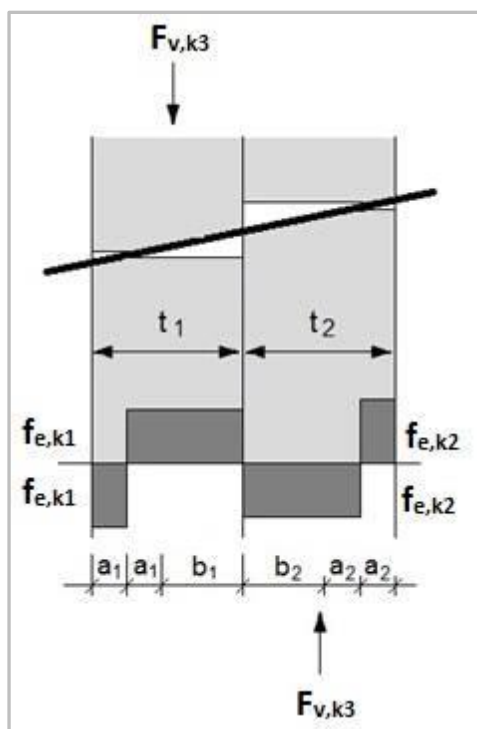


Figura A2 – Modelo de falha Ic

A Equação (A.3) para a resistência da ligação para o modelo de falha com embutimento nas duas espessuras t_1 e t_2 , é descrita a partir das deduções a seguir:

Sabendo que a resistência é calculada como:

$$F_{v,k3} = -(f_{e,k1} d a_1) + (f_{e,k1} d a_1) + (f_{e,k1} d b_1)$$

Temos

$$F_{v,k3} = f_{e,k1} d b_1$$

Também podendo ser expressa como:

$$F_{v,k3} = f_{e,k1} d b_1 = f_{e,k2} d b_2 = \beta f_{e,k1} d b_2$$

Pois

$$b_1 = \beta b_2$$

Momento na interface

$$\begin{aligned} &= f_{e,k1} d \left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) \\ &= f_{e,k2} d \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \\ &= \beta f_{e,k1} d \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Equacionando e substituindo:

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta}$$

Teremos:

$$\begin{aligned} \frac{b_1^2 \beta + 1}{2} \frac{1}{\beta} &= \beta a_2^2 + a_1^2 \\ a_1 &= \frac{t_1 - b_1}{2} \end{aligned}$$

e

$$a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2} = \frac{\beta t_2 - b_1}{2\beta}$$

Substituindo teremos:

$$b_1^2 \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) + 2b_1(t_1 + t_2) - (t_1^2 + \beta t_2^2) = 0$$

Resolvendo para b_1 temos:

$$b_1 = \frac{t_1}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$$

Como especificado:

$$R_d = f_{h,1,d} d b_1$$

$$F_{v,k3} = \frac{f_{e,k1} d t_1}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_1}{t_2} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (\text{A.3})$$

- Modelo de falha IIa

Ocorrência de flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 2, como mostrado na Figura A.3.

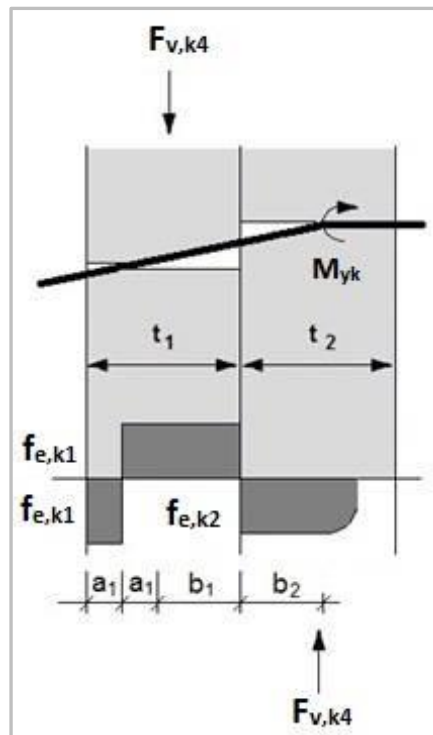


Figura A3 – Modelo de falha IIa

O cálculo da resistência da ligação para o modelo de falha IIa é especificado pela Equação (A.4) e deduzido na sequência.

Sabendo que:

$$F_{v,k4} = f_{e,k1} d b_1 = f_{e,k2} d b_2 = \beta f_{e,k1} d b_2$$

$$b_1 = \beta b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_{yk} = -f_{e,k2} d \frac{b_2^2}{2} + f_{e,k1} d (b_1 + a_1) \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{e,k1} d a_1 \left(b_1 + b_2 + \frac{3a_1}{2} \right)$$

Substituindo:

$$f_{e,k2} = \beta f_{e,k1} \quad \text{E} \quad a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

Fornece:

$$b_1^2 + t_1 \frac{2\beta}{2+\beta} b_1 - \frac{\beta t_1^2}{2+\beta} - \frac{M_{yk}}{f_{e,k1} d} \frac{4\beta}{2+\beta} = 0$$

Logo

$$b_1 = \frac{t_1}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{yk}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right]$$

Substituindo b_1 em:

$$R_d = f_{e,k1} d b_1$$

Temos:

$$F_{v,k4} = \frac{f_{e,k1} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{yk}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right] \quad (\text{A.4})$$

- Modelo de falha IIb

Ocorrência de flexão do pino metálico com ocorrência de rótula plástica no elemento 1, esquematizado na Figura A.4.

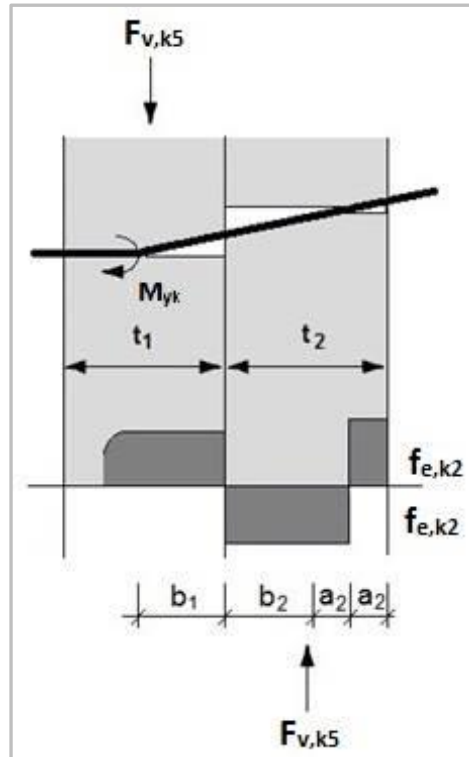


Figura A4 – Modelo de falha IIb

O cálculo da resistência da ligação para o modelo de falha 2b é especificado pela Equação (A.5) e deduzido na sequência.

Como antes:

$$b_1 = \beta b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_{yk} = f_{e,k1} d \left[\frac{-b_1^2}{2} + \beta b_2 \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + \beta a_2 \left(b_1 + t_2 - \frac{3a_2}{2} \right) - \beta a_2 \left(b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} \right) \right]$$

Substituindo:

$$b_1 = \beta b_2$$

E

$$a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2}$$

Temos:

$$b_2^2 + \frac{\beta}{2} \frac{4 t_2 b_2}{\beta (2\beta + 1)} - \left(\frac{\beta t_2^2}{4} + \frac{M_{yk}}{f_{e,k1} d} \right) \frac{4}{\beta (2\beta + 1)} = 0$$

Resolvendo para b_2 :

$$b_2 = \frac{-t_2}{2\beta + 1} + \sqrt{\frac{t_2^2}{(2\beta + 1)^2} + \frac{t_2^2}{2\beta + 1} + \frac{4M_{yk}}{f_{e,k1} d \beta(2\beta + 1)}}$$

Sendo

$$F_{v,k5} = \beta f_{e,k1} d b_2$$

Assim:

$$F_{v,k5} = \frac{f_{e,k1} d t_2}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{yk}}{f_{e,k1} d t_2^2}} - \beta \right] \quad (\text{A.5})$$

- Modelo de falha III

Considerando que há ocorrência de flexão do pino metálico e a existência de duas rótulas plásticas, uma em cada elemento de madeira, podendo ser visualizado na Figura A.5.

Para o modelo de falha 3 a resistência da ligação é especificada na Equação (A.6) e deduzida a seguir.

Com a somatória dos momentos temos:

$$M_{yk} + M_{yk} = f_{e,k1} d b_1 \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - \beta f_{e,k1} d \frac{b_2^2}{2}$$

Lembrando que:

$$b_2 = \frac{b_1}{\beta}$$

Substituindo e resolvendo para b_1 :

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 M_{yk}}{f_{e,k1} d}} \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}}$$

Sendo:

$$F_{v,k6} = f_{e,k1} d b_1$$

Temos:

$$F_{v,k6} = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{yk} f_{e,k1} d} \quad (\text{A.6})$$

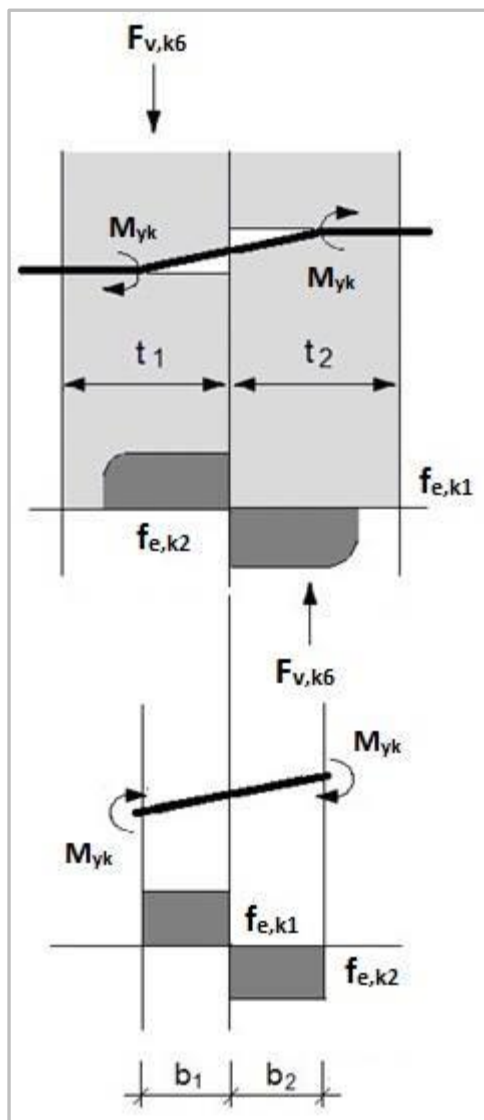


Figura A5 – Modelo de falha III

- Dupla seção de corte

Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995) pode-se utilizar a mesma abordagem de Johansen para se desenvolver equações para resistência da ligação para duas seções de corte, porém, deve-se multiplicar as equações pelo número de cortes, assim, para dupla seção simétrica se multiplica por dois como apresentadas nas Equações (A.7) a (A.10).

$$F_{v,k1} = 2 (f_{e,k1} t_1 d)$$

Modelo de falha Ia (A.7)

$$F_{v,k2} = 2 (0,5 f_{e,k1} t_2 d \beta)$$

(Figura A.1a)

Modelo de falha Ib

(Figura A.1b)

(A.8)

$$F_{v,k3} = 2 \left(\frac{f_{e,k1} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{yk}}{f_{e,k1} d t_1^2}} - \beta \right] \right)$$

Modelo de falha IIa

(Figura A.3)

(A.9)

$$F_{v,k4} = 2 \left(\sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{yk} f_{e,k1} d} \right)$$

Modelo de falha III

(Figura A.5)

(A.10)

O modelo de falha e o número da Figura refere-se ao diagrama mostrado em uma seção de corte.

Nessas equações t_2 é a espessura do elemento central e t_1 a espessura do elemento exterior ou a espessura de penetração do pino no elemento exterior, sendo o que tiver menor valor.