

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

BRUNA BERNARDI MAIA

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS EM MADEIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2016

BRUNA BERNARDI MAIA

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS EM MADEIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2016



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

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES PREGADAS EM MADEIRA

por

Bruna Bernardi Maia

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h00min do dia 13 de Junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Me. Jeferson Rafael Bueno

(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 Luiz e Sandra, e a minha irmã Gabriela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças e perseverança nesta caminhada, por nunca me desamparar, por sempre estar me guiando e iluminando meu caminho. Sem Ele nada disso seria possível!

Agradeço aos meus pais, Luiz e Sandra, e a minha irmã, Gabriela, por todo o incentivo e apoio, por cada palavra de força, por cada abraço nos momentos difíceis, e por comemorarem comigo cada conquista. Obrigada por estarem ao meu lado, por me amarem tanto e se dedicarem tanto por mim! Vocês são meu maior exemplo e inspiração!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes, por todos os ensinamentos, pela paciência e disponibilidade para me orientar. Sem seu auxílio este trabalho não existiria.

A Dionisio Palharini Junior, que acompanhou de perto esta etapa de minha vida, agradeço pela paciência ao me ouvir, pelos conselhos e ensinamentos dados, pelas broncas quando foram necessárias, por estar sempre ao meu lado, torcer por mim e me inspirar todos os dias a querer ser uma pessoa melhor! Obrigada por ser parte da minha vida! Sem você eu não teria conseguido!

Aos meus amigos, Halana, Daniel, Sheila, Déborah, Ana Raíza e Taciane, pela companhia, pelos dias de estudos árduos, pelas dúvidas tiradas, pelo conhecimento compartilhado, e pelas boas risadas juntos!

A minha amiga Carol, que mesmo de longe se faz presente. Obrigada pelos anos de amizade, por sempre me animar e mostrar o lado bom das coisas. Obrigada por torcer por mim!

A Pórticos Empresa Junior de Engenharia Civil, a todos os membros que fizeram e ainda fazem parte desta equipe. Minha passagem pela empresa contribuiu muito para o meu crescimento pessoal e profissional. Obrigada a todos pelo aprendizado, e pelas crises de riso!

Ao técnico do laboratório de estruturas, Maiko Cristian Sedoski, por sua ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

MAIA, Bruna B. **Resistência de ligações pregadas em madeira**. 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

As ligações são consideradas ponto crítico das estruturas, por isso requerem a devida atenção, a fim de oferecerem segurança e durabilidade. A ligação por pinos metálicos, que podem ser pregos ou parafusos, é a mais utilizada em estruturas de madeira no Brasil, devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação. O método de dimensionamento desse tipo de ligação proposto tanto pela NBR 7190/97 quanto pelo EUROCODE 5/04 advém da Teoria de Johansen, porém a norma brasileira é simplificada quando comparada com a norma europeia. Assim sendo, este estudo busca analisar experimentalmente a resistência de ligações com pregos em madeira, e comparar com os resultados teóricos segundo a norma brasileira e a norma europeia. Foram realizados ensaios experimentais com madeira da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira), e pregos lisos do modelo padrão comercial 20 x 30. Analisando os resultados obtidos foi possível observar que o resultado teórico apresentado pelo método de cálculo proposto pelo EUROCODE 5/04 considerando o efeito de corda foi o que mais se aproximou do resultado experimental.

Palavras-chave: Ligações em madeira. Resistência. Pregos. Teoria de Johansen.

ABSTRACT

MAIA, Bruna B. **Strength of nailed timber joints**. 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

The joints are considered the critical factor of the structure, so require due attention in order to provide safety and durability. Timber joints with dowel fasteners, which can be nails or screws, are commonly used in timber frame construction in Brazil, due to the low cost and easy application. The design of this type of timber joint proposed by both the NBR 7190/97 and by EUROCODE 5/04 comes from Johansen's theory, but the Brazilian code is restricted when compared to the European code. Therefore, this study aims to analyze experimentally the strength of timber joints with nails, and compare with the theoretical results according to Brazilian code and the European code. The experimental program was conducted with wood species *Apuleia Leiocarpa* (Grapeira), and smooth nails the standard business model 20 x 30. Analyzing the results, it was observed that the theoretical results according to EUROCODE 5/04 considering the rope effect was the closest to the experimental result.

Keywords: Timber joints. Strength. Nails. Johansen's theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ligações por entalhe; (a) empena de treliça de cobertura. (b) empena de treliça de cobertura com encaixe.....	16
Figura 2 - Estrutura com ligações coladas em madeira	17
Figura 3 - Ligações com cavilhas	18
Figura 4 - Ligações com anéis metálicos	19
Figura 5 - Ligação com chapa de dente estampado	19
Figura 6 - Variações dos tipos de cabeça, fustes, roscas e pontas de parafusos auto-atarraxantes.	21
Figura 7 - Tipos de pregos	21
Figura 8 - (a) Hipótese de comportamento para o pino metálico. (b) Hipótese de comportamento para o material que compõe as peças a serem ligadas	22
Figura 9 - Ligações com tração normal às fibras.....	26
Figura 10 - Espaçamento em ligações com pinos.....	28
Figura 11 - Pinos metálicos em corte simples	29
Figura 12 - Pinos metálicos em corte duplo	29
Figura 13 - Força inclinada transmitida para uma ligação.....	31
Figura 14 - Definições de t_1 e t_2 (a) ligação em corte simples, (b) ligação em corte duplo	35
Figura 15 - (a) prego perpendicular às fibras e (b) pregos inclinados	37
Figura 16 - Definição do espaçamento e distância para ligações	39
Figura 17 - Linha de pregos paralelamente às fibras	40
Figura 18 - Modos de falha dos corpos de prova de compressão.....	48
Figura 19 - Corpo de prova de embutimento.....	49
Figura 20 - Corpo de prova de embutimento.....	50
Figura 21 - Corpo de prova para ensaio de embutimento	50
Figura 22 - Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento	51
Figura 23 - Modo de falha dos corpos de prova de embutimento	52
Figura 24 - Modos de ruptura dos pregos	52
Figura 25 - Dimensões dos corpos de prova.....	53
Figura 26 - Distribuição dos pregos.....	54
Figura 27 - Faces opostas dos corpos de prova de ligação	54
Figura 28 - Procedimento de carga	55

Figura 29 - Ensaio de resistência da ligação.....	56
Figura 30 - Modos de falha dos corpos de prova da ligação pregada em madeira ...	56
Figura 31 - Modo de falha do ensaio experimental	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelos de falha e equações de Möller-Johansen para uma seção de corte	24
Quadro 2 - Modelos de falha e equações de Möller-Johansen para duas seções de corte.	25
Quadro 3 - Modelos de falha e equações do EUROCODE 5/04 para uma seção de corte	33
Quadro 4 - Modelos de falha e equações do EUROCODE 5/04 para duas seções de corte	34
Quadro 5 - Espaçamentos e distâncias mínimos	38
Quadro 6 - Valores de K_{ef}	39
Quadro 7 - Dimensões dos corpos de prova	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da comparação entre modelos de cálculo.....	45
Tabela 2 - Resultados dos ensaios para determinação do teor de umidade e densidade aparente	57
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira	57
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de resistência ao embutimento da madeira.....	58
Tabela 5 - Comparação entre resistências ao embutimento	58
Tabela 6 - Resultados das propriedades da madeira.....	59
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração no prego	59
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de resistência da ligação pregada em madeira .	60
Tabela 9 - Resultados dos modelos analíticos, experimental médio e diferenças percentuais.....	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA	15
4.1.1 Ligações por entalhe	15
4.1.2 Ligações coladas	16
4.1.3 Ligações mecânicas	17
4.1.3.1 Ligações por cavilha	17
4.1.3.1 Ligações por conectores	18
4.1.3.2 Ligações por pinos metálicos	20
4.2 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS	22
4.2.1 Comportamento mecânico das ligações - Teoria de Johansen	22
4.2.2 NBR 7190/97	26
4.2.3 EUROCODE 5/04	30
4.3 DISCUSSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
5 METODOLOGIA	46
5.1 Materiais	46
5.2 Procedimentos	47
5.2.1 Determinação da densidade e umidade	47
5.2.2 Determinação da resistência a compressão paralela às fibras	48
5.2.3 Determinação da resistência ao embutimento	48
5.2.4 Determinação da resistência última de tração do prego	52

5.2.5	Preparação dos corpos de prova de ligação	53
5.2.6	Ensaio de resistência da ligação	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
6.1	Caracterização dos materiais	57
6.2	Resistência da ligação pregada em madeira.....	59
7	CONCLUSÕES	64
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICE A – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PREGO EM MADEIRA SEGUNDO OS MODELOS PROPOSTOS PELA NBR 7190/97 E PELO EUROCODE 5/04;	67

1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira como elemento estrutural tende a aumentar nas próximas décadas, em virtude de ser uma solução promissora frente à necessidade de construções sustentáveis, que causem menores impactos ambientais. Além de ser um material que possui ótimas propriedades mecânicas, a madeira tem ganhado notoriedade por sua agradável estética em termos arquitetônicos.

Em países do hemisfério norte, seu uso como elemento estrutural é mais frequente, devido ao maior nível de conhecimento técnico e de inovações tecnológicas na área. Com a difusão da utilização da madeira no Brasil, há a necessidade de estudos científicos para aprimorar seu uso.

O uso de ligações em sistemas estruturais é indispensável, ora por ser uma estrutura reticulada, ora para fazer união entre as peças de madeira para a adequação às dimensões de projeto. As ligações são consideradas pontos críticos das estruturas de madeira, visto que o desempenho global da estrutura está relacionado com o comportamento de suas ligações. Portanto, é necessário que seja dada a devida atenção ao dimensionamento das ligações a fim de oferecerem resistência, durabilidade e segurança à estrutura.

Existem diversos tipos de ligações para estruturas de madeira, porém as mais utilizadas no Brasil são as ligações por pinos metálicos, que podem ser pregos ou parafusos, devido ao baixo custo e facilidade de aplicação.

Para dimensionamento deste tipo de ligação, os documentos normativos, nacional e europeu, se baseiam na Teoria de Johansen. Apesar de possuírem o mesmo embasamento teórico, a norma brasileira, NBR 7190/97, é simplificada e restrita a algumas configurações específicas de peças, além disso, não leva em consideração alguns efeitos não lineares, que possuem influência direta na resistência final da ligação. Já a norma europeia, EUROCODE 5/04, é mais abrangente e considera outros fenômenos físicos presentes na ligação.

Diante do exposto, um estudo comparativo entre a norma brasileira e a norma europeia é fundamental para analisar qual o modelo de cálculo mais adequado para dimensionamento de ligações pregadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a resistência de ligações com pregos em madeira, comparando modelos teóricos de documentos normativos nacionais e internacionais com resultados obtidos através de ensaios experimentais.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a madeira e o aço utilizados na pesquisa, em atendimento a normas nacionais e internacionais vigentes;
- Determinar a resistência de ligações com prego em madeira por meio de ensaios experimentais;
- Determinar a resistência de ligações com prego em madeira segundo os modelos analíticos propostos pela NBR 7190/97 e pelo EUROCODE 5/04;
- Comparar os resultados teóricos com os resultados experimentais obtidos.

3 JUSTIFICATIVA

As ligações em estruturas de madeira são consideradas pontos críticos da estrutura, necessitando assim que seja dada devida importância ao seu dimensionamento.

A NBR 7190/97 apresenta um método de dimensionamento das ligações por pinos metálicos simplificado, porém restrito, quando comparado com normas internacionais, tendo em vista que permite apenas o dimensionamento de ligações entre peças de madeira com mesma resistência ao embutimento, mesma direção das fibras entre os elementos, além de indicar as mesmas equações, tanto para corte simples quanto para corte duplo. Ainda pode se destacar que a mesma não apresenta método de cálculo de rigidez das ligações.

Tendo em vista que as ligações por pinos metálicos estão entre as mais utilizadas no Brasil e que a norma brasileira está atualmente em fase de revisão, é oportuno um estudo comparativo entre os modelos analíticos de documentos normativos, nacionais e internacionais, comparando com resultados de ensaios experimentais, a fim de avaliar qual modelo de cálculo mais apropriado.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA

A utilização da madeira como elemento estrutural tem aumentado ao longo do tempo, em virtude de apresentar ótimas propriedades mecânicas e tende a aumentar cada vez mais, por ser uma solução promissora frente à necessidade de construções sustentáveis como forma de minimizar a degradação ambiental gerada pela indústria da construção civil. Nas estruturas de modo geral, inclusive nas de madeira, é comum a execução de estruturas reticuladas, que exigem ligações entre os membros componentes.

De acordo com Porteous e Kermani (2007), a ligação é geralmente o ponto crítico na concepção da estrutura, uma vez que o número e as características físicas dos conectores escolhidos influenciam diretamente na determinação das dimensões das peças de madeira. A resistência da estrutura geralmente é determinada pela resistência da ligação, e a rigidez da mesma irá influenciar diretamente nos deslocamentos.

As maneiras diferentes de ligações existentes podem ser classificadas em relação a diversos aspectos. Silva (2009) as classifica em relação ao fator temporal, como ligações clássicas e modernas, ou quanto ao tipo de tecnologia empregue, podendo ser ligações por entalhe, ligações coladas e ligações mecânicas.

4.1.1 Ligações por entalhe

As ligações por entalhe consistem em cortes nas peças de madeira a serem ligadas através de encaixe entre os elementos. Segundo Branco, Cruz e Piazza (2006), nesse tipo de ligação os esforços são transmitidos por compressão e/ou atrito, e normalmente são adicionados elementos metálicos como forma de melhorar o contato entre os elementos como também garantir a estabilidade das estruturas frente

à inversão de esforços. Os elementos metálicos não são levados em consideração no cálculo da capacidade de carga desta ligação.

Os entalhes devem ser executados com precisão, para que haja o contato entre as peças antes do carregamento, pois caso exista folgas, a estrutura se deformará até que as faces se apoiem efetivamente (Pfeil e Pfeil, 2003). Esse tipo de ligação é comum em treliças de cobertura, comumente utilizadas no Brasil. A figura 1 mostra um exemplo desse tipo de ligação.



Figura 1 - Ligações por entalhe; (a) empena de treliça de cobertura. (b) empena de treliça de cobertura com encaixe.

Fonte: Dashöfer Holding (2016)

4.1.2 Ligações coladas

As ligações coladas são aquelas que utilizam compostos químicos para obter aderência. São utilizadas na produção de madeira laminada colada (MLC), compensados de madeira, e também em ligações com barras de aço coladas em madeira.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), esse tipo de ligação é pouco utilizada em campo, pois a colagem exige controle rigoroso da dosagem do adesivo, da umidade da madeira, da temperatura e da pressão.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) restringe o uso dessas ligações para juntas longitudinais da MLC, e a resistência da junta colada deve ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira.

A figura 2 mostra um exemplo de estrutura com ligações coladas.



Figura 2 – Estrutura com ligações coladas em madeira
Fonte: Stamford Stone (2016)

4.1.3 Ligações mecânicas

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) as ligações mecânicas nas peças de madeira podem ser feitas através de cavilhas, conectores ou pinos metálicos. As cavilhas são pinos de madeira torneados, os conectores podem ser constituídos por anéis metálicos ou por chapas metálicas com dentes estampados e os pinos metálicos podem ser pregos ou parafusos.

4.1.3.1 Ligações por cavilha

As cavilhas são pinos cilíndricos de madeira dura, que são introduzidos por cravação em furos sem folga nas peças de madeira (Pfeil e Pfeil, 2003). Segundo Calil Júnior, Lahr e Dias (2003) a transferência de esforços deste tipo de ligação é semelhante aos pinos metálicos, e se apresentam como uma opção alternativa a estes para utilização em ambientes agressivos.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) determina que as cavilhas devem ser torneadas e feitas com madeiras densas da classe C60, ou com madeiras pouco densas de $\rho_{\text{aparente}} \leq 600 \text{ kg/m}^3$ impregnadas com resinas que aumentem sua resistência. Para utilização em sistemas estruturais, restringe o uso dos diâmetros de

16 mm, 18 mm e 20 mm, devendo-se realizar pré-furação com diâmetro “ d_0 ” igual ao diâmetro “ d ” da cavilha. A figura 3 é um exemplo de ligação tipo cavilha.



Figura 3 - Ligações com cavilhas
Fonte: Wood craft (2016)

4.1.3.1 Ligações por conectores

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) considera como ligações com conectores aquelas feitas com anéis metálicos ou com chapas com dentes estampados.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), os conectores de anel são peças metálicas posicionadas na interface da madeira através de entalhes e mantidas na posição através de parafusos. A norma brasileira reconhece o emprego de anéis metálicos estruturais apenas com diâmetros internos de 64 mm e 102 mm, acompanhados de parafusos de 12 mm e 19 mm respectivamente, no centro do anel, e considera este tipo de ligação como rígida. A figura 4 ilustra uma ligação por anel metálico.

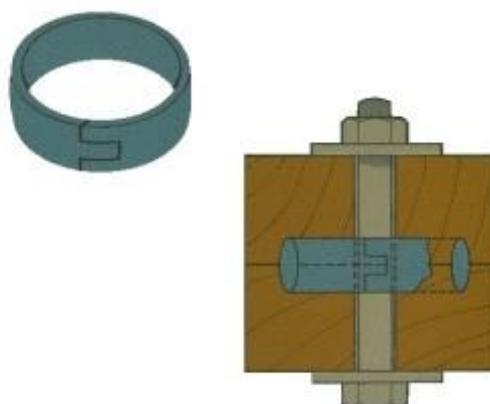


Figura 4 - Ligação com anel metálico
Fonte: NZ wood (2016)

As ligações com chapas de dentes estampados são chapas de aço com dentes na posição perpendicular ao plano da chapa, que são prensadas contra as peças de madeira. São frequentemente utilizadas em treliças de madeira pré-fabricadas.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) permite o uso desse tipo de ligação estrutural apenas quando a eficiência da cravação for garantida pelo executor. A figura 5 mostra um exemplo de ligação com chapas de dentes estampados.



Figura 5 - Ligações com chapas de dente estampados
Fonte: Roof truss (2016)

4.1.3.2 Ligações por pinos metálicos

Pino metálico pode ser entendido como um tipo de fixador feito geralmente de aço, formado por um eixo cilíndrico, cujo diâmetro é muito inferior ao comprimento. Os tipos mais conhecidos de pinos metálicos são os pregos e parafusos.

Este é o tipo de ligação mais utilizado, devido ao baixo custo, disponibilidade dos pinos no mercado, e facilidade na aplicação, não necessitando de mão de obra especializada.

Nas ligações por pinos metálicos, o carregamento é transferido através do elemento metálico. A força é distribuída lateralmente ao pino, ocasionando uma combinação de flexão e cisalhamento no mesmo, e as peças de madeira ficam submetidas à compressão, denominada resistência ao embutimento da madeira (Pfeil e Pfeil, 2003).

A diferença básica entre pregos e parafusos é a ausência ou a existência da rosca, o que influencia diretamente no modo de cravação. Pregos não possuem roscas e são cravados na madeira por impacto, já os parafusos possuem roscas e são instalados através do efeito combinado de rotação e pressão.

Os parafusos se diferenciam entre si pela forma da rosca, podendo ser total ou parcialmente roscado, pela forma da haste, cabeça e acionamento. De acordo com Pfeil e Pfeil (2003) os parafusos são basicamente de dois tipos: rosqueados auto-atarraxantes, ou passantes com porcas e arruelas; o primeiro sendo mais utilizado na marcenaria, e o segundo em ligações estruturais. A figura 6 mostra um resumo das variações dos tipos de cabeça, fustes, roscas e pontas de parafusos auto-atarraxantes.

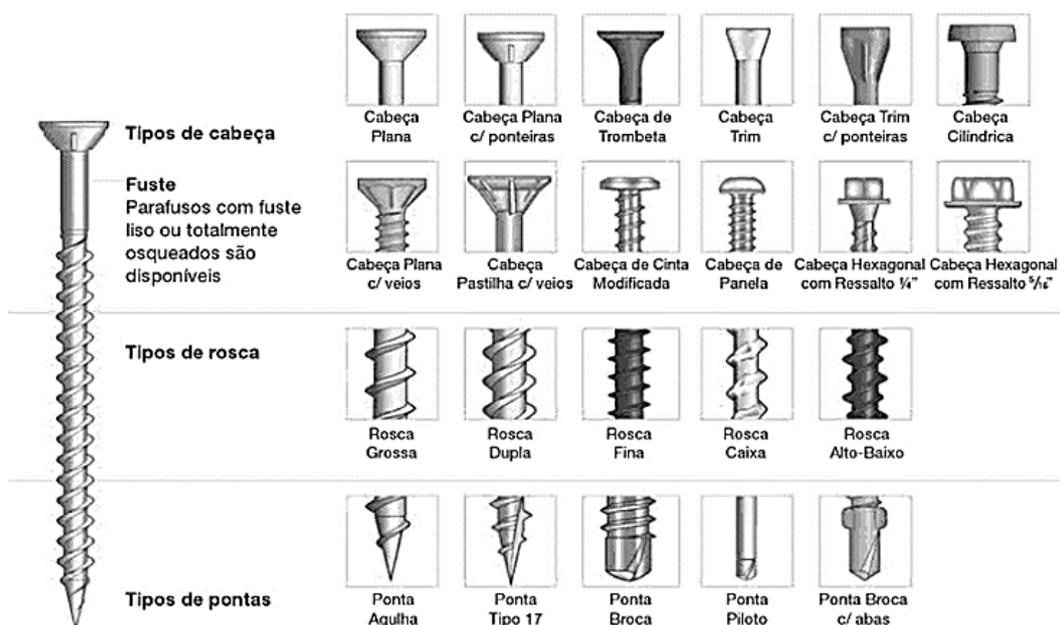


Figura 6 - Variações dos tipos de cabeça, fustes, rosças e pontas de parafusos auto-atarraxantes.

Fonte: Allen e Iano (2013)

Os pregos geralmente possuem uma extremidade achatada, conhecida como cabeça, e a outra extremidade pontiaguda. Existem vários tipos comercializados, com variações tanto no comprimento quanto na forma e no material, a fim de possuir uma melhor adaptação para cada uso. A figura 7 apresenta os tipos de pregos disponíveis no mercado.

Prego Anelado	
Prego Ardox	
Prego Cabeça Dupla	
Prego com Cabeça	
Prego Galvanizado	
Prego Quadrado	
Prego Sem Cabeça	
Prego Telheiro	
Prego para Taco	

Figura 7 - Tipos de pregos
Fonte: Construdeia (2012)

4.2 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS

O trabalho mais relevante sobre resistência de ligações com pinos metálicos foi desenvolvido por Johansen, em 1949. O modelo proposto por ele, complementado por estudos posteriores, originou o chamado EYM (*European Yield Model*), que hoje serve de base para cálculo de resistência em vários documentos normativos, entre eles a norma europeia (EUROCODE 5/04) e a brasileira (NBR 7190/97). Uma das limitações do EYM é que o modelo somente prevê uma carga de ruptura, não considerando a rigidez das ligações ou deslocamento.

4.2.1 Comportamento mecânico das ligações - Teoria de Johansen

Para formulação de sua teoria, Johansen (1949) assume um comportamento perfeitamente plástico tanto para a madeira quanto para o pino metálico, como mostra a figura 8. A resistência das ligações por pinos depende da resistência da madeira ao embutimento do pino (f_e) e da resistência do pino à flexão (M_y).

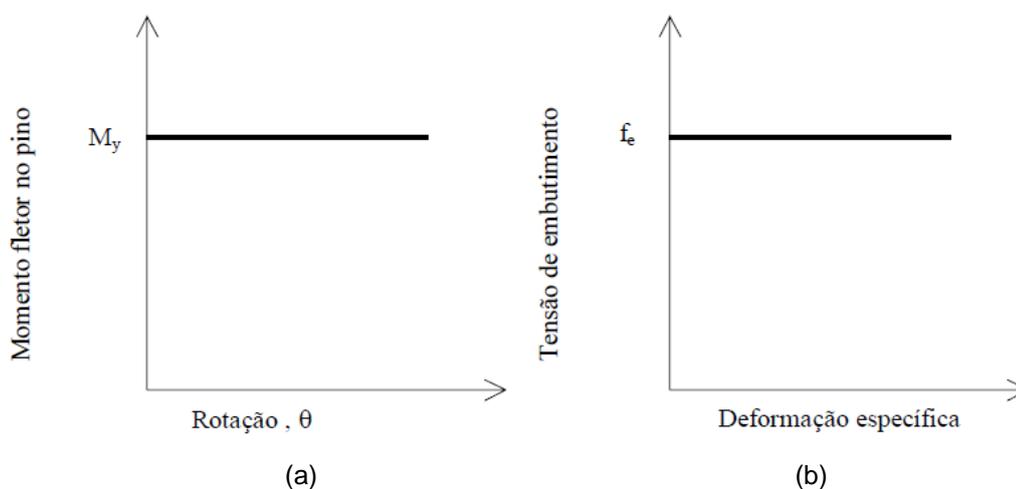


Figura 8 - (a) Hipótese de comportamento para o pino metálico. (b) Hipótese de comportamento para o material que compõe as peças a serem ligadas
Fonte: Veloso et al. (2002)

De acordo com Jorissen (1998), Johansen utilizou as seguintes simplificações para desenvolvimento das equações:

- Todos os elementos de madeira possuem a mesma resistência ao embutimento;
- Para ligações com apenas um plano de corte, as espessuras das 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;
- A resistência à flexão do pino metálico é admitida apenas ao seu limite elástico.

Möller¹ (1950, apud Veloso et al., 2002) reformulou as equações de Johansen para casos com diferentes espessuras de peças de madeira e diferentes resistências ao embutimento.

Johansen (1949) verificou através de ensaios que as falhas das ligações aconteciam de maneiras diferentes, e a partir disso, utilizou do princípio de equilíbrio de forças para desenvolver equações para cada modo de ruptura.

Os modos de falha são baseados na combinação dos fenômenos de embutimento da madeira em cada peça e flexão do pino metálico, resultando em seis modos de ruptura para uma seção de corte, conhecidos como (Ia), (Ib), (Ic), (IIa), (IIb) e (III), e quatro modos de falha, (Ia), (Ib), (II) e (III), para ligações com duas seções de corte.

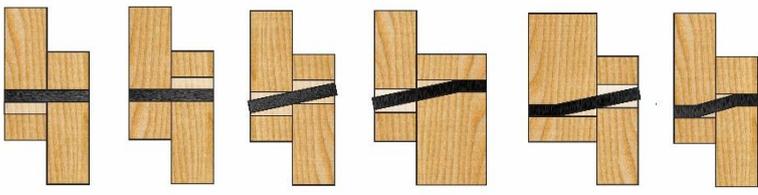
As equações para os modos de falha são dadas em função de:

- t_1 e t_2 que são as espessuras das peças de madeira ou da penetração pino;
- d que é o diâmetro do pino metálico;
- f_e que é o valor da força de embutimento da madeira;
- $M_{y,k}$ que é o valor característico do momento gerado pela flexão do pino;
- β que é o coeficiente de relação entre as resistências ao embutimento das peças de madeira, como mostra a equação 1.

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

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

A resistência da ligação é definida pelo menor valor entre os resultados das equações dos modos de falha, apresentadas nos quadros 1 e 2 para seção simples e seção dupla de corte, respectivamente.

					
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.				
(Ia)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$				(2)
(Ib)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$				(3)
(Ic)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$				(4)
(IIa)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$				(5)
(IIb)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right]$				(6)
(III)	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$				(7)
$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.					

Quadro 1 - Modelos de falha e equações de Möller-Johansen para uma seção de corte
 Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.	
(Ia)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	(8)
(Ib)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	(9)
(II)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$	(10)
(III)	$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$	(11)
$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modelos de falha.		

Quadro 2 - Modelos de falha e equações de Möller-Johansen para duas seções de corte.
Fonte: Adaptado Porteous e Kermani (2007).

Nos modelos de falha (Ia) e (Ib), tanto para seção simples de corte quanto para seções duplas, a falha ocorre pelo embutimento da madeira em apenas uma das peças, sem ocorrência de deformação do pino metálico. O modo (Ic) ocorre em apenas seção simples de corte, onde acontece o embutimento da madeira nas duas peças simultaneamente sem deformação do pino metálico. Nos modos (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. Por fim, no modelo (III) ocorre deformação do pino metálico devido à flexão e embutimento da madeira nas duas peças, com a formação de duas rótulas plásticas.

Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995), para ligações com múltiplas seções de corte, deve-se multiplicar as equações de dupla seção de corte pelo número de cortes, assim, para seção dupla simétrica, multiplica-se as equações por dois. Na utilização das equações para corte duplo, t_2 será a espessura do elemento central e t_1 a espessura dos elementos exteriores ou a espessura de penetração do pino nos elementos exteriores, utilizando o que tiver menor valor.

4.2.2 NBR 7190/97

A norma brasileira apresenta apenas um modelo para dimensionamento de ligações por pinos metálicos, fazendo diferenciação entre pregos e parafusos apenas no dimensionamento da pré-furação e na determinação de diâmetros máximos dos pinos. Neste trabalho serão apresentados parâmetros apenas para ligações com pregos.

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) não permite que forças de atrito das superfícies em contato, nem esforços transmitidos por grampos, braçadeiras ou estribos sejam levados em consideração nos cálculos de resistência das ligações. Para evitar o fendilhamento das peças de madeira na região das ligações, ou seja, ruptura por tração normal às fibras deve-se fazer a verificação conforme a equação 12. A figura 9 mostra quais são as variáveis da equação.

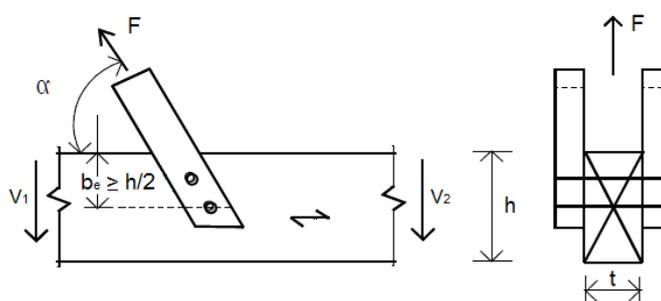


Figura 9 - Ligações com tração normal às fibras
Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997)

$$F \sin \alpha \leq \frac{2 \cdot f_{v,d} \cdot b_e \cdot t}{3} \quad (12)$$

Onde:

- b_e é a distância do eixo do pino mais afastado à borda do lado da solicitação, 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 Pfeil e Pfeil (2003), a pré-furação também é um recurso para evitar o fendilhamento da madeira; em ligações pregadas a norma brasileira, NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), especifica que a pré-furação deve ser feita de acordo com os seguintes critérios, sendo o diâmetro efetivo dos pregos (d_{ef}) maior que o diâmetro da pré-furação (d_0):

- Para madeira conífera: $d_0 = 0,85 d_{ef}$
- Para madeira folhosa: $d_0 = 0,98 d_{ef}$

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) indica ser desnecessária a pré-furação apenas para estruturas provisórias que empreguem madeira de baixa densidade ($\rho < 600 \text{ kg/m}^3$), e pregos com diâmetro d menor ou igual a $1/6$ da espessura da peça mais fina de madeira, espaçados de $10d$ ou mais.

O diâmetro dos pregos deve ser menor ou igual a $1/5$ da espessura da peça mais fina, ou menor ou igual a $1/4$ da espessura da peça mais fina desde que o diâmetro da pré-furação (d_0) seja igual ao diâmetro efetivo dos pregos (d_{ef}).

Para que a ligação seja considerada resistente, a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) estipula uma penetração mínima da ponta do prego igual a 12 vezes o diâmetro do prego, na peça de madeira mais distante de sua cabeça, ou igual à espessura dessa peça. A penetração mínima para ligações corridas, como em vigas compostas, pode ser limitada ao valor da espessura da peça mais delgada.

Os espaçamentos e as distâncias mínimas indicados para pregos pela norma brasileira também contribuem para evitar o fendilhamento da madeira (Pfeil e Pfeil, 2003). Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997, p.36), para pinos metálicos, os espaçamentos são:

- a) Entre o centro de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras: pregos, cavilhas e parafusos afastados $6 d$; parafusos $4 d$;
- b) Do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas: $7 d$;
- c) Do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas: $4 d$;
- d) Entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicular às fibras: $3 d$;
- e) Do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicular às fibras, quando o esforço transmitido for paralelo às fibras: $1,5 d$;
- f) 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: $1,5 d$;
- g) 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: $4 d$.

A figura 10 ilustra os espaçamentos citados anteriormente.

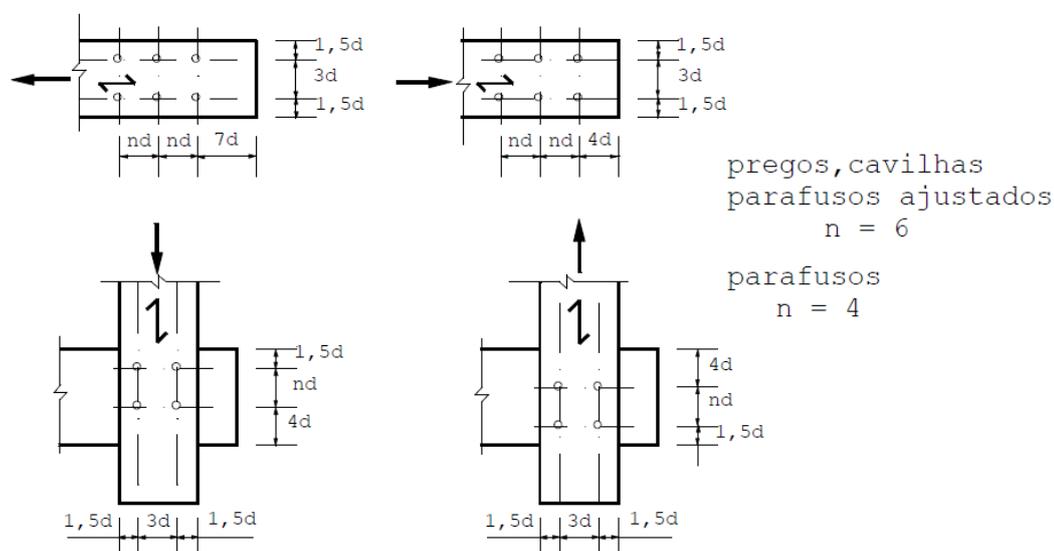


Figura 10 - Espaçamento em ligações com pinos
Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997)

O modelo de cálculo de resistência de ligações por pinos metálicos proposto pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) resulta em uma resistência (R_d) de um pino por seção de corte, ou seja, para se obter a resistência total da ligação é necessário somar as resistências correspondentes às diferentes seções de corte dos pinos utilizados na ligação.

No entanto, a norma considera que o número de pinos utilizados influencia na resistência total da ligação, determinando que ligações com até oito pinos dispostos em linha paralelamente a força aplicada, a resistência total da ligação é a dada pela soma da resistência de cada um dos pinos. Para ligações com mais de oito pinos, os suplementares devem ser considerados com apenas $2/3$ da resistência individual. Assim, com “n” sendo o número de pinos efetivos, o número convencional de pinos é calculado conforme equação 13.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (13)$$

O cálculo da resistência da ligação, segundo a norma brasileira, é dado em função da resistência de embutimento (f_{wed}) das duas madeiras interligadas, da resistência de escoamento (f_{yd}) do pino metálico, diâmetro (d) do pino, e da espessura

convencional (t), sendo o valor de tal espessura o menor entre t_1 e t_2 , como exposto na figura 11.

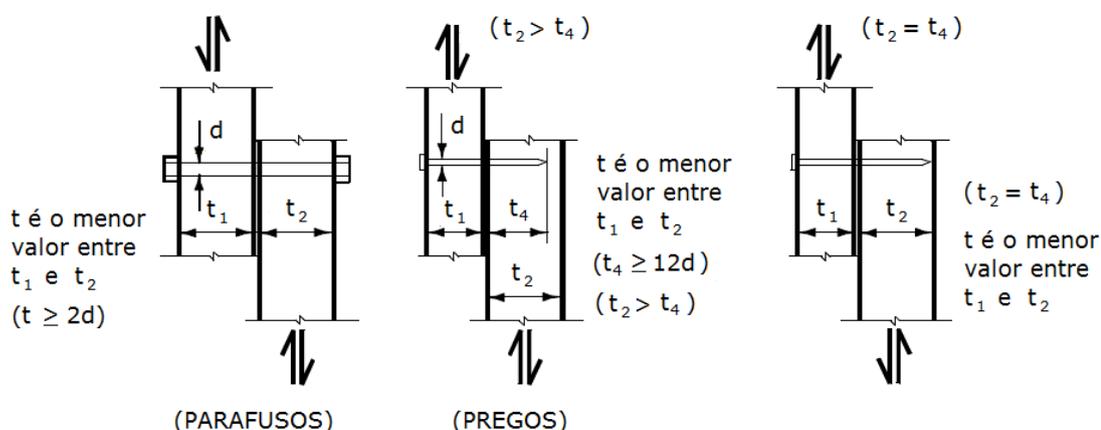


Figura 11 - Pinos metálicos em corte simples
Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997)

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, como mostra a figura 12.

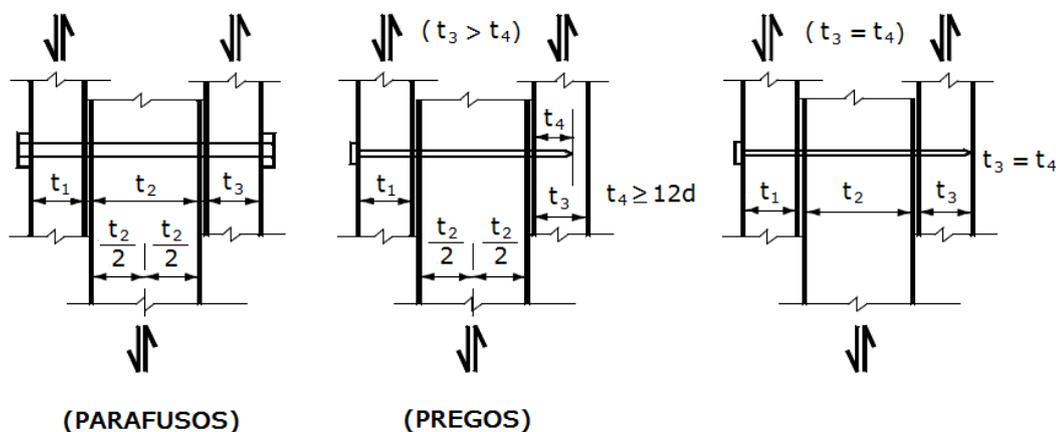


Figura 12 - Pinos metálicos em corte duplo
Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997)

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) considera apenas dois modos de falha distintos para a ligação, sendo eles: falha por embutimento do pino na madeira ou falha por flexão do pino. A determinação do modo de falha é feita através da verificação do parâmetro β e β_{lim} , como mostra as equações 14 e 15, respectivamente.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (14)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (15)$$

Onde:

- t é a espessura especificada nas figuras 11 e 12;
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 $\gamma_s = 1,1$.

Quando $\beta \leq \beta_{lim}$, deve-se utilizar a equação 16 para cálculo da resistência da ligação (R_d), que considera falha por embutimento na madeira.

$$R_d = 0,4 \cdot t \cdot d \cdot f_{e,d} \quad (16)$$

Quando $\beta > \beta_{lim}$, deve-se utilizar a equação 17 para cálculo da resistência da ligação (R_d), que considera falha por flexão do pino.

$$R_d = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,d} \quad (17)$$

Segundo Santana (2002), quando peças com direções das fibras diferentes em relação à direção de cálculo da resistência, deve-se aplicar a equação 14 para cada uma das peças utilizando-se a espessura de cada uma delas.

4.2.3 EUROCODE 5/04

A norma europeia para estruturas em madeira considera todos os modos de falha propostos por Möller-Johansen para ligações por pinos metálicos, levando em consideração ainda fatores não considerados por eles, como atrito entre as peças

ligadas e efeito de corda (tração do pino causada pela flexão do mesmo). O EUROCODE 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) indica que o efeito de corda deve ser considerado apenas quando verificado em ensaios.

O modelo de cálculo de resistência das ligações por pinos metálicos abordado pela norma é o mesmo para pregos e parafusos, porém a determinação dos espaçamentos mínimos, do momento resistente à flexão do pino, do número de pinos efetivos, e da pré-furação são diferentes para cada um.

De acordo com o EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004), quando a força solicitante atuar formando um ângulo com as fibras da madeira, como mostra a figura 13, deve ser feita a verificação da resistência ao fendilhamento, satisfazendo a condição exposta na equação 18.

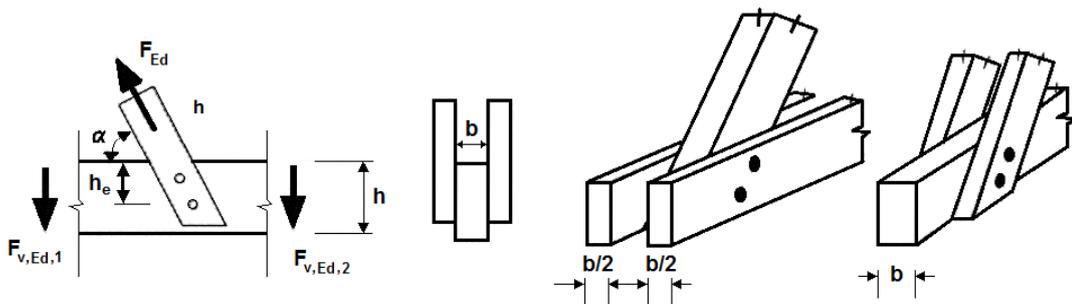


Figura 13 - Força inclinada transmitida para uma ligação
Fonte: EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (18)$$

$$F_{v,Ed} = \max. \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases} \quad (19)$$

Onde:

$F_{90,Rd}$ é a força de cálculo ao fendilhamento;

$F_{v,Ed,1}$, $F_{v,Ed,2}$ é a força de cálculo ao cisalhamento de cada lado do conector.

Para madeiras de baixa densidade, a força característica ao fendilhamento deve ser obtida através da equação 20.

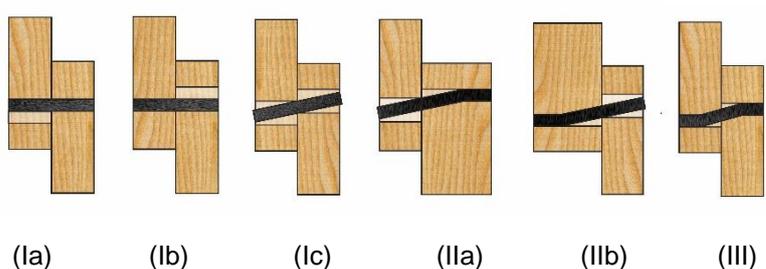
$$F_{90,Rk} = 14 \cdot b \cdot w \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad (20)$$

Onde:

- $F_{90,Rk}$ é a força característica ao fendilhamento, em N;
 w é o fator de modificação definido na equação 21;
 h_e é a distância da borda carregada para o centro do fixador mais distantes ou para a chapa de dentes estampados, em mm;
 h é a altura da peça de madeira, em mm;
 b é a espessura do membro de madeira, em mm;
 w_{pl} é a largura da chapa de dentes estampados paralela às fibras, em mm.

$$w = \begin{cases} \max. \left\{ \left(\frac{w_{pl}}{100} \right)^{0,35} \right. & \text{para chapa de dentes estampados} \\ 1 & \text{para todos os outros conectores} \end{cases} \quad (21)$$

A resistência característica das ligações por pinos metálicos corresponde ao menor valor obtido do conjunto de equações, divididos para uma e duas seções de corte, onde cada uma advêm de um modo de falha. Os quadros 3 e 4 mostram as equações para seção simples e dupla de corte, respectivamente, e os modos de falha correspondentes.

					
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.				
(Ia)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$				(22)
(Ib)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$				(23)
(Ic)	$F_{v,Rk} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$				(24)
(IIa)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$				(25)
(IIb)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$				(26)
(III)	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$				(27)
$F_{v,Rk}$, é o menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha.					

Quadro 3 - Modelos de falha e equações do EUROCODE 5/04 para uma seção de corte

<p>(Ia) (Ib) (II) (III)</p>		
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado.	
(Ia)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$	(28)
(Ib)	$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta$	(29)
(II)	$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,d}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(30)
(III)	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(31)
<p>$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modelos de falha.</p>		

Quadro 4 - Modelos de falha e equações do EUROCODE 5/04 para duas seções de corte

Onde:

- t_1 corresponde à espessura de uma das peças em ligações com uma seção de corte, ou a penetração do pino em ligações com dupla seção.
- t_2 corresponde à penetração do pino em ligações com uma seção de corte, ou a espessura da peça central em dupla seção;
- $f_{e,1,k}$ e $f_{e,2,k}$ são os valores de resistência característica ao embutimento da madeira da peça 1 e 2 respectivamente;
- β é o coeficiente de relação entre as resistências ao embutimento da madeira da peça 1 e 2;
- $M_{y,k}$ é momento característico resistente à flexão do pino;
- d é o diâmetro do pino.

A figura 14 estabelece t_1 e t_2 em ligações com seções de simples e duplo corte.

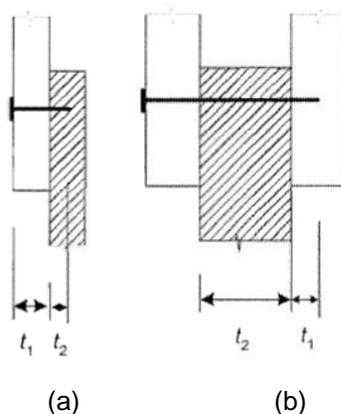


Figura 14 - Definições de t_1 e t_2 (a) ligação em corte simples, (b) ligação em corte duplo
Fonte: EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

Nas Equações 25 a 27, 30 e 31, o primeiro termo é a capacidade de carga de acordo com a teoria de Johansen multiplicada por um coeficiente devido à parcela de atrito, enquanto o segundo termo ($F_{ax,Rk}/4$) é a contribuição da resistência ao arrancamento (efeito de corda), que deve ser limitada de acordo com as seguintes percentagens da parcela de Johansen:

- | | |
|------------------------------------|------|
| - Pregos redondos | 15% |
| - Pregos quadrados ou com ranhuras | 25% |
| - Outros pregos (ex: anelado) | 50% |
| - Parafuso auto-atarraxante | 100% |
| - Parafuso com porca e arruela | 25% |
| - Pinos | 0% |

A parcela de contribuição da resistência ao arrancamento do prego, $F_{ax,Rk}$, deve ser tomado como nula quando não comprovada experimentalmente. Para pregos que estejam submetidos a carregamento axial e perpendicular ou inclinado às fibras da madeira, a resistência característica ao arrancamento do prego deve ser calculada segundo as equações 32 e 33, sendo considerado o menor valor obtido.

-Para pregos que não sejam lisos

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases} \quad (32)$$

-Para pregos lisos

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t + f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases} \quad (33)$$

Onde:

$f_{ax,k}$ é a resistência característica ao arrancamento da ponta;

$f_{head,k}$ é a resistência característica ao arrancamento da cabeça do prego;

d é o diâmetro do prego;

d_h é o diâmetro da cabeça do prego;

t é a espessura da peça onde está a cabeça do prego;

t_{pen} é o comprimento de penetração da ponta do prego, ou comprimento da parte roscada do mesmo.

As resistências $f_{ax,k}$ e $f_{head,k}$ devem ser obtidas experimentalmente, a menos que sejam pregos lisos com penetração de pelo menos $12d$, as resistências características ao arrancamento da ponta e da cabeça do prego podem ser calculadas de acordo com as expressões 34 e 35.

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \quad (34)$$

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \rho_k^2 \quad (35)$$

Sendo:

ρ_k é a densidade característica da madeira em kg/m^3 .

Para pregos com penetração menor que $12d$, a resistência ao arrancamento deve ser multiplicada por $(t_{pen}/4d - 2)$. Para pregos com penetração menor que $8d$, a resistência ao arrancamento deve ser multiplicada por $(t_{pen}/2d - 3)$.

Para estruturas de madeira instaladas com as fibras perto do ponto de saturação e suscetível de secar sob carregamento, os valores de $f_{ax,k}$ e $f_{head,k}$ devem ser multiplicados por $2/3$.

Para ligações com pregos inclinados, a distância da cabeça até a peça carregada deve ser de pelo menos $10d$, como mostra a figura 15.

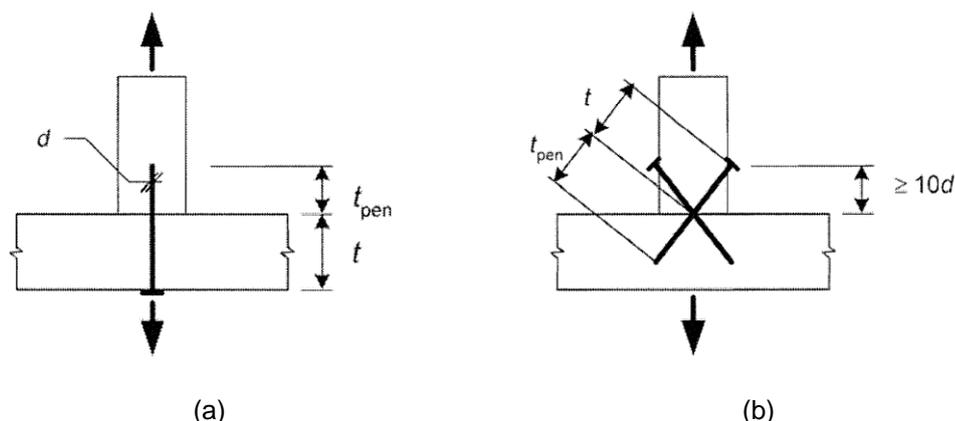


Figura 15 - (a) prego perpendicular às fibras e (b) pregos inclinados
 Fonte: EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

O momento característico de flexão do pino pode ser calculado de acordo com a equação 36, para pregos produzidos com uma resistência mínima a tração de 600 N/mm², ou através de ensaios normatizados como descrito na EN 409.

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{para pregos redondos} \\ 0,45 \cdot f_u \cdot d^{2,6} & \text{para pregos quadrados e com ranhura} \end{cases} \quad (36)$$

Onde:

f_u é a resistência última do aço do prego a tração;

d é o diâmetro do prego.

A resistência ao embutimento da madeira pode ser obtida através de ensaios, ou para ligações com pregos de até 8 mm de diâmetro, o EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) propõe as expressões 37 e 38, que consideram como parâmetros o valor característico da densidade da madeira, ρ_k , e o diâmetro do prego, d .

$$\text{-Sem pré-furação } f_{e,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (37)$$

$$\text{-Com pré-furação } f_{e,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (38)$$

De acordo com Mendes (1994), do ponto de vista teórico, a ligação ideal é aquela em que a transmissão de esforços se dá por toda a área de contato entre os elementos, tendo em vista que quanto mais pontos de transmissão, menor a tensão

nos elementos, o que reduz a possibilidade de fendilhamento da madeira. Sendo assim, em ligações mecânicas, procura-se diminuir o diâmetro e conseqüentemente aumentar o número de conectores para assegurar a resistência total da ligação. Porém, este tipo de ligação tende a provocar fendilhamento da madeira, e a utilização de um elevado número de conectores provoca a interação entre as fendas, surgindo a possibilidade de fendas danosas para a ligação.

Diante disto, o EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) define distâncias e afastamentos mínimos para ligações pregadas em madeira-madeira, de acordo com o ângulo entre a força aplicada e a direção das fibras da madeira, demonstrados no quadro 5, onde:

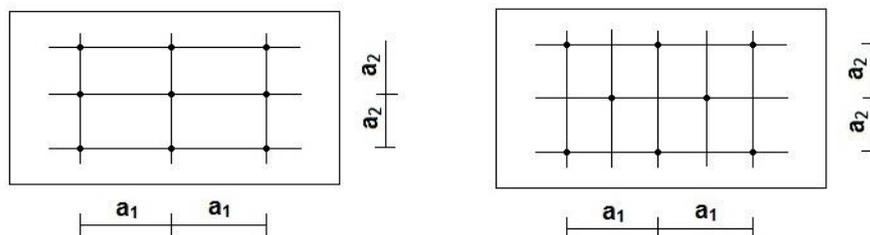
- a_1 é o espaçamento entre pregos em linha, paralelos às fibras;
- a_2 é o espaçamento de pregos perpendiculares às fibras;
- $a_{3,c}$ é a distância entre o prego e a extremidade não carregado;
- $a_{3,t}$ é a distância entre o prego e a extremidade carregado;
- $a_{4,c}$ é a distância entre o prego e a borda não carregada;
- $a_{4,t}$ é a distância entre o prego e a borda carregada;
- α é o ângulo entre a força e a direção das fibras.

Espaçamento ou distância	Ângulo α	Espaçamento mínimo ou distância extremidade/borda		
		Sem pré-furação		Com pré-furação
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \leq \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5\text{mm}$: $(5 + 5 \cos \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}$: $(5 + 7 \cos \alpha)d$	$(7 + 8 \cos \alpha)d$	$(4 + \cos \alpha)d$
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$(3 + \sin \alpha)d$
$a_{3,c}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10 + 5 \cos \alpha)d$	$(15 + 5 \cos \alpha)d$	$(7 + 5 \cos \alpha)d$
$a_{3,t}$	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$10d$	$15d$	$7d$
$a_{4,c}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5\text{mm}$: $(5 + 2 \sin \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}$: $(5 + 5 \sin \alpha)d$	$d < 5\text{mm}$: $(7 + 2 \sin \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}$: $(7 + 5 \sin \alpha)d$	$d < 5\text{mm}$: $(3 + 2 \sin \alpha)d$ $d \geq 5\text{mm}$: $(3 + 4 \sin \alpha)d$
$a_{4,t}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5d$	$7d$	$3d$

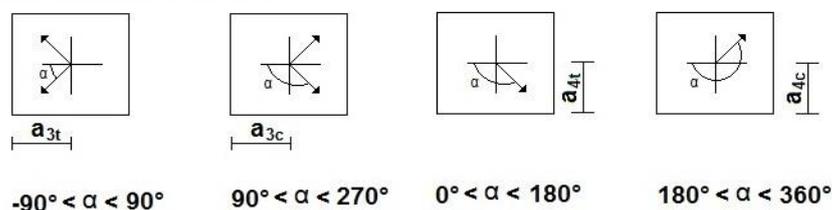
Quadro 5 - Espaços e distâncias mínimos
Fonte: Adaptado EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

A figura 16 demonstra os espaçamentos e distâncias.

Espaço perpendicular e paralelo a fibra:



Distância de extremidade e borda:



onde α é o ângulo entre a força e a direção das fibras

Figura 16 - Definição do espaçamento e distância para ligações
 Fonte: Adaptado EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

Para uma ligação com “n” pregos fixados paralelamente às fibras e em linha reta, a menos que os pregos estejam alternados na linha em pelo menos uma vez o diâmetro do prego, como mostra a figura 17, a capacidade de carga da ligação paralela às fibras deve ser calculada utilizando o número efetivo de pregos, N_{ef} , calculado através da equação 39.

$$N_{ef} = N^{k_{ef}} \quad (39)$$

Onde N é o número de pregos em linha e K_{ef} é dado pelo quadro 6.

Espaçamento ^a	K_{ef}	
	Sem pré-furação	Com pré-furação
$a_1 \geq 14d$	1,0	1,0
$a_1 = 10d$	0,85	0,85
$a_1 = 7d$	0,7	0,7
$a_1 = 4d$	-	0,5

^a Para espaçamentos intermediários, deve-se realizar interpolação linear

Quadro 6 - Valores de K_{ef}
 Fonte: Adaptado EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

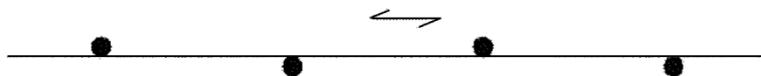


Figura 17 - Linha de pregos paralelamente às fibras
Fonte: Adaptado EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004)

O EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) determina que deve ser feita a pré-furação de ligações pregadas quando a densidade da madeira for maior que 500 kg/m³, e/ou o diâmetro do prego for maior que 6 mm, e/ou quando a espessura dos elementos de madeira for menor que o maior valor resultante da equação 40.

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 7d \\ (13d - 30) \frac{\rho_k}{400} \end{array} \right. \quad (40)$$

Onde:

d é o diâmetro do prego em mm;

ρ_k é a densidade característica da madeira em kg/m³.

Para madeiras particularmente sensíveis ao fendilhamento, deve ser feita a pré-furação quando a espessura dos elementos de madeira for menor que o maior valor resultante da equação 41.

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 14d \\ (13d - 30) \frac{\rho_k}{200} \end{array} \right. \quad (41)$$

A norma permite que a equação 41 seja substituída pela equação 40 quando a distância da borda for:

- $a_4 \geq 10d$ para $\rho_k \leq 420$ kg/m³
- $a_4 \geq 14d$ para $420 \leq \rho_k \leq 500$ kg/m³

Sobre a penetração da ponta do prego, o EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) determina que para pregos lisos, a penetração deve ser de pelo menos 8d. Para outros tipos de pregos, que não sejam lisos, a penetração deve ser de pelo menos 6d.

De acordo com a norma europeia, em ligações madeira-madeira, pregos no final das fibras são considerados incapazes de transmitir esforços, então como uma alternativa para este tipo de situação, deve-se aplicar as seguintes regras:

- Em estruturas secundárias podem ser utilizados pregos lisos, devendo ser considerado apenas 1/3 da resistência de cálculo da ligação com pregos instalados em ângulo reto com as fibras;
- Em estruturas que não sejam secundárias não se deve utilizar prego liso. A resistência de cálculo da ligação deve ser considerada como 1/3 dos valores obtidos para pregos lisos de diâmetro equivalente, instalados em ângulo reto com as fibras, desde que: os pregos estejam carregados apenas lateralmente, haja pelo menos três pregos por ligação, a penetração da ponta do prego seja de pelo menos 10d, seja atendido os requisitos de espaçamentos e distancias mínimos, e que a ligação não esteja exposta a condições climáticas que provoquem grandes mudanças nos teores de umidade.

4.3 DISCUSSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos de cálculo de resistência de ligações por pinos metálicos propostos pelos documentos normativos, brasileiro e europeu, mesmo ambos advindo da teoria de Johansen, apresentam equacionamentos diferentes.

As equações propostas pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) muito se assemelham as equações de Möller-Johansen, abrangem todos os modos de falha teóricos e levam em consideração ainda outros fatores como atrito e resistência ao arrancamento do pino. Já as equações propostas pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) são simplificadas, sendo válidas para apenas alguns casos.

A fim de mostrar a equivalência das duas abordagens (europeia e brasileira) são realizadas comparações para situações específicas em corte simples. Considerando que as peças de madeiras a serem unidas são de mesma espécie, ou seja, que a resistência ao embutimento é a mesma ($f_{e,d,1} = f_{e,d,2}$), e que as espessuras serão iguais ($t_1 = t_2$), obtém-se um parâmetro $\beta = 1$ e relação $t_2/t_1=1$. Substituindo estes valores na equação 4, referente ao modo de falha Ic caracterizado

por embutimento da madeira, proposta por Möller-Johansen, resulta-se na equação 42.

$$R_k = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$$

$$R_k = \frac{f_{e,k} \cdot d \cdot t}{1 + 1} \left[\sqrt{1 + 2 \cdot (1)^2 \cdot [1 + 1 + (1)^2] + 1^3 \cdot (1)^2} - 1 \cdot (1 + 1) \right]$$

$$R_k = \frac{f_{e,k} \cdot d \cdot t}{2} [\sqrt{8} - 2]$$

$$R_k = \frac{f_{e,k} \cdot d \cdot t}{2} [0,828]$$

$$R_k = 0,414 \cdot f_{e,k} \cdot d \cdot t \quad (42)$$

O EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) apresenta a mesma equação que Möller-Johansen para o modo de falha Ic (equação 24), portanto, mantendo as considerações feitas anteriormente, tem-se a mesma equação 42.

Ao analisar a equação de Möller-Johansen para o modo de falha III (equação 7), caracterizado predominantemente por flexão do pino metálico, pode-se considerar o momento elástico ou o momento plástico do pino. Portanto, considerando primeiramente o momento elástico à flexão de pregos redondos (equação 43), e considerando ainda que as peças de madeira unidas sejam iguais ($\beta = 1$), ao substituir tais parâmetros na equação 7, resulta-se na equação 44.

$$M_{y,k} = f_{y,k} \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (43)$$

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$$

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot (1)}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot f_{y,k} \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot f_{e,k} \cdot d}$$

$$R_k = \sqrt{0,196 \cdot f_{y,k} \cdot d^4 \cdot f_{e,k}}$$

$$R_k = 0,443 d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}} \quad (44)$$

Considerando agora o momento plástico à flexão de pregos redondos (equação 45), e que as peças de madeira unidas sejam iguais ($\beta = 1$), substituindo tais parâmetros na equação 7, resulta-se na equação 46.

$$M_{y,k} = f_{y,k} \cdot \frac{d^3}{6} \quad (45)$$

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d}$$

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot (1)}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot f_{y,k} \cdot \frac{d^3}{6} \cdot f_{e,k} \cdot d}$$

$$R_k = \sqrt{0,333 \cdot f_{y,k} \cdot d^4 \cdot f_{e,k}}$$

$$R_k = 0,577 d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}} \quad (46)$$

A equação apresentada pela norma europeia para o modo de falha III (equação 27) é a mesma equação de Möller-Johansen, acrescida de um coeficiente multiplicador para considerar a parcela de resistência ao atrito, e um termo correspondente a parcela de contribuição da resistência ao arrancamento do prego. Contudo, diferentemente das considerações sobre momento do pino aplicadas na teoria de Johansen, o EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) apresenta uma equação empírica específica de momento característico de flexão para pregos redondos (equação 36).

Assim sendo, mantendo a consideração que as peças de madeira unidas sejam iguais ($\beta = 1$), desprezando a contribuição da força de atrito e da resistência ao arrancamento do prego, ao substituir a equação 36 na equação 27, obtém-se a equação 47.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6}$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} \cdot f_{e,k} \cdot d}$$

$$F_{v,Rk} = \sqrt{0,6 \cdot d^{3,6} \cdot f_u \cdot f_{e,k}}$$

$$F_{v,Rk} = 0,775 \cdot d^{1,8} \sqrt{f_u \cdot f_{e,k}} \quad (47)$$

A norma brasileira apresenta a equação para falha por flexão do pino (equação 17) em função do parâmetro β_{lim} (equação 15), diâmetro e resistência ao escoamento do pino. Para fins de comparação, foram utilizados os valores característicos de escoamento do aço e embutimento da madeira, diferentemente do considerado na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), resultando na equação 48.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,k}}{f_{e,k}}}$$

$$R_k = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,k}$$

$$R_k = 0,625 \cdot \frac{d^2}{1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{y,k}}{f_{e,k}}}} \cdot f_{y,k}$$

$$R_k = 0,5 \cdot \frac{d^2}{\frac{f_{y,k}^{\frac{1}{2}}}{f_{e,k}^{\frac{1}{2}}}} \cdot f_{y,k}$$

$$R_k = 0,5 \cdot d^2 \cdot f_{y,k} \cdot f_{y,k}^{-\frac{1}{2}} \cdot f_{e,k}^{\frac{1}{2}}$$

$$R_k = 0,5 \cdot d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}} \quad (48)$$

Diante destas deduções, a tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as situações específicas.

Tabela 1 - Resumo da comparação entre modelos de cálculo para corte simples

Modo de falha	Möller - Johansen	EUROCODE 5/04	NBR 7190/97
Ic (embutimento)	$R_k = 0,414 \cdot f_{e,k} \cdot d \cdot t$	$F_{v,Rk} = 0,414 \cdot f_{e,k} \cdot d \cdot t$	$R_k = 0,4 \cdot f_{e,k} \cdot d \cdot t$
III (flexão do pino)	$R_k = 0,443 d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}}$ ^(a) $R_k = 0,577 d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}}$ ^(b)	$F_{v,Rk} = 0,775 \cdot d^{1,8} \sqrt{f_u \cdot f_{e,k}}$	$R_k = 0,5 \cdot d^2 \sqrt{f_{y,k} \cdot f_{e,k}}$
(a) considerando o momento elástico do pino ($M_{y,k} = f_{y,k} \cdot \pi \cdot d^3 / 32$)			
(b) considerando o momento plástico do pino ($M_{y,k} = f_{y,k} \cdot d^3 / 6$)			

Ao comparar as equações obtidas para falha por embutimento da madeira, nota-se que a equação proposta pela norma brasileira é muito semelhante às equações resultantes de Möller-Johansen e EUROCODE 5/04, ou seja, a NBR 7190/97 apresenta uma simplificação destas equações, considerando apenas o caso específico de peças com mesma espessura e mesma resistência ao embutimento. O mesmo pode ser observado nas equações para falha por flexão do pino, onde a equação da norma brasileira é semelhante às outras equações simplificadas, considerando apenas peças ligadas com mesma resistência ao embutimento.

Observando as equações para falha por flexão do pino, nota-se que a equação da norma europeia utilizando o momento empírico promove um resultado intermediário em comparação às equações de Möller-Johansen considerando o momento elástico e o momento plástico do pino. Já a norma brasileira apresenta um resultado truncado da equação de Möller-Johansen considerando o momento plástico do pino.

Assim sendo, pode-se notar como as equações na norma brasileira realmente são restritas, se fazendo válido o estudo comparativo entre resultados experimentais e resultados analíticos de cálculo de resistência de ligações por pinos metálicos, a fim de avaliar a eficiência dos modelos de cálculo propostos pela NBR 7190/97 e pelo EUROCODE 5/04.

5 METODOLOGIA

Foi realizada a análise experimental com o objetivo de avaliar a resistência das ligações pregadas para posteriormente, comparar com os resultados de modelos analíticos de cálculo de resistência de ligações pregadas propostos pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) e EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004), verificando qual o modelo mais indicado para dimensionamento deste tipo de ligação.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Campo Mourão. Os materiais e os procedimentos são apresentados a seguir.

5.1 Materiais

Neste trabalho foi utilizada madeira de alta densidade da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira) para confecção dos corpos de prova para os testes de caracterização e também para os ensaios de ligações.

Os pinos utilizados foram pregos lisos do modelo padrão comercial 20 x 30 (diâmetro de 4,4 mm e comprimento de 96,6 mm), por possuir dimensões que atenderam aos valores mínimos de penetração segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), tendo em vista que possuíram apenas uma seção de corte.

A pré-furação da madeira foi realizada em furadeira de bancada com brocas de aço rápido com diâmetro de 4 mm, a fim de atender as exigências de pré-furação da norma brasileira.

Para a caracterização das peças de madeira utilizadas, foram realizados ensaios com corpos de prova retirados aleatoriamente, a fim de determinar a sua umidade e densidade, resistência à compressão e ao embutimento, ambos na direção paralela às fibras, na Máquina Universal de Ensaio modelo DL 30000 com capacidade máxima de 300 kN, localizada no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, de acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) anexo B, e EN 383, respectivamente.

Para caracterização do pino metálico foi realizado ensaio de tração do prego segundo NBR ISO 6892-1 (2013), com o objetivo de determinar a resistência última à tração.

5.2 Procedimentos

5.2.1 Determinação da densidade e umidade

Foram extraídos aleatoriamente seis corpos de provas, com seção transversal de 3,0 cm x 2,0 cm e 5,0 cm de comprimento ao longo das fibras, como determina a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), anexo B.

O teor de umidade em porcentagem (U) foi calculado pela equação (45).

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (45)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa seca da madeira, em gramas.

A massa inicial da madeira foi obtida pesando-se as amostras em balança de precisão, e a massa seca da madeira foi obtida após as amostras ficarem em estufa com temperatura aproximada de 100 °C, sendo pesadas a cada 6 horas, até que atingissem variações menores que 0,5% da última pesagem.

A densidade aparente em g/cm³ foi calculada pela equação (46).

$$\rho_{ap} = \frac{m_i}{A \cdot B \cdot C} \quad (46)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

A é a dimensão da largura do corpo de prova, em centímetros;

B é a dimensão da altura do corpo de prova, em centímetros;

C é a dimensão do comprimento do corpo de prova em relação às fibras da madeira, em centímetros.

5.2.2 Determinação da resistência a compressão paralela às fibras

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), anexo B. Foram extraídos aleatoriamente seis corpos de provas, com seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm por 15 cm de comprimento, que foram submetidos a um carregamento monotônico crescente de 10 MPa/min e os resultados de resistência à compressão foram obtidos pela máquina universal de ensaios. A figura 18 mostra os corpos de prova após o ensaio de resistência a compressão, após ruptura.



Figura 18 - Modos de falha dos corpos de prova de compressão

5.2.3 Determinação da resistência ao embutimento

O procedimento de carga do ensaio de embutimento da madeira paralelo às fibras foi realizado de acordo com EN 383/2007. As dimensões adotadas buscaram atender tanto a norma brasileira quanto a norma europeia.

As seções mínimas determinadas pela norma europeia são apresentadas na figura 19 e no quadro 7, e a espessura do corpo de prova deve ser maior que 1,5d e menor que 4d, sendo d o diâmetro do prego.

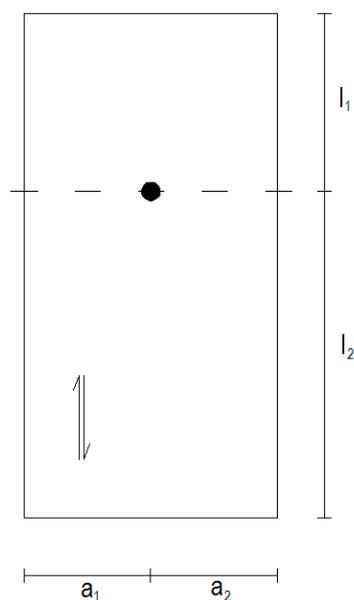


Figura 19 - Corpo de prova de embutimento
Fonte: Adaptado EN 383 (2007)

Dimensões ^a	Pregos sem pré-furação	Pregos com pré-furação	Parafusos e pino	Direção das fibras
a ₁	5d	5d	3d	Paralelo às fibras
l ₁	20d	12d	7d	
l ₂	20d	12d	7d	
l ₃	20d	12d	7d	
l ₄	40d	40d	30d	Perpendicular às fibras
a ₁	5d	5d	5d	
a ₂	5d	5d	5d	
l ₅	20d	20d	20d	

^aDimensão dadas na figura 19.

Quadro 7 - Dimensões dos corpos de prova
Fonte: Adaptado EN 383 (2007)

As dimensões mínimas determinadas pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), anexo B, são apresentadas na figura 20.

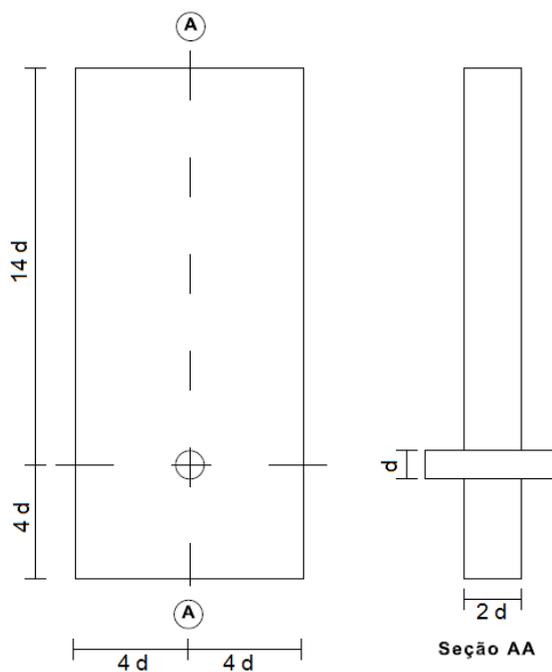


Figura 20 - Corpo de prova de embutimento
 Fonte: Adaptado NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997)

Foram confeccionados seis corpos de prova, com seção transversal de 10 mm x 60 mm e 124 mm de comprimento, como mostra a figura 21.

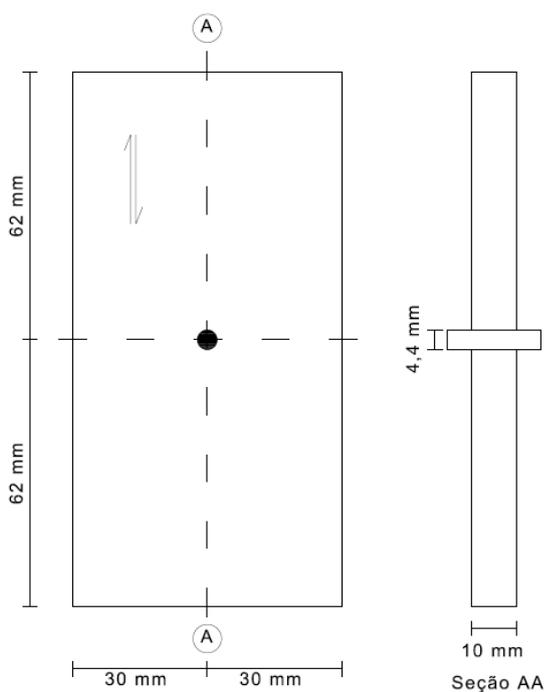


Figura 21 - Corpo de prova para ensaio de embutimento

O procedimento de carga consistiu em um incremento de carga de $0,4F_{est}$ por minuto, e ao atingir 40% de F_{est} , a carga foi mantida por 30 segundos. Após este

período, procedeu-se à descarga, mantendo o valor do incremento de carga anterior, agora negativo, até aos 10 % de F_{est} , os quais foram mantidos por mais 30 segundos. Posteriormente seguiu-se o carregamento até a carga máxima ser atingida, ou a deformação atingir 5mm. A figura 22 mostra o diagrama de carregamentos adotado.

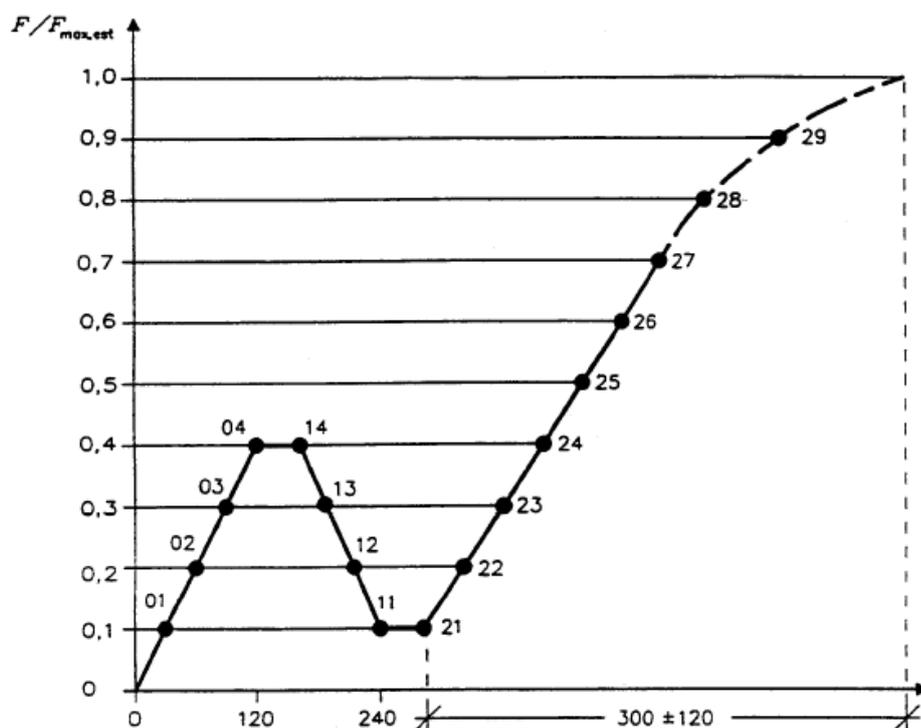


Figura 22 - Diagrama de carregamento para ensaio de embutimento
Fonte: EN 383 (2007)

A resistência ao embutimento, f_{e0} , é definida pela equação 47.

$$f_{e0} = \frac{F_{e,max}}{t \cdot d} \quad (47)$$

Onde:

- $F_{e,max}$ é a força máxima de ensaio, em Newtons;
- t é a espessura do corpo de prova, em milímetros;
- d é o diâmetro do pino, em milímetros.

A figura 23 mostra os corpos de prova de embutimento após o ensaio realizado.



Figura 23 - Modo de falha dos corpos de prova de embutimento

5.2.4 Determinação da resistência última de tração do prego

Foram realizados ensaios de tração no prego conforme as recomendações da ABNT NBR ISO 6892 (2013), para a determinação da resistência última de tração. O método consistiu na aplicação de uma carga axial crescente e contínua até que ocorra ruptura do corpo de prova. A figura 24 mostra os pregos rompidos após o ensaio.



Figura 24 – Modos de ruptura dos pregos

5.2.5 Preparação dos corpos de prova de ligação

Foram confeccionados seis corpos de prova, atendendo as exigências de espaçamento entre os pregos e penetração, para caracterização da resistência de uma ligação segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), anexo C. Foi utilizado um total de oito pregos em cada corpo de prova, contendo cada um apenas uma seção de corte. As peças laterais possuíam as seguintes dimensões: 15 cm x 2,5 cm x 20,5 cm. As dimensões da peça central foram 15 cm x 5 cm x 20,5 cm. As dimensões adotadas e a distribuição dos pregos estão representadas nas figuras 25 e 26.

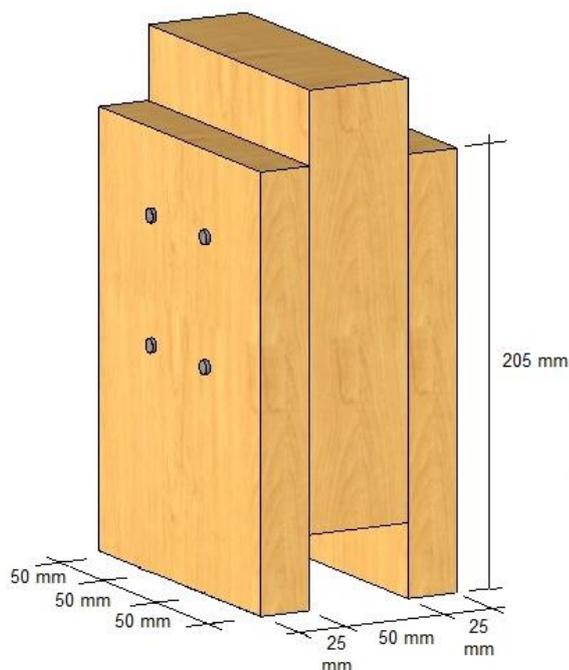


Figura 25 - Dimensões dos corpos de prova

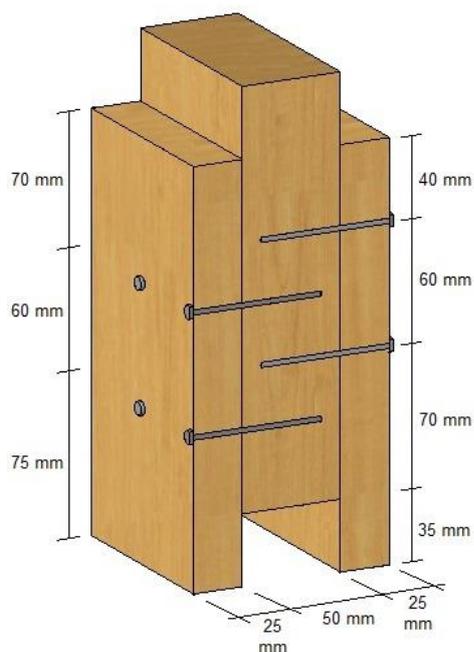


Figura 26 - Distribuição dos pregos

A figura 27 apresenta dois corpos de prova lado a lado, mostrando as faces opostas do modelo de ligação.

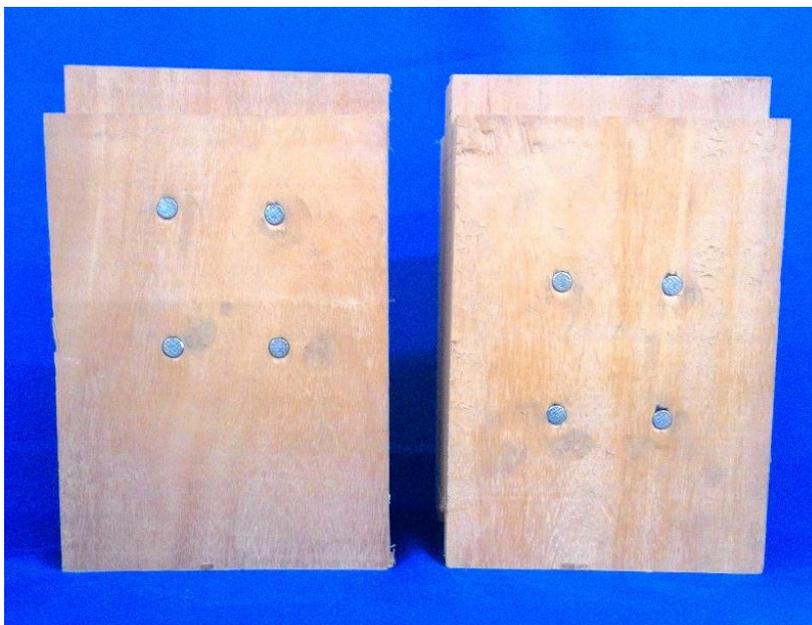


Figura 27 - Faces opostas dos corpos de prova de ligação

As espessuras “t” das peças foram estabelecidas conforme item 8.3.4 da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997), sendo utilizada a espessura padrão de 25 mm para as

cobrejuntas. A peça central foi construída com o dobro da espessura das respectivas cobrejuntas.

Após o corte das peças de madeira nas dimensões apropriadas, os corpos de prova foram montados com o auxílio de grampos de aperto rápido, para garantir que as peças ficariam na posição correta para a pré-furação e posterior pregação.

5.2.6 Ensaio de resistência da ligação

Foi realizado o método de ensaio de resistência e rigidez de ligações pregadas paralelas às fibras, segundo EN 26891/1991: Timber Structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for determination of strength and deformation, onde o procedimento de carga consistiu em um incremento de carga de $0,2F_{est}$ por minuto, e ao atingir 40% de F_{est} , a carga foi mantida por 30 segundos. Após este período, procedeu-se à descarga, mantendo o valor do incremento de carga anterior, agora negativo, até aos 10 % de F_{est} , os quais foram mantidos por mais 30 segundos. Posteriormente seguiu-se o carregamento, ainda com o mesmo incremento de carga, até atingir 70% de F_{est} , e a partir disto o incremento de carga foi tal que a ruptura aconteceu nos próximos 3 a 5 minutos. A figura 28 mostra o diagrama de carregamentos adotado e a figura 29 mostra o ensaio sendo realizado.

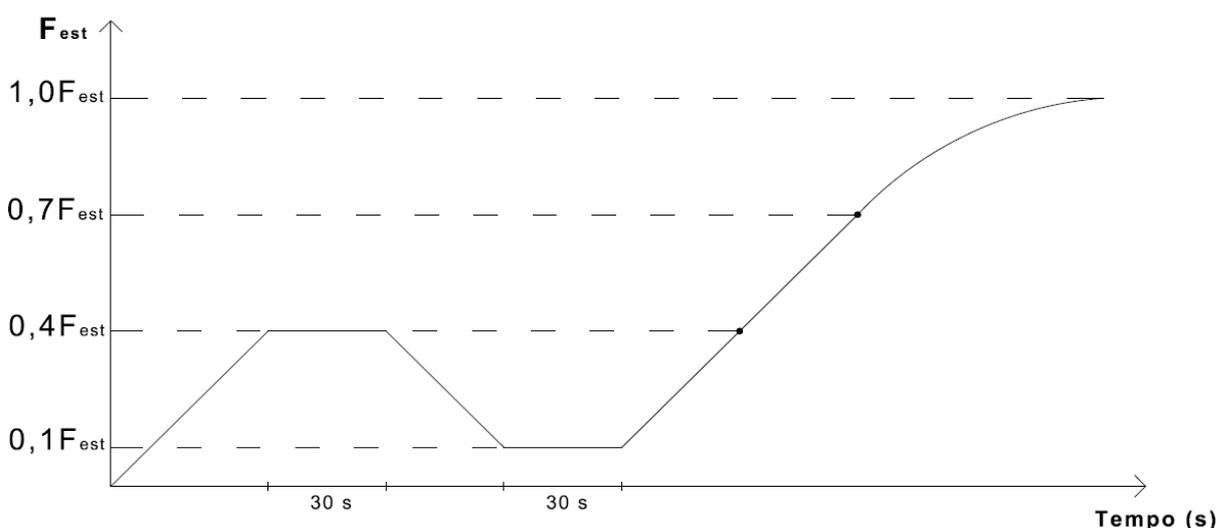


Figura 28 - Procedimento de carga
Fonte: Adaptado EN 26891 (1991)



Figura 29 – Ensaio de resistência da ligação

A figura 30 mostra os seis corpos de prova de ligação após a realização dos ensaios.



Figura 30 - Modos de falha dos corpos de prova da ligação pregada em madeira

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos através dos ensaios de umidade e densidade aparente da madeira são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios para determinação do teor de umidade e densidade aparente

Corpo de prova	Dimensões			Massa inicial (g)	Massa seca (g)	Teor de umidade (%)	Densidade ap. (kg/m ³)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)				
CP - 1	25,20	30,60	50,80	33,95	29,98	13,23%	866,54
CP - 2	25,40	30,40	49,50	32,28	28,40	13,65%	844,49
CP - 3	25,15	30,20	50,50	33,25	29,27	13,57%	866,79
CP - 4	25,25	30,50	49,45	33,32	29,32	13,65%	875,02
CP - 5	25,00	31,35	50,85	34,59	30,50	13,41%	867,85
CP - 6	25,20	45,50	49,40	48,30	42,51	13,61%	852,64
Média						13,52%	862,22
Desvio padrão						0,17	11,33
Coef. de Variação (%)						1,26%	1,31%

Os resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras da madeira são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira

Corpo de prova	Dimensões		Tensão máxima (MPa)	Modulo de elasticidade (MPa)
	X (mm)	Y (mm)		
CP - 1	49,70	50,00	65,50	16454
CP - 2	49,80	49,65	58,92	13622
CP - 3	50,00	49,65	65,03	15941
CP - 4	50,00	50,00	62,84	16558
CP - 5	50,15	49,85	64,15	16365
CP - 6	50,00	49,90	62,25	17963
Média			63,12	16150
Desvio padrão			2,40	1416
Coef. de Variação (%)			3,81 %	8,77 %

A tabela 4 mostra os resultados do ensaio de resistência ao embutimento da madeira.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de resistência ao embutimento da madeira

Corpo de prova	Resistência ao embutimento (MPa)
CP - 1	77,76
CP - 2	78,31
CP - 3	77,42
CP - 4	73,04
CP - 5	67,90
CP - 6	70,90
Média	74,22
Desvio padrão	4,29
Coef. de variação (%)	5,78 %

O EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) propõe uma equação empírica (equação 38) para determinação da resistência ao embutimento através da densidade da madeira e diâmetro do pino, já a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) permite admitir para a resistência ao embutimento paralelo às fibras o mesmo valor da resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Assim sendo a tabela 5 apresenta os valores estimados de resistência ao embutimento segundo o proposto pelas normas brasileira e europeia, o resultado do ensaio experimental e a diferença percentual dos valores teóricos em relação ao valor experimental.

Tabela 5 - Comparação entre resistências ao embutimento

	NBR 7190/97	EUROCODE 5	Resultado experimental (médio)
Resistência ao embutimento (MPa)	62,65	70,65	74,22
Diferença percentual	15,59%	4,81%	-

A tabela 6 mostra um resumo das propriedades da madeira Garapeira utilizada para a confecção dos corpos de prova para posterior ensaio de resistência da ligação pregada. Os ensaios de caracterização foram realizados nas mesmas condições de umidade que os ensaios de ligações.

Tabela 6 - Resultados das propriedades da madeira

Nome comum	Nome científico	Teor de umidade aparente (%)	$\rho_{ap,m}^{1)}$ (kg/m ³)	$f_{c0,m}^{2)}$ (MPa)	$f_{e0,m}^{3)}$ (MPa)
Garapeira	<i>Apuleia Leiocarpa</i>	13,52%	862,22	63,12	74,22

1) $\rho_{ap,m}$ é a massa específica aparente média sem correção de umidade
2) $f_{c0,m}$ é a resistência média a compressão paralela às fibras
3) $f_{e0,m}$ é a resistência média de embutimento da madeira paralelo às fibras

Os resultados dos ensaios de tração do prego liso padrão comercial 20x30 são mostrados na tabela 7. A resistência última foi calculada considerando o diâmetro nominal dos pregos de 4,4 mm.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração no prego

Corpo de prova	Força última de ruptura à tração (N)	Resistência última – f_u (MPa)
CP - 1	10652	700,79
CP - 2	11230	738,82
CP - 3	10229	672,96
CP - 4	10889	716,38
CP - 5	11220	738,16
CP - 6	11405	750,33
Média		719,57
Desvio padrão		26,45
Coef. de variação (%)		3,68 %

6.2 Resistência da ligação pregada em madeira

Os resultados dos ensaios de resistência das ligações são apresentados na tabela 8, sendo estes correspondentes a força máxima aplicada limitada a um deslocamento máximo de 15 mm, de acordo com a norma EN 26891. O baixo coeficiente de variação do ensaio agrega confiabilidade aos resultados obtidos.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de resistência da ligação pregada em madeira

Corpo de prova	Resistência da ligação – R_v (N)
CP - 1	30657
CP - 2	31400
CP - 3	30068
CP - 4	30956
CP - 5	29583
CP - 6	30254
Média	30486
Desvio padrão	652,61
Coef. de Variação (%)	2,14 %

Os cálculos para obtenção dos resultados teóricos da resistência de ligações com prego em madeira segundo os modelos propostos pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) e pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) são apresentados no Apêndice A. A tabela 9 mostra os resultados dos modelos analíticos, o resultado experimental médio, e as diferenças percentuais entre os valores estimados e o resultado experimental.

Tabela 9 - Resultados dos modelos analíticos, experimental médio e diferenças percentuais

	NBR 7190/97	EUROCODE 5 sem efeito de corda	EUROCODE 5 com efeito de corda	Resultado experimental (médio)
Resistência da ligação (N)	16360,6	23706,4	26798,4	30486,3
Diferença percentual	46,33%	22,14%	12,10%	-

Os resultados mostrados na tabela 9 são expressos em forma gráfica no gráfico 1, onde o eixo das abscissas apresenta os modelos analíticos e ensaio experimental, e o eixo das coordenadas os valores de resistências da ligação.

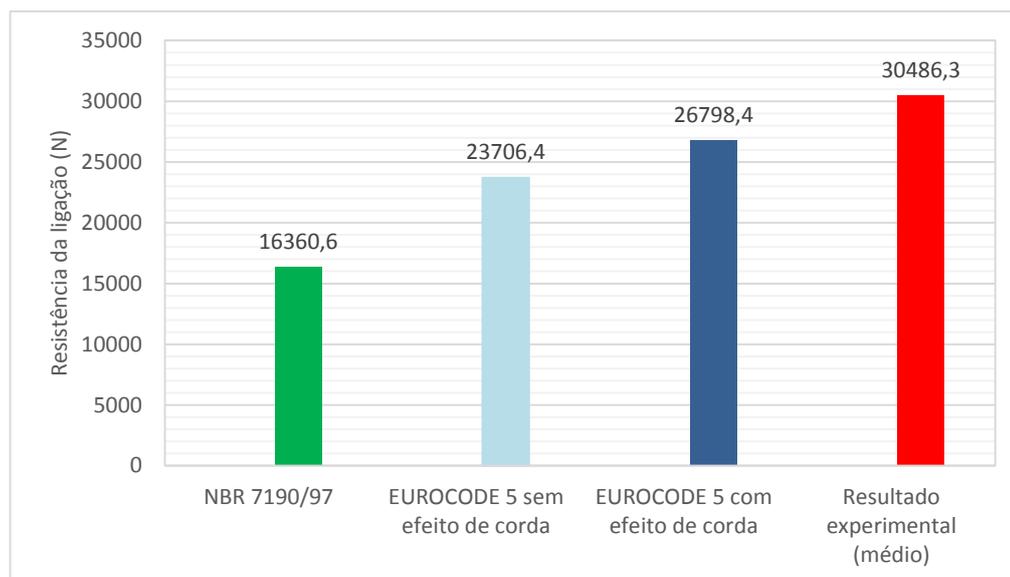


Gráfico 1 - Resistência da ligação

Analisando a linha das diferenças da tabela 9 e o gráfico 1, nota-se que o resultado obtido através do método de cálculo proposto pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) considerando o efeito de corda é o que mais se aproxima do resultado experimental; já o resultado obtido através do método de cálculo proposto pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) é o que mais se distancia.

Alguns fatores são contribuintes para tal distanciamento, um deles é o fato de o resultado analítico segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) ser oriundo da equação proposta para falha por flexão do pino metálico, que considera apenas a resistência ao escoamento do prego, diferente do EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) que considera a resistência última a tração do pino, além de considerar o atrito entre as peças e resistência ao arrancamento do pino. Outra razão pode estar relacionada com o método de ensaio utilizado, uma vez que o procedimento de carga foi realizado de acordo com norma europeia, que pode resultar em diferentes valores de resistência quando comparado a resultados de ensaios realizados segundo a norma brasileira, devido a diferença entre os limites de ensaio estipulados pelas normas.

Ao comparar os resultados teóricos, por considerar o momento plástico de flexão do prego, desconsiderar a resistência ao arrancamento do prego e o atrito entre as peças de madeira, a resistência da ligação segundo norma brasileira é até 38,9% inferior a norma europeia.

Tendo em vista a segurança, os resultados analíticos obtidos por ambas as normas são satisfatórios, visto que apresentaram resistências inferiores ao resultado experimental.

Quanto aos modos de falha, no modelo de cálculo proposto pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) a resistência da ligação é dada pelo modo de falha III, caracterizado predominantemente por flexão do pino. Já os cálculos feitos de acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...,1997) também apontam para falha por flexão do pino. Na figura 31 observa-se um corpo de prova de ligação aberto após o ensaio de resistência, onde é possível notar a deformação do pino metálico devido à flexão.



Figura 31 - Modo de falha do ensaio experimental

O gráfico 2 mostra a curva força-deslocamento do ensaio de resistência da ligação, pertencente ao corpo de prova 3. Nota-se que é uma curva típica de um comportamento plástico, devido a deformação do prego.

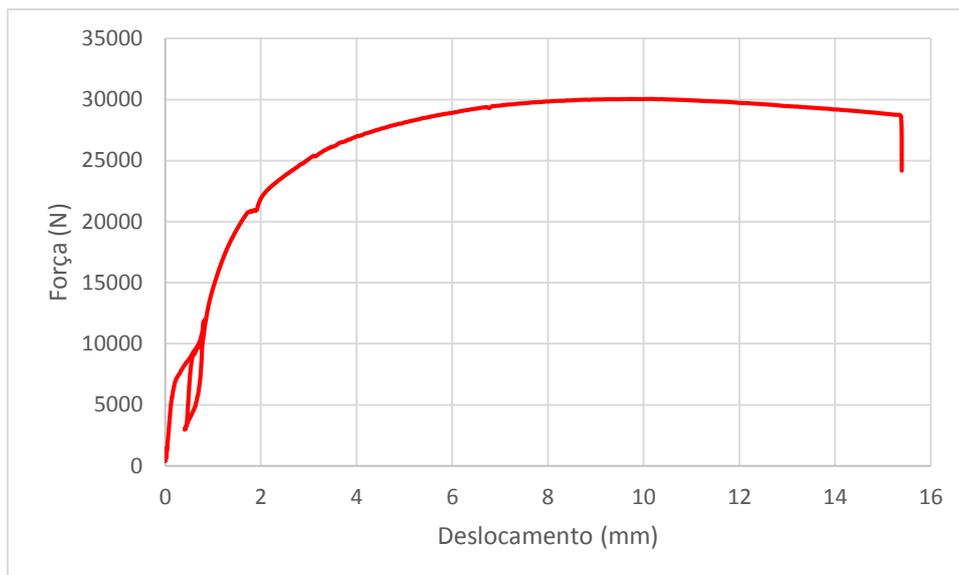


Gráfico 2 - Curva força-deslocamento típica dos corpos de prova de ligação (CP3)

7 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados comparando modelos teóricos de documentos normativos nacionais e internacionais com resultados experimentais, pode-se concluir que:

- Para ligações com pregos lisos em madeira da espécie *Apuleia Leiocarpa*, submetidos a ensaio segundo a norma europeia, o modelo de cálculo proposto pelo EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) se apresentou mais eficiente que o modelo da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

- As considerações e simplificações da NBR 7190/97 implicaram em valor teórico de resistência da ligação 38,9% inferior ao do modelo proposto pelo EUROCODE 5/04.

- Do ponto de vista da segurança, os modelos apresentados tanto pela NBR 7190/97 quanto pelo EUROCODE 5/04 são interessantes, por apresentarem resultados inferiores ao resultado experimental.

- O modo de falha obtido no ensaio experimental corresponde aos modos de falha propostos pelos cálculos analíticos.

- Mais estudos devem ser realizados a fim de validar a equação empírica proposta pelo EUROCODE 5/04 para cálculo de resistência ao embutimento para madeiras brasileiras.

- Sobre a resistência de ligações pregadas, mais estudos devem ser realizados, a fim de avaliar a eficiência do modelo de cálculo propostos pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) e EUROCODE 5 (EUROPEAN..., 2004) para espécies nativas com diferentes densidades, como também estudos que analisem a influência do método de ensaio na determinação da resistência das ligações.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Edward. Iano, Joseph. **Fundamentos da Engenharia de: Materiais e Métodos**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013), **NBR ISO 6892**: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, 2013, p. 70

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

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

CONSTRUDEIA. **Pregos**. Disponível em: <<http://construdeia.com/prego/>>. Acesso em: 11 out. 2015.

DASHÖFER HOLDING. **Tipologia das ligações**. Disponível em: <<http://reabilitacaodeedificios.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=12080>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of Timber Structures. Brussels, 2004.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN26891**: Timber Structures- Joints made with mechanical fasteners. General principles for determination of strength and deformation. European Standard, Brussels, 1991.

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

JORISSEN, André. **Double shear timber connections with dowel type fasteners**. College voor Promoties aangewezen, Technische Universiteit Delft, Países Baixos, 1998.

MENDES, Paulo Miguel Ferreira de Casto. **Ligações em estruturas de madeira: Tecnologia e dimensionamento segundo o Eucódigo 5**. 1995. 165 f. Dissertação (Mestre em Construções de Edifícios) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 1995.

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

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

ROOF TRUSS. **Products**. Disponível em: <<http://www.rooftruss.com.au/Products.aspx>>. Acesso em: 18 mai. 2016

SANTANA, Cláudia Lúcia de Oliveira. **Análise não-linear de pórticos planos de madeira com ligações semi-rígidas**. 2002. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SILVA, Ruben F. P. **Cálculo ao fogo de Ligações de Madeira**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

STAMFORD STONE. **Ripon College's Bishop Edward King Chapel**. Disponível em: <<http://www.stamfordstone.co.uk/casestudy/ripon-colleges-bishop-edward-king-chapel/>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

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

VELOSO, Luís Augusto Conte Mendes; MARTINEZ, Miguel Angel Buelta; ALVIM, Ricardo de C; ALMEIDA, Pedro Afonso de Oliveira. Sobre o Modelo de Johansen (EUROCODE 5) para o Cálculo da Resistência de Ligações de Peças de Madeira com Pinos Metálicos. In: EBRAMEM, 8, 2002, Uberlândia. 2002. **Anais...**1 CD-ROM.

WOOD CRAFT. Dowels. Disponível em: < <http://www.woodcraft.com/product/50m31/dowel-pins-38-diameter-2-length.aspx>>. Acesso em: 18 mai. 2016

APÊNDICE A – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PREGO EM MADEIRA SEGUNDO OS MODELOS PROPOSTOS PELA NBR 7190/97 E PELO EUROCODE 5/04;

Para fins de comparação, os valores de resistência ao embutimento da madeira e resistência última do aço do prego utilizados nos cálculos de resistência da ligação foram tomados como o valor médio obtido nos ensaios de caracterização dos materiais, não sendo transformados para valores característicos nem para valores de cálculo, sem a consideração de coeficientes de modificação ou minoração das resistências. Para as equações que consideram a resistência ao escoamento do aço do prego foi utilizado o valor mínimo determinado pelas normas brasileira e europeia, de 600 Mpa.

- NBR 7190/90

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{25}{4,4} = 5,68$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} = 1,25 \sqrt{\frac{600}{74,22}} = 3,55$$

Como $\beta > \beta_{lim}$, utiliza-se a equação 17 para cálculo da resistência da ligação (modelo de falha caracterizado por flexão do pino).

$$R_v = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,d} = 0,625 \cdot \frac{4,4^2}{3,55} \cdot 600 = 2045,07 \text{ N}$$

Uma vez que o resultado obtido pela equação 17 corresponde a um prego com uma seção de corte, deve-se multiplicar o resultado pelo total de seções e de pregos da ligação, obtendo o valor de capacidade de carga da ligação.

$$R_v = 2045,07 \cdot 8 = 16360,6 \text{ N}$$

Assim a capacidade de carga da ligação estimada utilizando o modelo analítico da NBR 7190/97 é de $R_v = 16360,6 \text{ N}$.

- EUROCODE 5/04

$$\beta = \frac{f_{e,k,2}}{f_{e,k,1}} = 1$$

O momento de flexão do pino foi calculado de acordo com a equação 36, para pregos lisos.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 719,57 \cdot 4,4^{2,6} = 10166 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

- Modo de falha (Ia):

$$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d = 74,22 \cdot 25 \cdot 4,4$$

$$F_{v,Rk1} = 8164,2 \text{ N}$$

- Modo de falha (Ib):

$$F_{v,Rk2} = f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta = 74,22 \cdot 25 \cdot 4,4 \cdot 1$$

$$F_{v,Rk2} = 8164,2 \text{ N}$$

- Modo de falha (Ic):

$$F_{v,Rk3} = \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk3} = \frac{74,22 \cdot 25 \cdot 4,4}{1 + 1} \cdot \left[\sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \cdot \left[1 + \frac{25}{25} + \left(\frac{25}{25} \right)^2 \right] + 1^3 \cdot \left(\frac{25}{25} \right)^2} - 1 \left(1 + \frac{25}{25} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk3} = 3381,7 + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

- Modo de falha (IIa):

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \cdot \frac{74,22 \cdot 25 \cdot 4,4}{2 + 1} \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 10166}{74,22 \cdot 4,4 \cdot 25^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk4} = 1,05 \cdot 3113,9 + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

- Modo de falha (IIb):

$$F_{v,Rk5} = 1,05 \cdot \frac{f_{e1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,k}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk5} = 1,05 \cdot \frac{74,22 \cdot 25 \cdot 4,4}{1 + 2} \left[\sqrt{2 \cdot 1^2 \cdot (1 + 1) + \frac{4 \cdot 1 \cdot (1 + 2 \cdot 1) \cdot 10166}{74,22 \cdot 4,4 \cdot 25^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk5} = 1,05 \cdot 3113,9 + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

- Modo de falha (III):

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{e1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \sqrt{2 \cdot 10166 \cdot 74,22 \cdot 4,4} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$F_{v,Rk6} = 1,15 \cdot 2576,8 + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

O acréscimo de resistência devido ao efeito de corda pode ser considerado no máximo como sendo 15% para pregos lisos, sendo assim a tabela A.1 apresenta os resultados das equações do EUROCODE 5/04 de acordo com cada modo de falha. Vale ressaltar que esta porcentagem deve ser aplicada apenas na parcela de Johansen, sem o acréscimo devido a força de atrito.

Tabela A.1 - Resultados das equações do EUROCODE 5/04 de acordo com o modo de falha

Modo de falha	Força calculada por plano de corte e por pino utilizado (N)	
	Sem efeito de corda	Com efeito de corda
Ia	8164,2	8164,2
Ib	8164,2	8164,2
Ic	3381,7	3888,2
IIa	3269,6	3736,7
IIb	3269,6	3736,7
III	2963,3	3349,8

A resistência da ligação é dada pelo modo de falha III, visto que corresponde ao menor valor dentre os resultados dos seis modelos de falha. Uma vez que os resultados das equações devem ser multiplicados pelo número de seções de corte nos pregos da ligação (oito no caso) temos que a resistência da ligação é:

- Sem efeito de corda: $F_v = 23706,4 \text{ N}$
- Com efeito de corda: $F_v = 26798,4 \text{ N}$