

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

DANIEL FERREIRA TOMAZ

**FENÔMENOS DE SEGUNDA ORDEM EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS
EM MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

DANIEL FERREIRA TOMAZ

**FENÔMENOS DE SEGUNDA ORDEM EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS
EM MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado na disciplina de TCC 2, do Curso Superior de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Engenharia Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes.

CAMPO MOURÃO

2015



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

FENÔMENOS DE SEGUNDA ORDEM EM LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM MADEIRA

por

Daniel Ferreira Tomaz

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h00min do dia 15 de junho de 2016 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. Me. Jeferson Rafael Bueno

(UTFPR)

Eng. Civil Maiko Cristian Sedoski

(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. Marcelo Guelbert

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

Aos meus pais e irmãs.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos da minha família, especialmente meus pais Paulo e Ajanete e minha irmã Débora, sou eternamente grato por ter vocês na minha vida, pelo apoio em todos os momentos e por todos os conselhos, nada disso seria possível sem vocês do meu lado, amo muito vocês.

A todos meus amigos e as pessoas maravilhosas que conheci nesses anos de formação, de modo especial a Rafael Rosielo, Duda Manfrinato, Gregh, Dino, aos integrantes do The Barbas e amigos que fiz nas repúblicas “Lar e Casa” e “Sirene”.

A Mariana Faleiros, grande companheira desde o terceiro e para a vida inteira, te considero como minha irmã, obrigado por sempre estar presente nesses anos.

A UTFPR e a todos os professores envolvidos na minha formação, de modo especial ao meu orientador Dr. Jorge Góes, que me guiou e tornou possível a realização desse trabalho, por ter passado seus conhecimentos e confiado na minha capacidade, o senhor é um exemplo de pessoa que levarei para a minha vida.

Ao Maiko, por ter me auxiliado na realização das práticas nesse trabalho, por todo o conhecimento prático que me passou como supervisor em meu estágio no laboratório, você com certeza é uma das grandes amizades que a UTFPR me trouxe e que levo no peito.

Finalmente, a todos que de alguma forma ou por algum momento me auxiliou a alcançar o título Engenheiro.

RESUMO

TOMAZ, D. F. (2016). **Fenômenos de segunda ordem em ligações parafusadas em madeira.** 2016. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

As ligações em madeira com pinos metálicos possuem várias particularidades quando comparado a outras técnicas de ligação em estrutura de madeira. Johansen (1949) foi um dos principais estudiosos sobre as ligações por pinos metálicos, em seus modelos ele prevê a resistência da ligação a partir de relações entre a resistência de embutimento na madeira e flexão no pino, desconsiderando fenômenos como o atrito, dentre outros. Quando submetida a esforços, a ligação se deforma e fenômenos de segunda ordem não quantificados na teoria de Johansen podem ocorrer, o que ocasiona um ganho de resistência à ligação. Alguns desses fenômenos são considerados pelo modelo analítico do EUROCODE 5, no entanto, na norma brasileira NBR 7190 não há nenhuma consideração sobre efeitos secundários. Fundamentado nesse contexto, esse trabalho visa demonstrar e quantificar o ganho de resistência provocado pelos efeitos secundários, ao comparar valores de cálculo com valores de ensaios experimentais.

Palavras-chave: Pinos metálicos. Ligações. Fenômenos de segunda ordem. Atrito. Efeito de corda.

ABSTRACT

TOMAZ, D. F. **Second-order phenomena in wooden bolted joints**. 2016. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Wood connections with dowel type connectors have different characteristics when compared to other connection techniques in wood structure. Johansen (1949) was one of the leading scholars about connections by dowel type connectors, in his models he predicts the bond strength from relationships between resistance of embedding in wood and bending the dowel, disregarding phenomena such as friction, among others. When subjected to efforts, the connections deforms and second-order phenomena not quantified in Johansen's theory may occur, bringing a gain resistance to the connection. Some of these phenomena are considered by the analytical model in EUROCODE 5, however, the Brazilian NBR 7190 there is no consideration of side effects. Based on this context, this paper aims to demonstrate and quantify the strength gain caused by the side effects, comparing calculated values and experimental tests values.

Keywords: Metallic pins. Joints. Second-order phenomena. Friction. Rope effect.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
	2.1 OBJETIVO GERAL	10
	2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3	JUSTIFICATIVA.....	11
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
	4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRAS	12
	4.1.1 Ligações em madeira com pinos metálicos	12
	4.2 MODELO DE JOHANSEN PARA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES	13
	4.3 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES DE ACORDO COM A NBR 7190:1997..	16
	4.4 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES DE ACORDO COM EUROCODE 5	18
	4.5 EQUACIONAMENTO CONFORME O EUROCODE 5.....	20
	4.5.1 Equacionamento para uma seção de corte	20
	4.5.2 Equacionamento para duas seções de corte	21
5	MATERIAIS E MÉTODO	22
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
	6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS	26
	6.2 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA POR MODELOS TEÓRICOS	27
	6.3 RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES.....	27
7	CONCLUSÃO	31
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

As ligações por pinos metálicos em madeira são estudadas mundialmente desde meados do século XX. Muitos trabalhos foram desenvolvidos e vários modelos de comportamento para as ligações foram propostos nesse período. O comportamento das ligações com pinos metálicos foi inicialmente estudado por Johansen (1949), seus estudos serviram de base para a criação do European Yield Model, adotado no EUROCODE 5.

O EUROCODE 5 propõe valores que aumentam a resistência da ligação em virtude dos efeitos de segunda ordem que ocorrem no momento que a ligação é solicitada. Esses efeitos surgem em virtude do confinamento gerado pelas arruelas que comprimem a madeira e aumentam o atrito entre as peças conectadas.

No Brasil, Almeida (1987), apud Stamato (2002), faz um estudo sobre ligações, apresentando o modelo de Möller (1951) como mais eficiente para determinação da força última de uma ligação por pino metálico. O modelo de Möller (1951) determina a resistência da ligação considerando o embutimento na madeira e plastificação do pino, afirmando que qualquer acréscimo de resistência em um corpo de prova além do estado limite último é devido a efeito de segunda ordem.

De acordo com Almeida (1987), apud Stamato (2002), no momento que a ligação é solicitada, ocorre uma alteração de esforços entre a parede do furo e o pino metálico, concentrando tensões de compressão nessa região que variam conforme o diâmetro do prego e das propriedades da madeira.

A resistência adicional pelos efeitos de segunda ordem traz um ganho de resistência significativo à conexão. Para mensurar esse ganho é necessário analisar e comparar os valores de resistência obtidos entre ensaios e modelo de cálculo que represente uma ligação sujeita a efeitos de segunda ordem.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente o comportamento de ligações com pinos metálicos em madeira considerando os efeitos de segunda ordem de confinamento das arruelas e atrito.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os modelos de cálculos de resistência das ligações por pinos metálicos em madeira;
- Estimar experimentalmente a influência do atrito e do confinamento no comportamento estrutural das ligações parafusadas em madeira;
- Quantificar o ganho de resistência devido aos efeitos secundários provocado pelo conector.
- Avaliar qual modelo de cálculo apresenta maior exatidão na determinação da resistência da ligação.

3 JUSTIFICATIVA

A resistência das ligações nos modelos de cálculo de Johansen (1949) levam em consideração a geometria da ligação, a resistência ao embutimento da madeira e o momento fletor suportado pelo pino. Seu modelo foi a base para o desenvolvimento de várias normas, o EUROCODE 5 e DIN 1052 são exemplos.

No EUROCODE 5 as equações têm seus valores de resistência majorados. Uma parcela da equação leva em consideração o efeito de corda e um coeficiente que representa o atrito entre as peças conectadas. Esses fatores adicionados ao modelo de Johansen (1949) fazem com que a resistência teórica da ligação atinja até o dobro, dependendo do conector que for utilizado.

Esses efeitos secundários trazem um ganho considerável de resistência última da ligação, porém são desconsiderados em muitos casos por falta de modelos teóricos ou estudos que quantifique o comportamento desses efeitos que ocorrem no momento do carregamento.

A NBR 7190:1997 apresenta o modelo de resistência das ligações a partir de uma simplificação do modelo de Johansen (1949), limitando a resistência da ligação por dois modos de ruptura, embutimento na madeira ou flexão do pino metálico, desconsiderando qualquer acréscimo de resistência por ação secundária. Já no EUROCODE 5 são apresentadas mais de 4 variações de ruptura, dependendo da quantidade de seções de cortes no conector.

O estudo sobre os efeitos secundários em ligações se faz necessário para que se tenha um modelo teórico que conduza a um dimensionamento compatível com o comportamento real da estrutura.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRAS

As ligações em estruturas de madeiras podem ser divididas em três grupos: entalhes, produtos químicos e conectores metálicos. Os entalhes são caracterizados por transmitir esforços de compressão nas ligações e não suportam inversão de esforços, produtos químicos em geral são substâncias que fixam as peças e apresentam um comportamento frágil (colas de poliuretano, acetato de polivinil e resina epóxi são exemplos), os conectores metálicos caracterizam-se por resistir a esforços de tração e compressão e apresentam comportamento dúctil.

Pregos, parafusos de porca, cavilhas, parafusos auto-atarraxante e todos os conectores cujo a forma geométrica seja cilíndrica e com o comprimento bastante superior ao diâmetro, são definidos como pinos metálicos (Dowel type Connectors) (MENDES, 1994).

4.1.1 Ligações em madeira com pinos metálicos

O comportamento das ligações sofre influência direta do tipo do conector. Ligações coladas apresentam pouca deformabilidade e comportamento elasto-frágil, já as ligações com pinos metálicos são caracterizadas por comportamento elasto-plástico (PFEIL; PFEIL, 2003). Na Figura 1 apresenta-se o diagrama Força x Deslocamento para três tipos de ligação em madeira: Ligação colada; ligação com anel metálico; e ligação com pino metálico.

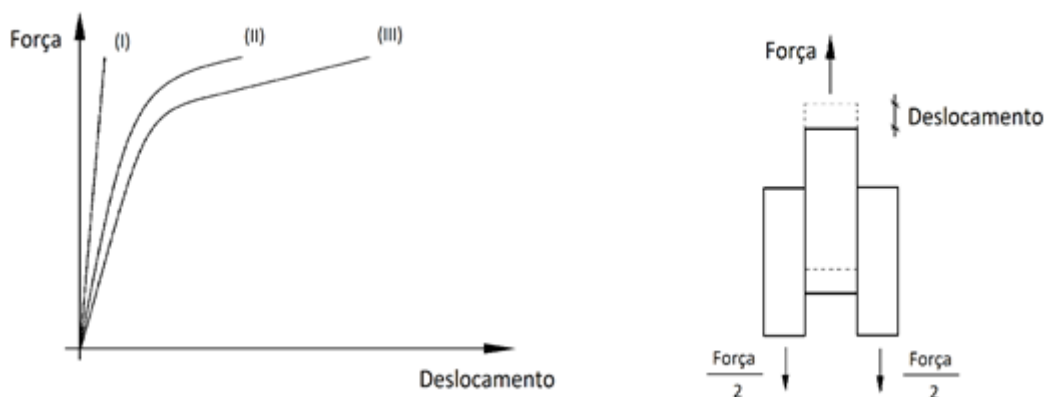


Figura 1 – Diagrama força por deslocamento para ligação: colada (I); com anel metálico (II); e com pino metálico (III).

Os estudos sobre ligações por conectores metálicos desenvolvido por Johansen (1949), assume o comportamento perfeitamente plástico tanto para a madeira quanto para o pino, o que não permite prever a rigidez e o deslocamento da ligação (GOÉS, 2002).

O modelo de cálculo para a resistência das ligações apresentado por Johansen (1949) considera mais de quatro possíveis modos de falha numa conexão, considerando dois parâmetros importantes para o desenvolvimento de seus modelos, que é a resistência ao embutimento do pino na madeira e a resistência ao escoamento do aço do conector.

O embutimento é um fenômeno que ocorre quando um carregamento é aplicado perpendicular ou eixo do conector, causando tensões na região de contato com a madeira provocando deformação. Essas deformações podem ocorrer paralela ou perpendicular as fibras da madeira dependendo da direção da força (BLAß; SCHÄDLE, 2011), a Figura 2 apresenta essas deformações.

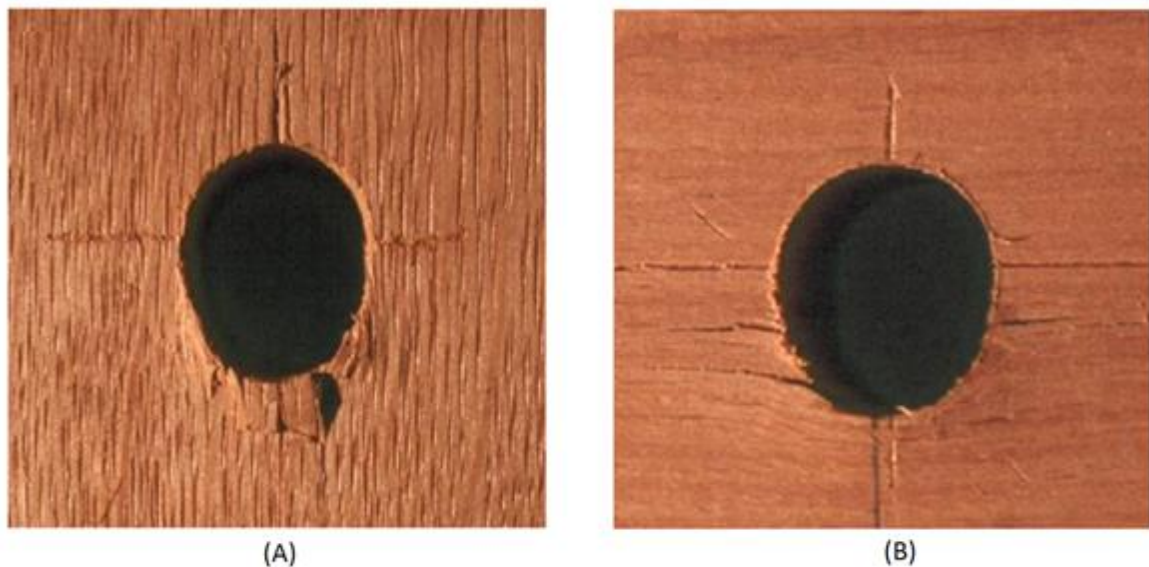


Figura 2 – A imagem (A) demonstra o embutimento na direção das fibras e em (B) o embutimento perpendicular a direção das fibras.

Fonte: Adaptado de Blaß e Schädle (2011)

4.2 MODELO DE JOHANSEN PARA RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES

A partir de relações entre as espessuras das peças, diâmetro do pino metálico, a resistência da madeira ao embutimento do pino e a resistência máxima do pino a flexão, Johansen (1949) desenvolveu equações para o cálculo da resistência de acordo dos modelos de falha.

A ruptura das ligações com pinos metálicos ocorre quando a resistência máxima ao embutimento na madeira é atingido na região de esmagamento da conexão e a flexão do pino atinge o escoamento, tornando a seção fletida em uma rótula plástica (PFEIL; PFEIL, 2003).

Na Figura 3 apresenta-se os modelos de falha em pinos com uma seção de corte:

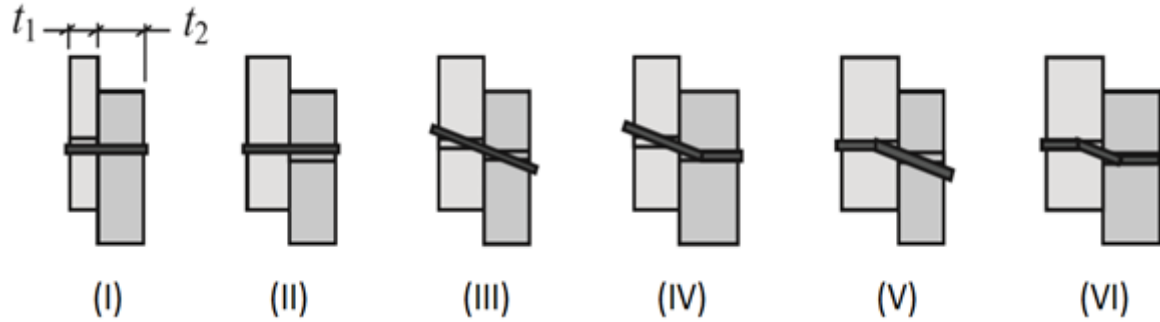


Figura 3 – Modelos de falha para uma seção de corte.

Fonte: Adaptado de Porteous; Kermani (2007)

Equações de Johansen conforme modelo de falha:

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

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

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

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

$$(V) \quad F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] \quad (5)$$

$$(VI) \quad F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} \quad (6)$$

$F_{v,Rk}$: Resistência característica da ligação.

$f_{h,1,k}$: Resistência característica de embutimento na madeira de espessura t_1 .

$f_{h,2,k}$: Resistência característica de embutimento na madeira de espessura t_2 .

d : Diâmetro do pino metálico.

β : Razão entre $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$.

$M_{y,Rk}$: Valor característico do momento gerado pela flexão do pino, onde:

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (7)$$

$f_{u,k}$: Resistência última do aço do parafuso à tração.

Na Figura 4 apresenta-se o comportamento das ligações com o pino metálico sujeito a duas seções de corte:

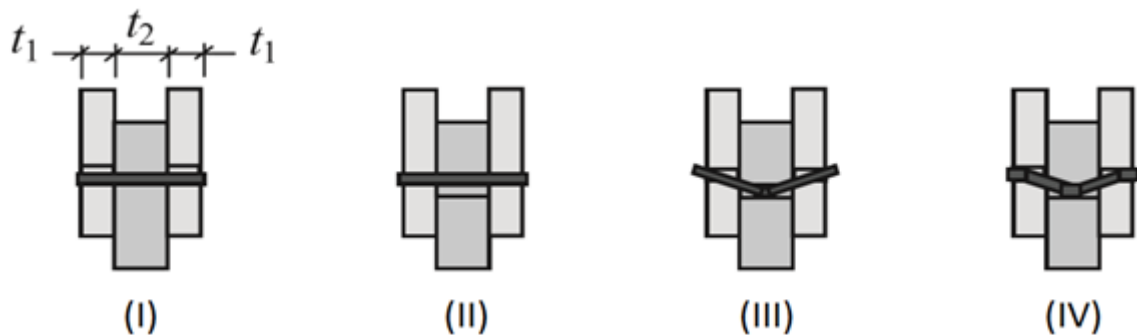


Figura 4 – Modelos de falha para duas seções de corte.

Fonte: Adaptado de Porteous; Kermani (2007)

Equações de Johansen conforme modelo de falha:

$$(I) \quad F_{v,Rk} = f_{h,1,k} t_1 d \quad (8)$$

$$(II) \quad F_{v,Rk} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (9)$$

$$(III) \quad F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] \quad (10)$$

$$(IV) \quad F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} \quad (11)$$

Fueyo, Domínguez e Cabezas (2010), por meio de ensaios e usando métodos de elementos finitos concluem que o modelo de Johansen (1949) apresenta variação nos modelos de falha de acordo com o diâmetro do conector. Comparando o comportamento de uma ligação em peças de madeira de grande espessura feita com pinos metálicos de 10mm e 30mm, notou-se que conforme diminui o diâmetro do pino, mais rótulas plásticas formam-se no conector.

A Figura 5 apresenta o comportamento da ligação com os diâmetros de 10mm e 30mm usando método dos elementos finitos. As regiões em vermelho são as de valores máximos de tensões normais no pino metálico e coincidem com as regiões onde ocorre as rótulas plásticas.

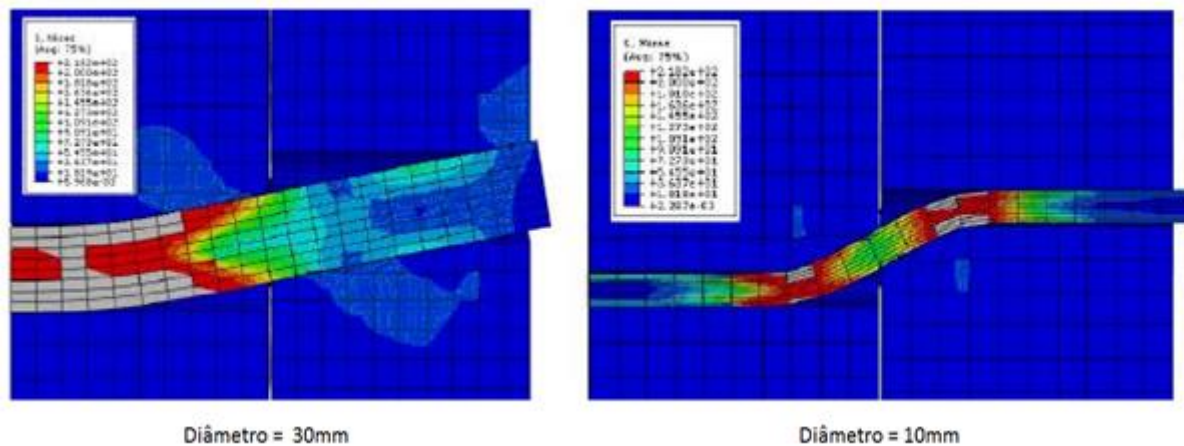


Figura 5 – Comportamento da ligação usando diâmetros de 30mm e 10mm.

Fonte: Adaptado de Fueyo e Domínguez (2010)

4.3 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES DE ACORDO COM A NBR 7190:1997

A resistência das ligações com pinos metálicos é adquirida a partir da soma da resistência individual de cada pino utilizado na conexão, respeitando a seção de corte. Em ligações com até oito pinos em linha, a resistência total da ligação pode ser considerada como a soma da resistência de cada pino. Os pinos adicionais aos oito contribuem com 2/3 da sua resistência.

De acordo com a NBR 7190:1997, as ligações com pinos metálicos estão sujeitas a dois tipos de falhas, embutimento na madeira ou flexão do pino. A norma define a seguinte equação para cálculo da resistência do pino metálico:

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (12)$$

t : Espessura da menor peça da ligação.

d : Diâmetro do pino metálico.

A resistência da ligação é limitada pelo tipo de falha que a ligação está sujeita, a equação a seguir estabelece o valor limite para β :

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (13)$$

f_{yd} : Resistência ao escoamento do pino metálico (valor de cálculo).

f_{ed} : Resistência de embutimento na madeira (valor de cálculo).

A norma apresenta uma relação entre β e β_{lim} :

- Para $\beta < \beta_{lim}$, ocorre embutimento na madeira com giro do pino metálico;
- Para $\beta > \beta_{lim}$, ocorre flexão do pino metálico.

As equações abaixo apresentam a resistência de um pino metálico equivalente a uma seção de corte:

- Para modo de falha por embutimento:

$$R_d = 0,40 \left(\frac{t^2}{\beta} \right) f_{ed} \quad (14)$$

- Para modo de falha por flexão do pino metálico:

$$R_d = 0,625 \left(\frac{d^2}{\beta_{lim}} \right) f_{yd} \quad (15)$$

f_{yd} : Resistência de cálculo da tensão de escoamento do aço do pino metálico.

4.4 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES DE ACORDO COM EUROCODE 5

O modelo de cálculo adotado pelo EUROCODE 5 baseia-se nas equações de Johansen, a diferença está nas equações cujo modelo de falhas ocorre a flexão do pino, pois essas ligações estão sujeitas a efeitos que não foram abordados por Johansen.

As ligações recebem acréscimo de resistência devido a dois tipos de efeito. O primeiro efeito acontece quando o coeficiente de atrito μ entre as peças conectadas sofre acréscimo de resistência com carregamento. O segundo pela resistência ao arrancamento (*withdrawal capacity*) do conector durante o carregamento, denominado efeito de corda (PORTEOUS; KERMANI, 2007).

No momento do carregamento, forças de confinamento aumentam a resistência da conexão, ocorrem forças axiais ao eixo do conector, fazendo com que as peças se mantenham mais unidas, aumentando o atrito entre as peças conectadas.

As forças axiais no conector (N_d) gera duas componentes, uma vertical ($N_d \sin \theta$) e outra horizontal ($N_d \cos \theta$). A componente horizontal aumenta o coeficiente de atrito μ entre as peças e a parcela vertical representa a resistência à remoção do conector (PORTEOUS; KERMANI, 2007). A figura 6 representa uma ligação com flexão de um conector:

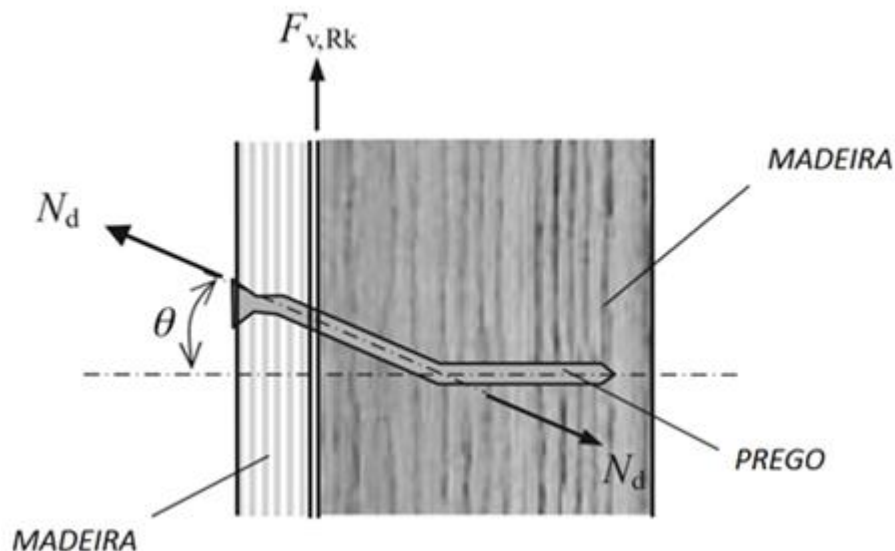


Figura 6 – Ligação pregada com o conector fletido em uma seção.

Fonte: Adaptado de Porteous e Kermani (2007)

Somando as componentes de N_d ao modelo de Johansen, temos:

$$F_{v,Rk} = N_d (\sin \theta + \mu \cos \theta) + (\text{Equação de Johansen})$$

O EUROCODE 5 propõe algumas simplificações, a componente $N_d \sin \theta$ é substituída pela parcela $F_{ax,Rk} / 4$, denominado efeito de corda, $F_{ax,Rk}$ é a resistência característica de remoção do conector (withdrawal capacity).

A norma estabelece alguns valores limite para o efeito de corda:

• Pregos redondos (Round nails)	15%
• Pregos quadrados (Square nails)	25%
• Outros pregos (Other nails)	50%
• Parafuso auto-atarraxante (Screws)	100%
• Parafuso com porca e arruela (Bolts)	25%
• Pinos (Dowels)	0%

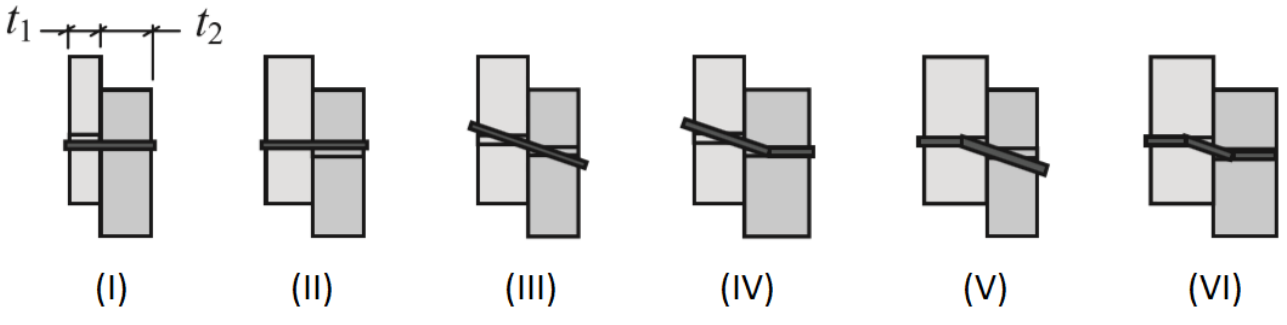
A componente $N_d \mu \cos \theta$ torna se um coeficiente que multiplica a equação de Johansen (1949). A norma europeia adota coeficiente de atrito igual a 1,05 nos modelos de falha que o conector tem uma seção fletida e 1,15 nos modelos que o conector tem duas seções fletida (PORTEOUS; KERMANI, 2007).

A norma europeia apresenta a resistência característica da ligação na seguinte configuração:

$$F_{v,Rk} = (\text{Coeficiente de atrito}) \times (\text{Equação de Johansen}) + (\text{Efeito de corda})$$

4.5 EQUACIONAMENTO CONFORME O EUROCODE 5

4.5.1 Equacionamento para uma seção de corte

	
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.
(I)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$ (16)
(II)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$ (17)
(III)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (18)
(IV)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (19)
(V)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (20)
(VI)	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (21)

$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.

Quadro 1 - Equações e modos de falha para uma seção de corte

4.5.2 Equacionamento para duas seções de corte

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.	
(I)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	(22)
(II)	$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	(23)
(III)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,d}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(24)
(IV)	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(25)
$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos quadro modelos de falha.		

Quadro 2 - Equações e modos de falha para duas seções de corte

5 MATERIAIS E MÉTODO

Com a finalidade de quantificar a influência dos efeitos de segunda ordem nas ligações, foram desenvolvidos dois modelos de corpo de prova com duas espécies de madeira, uma folhosa e outra conífera, ambos respeitando especificações da NBR 7190 (1997) - Anexo C. O primeiro modelo (modelo 1) apresenta as peças de madeira unidas por um pino metálico (parafuso passante sem porca e arruela) e no segundo modelo (modelo 2) foram utilizados parafusos rosqueados com porca e arruela para fixar as peças, o que propicia o efeito de corda (figuras 7 e 8). Os dois modelos de corpos de prova foram confeccionados com madeiras da espécie Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*).



(a)



(b)

Figura 7 – Corpo de prova do modelo 1, (a) espécie Garapeira, (b) espécie Caixeta.



(a)



(b)

Figura 8 – Corpo de prova do modelo 2, (a) espécie Garapeira, (b) espécie Caixeta.

Ambas espécies utilizadas são de um mesmo lote, foram realizados ensaios de compressão paralela as fibras, definida na NBR 7190 (1997) – Anexo B, e ensaios para caracterização da força de embutimento conforme as exigências da norma europeia EN 383 (2007). Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC DL30000, do Laboratório de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal – campus Campo Mourão, aplicando-se carregamento monotônico e crescente, com uma taxa de 10 MPa/min, até atingir a força máxima de ruptura do corpo de prova.

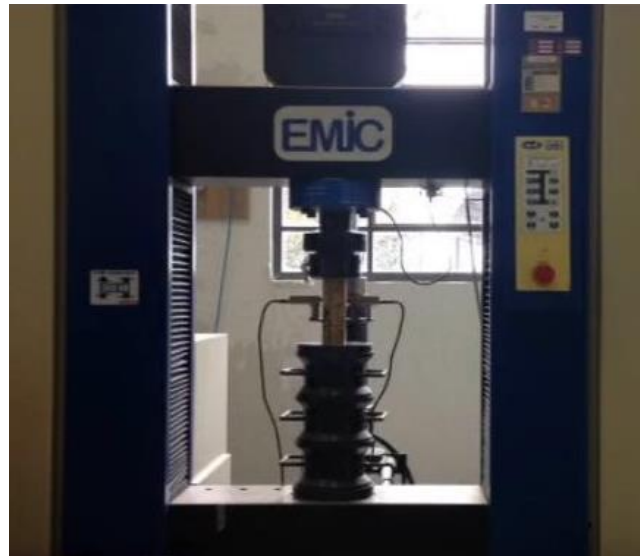


Figura 9 – Máquina universal de ensaios EMIC DL30000.

Foram confeccionados cinco corpos de prova do modelo 1 e seis corpos de prova do modelo 2 com as duas espécies, totalizando vinte e dois corpos de prova. Todos os corpos de prova apresentam as mesmas dimensões das peças e o mesmo diâmetro dos conectores. A Figura 10 apresenta o espaçamento entre os conectores.

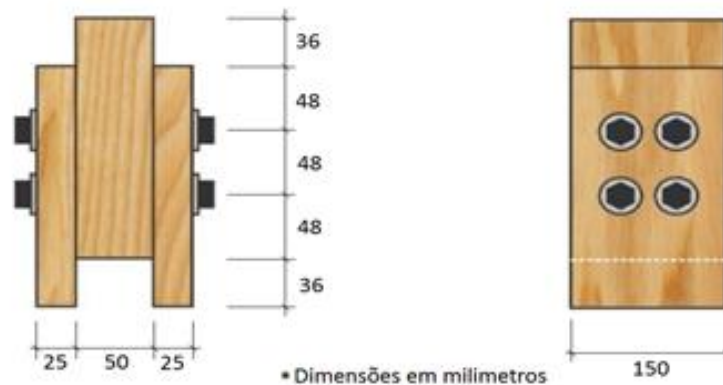


Figura 10 – Dimensões do corpo de prova.

Fonte: Adaptado Junior e Goés (2015)

Foram utilizados parafusos sextavados de rosca parcial com diâmetro de 12 mm (M12) produzidos em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8 especificado segundo a norma ISO 4016 (2000) e arruelas com diâmetro interno igual a 13,5 mm e diâmetro externo igual a 44,0 mm, atendendo as exigências da norma DIN 440R (2001).

Os ensaios foram realizados com a máquina universal de ensaios EMIC DL30000. Para as leituras das medidas de deslocamentos relativos, foram utilizados relógios comparadores com sensibilidade de 0,01 mm, montados em dispositivos, constituídos de cantoneira metálica, colocados nas duas faces laterais dos corpos de prova. As Figura 11 e 12 exibem os ensaios nos corpos de prova do modelo 1.



Figura 11 – Execução do ensaio no corpo de prova do modelo 1 da espécie Garapeira.



Figura 12 – Execução do ensaio no corpo de prova do modelo 1 da espécie Caixeta.

Os ensaios para determinação da resistência da ligação seguem os critérios da norma EN 26891 (1991) “*Timber Structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for determination of strength and deformation*”. 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} , mantendo-os por mais 30 segundos. Sucede-se então a outro carregamento, ainda com o mesmo incremento, até aos 70 % de F_{est} , as leituras dos deslocamentos são realizadas até esse momento do ensaio. Acima deste valor, o incremento deve ser tal que a ruptura seja alcançada ao fim de 3 a 5 minutos. A Figura 13 apresenta o diagrama de carregamento adotado no ensaio.

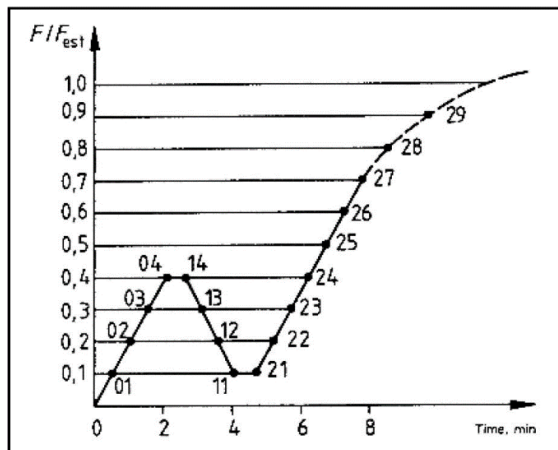


Figura 13 - Procedimento de carga.

Fonte: EN 26891 (1991)

Os dados obtidos nos ensaios permitiram a obtenção de diagramas equivalentes ao da Figura 14.

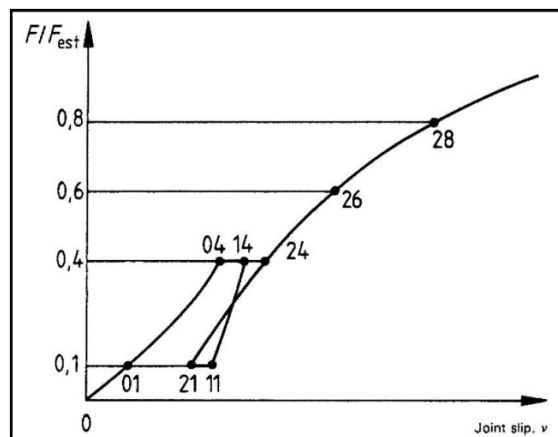


Figura 14 - Diagrama idealizado força-deslocamento

Fonte: EN 26891 (1991)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

Para facilitar a visualização dos dados obtidos com os ensaios de caracterização dos materiais, foram elaboradas as seguintes tabelas que apresentam os valores médios, número de corpos de prova utilizados e coeficiente de variação. As Tabela 1, 2 e 3 apresentam os dados da Garapeira, da Caixeta e do parafuso respectivamente.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização da Garapeira.

Propriedade	Valor obtido	Número de CP	Coeficiente de variação
U	13,51%	8	1,82%
$\rho_{12\%}$	$7,4 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$	8	1,39%
$f_{c0,m}$	57,8 Mpa	6	12,70%
$f_{e0,m}$	90,6 Mpa	7	9,80%

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização da Caixeta.

Propriedade	Valor obtido	Número de CP	Coeficiente de variação
U	13,51%	8	2,47%
$\rho_{12\%}$	$4,1 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$	8	2,57%
$f_{c0,m}$	29,2 Mpa	6	3,90%
$f_{e0,m}$	28,4 Mpa	8	6,60%

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização do parafuso.

Propriedade	Valor obtido	Número de CP	Coeficiente de variação
$f_{u,m}$	872,5 Mpa	3	1,20%

U: Teor de umidade;

$\rho_{12\%}$: Densidade aparente da madeira a 12% de teor de umidade;

$f_{c0,m}$: Valor médio de resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{e0,m}$: Valor médio de resistência ao embutimento paralela às fibras;

$f_{u,m}$: Valor médio de resistência última a tração do aço.

6.2 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA POR MODELOS TEÓRICOS

Os cálculos realizados seguindo o modelo da norma brasileira apresentam o mesmo valor de resistência para o modelo 1 e 2, ambos com $\beta < \beta_{lim}$, indicando falha na ligação por embutimento na madeira para as duas espécies utilizadas. A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados.

Nos modelos propostos pela norma europeia, no caso da Garapeira, a equação que apresentou o menor resultado de resistência foi o modo de falha (III) para duas seções de corte, onde o pino metálico sofre uma rótula plástica, para a Caixeta, o menor resultado foi nos modos de falha I e II, onde acontece o embutimento na madeira.

No caso do modelo 2, a equação recebe o acréscimo de 25% na resistência em virtude do efeito de corda, já no modelo 1 não há o efeito de corda. Os resultados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência teórica da ligação de acordo com a NBR 7190 e EUROCODE 5.

NBR 7190		EUROCODE 5	
Garapeira	Caixeta	Garapeira	Caixeta
86,96 kN	27,24 kN	124,08 kN ^(a)	63,18 kN ^(a)
		153,53 kN ^(b)	78,22 kN ^(b)

(a) Resistência sem o efeito de corda (modelo 1)

(b) Resistência considerando o efeito de corda (modelo2)

6.3 RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES

As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores encontrado com os ensaios feitos nos corpos de prova do modelo 1 e 2 respectivamente.

Tabela 5 – Resistencia dos corpos de prova do modelo 1.

Corpo de Prova	Resistência	
	Garapeira	Caixeta
CP1	133,4 kN	73,1 kN
CP2	136,5 kN	70,5 kN
CP3	135,3 kN	69,8 kN
CP4	139,2 kN	67,6 kN
CP5	137,9 kN	69,5 kN

Tabela 6 – Resistência dos corpos de prova do modelo 2.

Corpo de Prova	Resistência	
	Garapeira	Caixeta
CP1	168,0 kN	113,5 kN
CP2	179,7 kN	104,7 kN
CP3	189,6 kN	109,5 kN
CP4	169,8 kN	107,4 kN
CP5	172,1 kN	107,5 kN
CP6	187,3 kN	108,1 kN

A Tabela 7 apresenta a média dos resultados adquirido experimentalmente e o coeficiente de variação para os dois modelos em estudo.

Tabela 7 – Resistência média dos ensaios e coeficiente de variação.

Modelo	Resistência Média		Coeficiente de Variação	
	Garapeira	Caixeta	Garapeira	Caixeta
1	136,45 kN	70,1 kN	1,48%	2,54%
2 ^(a)	177,75 kN	108,45 kN	4,74%	2,46%

(a) Resultados obtidos de Junior e Góes (2015)

Os modelos de cálculos apresentados pela norma brasileira e europeia geram valores distintos. O resultado das simulações de cálculo com o modelo de cálculo da norma brasileira leva a um valor 56,8% menor comparado ao da norma europeia, já no modelo 2 a diferença chega a 65,17%, isso para os valores gerados com simulações de cálculo usando a Caixeta.

Um dos motivos que leva a essa diferença é a norma brasileira não apresentar ganho de resistência em virtude do tipo do conector. Podemos perceber com os ensaios que o confinamento provocado pelo material utilizado como conector aumenta a resistência da ligação, no caso em estudo, o acréscimo de resistência na ligação feita com porca e arruela foi de 23,23% à 35,36% maior em relação a ligação feita com parafuso livre.

O acréscimo de resistência que a norma europeia indica para ligações parafusadas é similar a resistência adicional que o modelo 2 adquiriu em relação ao modelo 1. O EUROCODE 5 sugere o acréscimo de 25% de resistência em ligações parafusadas e os valores de ensaio apontam um valor médio de 29,3% de acréscimo de resistência.

A previsão de resistência usando a norma europeia para os corpos de prova de Caixeta do modelo 1 foi 9,87% menor que a resistência obtida com os ensaios, enquanto a norma brasileira aponta um valor 61,14% menor.

Para facilitar a interpretação dos dados, o Gráfico 1 apresenta os valores obtidos com ensaios e estimativas feitas pelas normas.

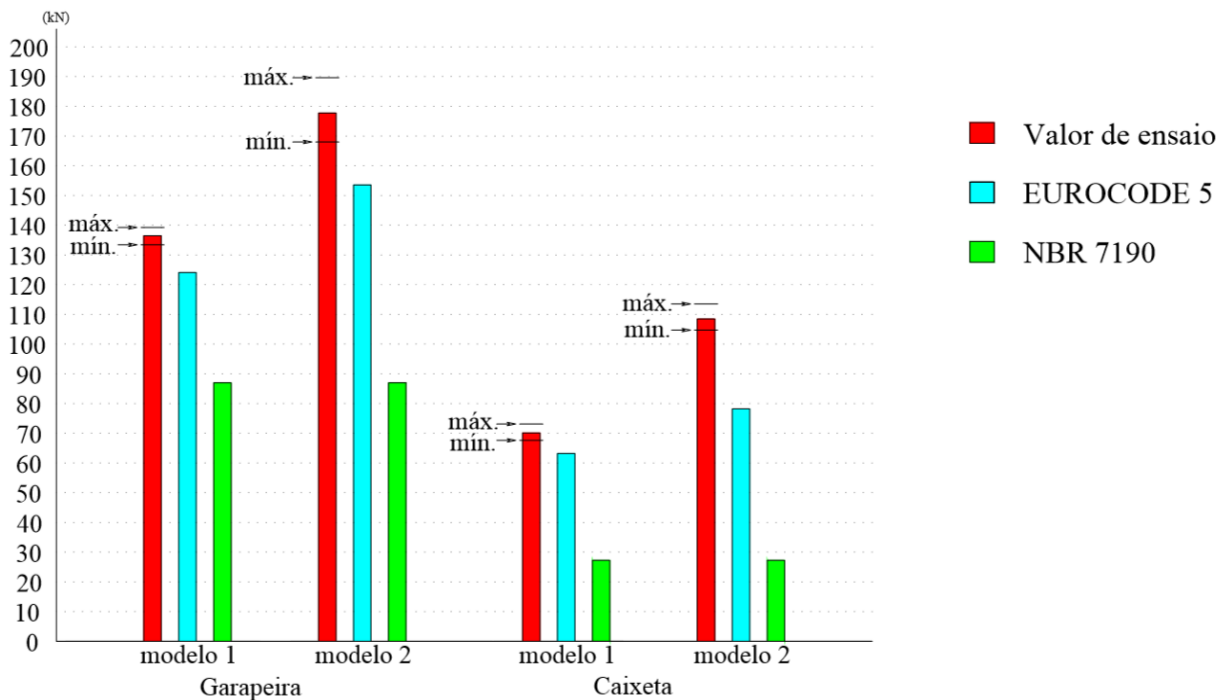


Figura 15 – Comparação de resistências das ligações.

O comportamento da ligação durante os ensaios levou a uma ruptura como prevista pelos modelos de cálculo de Johansen (1949). Para os corpos de prova de Garapeira o modo de falha foi o III, onde ocorre a flexão no pino metálico e embutimento na madeira, já nos corpos de prova de Caixeta, a ruptura se deu pelo embutimento na madeira sem a deformação do pino. As figuras 16 e 17 exibem um corte do corpo de prova, mostrando as deformações que levaram a ruptura.



(a)



(b)

Figura 16 – Modo de ruptura do corpo de prova do modelo 1, (a) espécie Garapeira, (b) espécie Caixeta.



(a)



(b)

Figura 17 – Modo de ruptura do corpo de prova do modelo 2, (a) espécie Garapeira, (b) espécie Caixeta.

7 CONCLUSÃO

Os modelos apresentados pela norma europeia levam a valores próximos dos reais, com uma diferença média de 9,5% para o modelo 1 e 20,7% para o modelo 2. O valor do acréscimo de resistência em virtude da porca e arruela atinge valores semelhantes com o sugerido pela norma europeia, com uma diferença de 14,6%.

A NBR 7190:1997, em virtude de simplificações, apresenta estimativa de resistência inferior ao EUROCODE 5, embora fundada a partir do mesmo princípio da norma europeia. A norma brasileira leva a um superdimensionamento estrutural, ignorando até 74,8% da resistência real da ligação, gerando desperdício de material.

A espécie da madeira também é um fator que interfere nos valores de cálculo quando comparado aos valores de ensaio. Para Garapeira o acréscimo de carga em virtude da arruela e porca é similar ao 25% sugerido pela norma, enquanto para Caixeta o acréscimo chega a 35%.

Os efeitos secundários agregam resistência significativa as ligações, porém a quantificação das parcelas de efeito de corda e atrito lateral são muito complexas de serem analisadas. As dimensões das arruelas, esbeltes do conector, quantidade e posição dos conectores são exemplo de fatores não abordados pelos modelos em estudo e que podem alterar a resistência de uma ligação.

Nesse trabalho foi avaliado a resistência de uma ligação utilizando duas espécies de madeira, uma folhosa e outra conífera, portanto não é possível concluir se os modelos apresentados pelas normas têm comportamento similar para as demais espécies de madeira ou outros tipos de ligações.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira.** São Paulo, 1987, 174p. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto Estruturas de Madeiras.** Rio de Janeiro: 1997.

_____. **NBR ISO 6892** – Materiais Metálicos - Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

BLAß, Hans J.; SCHÄDLE, Patrick. **Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints.** ELSEVIER – Engineering Structures, v. 33, mar. 2011.

DEBARBOUILLE, Q. **Consequences of using Eurocode 5 for design of steel-timber connections.** 2011. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil (Course 4BY05E). Linnaeus University, Växjö, 2006.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. **DIN 440 – Washers – With square hole, especially for timber construction.** Berlin, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN383: Timber Structures. Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners.** European Standard, Brussels, 1993.

_____. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures.** Brussels, 2008.

FUEYO, José G.; DOMÍNGUEZ, Manuel; CABEZAS José A. **Rendimiento de Uniones Clavija de Tipo Perno Encolado usando Elementos Finitos.** SciELO, v. 22, nov. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000400013&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 01 set. 2015.

GOÉS, Jorge L. N. de. **Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I**. 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia das Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4016 – Product grade C**. Brussels, 2000.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for Bridge and Structural Engineering. Zurich. Vol. 9. 1949.

JUNIOR, Josué da Silva; GOÉS, Jorge L. N. de. **Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes**. EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba - PR, maio 2015.

MENDES, Paulo M. F. de Castro. **Ligações em estruturas de madeira tecnologia e dimensionamento de acordo com o eurocódigo 5**. Dissertação (Mestrado em Construções de Edifícios) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11777>>. Acesso em: 02 set. 2015, 10:30.

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

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy. **STRUCTURAL TIMBER DESIGN to Eurocode 5**. UK: Blackwell Publishing company, 2007.

STAMATO, Guilherme Corrêa. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. 2002. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002.