

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

NATALIA GARCIA COUTO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES MADEIRA-AÇO
COM CHAPAS LATERAIS EM CORTE DUPLO COM PARAFUSOS SEXTAVADOS
PASSANTES**

CAMPO MOURÃO

2017

NATALIA GARCIA COUTO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES
MADEIRA-AÇO COM CHAPAS LATERAIS EM CORTE DUPLO COM
PARAFUSOS SEXTAVADOS PASSANTES**

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

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO

2017



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES MADEIRA-AÇO COM CHAPAS LATERAIS EM CORTE DUPLO COM PARAFUSOS SEXTAVADOS PASSANTES

por

Natalia Garcia Couto

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19h00min do dia 30 de novembro de 2017 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. Ronaldo Rigobello

(UTFPR)

Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim

Corelhano

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Orientador

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda graça, benção, alegria e força proporcionadas em cada dia desses últimos anos. A minha família, meu irmão Gabriel, meus pais, Samuel e Suzana, vocês são meu porto seguro, minha base e meu maior exemplo de honestidade, amor, luta e fé, sem a força de vocês eu não teria conseguido chegar até aqui⁴. Ao meu namorado, Marcus, por toda paciência, compreensão, companheirismo e amor nos momentos bons e ruins, você é peça fundamental no meu caminho até aqui e você sabe disso. Aos meus familiares, meus avós, tios, primos, por todas as orações e torcida.

Ao amigo, orientador, tutor e professor Dr. Jorge Góes por todo o ensinamento, paciência e incentivo ao longo desses anos de faculdade. Seu cuidado paternal com nós será sempre lembrado, você é meu exemplo de profissional. Também ao amigo e técnico do Laboratório de Sistemas Estruturais, Maiko Sedoski, pelas longas horas trabalhadas e conselhos recebidos. Sem vocês esse trabalho nunca seria realizado. Aos meus professores, docentes do Departamento de Construção Civil (DACOC) por todos os ensinamentos passados dentro e fora da sala de aula.

Ao grupo PET Engenharia Civil UTFR por todas as experiências e capacitações proporcionadas, pelos os momentos de alegria e descontração, vocês fizeram esses anos serem ainda mais importantes, levarei essa família sempre comigo, torço muito por todos vocês. Por fim aos amigos que, de perto ou de longe, me apoiaram todos os dias. Aos companheiros de batalha, grupo conhecido como “Ceia dos Parças” que desde 2013 foram peças chaves nessa caminhada rumo a formação, agradeço por todos os trabalhos concluídos com sucesso, estudo para as provas e também pelo companheirismo, vocês formaram a minha família mourãoense, são pessoas sensacionais e que torço muito pela felicidade e sucesso de cada um de vocês.

RESUMO

COUTO, Natalia Garcia. **Avaliação experimental da resistência de ligações madeira - aço com chapas laterais em corte duplo com parafusos sextavados passantes**. 2017, 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

As ligações necessitam de um estudo profundo acerca do seu comportamento estrutural pois são consideradas pontos críticos das estruturas. No que diz respeito a ligações em elementos de madeira, um uso ainda pouco estudado no Brasil é o de estruturas mistas madeira-aço. O método de dimensionamento desse tipo de ligação, proposto pela ABNT NBR 7190:1997, é simplificado quando comparado com o apresentado pela norma europeia EUROCODE 5:2004. Assim sendo, este trabalho buscou estudar os diferentes modelos teóricos de cálculo para resistência de ligações madeira-aço com parafusos sextavados passantes recomendados pelas normas, e compara-los com os resultados obtidos experimentalmente. Foram realizados ensaios com corpos de prova em escala real seguindo a metodologia da EN 26891:1997, utilizando madeira da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira), chapas de Aço Carbono ASTM A36 de 6,35 mm de espessura e parafusos sextavados passantes ISO 4016 Classe 8.8 com diâmetro de 12 mm com porcas e arruelas. Analisando os resultados obtidos, foi possível observar que o resultado teórico apresentado pelo método de cálculo proposto pelo EUROCODE 5:2004 é mais adequado que o modelo da norma brasileira para o cálculo da resistência das ligações parafusadas entre os elementos de madeira e chapa de aço analisados.

Palavras-Chave: Ligação madeira-aço. Pinos metálicos. Estrutura mista. Parafusos passantes. Chapa de aço.

ABSTRACT

COUTO, Natalia Garcia. **Experimental evaluation of strength in double shear bolted timber – to – steel connections**. 2017, 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

The connections require a deep study of their structural behavior because they are considered critical points of the structures. About the connections in wood elements, a use still little studied in Brazil is that of steel-to-timber structures. The method of designing this type of connection, proposed by ABNT NBR 7190:1997, is simplified when compared to the EUROCODE 5:2004. Therefore, this paper presents to study the different theoretical models of calculation for resistance connections through bolt with nut and washer recommended by the norms, and compare them with the results obtained experimentally. The experiment was realized with test pieces in real scale, following the methodology of EN 26891: 1997, using Apuleia Leiocarpa (Garapeira) specie of wood, A36 Carbon 6.35 mm steel plates and ISO 4016 Class 8.8 12 mm bolts with nuts and washers. Analyzing the results obtained, it was observed that the theoretical result presented by the calculation method proposed by EUROCODE 5: 2004 is more adequate than the model of the Brazilian standard for the calculation of the resistance of steel-to-timber connections.

Keywords: Steel-to-timber connection. Metallic pins. Hybrid Structures. Bolt. Steel plates.

LISTA DE SÍMBOLOS

- $f_{y,k}$ Tensão de escoamento do pino.
- $f_{u,k}$ Tensão última de tração do pino.
- $f_{u,chapa}$ Valor teórico de tensão última de tração da chapa.
- $f_{y,chapa}$ Valor teórico de tensão de escoamento da chapa.
- t_1, t_2 Espessura da peça de madeira.
- β_1 Coeficiente de relação entre os valores de embutimento dos elementos de madeira, para as equações de Johansen e EUROCODE 5 (2004).
- $f_{e,1,k}, f_{e,2,k}, f_{e,0}$ Resistência de embutimento na direção paralela às fibras.
- $f_{e,90}$ Resistência de embutimento na direção perpendicular às fibras.
- $f_{e\alpha}$ Resistência de embutimento em uma direção qualquer.
- $f_{e\alpha}$ Resistência de embutimento em uma direção qualquer.
- α Ângulo de inclinação em relação às fibras.
- d_e Diâmetro externo da arruela,
- d_i Diâmetro interno da arruela.
- d Diâmetro do parafuso.
- t Espessura da chapa de aço.
- ρ_k Densidade aparente característica.
- α_e Parâmetro de relação entre resistência a compressão na direção paralela e resistência de embutimento na direção normal, segundo a ABNT NBR 7190:1997
- $F_{v,Rk}$ Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado.
- $M_{y,k}$ Momento resistente do pino.

- $F_{ax,Rk}$ Parcela de força referente ao Efeito de Corda segundo o EUROCODE 5:2004.
- n Número efetivo de pinos.
- n_0 Número convencional de pinos.
- U Teor de umidade da madeira.
- m_i Massa inicial da madeira.
- m_s Massa seca da madeira.
- $F_{bs,Rk}$ Força resistente referente ao Efeito *Block Shear* e *Plug Shear* segundo o EUROCODE 5:2004.
- $L_{tot,t}$ Comprimento total da ruptura perpendicular às fibras que sofre tração;
- $L_{tot,v}$ Comprimento total da ruptura devido a cortante;
- A_t Área da seção cortada na região parafusada que está submetida a tração.
- A_v Área da seção cortada na região parafusada está submetida a cortante.
- $F_{t,Rd}$ Força resistente ao colapso por rasgamento da ligação pino – chapa metálica.
- $F_{v,Rd}$ Força resistente do parafuso à força cortante.
- $N_{t,Rd}$ Força resistente à tração da chapa metálica.
- $F_{c,Rd}$ Força resistente à pressão de contato da ligação pino – chapa metálica.
- A_b Área bruta da seção transversal do parafuso.
- A_g Área bruta da seção transversal da chapa.
- A_n Área líquida da seção transversal da chapa.
- C_{ts} Coeficiente que considera a distribuição de tensão segundo a ABNT NBR 880:2008.
- $R_{vk,1}$ Resistência característica da ligação parafusada segundo a ABNT NBR 7190:1997.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de pregos	19
Figura 2 – Tipos de parafusos passantes: (a) parafuso francês, (b) parafuso sextavado com rosca inteira e (c) parafuso sextavado com rosca parcial.....	20
Figura 3 – Espaçamentos mínimos em ligações com pinos.....	29
Figura 4 – Pinos metálicos em corte simples	32
Figura 5 – Pinos metálicos em corte duplo	33
Figura 6 – (a) ruptura por corte do fuste do conector; (b) ruptura por ovalização do furo por plastificação do local da chapa na superfície de apoio do fuste do conector; (c) ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda ou entre dois furos consecutivos; (d) ruptura por tração da chapa na seção transversal líquida.	34
Figura 7 – Cisalhamento de Bloco	34
Figura 8 – Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2.....	37
Figura 9 – Situações com $Cts = 1,0$	38
Figura 10 – Situação com $Cts = 0,5$	38
Figura 11 – Modo de falha a	39
Figura 12 – Modo de falha b	40
Figura 13 – Modo de falha c	41
Figura 14 – Modo de falha d	42
Figura 15 – Efeito <i>Block Shear</i>	45
Figura 16 – Efeito <i>Plug Shear</i>	45
Figura 17– Procedimento de carga para o ensaio.....	50
Figura 17 – Corpos de prova para ensaio na direção paralela as fibras.....	51
Figura 18 – Corpos de prova para ensaio na direção normal as fibras	51
Figura 19 – Corpo de prova após a ruptura no ensaio de tração no pino.	52
Figura 20 – Representação do aparato em U: (A) vista superior (B) vista lateral (C) vista frontal com dimensões em mm	53
Figura 21 – Representação das chapas de ligação com dimensões em mm	53
Figura 22 – Chapas de ligação e aparato	54
Figura 23 – Representação gráfica do corpo de prova em vista frontal com dimensões em mm	54
Figura 24 – Vista Frontal do corpo de prova montado.....	54
Figura 25 – Representação do corpo de prova em vista lateral com dimensões em mm	54
Figura 26 – Vista lateral do corpo de prova montado	55
Figura 27 – Fixação dos relógios comparadores.....	55
Figura 28 – Corpo de prova sendo ensaiado	56
Figura 29 – Procedimento de carga para o ensaio.....	56
Figura 30 – Curva força x deslocamento típica dos corpos de prova (CP5).....	60
Figura 31 – Corpo de prova após a ruptura	61
Figura 32 – Corpo de prova desmontado após a ruptura da ligação.....	61
Figura 33 –Comparação entre os resultados analíticos e experimental	63
Figura 34 – Modo de falha da ligação madeira-madeira estudada por Silva Júnior.....	64
Figura 35 – Parafuso após a ruptura da ligação utilizado por Silva Júnior (2017)	64
Figura 36 – Parafuso após a ruptura da ligação utilizado por Silva Júnior (2017)	65
Figura 37 – Modo de falha da ligação madeira - aço	65

Figura 38 – Parafusos após a ruptura da ligação.....	66
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais usados em parafusos.....	20
Quadro 2 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 436.....	21
Quadro 3 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440 V.....	21
Quadro 4 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R.....	22
Quadro 5 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 125 A.....	22
Quadro 5 - Valores de α_e para diferentes diâmetros de pino (d).....	23
Quadro 6 – Valores limites de efeito corda.....	26
Quadro 7 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda.....	30
Quadro 8 – Modos de falha da ligação pino – madeira em corte simples.....	32
Quadro 9 – Chapa ligada por pino.....	37
Quadro 10 – Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações madeira-aço com chapas laterais em dupla seção de corte.....	43
Quadro 11 – Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações madeira-aço com chapas laterais em dupla seção de corte.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do ensaio de umidade e densidade	58
Tabela 3 – Resultados do ensaio de compressão paralela às fibras.....	58
Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência ao embutimento.....	59
Tabela 5 – Resultados do ensaio de resistência à tração do parafuso.....	59
Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência característica da ligação	60
Tabela 7 –Parâmetros utilizados.....	62
Tabela 8 – Comparativo entre os valores médios de resistências da ligação.....	62
Tabela 9 – Modo de falha da ligação	64
Tabela A.1 – Resultados teóricos obtidos pela metodologia de cálculo do EUROCODE 5:2004	75
Tabela B.1 – Resultados teóricos obtidos pela metodologia de cálculo da ABNT NBR 7190:1997.....	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 JUSTIFICATIVA	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA	18
4.1.1 Ligações com pinos metálicos	18
4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÃO COM PINOS METÁLICOS	23
4.2.1 Resistência ao embutimento.....	23
4.2.2 Momento resistente do parafuso.....	24
4.2.3 Atrito e Efeito de Corda.....	25
4.3 CAPACIDADE RESISTENTE DE UMA LIGAÇÃO AÇO-MADEIRA	30
4.3.1 ABNT NBR 7190:1997	31
4.3.1.1 Ligação pino – madeira	31
4.3.1.2 Ligação chapa de aço - pino.....	33
4.3.2 EUROCODE 5.....	38
4.3.2.1 Seções de corte simples.....	38
4.3.2.1.1 Modo de falha a.....	38
4.3.2.1.2 Modo de falha b.....	39
4.3.2.1.3 Modo de falha c.....	40
4.3.2.1.4 Modo de falha d.....	41
4.3.2.1.5 Modo de falha e.....	42
4.3.2.2 Dupla seção de corte	43
4.3.2.2.1 Chapas laterais finas e grossas:.....	43
4.3.2.2.2 Chapa central de qualquer espessura:	44
4.3.2.2 Efeito Block Shear e Plug Shear.....	45
5 METODOLOGIA	48
5.1 MATERIAIS	48
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO PARAFUSO	49
5.2.1 Determinação do teor de umidade da madeira	49
5.2.2 Resistência à compressão paralela às fibras da madeira	49
5.2.3 Resistência ao embutimento paralela às fibras da madeira	50
5.2.4 Resistência a tração do parafuso.....	51
5.3 MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	52
5.4 ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA.....	55
6 RESULTADOS	58
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	58
6.1.1 Ensaio de determinação do teor de umidade	58
6.1.2 Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira	58

6.1.3 Ensaio de determinação da resistência ao embutimento paralela às fibras	58
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO PARAFUSO	59
6.2.1 Determinação da resistência à tração do parafuso	59
6.3 RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO	59
6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
7 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCODE 5:2004	72
A.1 CHAPAS FINAS E GROSSAS DESCONSIDERANDO O EFEITO DE CORDA	72
A.2 CHAPAS FINAS E GROSSAS CONSIDERANDO O EFEITO DE CORDA.....	73
A.3 EFEITO BLOCK SHEAR E PLUG SHEAR	74
A.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	75
APÊNDICE B – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO SEGUNDO A ABNT NBR 7190:1997	77
B.1 LIGAÇÃO PINO – MADEIRA.....	77
B.2 LIGAÇÃO PINO – CHAPA METÁLICA	78
B.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os usos de estruturas híbridas são interessantes por combinarem benefícios de materiais diferentes para superar suas limitações individuais. Na construção civil, as estruturas em aço – concreto, aço – madeira e concreto – madeira são exemplos de estruturas híbridas ou mistas. Os benefícios do uso das estruturas mistas incluem aumento da capacidade de tração, melhoria no desempenho sísmico, resistência ao fogo, liberdade para diversificar a arquitetura e a sustentabilidade.

Em países do continente europeu, assim como Estados Unidos e Canadá, o uso da madeira e do aço como elemento estrutural é mais abrangente, devido ao maior nível de conhecimento técnico e de inovações tecnológicas no setor de construção civil. No Brasil, vem se observando um grande incremento da utilização desses materiais, devido a necessidade de buscar um método de construção mais sustentável, versátil e com menor tempo de execução.

O dimensionamento de ligações de um sistema estrutural deve ser sempre cauteloso, sendo as ligações pontos críticos das estruturas, visto que, o seu desempenho global está relacionado com o comportamento das mesmas. Isso ocorre, pois, para a utilização dos elementos estruturais, especialmente os de madeira, há grande dificuldade de se obter peças com dimensões requeridas em projeto, fazendo-se necessário uniões entre as disponíveis no mercado. Portanto, é necessário que seja dada a devida atenção ao dimensionamento das ligações a fim de oferecerem resistência, durabilidade e segurança à estrutura.

No Brasil, as ligações mais utilizadas para estruturas em madeira, devido ao baixo custo e facilidade de aplicação, são as ligações por pinos metálicos que podem ser pregos ou parafusos. No que diz respeito à resistência de ligações com pinos metálicos, as principais normas internacionais fazem uso do modelo de Johansen. Exemplos de documentos normativos que apresentam tal teoria em sua metodologia são a Norma Europeia, EUROCODE 5:2004, e a Norma Brasileira, ABNT NBR 7190:1997.

No que se refere a ligações entre elementos madeira - aço a norma brasileira é simplificada, diferente do EUROCODE 5:2004 que apresenta um modelo de cálculo mais detalhado e abrangente. Diante do exposto, um estudo comparativo entre o cálculo teórico proposto pela ABNT NBR 7190:1997 e a norma europeia, EUROCODE

5:2004 com valores obtidos experimentalmente é fundamental para analisar a eficiência de cada modelo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência a tração da ligação com parafusos sextavados passantes de uma estrutura em madeira - aço por meio de ensaios experimentais e comparar com os modelos teóricos de cálculo presente em documentos normativos nacionais e internacionais.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar modelos teóricos propostos pela ABNT NBR 7190:1997 e EUROCODE 5:2004 para cálculo de resistência a tração de ligações madeira - aço com parafusos sextavados passantes;
- Realizar ensaios laboratoriais preliminares padronizados a fim de caracterizar a madeira e o aço utilizados;
- Determinar a resistência da ligação madeira – aço em escala real através ensaios laboratoriais;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados teóricos.

3 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que as ligações de estruturas em madeira são consideradas pontos críticos, somado ao fato que, por estar ainda ganhando espaço na construção civil brasileira, não há muitos estudos sobre a utilização de estruturas mistas madeira – aço, é necessário que seja dado uma importância significativa para o dimensionamento dessas ligações.

A ABNT NBR 7190:1997, em sua abordagem sobre ligações madeira - aço com pinos metálicos indica um modelo de dimensionamento diferenciado e simplificado em relação a outras normas internacionais. Considerando também, que a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 se encontra em revisão, é importante que haja uma comparação com os modelos propostos por outras normas, como o EUROCODE 5:2004, assim como, com resultados obtidos por experimentos laboratoriais. Logo, será possível avaliar o modelo nacional atual e se oportuno, propor alterações caso seja constatado que não é o mais apropriado. O estudo do tema viabiliza um maior conhecimento do comportamento estrutural de ligações aço – madeira, contribuindo para que o dimensionamento torne-se mais preciso e seguro.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Ligações em madeira

As peças de madeira, em função da dificuldade de transporte, estrutura anatômica do material e das limitações de comprimento, principalmente da madeira serrada, faz-se necessário, na maioria dos casos, o uso de ligações para viabilizar a execução da estrutura com o comprimento desejável de projeto. De acordo com Calil Júnior et al (2003) há dificuldade de encontrar peças de madeiras de comprimento superior a sete metros para espécies tropicais, e cinco metros para espécies de reflorestamento. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), no caso de madeira serrada em geral o comprimento das peças não ultrapassa quatro ou cinco metros.

Para Porteous e Kermani (2007) em estruturas de madeira as ligações são pontos críticos no dimensionamento, sendo responsáveis pela resistência global da estrutura. As ligações constituem todos os dispositivos que permitem assegurar a ligação e a transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura. Essa transmissão de esforços, segundo Calil *et al.* (2003), podem convergir para uma pequena área, caracterizando a utilização de elementos de ligação (ligações mecânicas), assim como podem ser absorvidas por superfícies relativamente grandes, caracterizando as ligações coladas.

As ligações mecânicas, segundo a ABNT NBR 7190 :1997 podem ser constituídas por pinos metálicos (pregos ou parafusos), cavilhas (pinos de madeira torneados) e conectores (anéis metálicos ou chapas metálicas). As ligações com cola somente podem ser empregadas em juntas longitudinais da madeira laminada colada.

No cálculo das ligações, a ABNT NBR 7190:1997 não permite levar em conta o atrito das superfícies em contato, nem de esforços transmitidos por estribos, braçadeiras ou grampos. Além disso, deve-se respeitar os valores especificados de espaçamentos e pré-furação para evitar o fendilhamento da madeira em virtude da presença dos elementos de conexão.

4.1.1 Ligações com pinos metálicos

Devido ao baixo custo e facilidade de manutenção, não exigindo uma mão de obra especializada, os pinos metálicos são os elementos de conexão mais utilizados

no Brasil. Segundo Timber Engineering STEP 1 (1995), as ligações que utilizam pinos metálicos, possuem transmissão de esforços entre elementos de ligação do tipo “*Metal dowel type fasteners*”, onde a transferência é dada pela ação do elemento metálico de ligação. Neste tipo conexão, o comportamento é regido pelos modos de falha de Johansen, com pequenas adaptações para os diferentes tipos de conectores.

Usualmente, usa-se dois tipos de pinos metálicos: os parafusos e os pregos. Os pregos, segundo Pfeil e Pfeil (2013) são peças metálicas cravadas na madeira com impacto, são usados em ligações de montagem e também definitivas. No mercado, há diversos tipos de pregos com variados diâmetros, materiais e comprimentos, que buscam atender a maior demanda de aplicação possível. Na Figura 1 é possível ver os principais modelos disponíveis.

Figura 1 – Modelos de pregos

TIPOS DE PREGOS

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

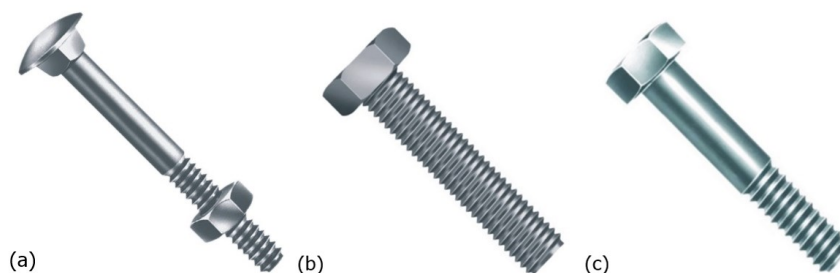
Fonte: Construteia (2012)

De acordo com Metálica (2017) os parafusos são elementos de fixação de eixo cônico ou cilíndrico que se diferenciam dos pregos pela existência de rosca, podendo ser parcial ou total. Os parafusos possuem variações devido ao modelo de cabeça, haste, formato da rosca e acionamento.

Segundo Pfeil e Pfeil (2013) os parafusos podem ser auto-atarraxantes ou com passantes com porcas e arruelas. Os parafusos com porcas e arruelas, são instalados em furos com folga máxima de 1 a 2 mm e depois são apertados por porcas, além disso, utilizam-se arruelas metálicas para reduzir a pressão de apoio na superfície da madeira.

Os parafusos passantes possuem cabeça hexagonal ou semiesféricas e diâmetros variados de até 30 mm, e são os mais empregados em ligações de peças estruturais de madeira. Os tipos comuns utilizados no país são demonstrados na Figura 2:

Figura 2 – Tipos de parafusos passantes: (a) parafuso francês, (b) parafuso sextavado com rosca inteira e (c) parafuso sextavado com rosca parcial.



Fonte: adaptado IPABRAC 2017

A ABNT NBR 7190:1997 recomenda que os parafusos estruturais tenham diâmetros não menores que 10 mm e resistência característica de escoamento (f_{yk}) de pelo menos 240 MPa.

Segundo Goés e Silva Junior (2017) os parafusos são especificados segundo a norma ISO 4016 e a ISO 898-1, que definem, respectivamente a geometria dos parafusos e as características do aço empregado. Os parafusos especificados segundo as normas ASTM A325a, ASTM A307 e ASTM A490 são, de um modo geral curtos, utilizados em estruturas metálicas. No Quadro 1 estão indicados os valores mínimos de resistência ao escoamento e da resistência a ruptura para cada tipo de parafuso.

Quadro 1 – Materiais usados em parafusos

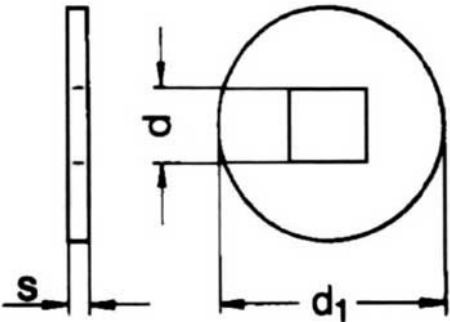
Especificação	f_y MPa	f_u MPa
ASTM A307	-	415
ISO 4016 Classe 4.6	235	400
ASTM A325 ^a	635	825
	560	725
ISO 4016 Classe 8.8	640	800
ASTM A490	895	1035
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000

^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.

Fonte: Goés e Silva Junior (2017)

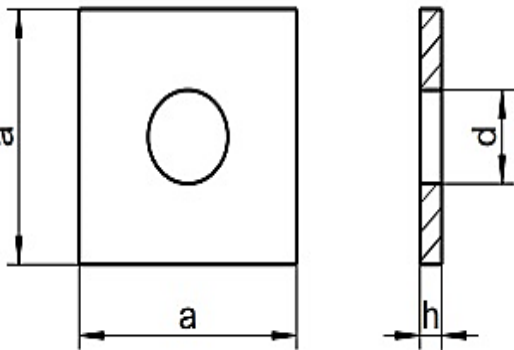
Em parafusos passantes, são usados porcas e arruelas. As arruelas são utilizadas entre a cabeça do parafuso e o elemento estrutural, e também entre a porca e a madeira, ou seja, são necessárias duas arruelas por parafuso. O uso das arruelas permitem distribuir as tensões proveniente do parafuso de porca por uma maior área de contato, evitando assim o esmagamento localizado da madeira. As arruelas para parafusos em estruturas de madeira são especificadas segundo a norma DIN 440:2001 e DIN 436:1990. Para ligações com chapas de aço, as arruelas são especificadas segundo a DIN 125 A, que foi substituída pela ISO 7089:2000. Os Quadros 2 a 5 abaixo apresentam as dimensões indicadas pelas normas.

Quadro 2 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 436

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

Fonte: Adaptado DIN 436

Quadro 3 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440 V

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

Fonte: Adaptado DIN 440

Quadro 4 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 440R

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

Fonte: Adaptado DIN 440

Quadro 5 - Dimensões das arruelas definidas segundo DIN 125 A

Tipos de Arruelas	d (mm)	d1 (mm)	s (mm)
M7	7,4	14	1,6
M8	8,4	17	1,6
M10	10,5	21	2
M12	13	24	2,5
M14	15	28	2,5
M16	17	30	3
M18	19	34	3
M20	21	37	3
M22	23	39	3
M24	25	44	4
M26	27	50	4
M27	28	50	4
M28	29	50	4
M30	31	56	4
M33	34	60	5

Fonte: Adaptado DIN 125

4.2 Fatores que influenciam na resistência de ligação com pinos metálicos

4.2.1 Resistência ao embutimento

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

No Brasil, o primeiro estudo sobre o embutimento de pinos metálicos em ligações de madeira foi apresentado por Almeida (1987), que afirma que a pressão de contato aplicada pelo pino causa um estado múltiplo de tensões na região do entorno do furo, que tende a embutir o pino na madeira.

A norma ABNT NBR 7190:1997 fornece as diretrizes para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento com pino metálico nas direções paralela (f_{e0}) e normal (f_{e90}) em relação às fibras, a partir da resistência a compressão paralela às fibras, como indica as Equações 1 e 2.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (1)$$

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (2)$$

Na resistência ao embutimento na direção normal as fibras também é utilizado o parâmetro α_e dado pelo Quadro 5 em função do diâmetro do pino.

Quadro 5 - Valores de α_e para diferentes diâmetros de pino (d)

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

Fonte: NBR 7190:1997

Segundo ABNT NBR 7190:1997 a resistência da madeira ao embutimento em uma direção qualquer ($f_{e\alpha}$), inclinada de um ângulo α em relação às fibras, pode ser

calculada pela Equação 3, com base nas resistências de embutimento na direção paralela (f_{e0}) e normal (f_{e90}).

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{e90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (3)$$

Segundo Santos et al (2008) os equacionamentos fornecidos pela norma brasileira são diferentes dos encontrados no documento normativo europeu EUROCODE 5: 2004 e americano NDS: 2001, onde, em vez da resistência à compressão na direção paralela às fibras, os documentos normativos levam em consideração como parâmetros o diâmetro do pino metálico e a densidade da madeira utilizada.

Segundo o EUROCODE 5:2004, para parafusos com diâmetros até 30 mm, a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras e para resistência com forças aplicadas formando um ângulo α com a direção das fibras ($f_{e,\alpha,k}$) podem ser determinadas pelas Equações 4 e 5, respectivamente. As equações são empíricas, com diâmetro do parafuso dado em mm, a densidade aparente em kg/m^3 e a capacidade resistente em MPa.

$$f_{e,0} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \quad (4)$$

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{e,0}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

Os valores de k_{90} são calculados pelas Equações 6, 7 e 8, para madeiras conífera, LVL (*Laminated Veener Lumer*) e folhosa, respectivamente. As equações são dadas em função do diâmetro do pino metálico (d).

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (6)$$

$$k_{90} = 1,30 + 0,015 \cdot d \quad (7)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (8)$$

4.2.2 Momento resistente do parafuso

Segundo Johansen (1949, apud Johnsson 2004), um dos fatores apontados como diretamente responsável pelo valor da resistência final das ligações por pinos metálicos, é o momento resistente do pino à flexão. O autor adotou em sua teoria a

resistência à flexão do pino metálico apenas ao seu limite elástico, dado pela Equação 9.

$$M_{y,k} = \frac{\pi \cdot f_y \cdot d^3}{32} \quad (9)$$

No entanto, a resistência do pino permanece crescente até alcançar seu limite plástico.

Em 1957 a teoria de Johansen foi estendida por Meyer (1957, apud Jorissen 1998) admitindo a capacidade plástica à flexão do pino metálico, dada pela Equação 10.

$$M_{y,k} = \frac{\pi \cdot f_y \cdot d^3}{6} \quad (10)$$

Blass & Krämer (2000), analisaram os experimentos de ligações com pinos metálicos de Jorissen (1998), e verificaram que na maioria dos casos o momento plástico não é totalmente desenvolvido, e assim, o momento plástico máximo do pino não é atingido. Os autores também chegaram a uma equação empírica simplificada onde a capacidade de flexão de acordo com a equação proposta resulta em valores significativamente menores. A equação desenvolvida por Blass & Krämer (2000), conforme a Equação 11, é atualmente utilizada no EUROCODE 5:2004.

$$M_{y,k} = \frac{180 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}}{600} \quad (11)$$

Sendo:

$f_{u,k}$ a resistência última característica a tração do conector em MPa;

d o diâmetro do pino em mm;

$M_{y,k}$ momento resistente do parafuso (N.mm);

4.2.3 Atrito e Efeito de Corda

Segundo Porteus and Kermani (2007), as ligações recebem acréscimo de resistência devido a duas causas básicas, conhecidos como efeitos de segunda ordem. O primeiro ocorre quando o coeficiente de atrito entre as peças conectadas

sofre acréscimo com o carregamento. O segundo é devido a de contenção lateral que o pino ao ser deformado provoca na ligação, conhecido como efeito de corda (Rope Effect).

Quando o carregamento é aplicado, as 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 constituintes da ligação. O EUROCODE 5 adota coeficiente de atrito igual a 1,05 nos modelos de falha que o conector possui uma rótula plástica e 1,15 nos modelos que o conector tem duas rótulas plásticas (PORTEOUS; KERMANI, 2007).

O efeito de corda pode ser gerado pela compressão das arruelas na madeira, ou da chapa de aço no caso de ligações madeira - aço, e pela rotação do pino metálico ao se deformar. Para Reichert (2009) o efeito ocorre quando o deslocamento entre as peças provoca rotação do pino. As arruelas são comprimidas na parte externa da ligação, aumentando sua resistência, fazendo com que a resistência a compressão sob a mesma, seja um dos parâmetros a ser considerado.

O EUROCODE 5:2004 apresenta para ligações madeira-madeira com parafusos, o efeito de corda como sendo $F_{ax,Rk} / 4$ somados a parcela de Johansen. O valor de $F_{ax,Rk}$ deve ser obtido através dos parâmetros de resistência a tração do pino, resistência ao embutimento da arruela na parte externa da ligação e a aplicação dos valores limites apresentados no Quadro 6 nas resistências obtidas por Johansen.

Quadro 6 – Valores limites de efeito corda

CONECTOR	LIMITE
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%

Fonte: adaptado de EUROCODE 5

No presente estudo, para análise do efeito referente a resistência à tração do pino, é utilizada a Equação 12, sendo esta proposta pela NBR 8800:2008 com valores característicos:

$$F_{ax,Rk} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} f_{u,k} \quad (12)$$

Sendo:

d o diâmetro do pino;

$f_{u,k}$ a resistência característica a ruptura do pino;

Para a determinação da contribuição devido aos esforços gerados pela compressão da arruela na parte externa da ligação, o EUROCODE 5 considera que a tensão máxima gerada pelo embutimento da arruela encontra-se em uma área no interior da peça que possui valor empírico igual a três vezes a área efetiva (A_{ef}) da mesma. Para cálculo da área efetiva da arruela em ligação entre elementos madeira - madeira, utiliza-se a Equação 13:

$$A_{ef} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (13)$$

Sendo:

d_e o diâmetro externo da arruela;

d_i o diâmetro interno da arruela;

Para ligações parafusadas entre elementos de madeira - aço, para cálculo da área efetiva (A_{ef}), segundo o EUCODE 5, deve ser considerada como a área circular com diâmetro igual ao menor valor indicado pela Equação 14, sendo t a espessura da chapa de aço e d o diâmetro do parafuso utilizado:

$$A_{ef} = \text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot (12 \cdot t)^2}{4} \\ \frac{\pi \cdot (4 \cdot d)^2}{4} \end{array} \right. \quad (14)$$

Com a área efetiva calculada, o valor da contribuição devido ao efeito de compressão gerada pela a arruela deve ser determinada segundo a Equação 15, sendo essa válida para ambos os tipos de ligações:

$$F_{ax,Rk} = A_{ef} \cdot 3 \cdot f_{c90,k} \quad (15)$$

Sendo A_{ef} a área efetiva do parafuso e $f_{c90,k}$ a resistência característica da peça de madeira à compressão normal as fibras.

A terceira análise indicada pelo EUROCODE 5 para cálculo do efeito de corda é feita considerando os valores limites indicados no Quadro 6 aplicados nos modos de falhas propostos por Johansen, que consiste nas equações do EUROCODE 5:2004 sem a parcela devido ao atrito. A Equação 16 indica a relação a ser considerada:

$$(Modo de falha segundo Johansen).0,25 \quad (16)$$

Sendo assim, ainda segundo o EUROCODE 5:2004 o valor efetivo devido ao efeito de corda a ser considerado para a determinação dos modos de falha da ligação, deve ser o menor valor entre a relação apresentada abaixo:

$$\text{minimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_{ef} \cdot 3 \cdot f_{c90,k}}{4} \\ \frac{\pi d^2 f_{u,k}}{8} \end{array} \right. (Modo de falha segundo Johansen).0,25$$

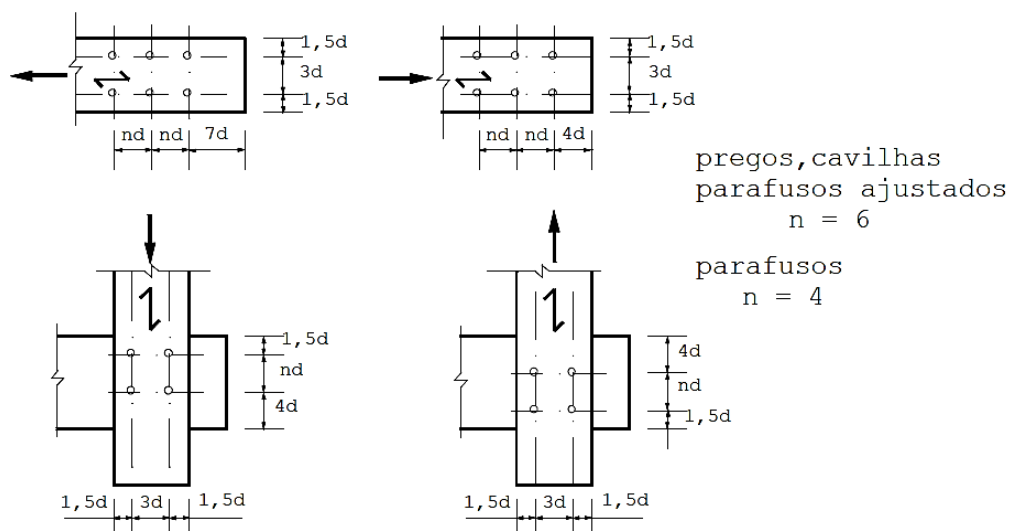
4.2.4 Espaçamentos entre pinos

Segundo as especificações da ABNT NBR 7190:1997, para ligações com pinos metálicos são feitas as seguintes recomendações:

- 1) 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;
- 2) Do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas: 7 d;
- 3) Do centro do último pino à extremidade de peças comprimidas: 4 d;
- 4) Entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicular às fibras: 3 d;
- 5) 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;
- 6) 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;
- 7) 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.

Com o descrito acima, os espaçamentos são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Espaços mínimos em ligações com pinos



Fonte: Adaptado NBR 7190 (1997)

No caso de ligações madeira - aço, deve ser adotado o menor valor entre os espaçamentos especificados para cada material. Segundo a ABNT NBR 8800:2008, o espaçamento mínimo é determinado como:

A distância entre centros de furos-padrão, alargados ou alongados, não pode ser inferior a $2,7 d_b$ de preferência $3 d_b$, sendo d_b o diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada. Além desse requisito a distância livre entre as bordas de dois furos consecutivos não pode ser inferior a d_b .

Além do espaçamento mínimo, segundo a ABNT NBR 8800:2008 também especifica o espaçamento máximo entre parafusos

- Em elementos pintados ou não sujeitos à corrosão, o espaçamento máximo não pode exceder 24 vezes a espessura da parte ligada menos espessa, nem 300mm.
- Em elementos sujeitos à corrosão atmosférica, executados com aços resistentes à corrosão, não pintados, o espaçamento não pode exceder 14 vezes a espessura da parte ligada menos espessa nem 180 mm.

A norma também determina a distância mínima de um furo às bordas, não sendo permitida a distância de um furo-padrão em relação a qualquer borda de uma ligação inferior aos valores indicados no Quadro 7. Já para os furos alongados ou alargados não pode ser inferior ao valor indicado no Quadro 7 acrescidos de $\beta \cdot d_b$, sendo β definido

$\beta = 0,20$ para furos poucos alongados na direção perpendicular à borda considerada;

$\beta = 0,75$ para furos muito alongados na direção perpendicular à borda considerada;

$\beta = 0$ para furos alongados na direção paralela à borda considerada;

$\beta = 0,12$ para furos alargados;

Quadro 7 – Distância mínima do centro de um furo-padrão à borda

Diâmetro d_b		Borda cortada com serra ou tesoura (mm)	Borda laminada ou cortada a maçarico (mm)
Pol	Mm		
-		22	19
-	16	29	22
-		32	26
-	20	35	27
-	22	38	29
-	24	42	31
-		44	32
-	27	50	38
-	30	53	39
-		57	42
-	36	64	46
	>36	1,75 db	1,25 db

^a São permitidas distâncias inferiores às desta Tabela, desde que a equação aplicável de 6.3.3.3 seja satisfeita.

^b Nesta coluna, as distâncias podem ser reduzidas de 3 mm, quando o furo está em um ponto onde a força solicitante de cálculo não exceda 25% da força resistente de cálculo.

^c Nas extremidades de cantoneiras de ligação de vigas e de chapas de extremidade para ligações flexíveis, esta distância pode ser igual a 32 mm.

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008

4.3 Capacidade resistente de uma ligação aço-madeira

Segundo Hilário (2013) um dos usos de chapas metálicas em ligações, é para reforço em uma estrutura. Através do seu posicionamento em zonas estratégicas é possível aumentar a capacidade resistente da madeira à compressão perpendicular à fibra: por ser mais rígida que a madeira, uma chapa metálica oferece um caminho alternativo para a transmissão de cargas da ligação. Pode também haver um aumento da capacidade resistente da madeira à tração perpendicular as fibras, prevenindo a rotura frágil de uma ligação. Ainda segundo o autor, as chapas atuam como um apoio ou engastamento para o pino metálico, dependendo da sua espessura.

No presente trabalho, será estudada a ligação madeira – aço com parafusos sextavados passantes com porcas e arruelas.

4.3.1 ABNT NBR 7190:1997

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, a resistência de um pino, correspondente a uma dada seção de corte entre uma peça de madeira e uma peça de aço, é determinada pela menor das duas resistências, uma referente à ligação do pino com a madeira e a outra à ligação do pino com a parede da peça metálica. A determinação da resistência referente à ligação do pino com a madeira é feita com os mesmos critérios estabelecidos para a ligação de duas peças de madeira. A determinação da resistência referente à ligação do pino com a peça de aço é feita de acordo com os critérios da ABNT NBR 8800:2008.

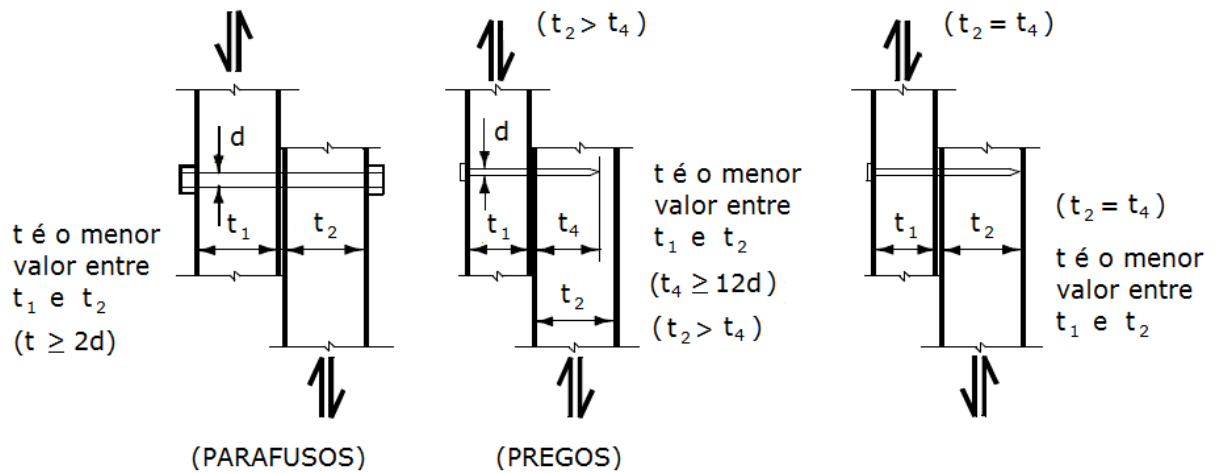
4.3.1.1 Ligação pino – madeira

Segundo a ABNT NBR 7190 (1997), a resistência total de um pino de ligação é dada pela soma das resistências referentes às suas diferentes seções de corte. Nas ligações com até oito pinos em mesma linha dispostos de forma paralela ao esforço a ser transmitido, a resistência total é equivalente a soma das resistências de cada um dos pinos. Nas ligações com mais de oito pinos, os pinos suplementares devem ser considerados com apenas 2/3 de sua resistência individual. Assim, com “n” sendo o número de pinos efetivos, temos o número efetivo de pinos (n_0) calculado conforme Equação 17.

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (17)$$

Para uma seção de corte é levado em consideração à resistência ao embutimento (f_{ed}), a resistência de cálculo ao escoamento do pino (f_{yd}) e o seu diâmetro (d), a espessura convencional t , sendo o valor de tal espessura o menor entre t_1 e t_2 , conforme é indicado na Figura 4.

Figura 4 – Pinos metálicos em corte simples



Fonte: Adaptado Revisão ABNT NBR 7190:2011

O valor correspondente da resistência do pino metálico para ligação de uma seção de corte, é determinado em função de alguns parâmetros, dados pelas Equações 18 e 19:

$$\beta_1 = \frac{t}{d} \quad (18)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,k}}{f_{e,k}}} \quad (19)$$

Sendo t a espessura indicada na Figura 4, d o diâmetro do pino metálico, $f_{y,k}$ a resistência de escoamento do pino, $f_{e,k}$ a resistência ao embutimento da madeira.

O valor de cálculo da resistência de um pino, correspondente a uma seção de corte é dada pelas equações no Quadro 8:

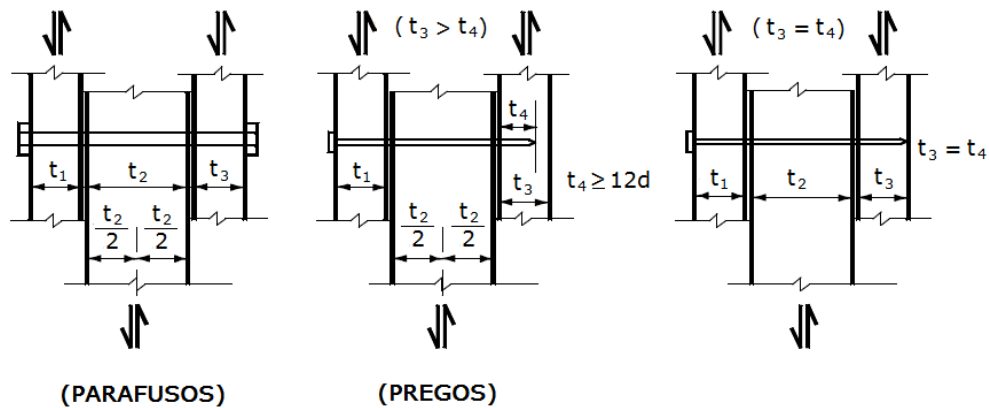
Quadro 8 – Modos de falha da ligação pino – madeira em corte simples

I – Embutimento na Madeira	$\beta_1 \leq \beta_{lim}$	$R_{vk,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta_1} f_{e,k}$	(20)
II – Flexão do Pino	$\beta_1 > \beta_{lim}$	$R_{vk,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,k}$	(21)

Fonte: Adaptado ABNT NBR 7190:1997

Em seções de corte duplo, utiliza-se a mesma análise que a de corte simples, considerando t com o menor dos valores entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções, e entre $t_2/2$ e t_3 na outra, como indica a Figura 5.

Figura 5 – Pinos metálicos em corte duplo



Fonte: Adaptado Revisão ABNT NBR 7190:2011

4.3.1.2 Ligação chapa de aço - pino

A ABNT NBR 8800:2008 separa as análises dos esforços nos parafusos da ligação dos outros elementos da ligação. Para os parafusos, os esforços podem ser de tração, cortante ou ação em conjunto de ambos, avaliando os efeitos causados nos parafusos para cada um dos casos. As análises dos outros elementos, varia de acordo com o tipo e também a posição da força em que ele está submetido.

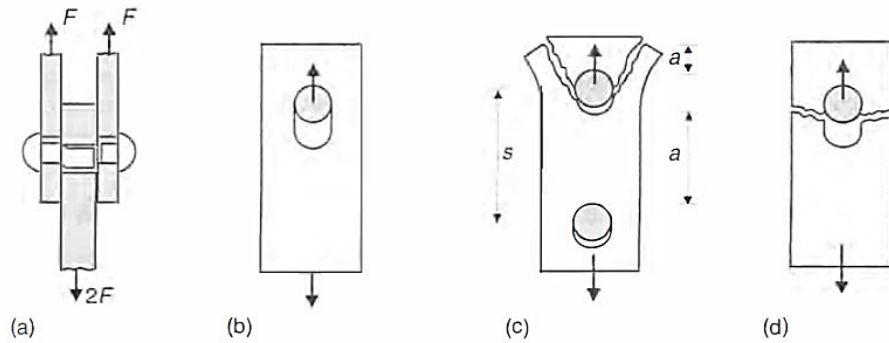
Nas ligações madeira-aço os esforços que os parafusos estarão submetidos comumente configura-se em cortante, sendo assim, as análises serão de acordo com o equacionamento devido a esse esforço.

Segundo Pfeil e Pfeil (2009) os modos de colapso nas ligações entre chapas de aço - conectores metálicos são: colapso do conector, rasgamento da chapa ou ovalização do furo e tração da chapa. Na Figura 6 está representado esses modos de colapso.

Além dos citados, nos casos de perfis de chapas finas tracionados e ligados por conectores, pode haver a ruptura da seção líquida e também o colapso por rasgamento ao longo de uma linha de conectores. Nesse tipo de colapso, denominado cisalhamento de bloco, conforme ilustrado na Figura 7, ocorre a ruptura do segmento do perfil que recebe a ligação, envolvendo cisalhamento nos planos paralelos à força (áreas A_v) e tração no plano normal à força (área A_t). A ruptura da área tracionada

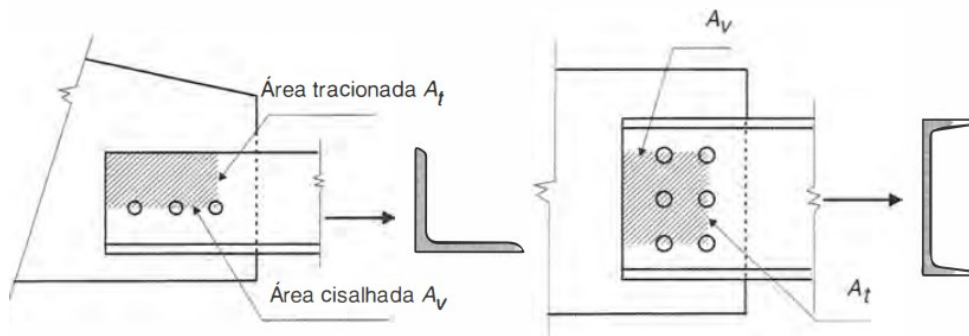
pode estar acompanhada da ruptura ou do escoamento das áreas cisalhadas, o que fornece a menor resistência.

Figura 6 – (a) ruptura por corte do fuste do conector; (b) ruptura por ovalização do furo por plastificação do local da chapa na superfície de apoio do fuste do conector; (c) ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda ou entre dois furos consecutivos; (d) ruptura por tração da chapa na seção transversal líquida.



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

Figura 7 – Cisalhamento de Bloco



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

a) Cisalhamento do pino

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 a resistência de cálculo devido ao corte do parafuso pode ser dada pela Equação 22, utilizada para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas em que o plano de corte passa pela rosca e parafusos comuns em qualquer situação, e também pela Equação 23, para parafusos de alta resistência e barras redondas rosqueadas em que o plano de corte não passa pela rosca :

$$F_{v,Rd} = 0,4 \frac{A_b f_{u,k}}{\gamma_{a2}} \quad (22)$$

$$F_{v,Rd} = 0,5 \frac{A_b f_{u,k}}{\gamma_{a2}} \quad (23)$$

Sendo:

$f_{u,k}$ a tensão de ruptura à tração do aço do parafuso;

$\gamma_{a2} = 1,35$ referente a solicitações originadas de combinações normais;

A_b a área bruta da seção transversal do parafuso:

$$A_b = d_b^2 \pi \quad (24)$$

d_b diâmetro do parafuso ou diâmetro externo da rosca da barra redonda rosqueada;

b) Pressão de contato em furos

Segundo a ABNT NBR 8800:2008, a força resistente de cálculo à pressão de contato na parede do furo, considerando o rasgamento entre furos consecutivos ou entre o furo e a borda externa e dada pelas equações condicionadas as situações abaixo:

- Para furos padrões, alargados e pouco alargados, em qualquer direção, furos muito alargados na direção da força.

- Deformação para forças de serviço for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \quad (25)$$

- Deformação para forças de serviço não for uma limitação de projeto:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,5 \cdot l_f \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{3,0 \cdot d_b \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \quad (26)$$

- Para furos muito alongados na direção perpendicular à da força.

$$F_{c,Rd} = \frac{1,0 \cdot l_f \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,0 \cdot d_b \cdot t_{chapa} \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \quad (27)$$

Sendo:

$f_{u,chapa}$ a tensão de ruptura à tração do aço da chapa;

$\gamma_{a2} = 1,35$ referente a solicitações originadas de combinações normais;

d_b diâmetro bruto do parafuso;

t_{chapa} a espessura da chapa/parte ligada;

A força resistente total é igual a soma das forças resistentes à pressão de contato calculadas para todos os parafusos.

c) Tração na chapa

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 para chapas tracionadas conectadas devem ser verificados os seguintes estados limites: o escoamento da seção bruta e ruptura da seção.

- Escoamento da seção bruta é dada pela Equação 28:

$$N_{t,Rd} = A_g \frac{f_{y,chapa}}{\gamma_{a1}} \quad (28)$$

- Ruptura da seção líquida é dada pela Equação 29:

$$N_{t,Rd} = A_e \frac{f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \quad (29)$$

Com:

$$A_e = A_n \cdot C_t \quad (33)$$

Sendo:

$\gamma_{a1} = 1,10$ e $\gamma_{a2} = 1,35$ para esforços decorrentes de combinações normais de ações;

A_g a área bruta da seção transversal da chapa;

$f_{y,chapa}$ a resistência ao escoamento do aço da chapa;

$f_{u,chapa}$ a resistência à ruptura do aço da chapa;

A_n área líquida da chapa. A norma defini como sendo a soma dos produtos da espessura pela largura líquida de cada elemento, calculado para ligações parafusadas, como:

- 1) Em ligações parafusadas, a largura dos furos deve ser considerada 2,0 mm maior que a dimensão máxima desses furos, conforme o Quadro 9, perpendicular à direção da força aplicada (caso se possa garantir que os furos sejam executados com broca, pode-se usar a largura igual a dimensão máxima);
- 2) No caso de uma série de furos distribuídos transversalmente ao eixo da barra, em diagonal a esse eixo ou em ziguezague, a largura líquida dessa parte da barra deve ser calculada deduzindo-se da largura bruta a soma das larguras de todos os furos em cadeia, e somando-se para cada linha ligando dois furos a quantidade $s^2/(4g)$, sendo s e g ,

respectivamente, os espaçamentos longitudinal e transversal (gabarito) entre os dois furos (Figura 8);

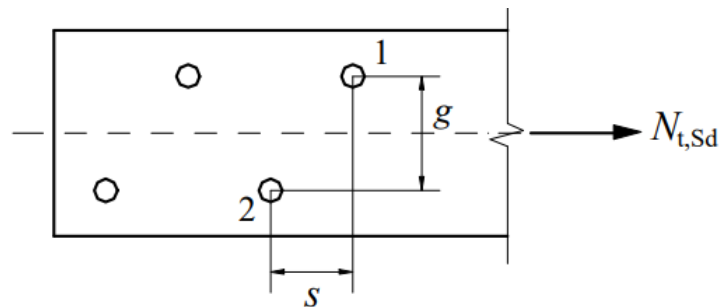
- 3) A largura líquida crítica daquela parte da barra será obtida pela cadeia de furos que produza a menor das larguras líquidas para as diferentes possibilidades de linha de ruptura;
- 4) Para cantoneiras, o gabarito g dos furos em abas opostas deve ser considerado igual à soma dos gabaritos medidos a partir da aresta da cantoneira, subtraída de sua espessura;

Quadro 9 – Chapa ligada por pino

	Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
Dimensões em milímetros	≤ 24	$d_b + 1,5$	$d_b + 5$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 6)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$
	27	28,5	33	$28,5 \times 35$	$28,5 \times 67,5$
	≥ 30	$d_b + 1,5$	$d_b + 8$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 9,5)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$

Fonte: ABNT NBR 8800:2008

Figura 8 – Ilustração dos espaçamentos s e g entre os furos 1 e 2



Fonte: ABNT NBR 8800:2008

C_t coeficiente de redução de área líquida. Esse coeficiente, para seções transversais não abertas, assume o valor de 1,0 quando a força de tração for transmitida diretamente para cada um dos elementos da seção transversal da barra por soldas ou parafusos.

d) Colapso por rasgamento

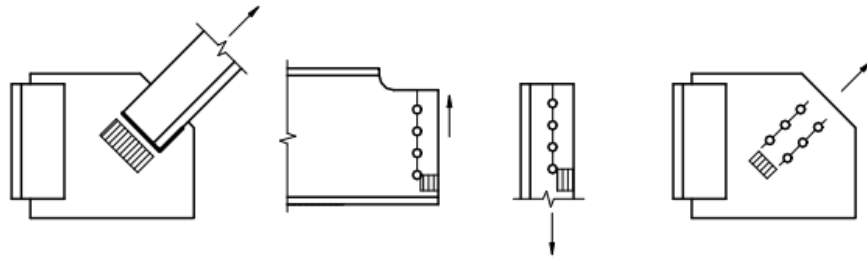
Esse fenômeno pode ser analisado conforme a Equação 30:

$$F_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{az}} (0,60 \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{az}} (0,60 \cdot f_{y,chapa} \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nt}) \quad (30)$$

Sendo $f_{y,chapa}$ a resistência ao escoamento do aço da chapa e $f_{u,chapa}$ sua resistência última à ruptura. A_{nv} e A_{gv} as áreas líquida e bruta cisalhadas,

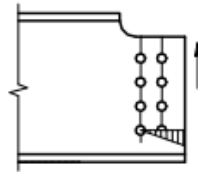
respectivamente. A_{nt} a área líquida tracionada e $C_{ts} = 1,0$ quando a tensão de tração na área líquida é uniforme e $C_{ts} = 0,5$ para tensão não uniforme, conforme o indicado nas Figura 9 e 10.

Figura 9 – Situações com $C_{ts} = 1,0$



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

Figura 10 – Situação com $C_{ts} = 0,5$



Fonte: ABNT NBR 8800 (2008)

4.3.2 EUROCODE 5

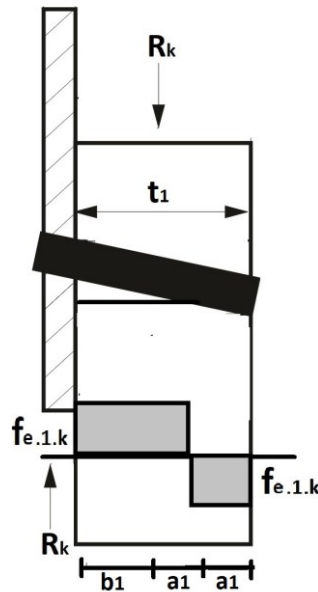
Para ligação de madeira - aço com um único plano de corte, o EUROCODE 5 apresenta, inicialmente, cinco modos de falha reunidos em dois grupos, onde o parâmetro de divisão é a espessura da chapa de aço. A chapa de aço é classificada, segundo a norma europeia, como fina quando espessura é inferior ou igual a $0,5d$, sendo d o diâmetro do conector. As chapas de aço de espessura maiores ou iguais a d , sendo a tolerância nos diâmetros dos orifícios inferiores a $0,1d$ são classificadas como grossas (DEBARBOUILLE, 2011). Além dos cinco modos citados, em ligações entre elementos de madeira e aço é recomendado a verificação do efeito *block shear* e *plug shear*, segundo o EUROCODE 5 - Anexo A. Para determinar a resistência da ligação, é utilizado o menor valor encontrado entre os modos de falha analisados de acordo com os elementos utilizados na ligação.

4.3.2.1 Seções de corte simples

4.3.2.1.1 Modo de falha a

Os modos de falha de uma ligação com uma placa fina dão-se com a criação de nenhuma ou uma rótula plástica no conector. No modo de falha em que não existe a criação de uma rótula plástica no conector, este rotaciona dentro da ligação. Por equilíbrio de momentos é possível de obter a capacidade resistente da ligação, presente na Equação 25. O modo de falha é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Modo de falha a



Fonte: Adaptado Debarbouille (2011)

Fazendo o somatório de momentos seção de corte e igualando a zero, é possível obter a resistência característica através da Equação 31:

$$0 = f_{e,1,k} \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right)$$

$$a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

$$b_1^2 + 2t_1b_1 - t_1^2 = 0$$

$$b_1 = t_1(\sqrt{2} - 1)$$

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{eh,1,k} = 0,4 \cdot d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k} \quad (31)$$

Sendo,

$f_{e,1,k}$ - Resistência ao embutimento da madeira;

t_1 - Espessura da peça de madeira;

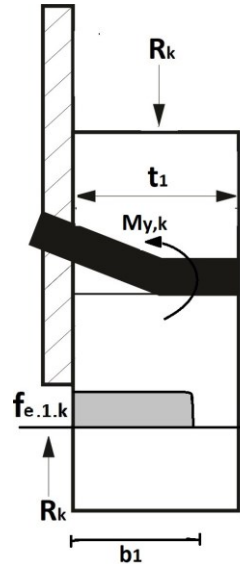
$F_{v,Rk}$ - Resistência característica na seção de corte;

$M_{y,k}$ - Momento resistente do parafuso;

4.3.2.1.2 Modo de falha b

Neste modo de falha é analisada de criação de uma rótula plástica, que é formada dentro do elemento estrutural de madeira. O modo de falha é representado na Figura 12, e com o equilíbrio de momentos fornece a resistência a resistência da ligação através da Equação 32.

Figura 12 – Modo de falha b



Fonte: Adaptado Debarbouille (2011)

$$0 = -M_{y,k} + f_{e,1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2}$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{2M_{y,k}}{f_{e,1,k} \cdot d}}$$

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{e,1,k} = \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,1,k}} \quad (32)$$

Segundo o EUCODE 5, neste modo de falha, deve-se acrescentar 15 % do efeito devido ao atrito entre o parafuso e a peça de madeira, e também, pode ser somada a parcela devido ao efeito de corda ($F_{ax,Rk}$), tendo assim a equação 33:

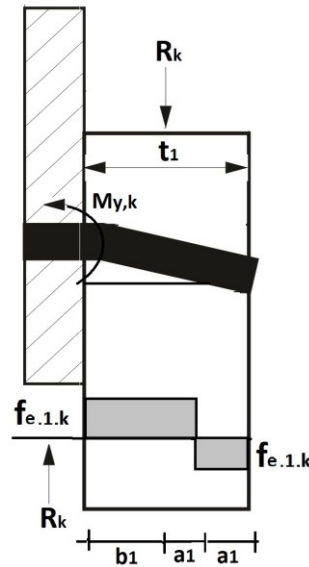
$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,1,k}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (33)$$

4.3.2.1.3 Modo de falha c

Segundo Hilário (2013), os modos de falha com uma placa de aço espessa são três, correspondendo à criação de nenhuma, uma e duas rótulas plásticas no conector. No modo em que não existem rótulas plásticas no conector, a ruptura da ligação é dada pelo esmagamento da madeira, como dado no caso de ligações

madeira-madeira. No modo de falha com a criação de uma rótula plástica (Modo de Falha III), esta ocorre na secção onde o aço e a madeira se encontram. Por equilíbrio de momentos obtém-se a Equação 34. O modo de falha é representado na Figura 13.

Figura 13 – Modo de falha c



Fonte: Adaptado Debarbouille (2011)

Fazendo o somatório de momentos na secção de corte, tem-se:

$$M_{y,d} = f_{e,1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2} + f_{e,1,k} \cdot d \cdot a_1 \left(t_1 - \frac{3a_1}{2} \right) - f_{e,1,k} \cdot d \cdot a_1 \left(t_1 - \frac{a_1}{2} \right)$$

$$a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

$$b_1^2 + 2t_1b_1 - \left(t_1^2 + \frac{4M_{y,k}}{f_{e,1,k} \cdot d} \right) = 0$$

$$b_1 = t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,k}}{f_{e,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right)$$

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{e,1,k} = d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k} \sqrt{2 + \frac{4M_{y,k}}{d \cdot t_1^2 \cdot f_{e,1,k}}} - 1 \quad (34)$$

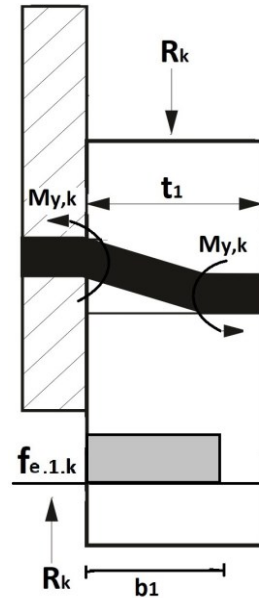
Adicionando o efeito de corda ($F_{ax,Rk}$), obtém-se a Equação 35:

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{e,1,k} = d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k} \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,k}}{d \cdot t_1^2 \cdot f_{e,1,k}}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (35)$$

4.3.2.1.4 Modo de falha d

No modo de rotura há a formação de duas rótulas plásticas, estas ocorrem no elemento estrutural de madeira e na secção que une a chapa grossa e a madeira, como apresentado na Figura 14. Por equilíbrio de momentos obtém-se a Equação 36.

Figura 14 – Modo de falha d



Fonte: Adaptado Debarbouille (2011)

$$2M_{y,k} = f_{e,1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2}$$

$$b_1 = 2 \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{e,1,k} \cdot d}}$$

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{e,1,k} = 2\sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,1,k}} \quad (36)$$

Adicionando o efeito de corda e 15% de coeficiente de atrito, temos a Equação 37:

$$F_{v,Rk} = d \cdot b_1 \cdot f_{e,1,k} = 2,3\sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,1,k}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (37)$$

4.3.2.1.5 Modo de falha e

Nessa análise, será considerado que a falha ocorrerá na madeira, sendo assim:

$$F_{v,Rk} = d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k} \quad (38)$$

4.3.2.2 Dupla seção de corte

Nas ligações aço-madeira pode existir mais do que um plano de corte. O comportamento da ligação é analisado considerando se as placas de aço estão entre elementos estruturais ou fora, resultando para cada situação, em modos de falha distintos. No entanto, as capacidades resistentes de cada um dos modos de falha resultantes são iguais aos de um plano de corte, como no caso das ligações madeira-madeira

O EUROCODE 5:2004 considera, assim como na equação de um plano de corte, um aumento de 15% no caso equivalente a uma rótula plástica numa seção do conector no elemento estrutural de madeira.

O valor para a resistência das ligações com parafusos passantes entre as peças de madeira e chapas de aço deve ser o menor das equações apresentadas nos no Quadro 10 e 11.

4.3.2.1.1 Chapas laterais finas e grossas:

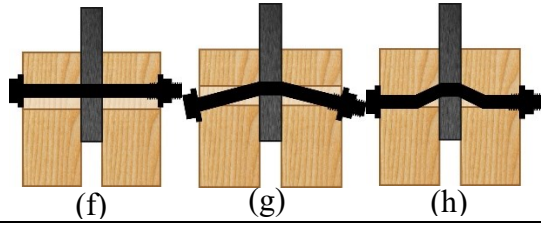
Quadro 10 – Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações madeira-aço com chapas laterais em dupla seção de corte

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado	
j	$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{e,2,k}$	(39)
k	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,2,k} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}$	(40)
l	$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{e,2,k}$	(41)
m	$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,2,k} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}$	(42)

Os modos de falha j e l são iguais e podem ser usados para qualquer espessura de chapa, os modos k e m são utilizados para chapas finas e grossas, respectivamente.

4.3.2.1.2 Chapa central de qualquer espessura:

Quadro 11 – Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações madeira-aço com chapas laterais em dupla seção de corte

		
Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado	
F	$F_{v,Rk} = d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k}$	(43)
G	$F_{v,Rk} = d \cdot t_1 \cdot f_{e,1,k} \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,k}}{d \cdot t_1^2 \cdot f_{e,1,k}}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$	(44)
H	$F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,1,k} + \frac{F_{ax,Rk}^2}{4}}$	(45)

Sendo:

$f_{e,1,k}$ e $f_{e,2,k}$ – Resistência ao embutimento da madeira;

t_2 – Espessura da peça de madeiram (central);

t_1 – Espessura da peça de madeiram (lateral);

$F_{ax,Rk}$ – Efeito de corda;

$M_{y,k}$ – Momento resistente do parafuso;

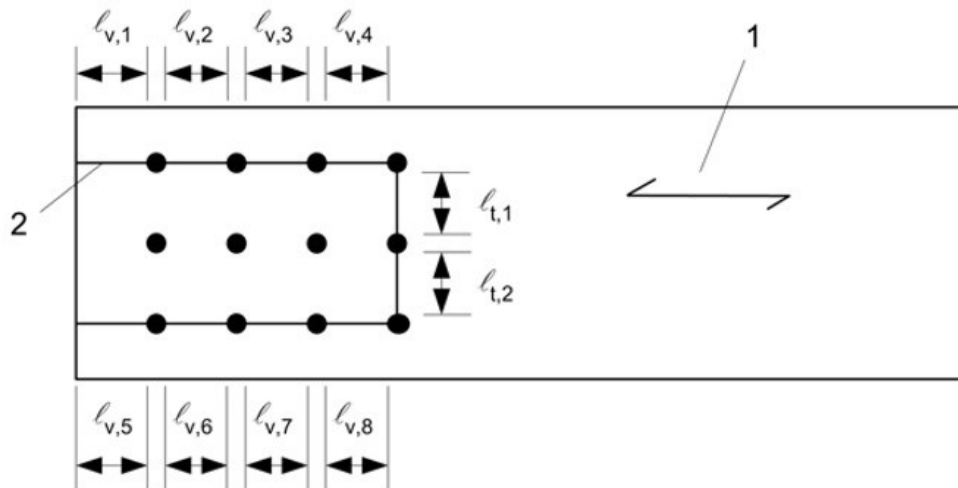
$F_{v,Rk}$ – Resistência característica na seção de corte;

As chapas de aço de espessura inferiores ou iguais a $0,5d$ são classificadas como finas e as de espessura maiores ou iguais a d , com diâmetro de pré-furação menor ou igual a $1,10d$, são classificadas como chapa grossa. A resistência de ligações com espessura da chapa de aço entre uma placa fina e grossa deve ser calculada por interpolação linear entre os menores valores obtidos entre as resistências apresentadas pelos equacionamentos correspondentes.

4.3.2.2 Efeito *Block Shear* e *Plug Shear*

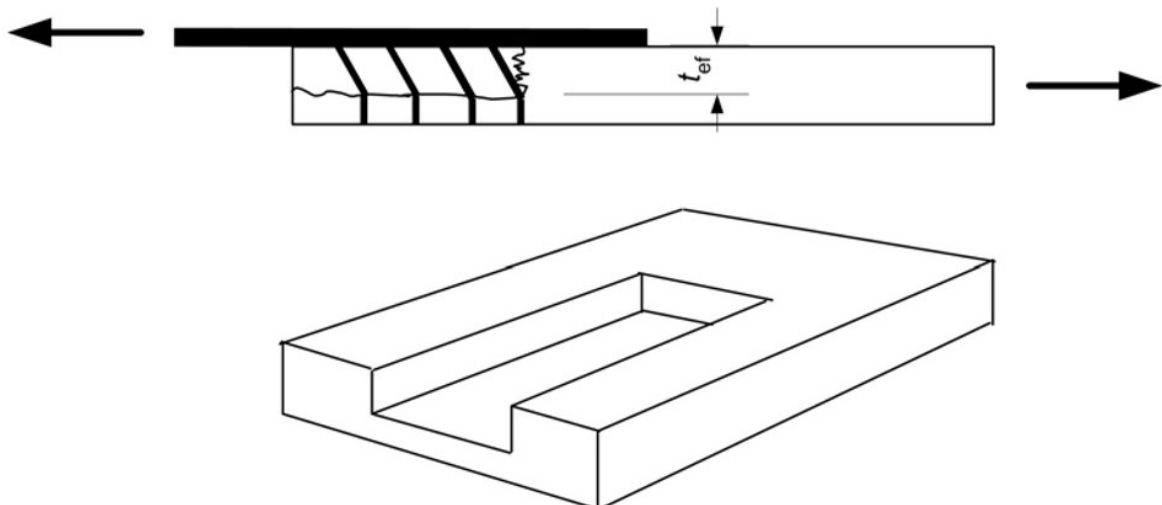
Segundo o EUROCODE 5:2004 para ligações do tipo madeira - aço com múltiplos parafusos, submetidas a forças paralelas às fibras aplicada próxima ao elemento de madeira deve ser verificada a capacidade de carga devido ao efeito de ruptura ao longo do perímetro da ligação, denominada de *Block Shear* e *Plug Shear*. A resistência devido a esse efeito pode ser calculada através da Equação 46, e os modos de falha podem ser observados nas Figuras 15 e 16:

Figura 15 – Efeito *Block Shear*



Fonte: EUROCODE 5:2004

Figura 16 – Efeito *Plug Shear*



Fonte: EUROCODE 5:2004

$$F_{bs,Rk} = \text{máximo} \begin{cases} 1,5 \cdot A_t \cdot f_{t,o,k} \\ 0,7 \cdot A_v \cdot f_{v,k} \end{cases} \quad (46)$$

Sendo:

$f_{t,o,k}$ resistência a tração paralela as fibras da madeira; t_1

$f_{v,k}$ resistência a cortante da madeira;

A_t área da seção cortada na região parafusada perpendicular às fibras que está submetida a tração, que é definida através das Equações 47 e 48:

$$A_t = L_{tot,t} \cdot t_1 \quad (47)$$

$$L_{tot,t} = \sum_i l_{t,i} \quad (48)$$

Com A_v sendo a área da seção cisalhada na região parafusada paralela às fibras que está submetida ao efeito de força cortante, encontrada através das Equações 49 e 50. A Equação 49 é utilizada para os modos de falha e, f, j/l, k e m, e a Equação 50 para os demais modos.

$$A_v = \begin{cases} L_{tot,v} \cdot t_1 \\ \frac{L_{tot,v}}{2} \cdot (L_{tot,t} + 2 \cdot t_{ef}) \end{cases} \quad (49)$$

$$(50)$$

$$L_{tot,v} = \sum_i l_{v,i} \quad (51)$$

$L_{tot,t}$ é o comprimento total da ruptura perpendicular às fibras que sofre tração;

$L_{tot,v}$ é o comprimento total da ruptura devido a cortante;

$l_{i,t}$ e $l_{i,v}$ são obtidos conforme as figuras 15 e 16;

$M_{y,Rk}$ momento característico do parafuso;

$f_{e,1,k}$ resistência ao embutimento da madeira;

t_1 espessura da peça de madeira;

t_{ef} espessura efetiva da região de ruptura, dependente dos modos de falha conforme

as relações abaixo:

- Chapas finas:

$$t_{ef} = \begin{cases} 0,4 \cdot t_1 \\ 1,4 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{1,e,k} \cdot d}} \end{cases} \quad (52)$$

$$(53)$$

Sendo as Equações 52 e 53, utilizadas respectivamente, pelos modos de falha a e b.

- Chapas grossas

$$t_{ef} = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{f_{e,1,k}}} & (54) \\ t_1 \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{M_{y,Rk}}{f_{e,1k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] & (55) \end{cases}$$

Sendo a Equação 54 utilizada para os modos de falha d, e, h, e a Equação 55 para os modos c e g.

5 METODOLOGIA

Com o objetivo de obter a resistência da ligação madeira - aço com parafusos sextavados passantes foi realizada comparações entre diferentes modelos de cálculo analítico propostos pela ABNT NBR 7190:1997 e EUROCODE 5:2004 com os resultados experimentais da resistência de ligações em escala real. O método experimental da pesquisa foi conduzido de forma que, inicialmente, realizou-se a caracterização dos materiais que foram utilizados, montagem da estrutura e posteriormente o ensaio, atendendo as exigências das normas ABNT NBR 7190:1997, EUROCODE 5:2004 e EN 26891:1991.

Além disso, os ensaios foram feitos no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Campo Mourão.

5.1 Materiais

Foram confeccionados corpos de prova de madeira da espécie *Apuleia leiocarpa* (Garapeira) para a caracterização e também para os ensaios de ligações. A madeira utilizada foi adquirida já com classificação visual em uma empresa da cidade de Campo Mourão e permaneceu armazenada até atingir a umidade de equilíbrio, em torno de 12% em conformidade com ABNT NBR 7190:1997. Realizou-se um controle periódico do teor de umidade por meio de medidor elétrico Digisystem DL 2000.

Os pinos utilizados são os parafusos sextavados de rosca parcial com diâmetro de 12 mm (M12) produzidos em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8. As arruelas utilizadas possuem diâmetro interno igual a 13,5 mm e diâmetro externo igual a 24,0 mm, especificadas segundo a norma DIN 125 A..

As chapas que compõem a ligação madeira - aço são de 6,35 mm de Aço Carbono A36. Seu dimensionamento foi feito baseado nas distâncias entre furos mínimas exigidas para as peças em madeira, por essas serem mais críticas do que as exigidas para estruturas em aço. Além das chapas das ligações, necessitou-se de aparatos metálicos conectados às peças de madeira para que fosse possível a ligação da mesma com a máquina de ensaio. Esses aparatos são compostos por duas chapas em seção U de 6,50 mm e duas peças retangulares maciças de seção 25x50 mm e comprimento de 150 mm, localizadas entre as chapas em U e a madeira.

5.2 Caracterização da madeira e do parafuso

5.2.1 Determinação do teor de umidade da madeira

Com o propósito de caracterizar a madeira utilizada, primeiramente, 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 ABNT NBR 7190:97, anexo B. Inicialmente, foi obtida a massa inicial (m_i) do corpo de prova em balança com exatidão. Posteriormente, os corpos de prova foram colocados na estufa, com temperatura de 100° C. Durante a secagem, mediu-se a massa a cada 6h, até a obtenção de variação menor que 0,5 % em relação a última pesagem, indicando assim a massa seca (m_s). Por fim, foi possível obter o teor de umidade através da Equação 56:

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (56)$$

Em que:

m_i = a massa inicial da madeira, em gramas.

m_s = a massa da madeira seca, em gramas.

Após a determinação do teor de umidade, calculou-se o volume (V_s) de todos corpos de prova utilizados. Com as massas secas calculadas anteriormente, foi determinada a densidade aparente, através da Equação 57:

$$\rho_{x\%} = \frac{m_{x\%}}{V_{x\%}} \quad (57)$$

Onde:

$m_{x\%}$ = massa em uma determinada umidade, dada em g;

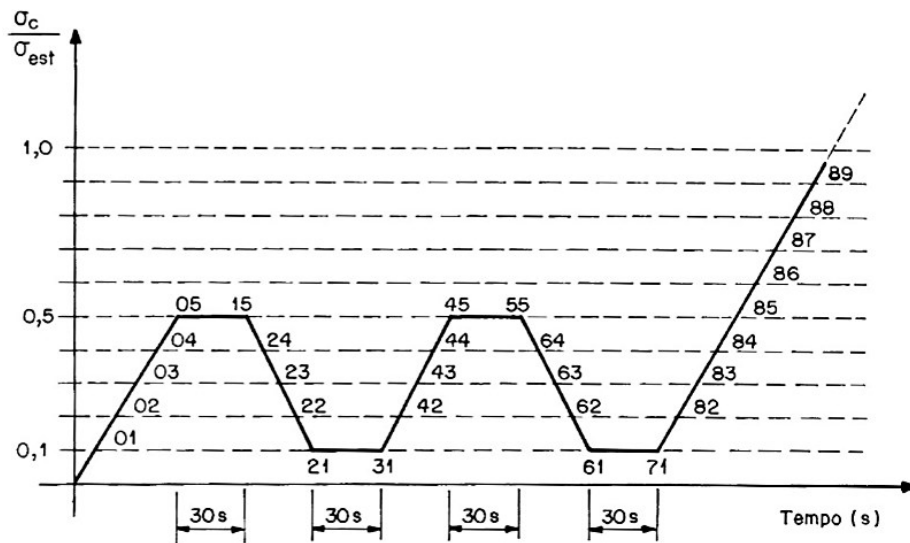
$V_{x\%}$ = volume em um determinada umidade, dado em cm³;

5.2.2 Resistência à compressão paralela às fibras da madeira

A caracterização da resistência da madeira quanto a compressão paralela às fibras foi feita segundo o procedimento contido no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

Consistiu em extrair seis corpos de prova, com seção transversal de 50 mm x 50 mm por 150 mm de comprimento, que foram submetidos a um carregamento monotônico crescente de 10 MPa/min na máquina universal de ensaios EMIC DL30000, do Laboratório de Estruturas da UTFPR Campus Campo Mourão, aplicando-se dois ciclos de carga e descarga, de acordo com o procedimento especificado no diagrama de carregamento da Figura 17, até atingir a força máxima de ruptura do corpo de prova.

Figura 17– Procedimento de carga para o ensaio



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

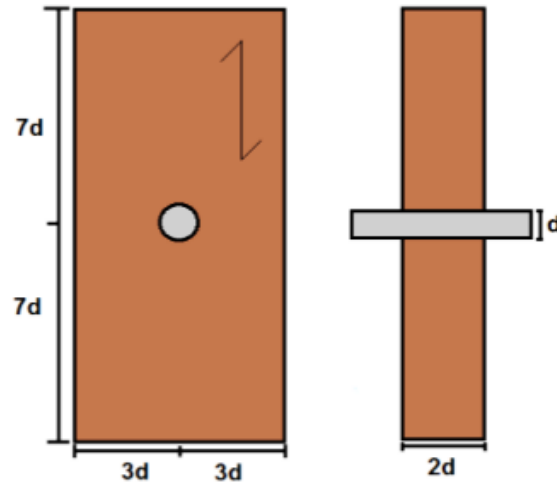
5.2.3 Resistência ao embutimento paralela às fibras da madeira

Para a determinação da resistência ao embutimento da madeira paralelo às fibras utilizou-se os procedimentos segundo a norma EN 383:2007. Para Almeida (2014), a norma considera a resistência da madeira ao embutimento ($f_{e,k}$) igual ao quociente da máxima força resistida pelo corpo de prova (F_{max}) ou a força que provoca o deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e o corpo de prova (F_{5mm}) pelo produto do diâmetro do parafuso (d) e a espessura da peça de madeira (t), como indica a Equação 58:

$$f_{e,k} = \frac{F_{max}}{t.d} \text{ ou } \frac{F_{5mm}}{t.d} \quad (58)$$

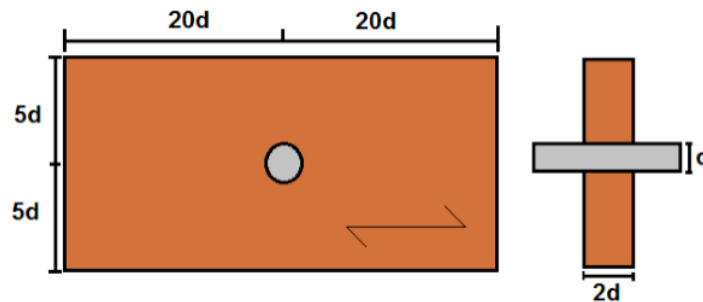
A configuração dos corpos de prova para realização do ensaio na direção paralela e normal as fibras estão representadas nas Figura 17 e 18.

Figura 17 – Corpos de prova para ensaio na direção paralela as fibras



Fonte: Almeida (2014)

Figura 18 – Corpos de prova para ensaio na direção normal as fibras



Fonte: Almeida (2014)

Estimou-se a resistência ($F_{e,est}$) por meio de ensaio destrutivo de um corpo de prova mesma amostra. Após ter o valor da $F_{e,est}$, segundo a EN 383:2000, aplicou-se um ciclo de carregamento de até 40% dessa força, mantendo durante 30 segundos, seguido de um descarregamento até atingir 10%, mantendo novamente por mais 30 segundos. Em seguida, aplicou-se um carregamento até ocorrer a ruptura do corpo de prova ou um deslocamento relativo de 5 mm entre o pino metálico e a madeira.

5.2.4 Resistência a tração do parafuso

No presente trabalho, devido os parafusos serem do mesmo lote dos utilizados por Silva Junior (2017) em sua pesquisa, serão utilizados os resultados dos ensaios realizados pelo mesmo.

Os parafusos utilizados foram de diâmetro 12 mm (M12), de aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8, que foram caracterizados segundo o recomendado pela ABNT NBR ISO 6892:2013. O ensaio foi realizado na máquina geral de ensaios EMIC DL300000, que consistiu em aplicar uma carga axial contínua e crescente até que ocorresse a ruptura do corpo de prova. Silva Júnior (2017) realizou o procedimento com três parafusos, a Figura 19 apresenta um dos corpos de prova após a ruptura.

Figura 19 – Corpo de prova após a ruptura no ensaio de tração no pino.



Fonte: Silva Júnior (2017)

5.3 Montagem dos corpos de prova

Os corpos de prova, para ensaio de ligação na direção paralela às fibras, foram montados atendendo às dimensões e espaçamentos mínimos para as peças segundo a ABNT NBR 7190:1997 e a ABNT NBR 8800:2011, e também o comprimento máximo permitido para o corpo de prova, considerando o vão livre disponível da máquina de ensaio para que fosse permitido realizar o procedimento de ensaio.

A representação gráfica com as dimensões, o posicionamento de cada componente e as peças utilizadas para montagem do corpo de prova, se encontram nas Figuras 20 a 26:

Figura 20 – Representação do aparato em U: (A) vista superior (B) vista lateral (C) vista frontal com dimensões em mm

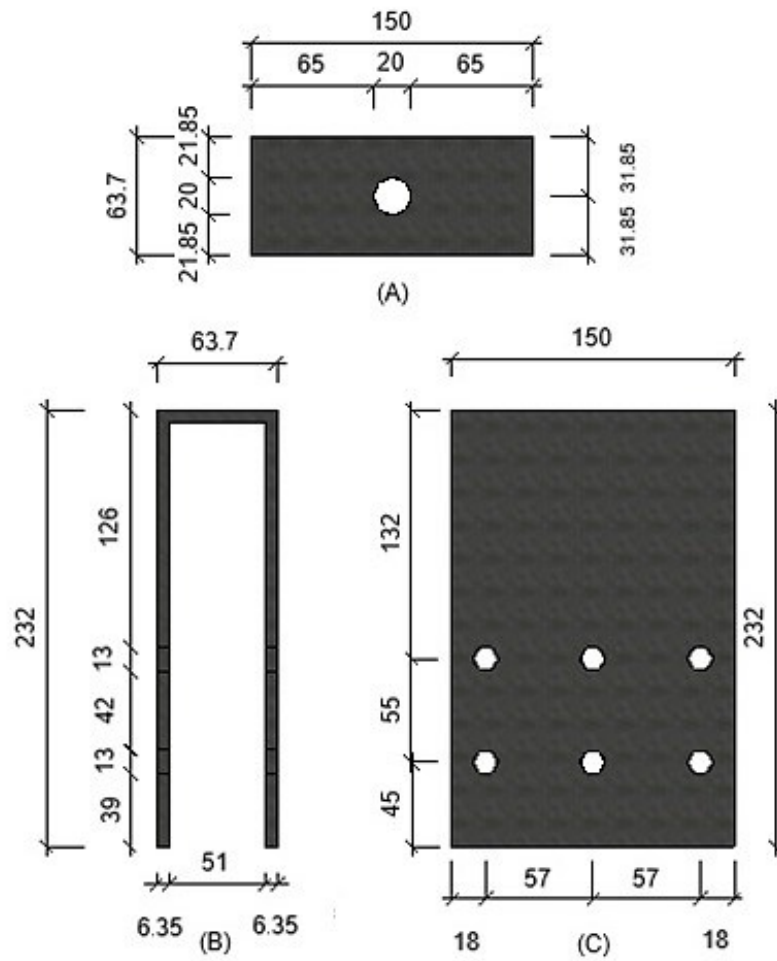


Figura 21 – Representação das chapas de ligação com dimensões em mm

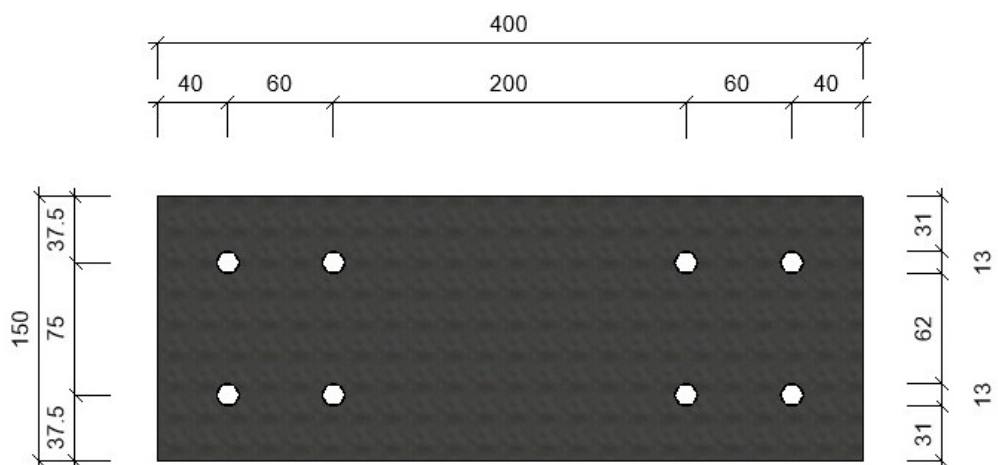


Figura 22 – Chapas de ligação e aparato



Figura 23 – Representação gráfica do corpo de prova em vista frontal com dimensões em mm

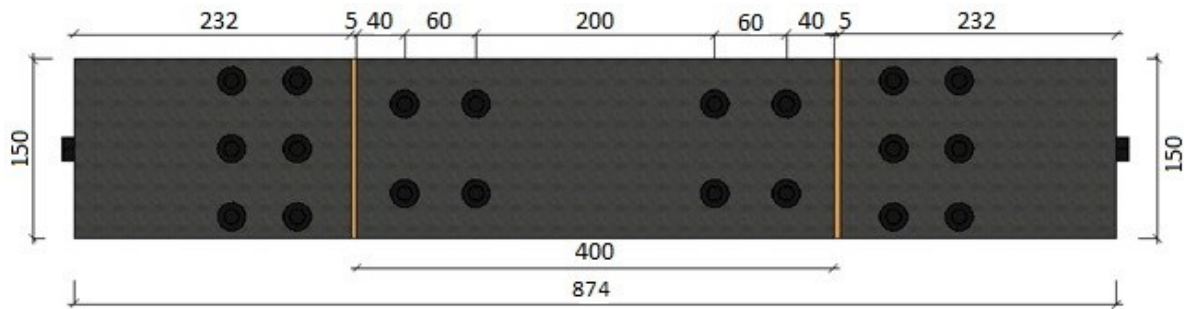


Figura 24 – Vista Frontal do corpo de prova montado

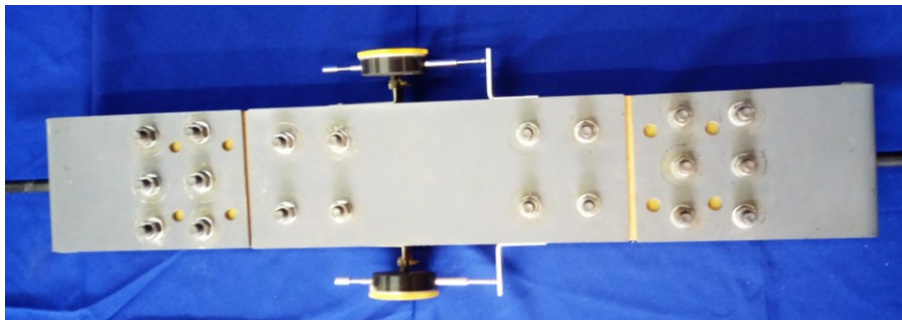


Figura 25 – Representação do corpo de prova em vista lateral com dimensões em mm

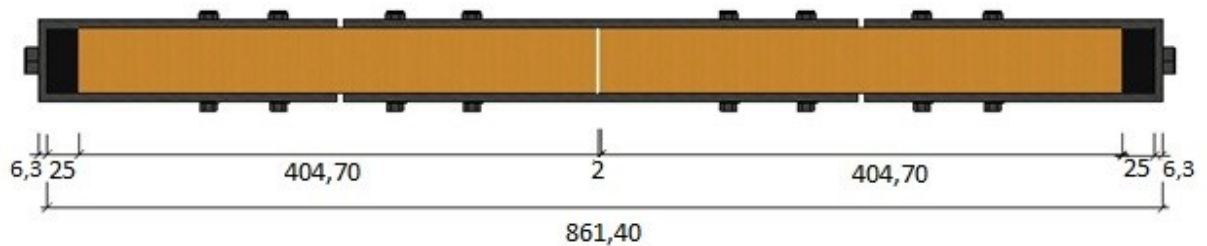
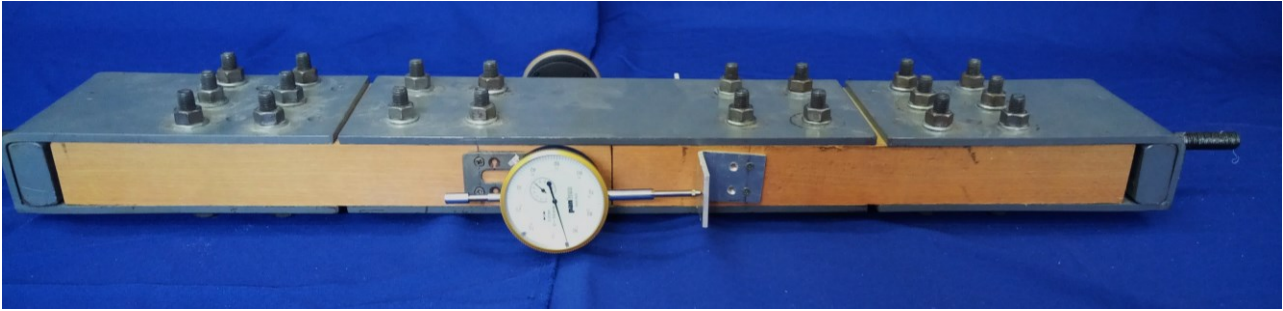


Figura 26 – Vista lateral do corpo de prova montado



Para ter o registro do deslocamento da ligação obtido durante a realização do ensaio, fixou-se dois relógios comparadores nas laterais de cada corpo de prova, como indicado na Figura 27:

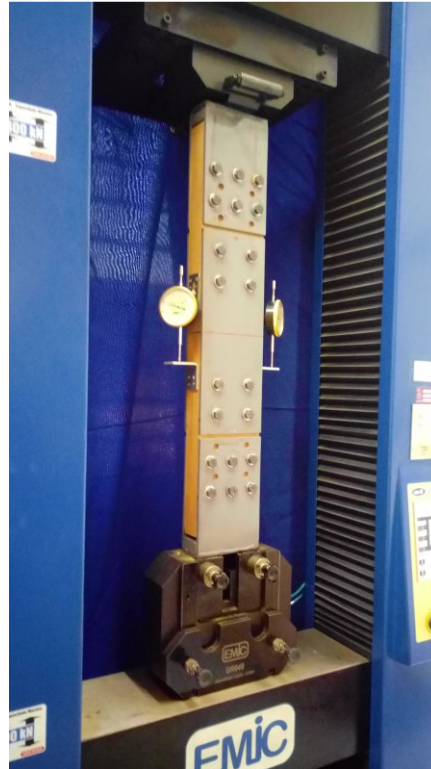
Figura 27 – Fixação dos relógios comparadores



5.4 Ensaio dos corpos de prova

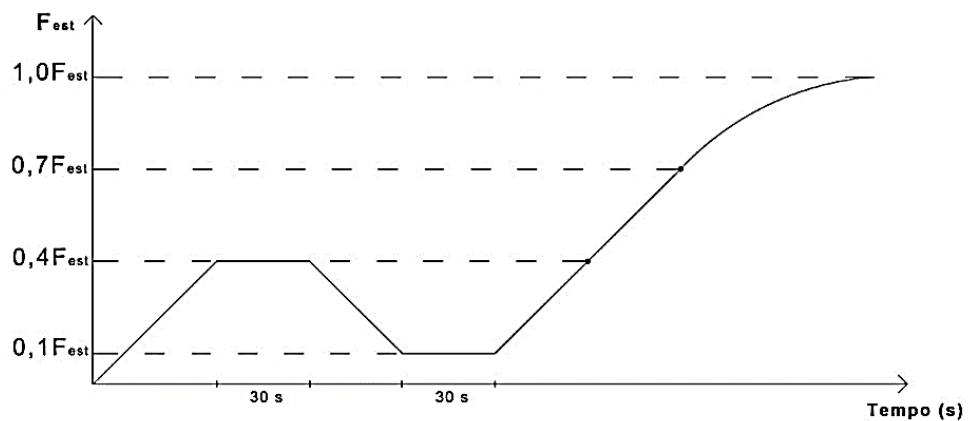
As análises experimentais foram realizadas por meio da aplicação de uma força de tração no corpo de prova formando um ângulo de 0° em relação às fibras da madeira, utilizando a máquina universal de ensaios EMIC DL30000, como indicado na Figura 28, e seguindo a metodologia de ensaio proposta pela norma EN 26891:1997.

Figura 28 – Corpo de prova sendo ensaiado



O procedimento de carga resumiu-se em um incremento de carga de $0,2F_{est}$ por minuto, 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. Em seguida, houve outro carregamento, ainda com o mesmo incremento, até aos 70 % de F_{est} . Acima deste valor, o incremento foi tal que a ruptura foi alcançada ao fim de 3 a 5 minutos. Assim, o período de tempo destes ensaios situou-se nos 10 a 15 minutos. A Figura 29 representa graficamente o procedimento realizado.

Figura 29 – Procedimento de carga para o ensaio



Fonte: adaptado EN 26891:1997

Foram realizados seis ensaios, que tiveram seus resultados comparados posteriormente com os valores teóricos de resistência obtidos pela metodologia apresentada na ABNT NBR 7190:1997 e EUROCODE 5:2004.

6 RESULTADOS

6.1 Caracterização da madeira

6.1.1 Ensaio de determinação do teor de umidade

Os procedimentos realizados para o ensaio seguiram o descrito no item 5.2.1. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de umidade e densidade

Propriedade	Resultado
U	12,61%
	(8CP) CV=1,85%
ρ	704 g/cm³
	(8CP) CV=1,60%

6.1.2 Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira

Os procedimentos realizados seguiram o descrito no item 5.2.2. Os resultados são demonstrados na Tabela 3. O valor utilizado nos cálculos do presente trabalho, foi o valor médio de 70,36 MPa.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de compressão paralela às fibras

CP	Resistência (MPa)
1	71,82
2	67,58
3	69,35
4	71,24
5	72,36
6	69,81
Valor médio:	70,36
Desvio padrão :	1,77
CV:	2,52%

6.1.3 Ensaio de determinação da resistência ao embutimento paralela às fibras

Os procedimentos realizados para o ensaio seguiram o descrito no item 5.2.3. Os resultados estão apresentados na Tabela 4. O valor utilizado nos cálculos do presente trabalho, foi o valor médio de 90,58 MPa.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência ao embutimento

CP	Resistência (MPa)
1	74,74
2	68,46
3	68,88
4	80,64
5	82,63
Valor médio:	75,07
Desvio padrão:	6,52
CV:	8,68%

6.2 Caracterização do parafuso

6.2.1 Determinação da resistência à tração do parafuso

Como já citado anteriormente, devido os parafusos possuírem as mesmas especificações e serem do mesmo lote dos utilizados por Silva Júnior (2017) em seus ensaios, serão utilizados os resultados do mesmo autor. Os valores estão representados na Tabela 5, para cálculo do momento resistente utilizou a Equação 11, apresentada no item 4.2.2.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de resistência à tração do parafuso

CP	Tensão (MPa)	Momento (N.mm)	Momento (kN.m)
1	860,6	165118	0,165118
2	879,9	168821	0,168821
3	877,0	168264	0,168264
Valor médio:	872,5	167400,95	0,167400
Desvio padrão:	8,5	1630,35	0,001630
CV:	0,97%	0,97%	0,97%

Fonte: Silva Júnior (2017)

6.3 Resistência da ligação

Os resultados de resistências das ligações foram obtidos através da força máxima para uma deformação de 15 mm ou até o colapso da ligação, de acordo com a EN 26891:1991. A Tabela 6 apresenta as resistências para cada corpo de prova, assim como, os valores médios, força estimada e de desvio padrão.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência característica da ligação

CP	Resistência (N)	Resistência (kN)
1	193320	193,32
2	213670	213,67
3	214640	214,64
4	218350	218,35
5	226670	226,67
6	223630	223,63
Valor médio:	215046,7	215,046
Desvio padrão:	1,77	1,77
CV:	2,52%	2,52%
Fest	150000 N	150 kN

Em todos os resultados, a resistência foi obtida pela força última da ligação, sendo que, houve deslocamentos inferiores a 15 mm nos seis dos corpos de prova. O comportamento das ligações pode ser observado no gráfico pertencente ao CP5 indicado na Figura 30, e o corpo de prova após a ruptura na Figura 31. Ao finalizar o ensaio, os corpos de prova foram desmontados para que fosse possível verificar o modo de falha da ligação, como indicado nas Figura 32

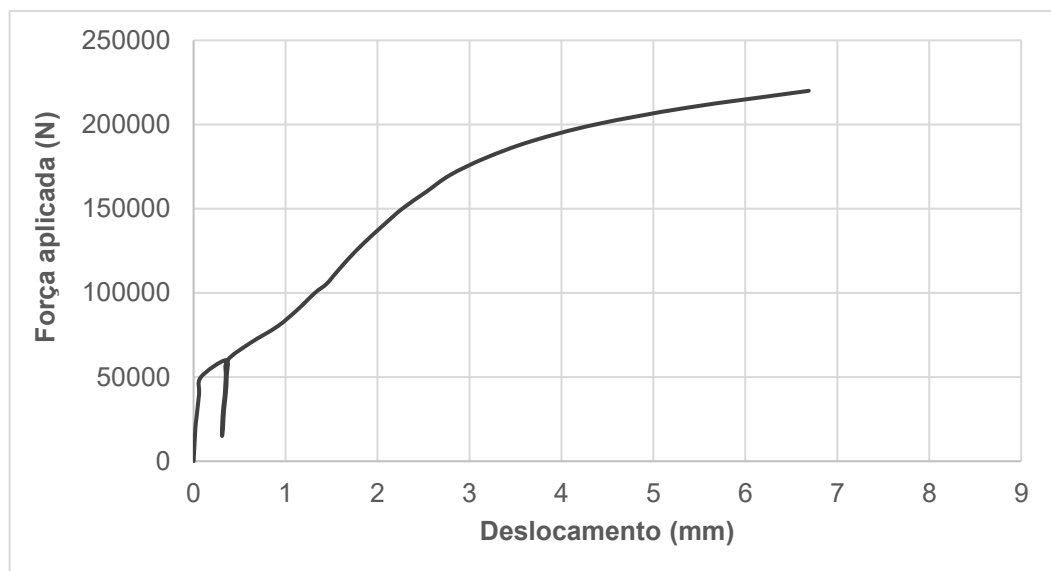
Figura 30 – Curva força x deslocamento típica dos corpos de prova (CP5)

Figura 31 – Corpo de prova após a ruptura

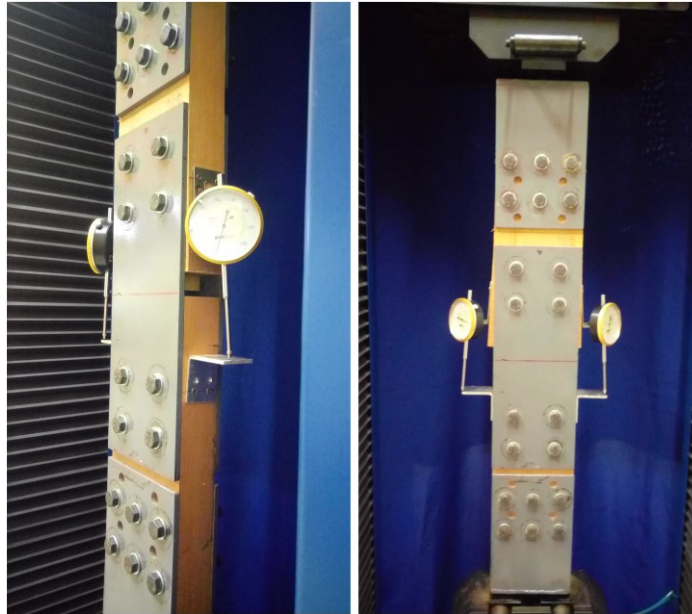
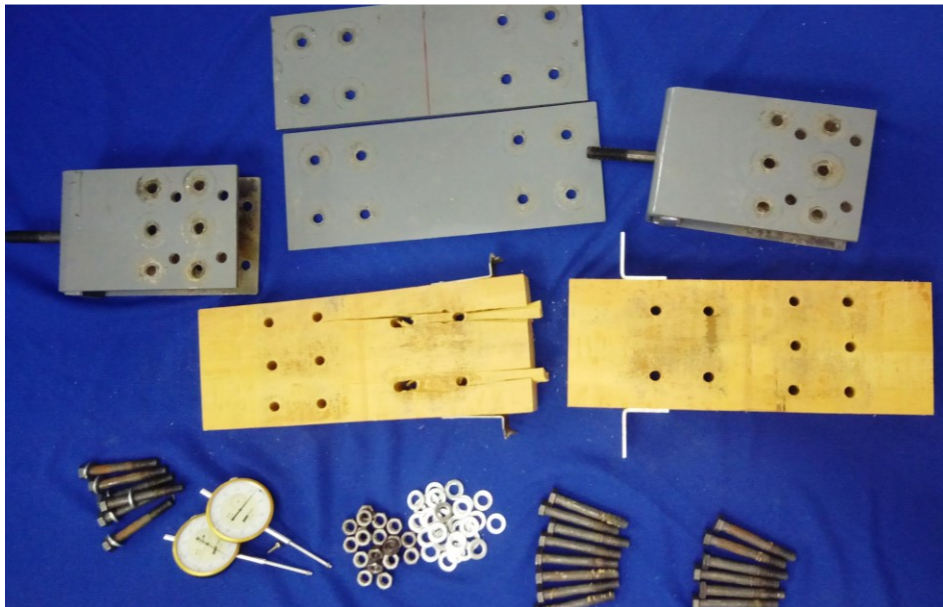


Figura 32 – Corpo de prova desmontado após a ruptura da ligação



6.4 Análise dos resultados

Para a análise teórica da resistência da ligação, segundo a ABNT NBR 7190:1997 e EUROCODE 5:2004, foram utilizadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, obtidas experimentalmente e também, através dos estudos realizados por Silva Júnior (2017). O resumo das propriedades é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 –Parâmetros utilizados

Propriedade	Garapeira		Parafuso		Chapa de aço
U	12,61%	f_{u,k}	872,50 Mpa	t	6,35 mm
ρ12%	704 g/cm ³	M_{yk}	167400,95 N.mm	Carbono	A36
f_{c,0,m}	70,36 Mpa	dp	11,80 mm	f_{y,k}	250 MPa
f_{e,0,m}	75,07 Mpa	n° de pinos	4	f_{u,k}	400 MPa
t1=t2	49,80 mm	n° seção de corte	2		

Para a simulação através dos modelos teóricos foram utilizados os valores médios dos parâmetros. Não foram utilizados coeficientes de modificação e minoração nas resistências. Os cálculos e seus respectivos resultados obtidos pela análise de acordo com as metodologias apresentadas pelo EUROCODE 5:2004, estão apresentados no Apêndice A.

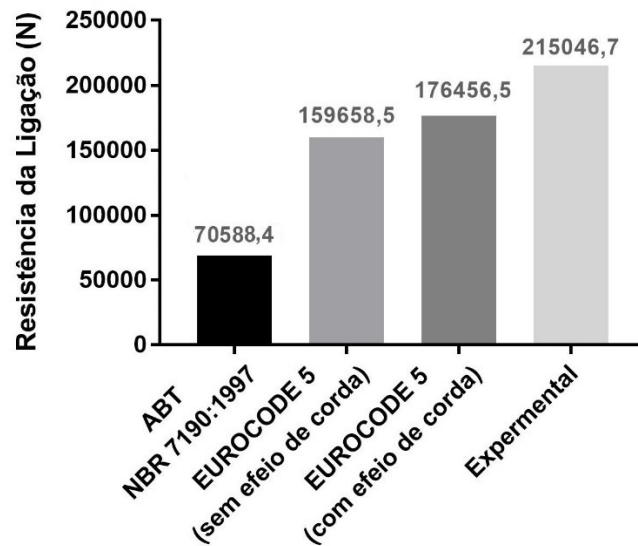
Nos cálculos realizados seguindo o proposto pela ABNT NBR 7190:1997, apresentados no Anexo B, resultou em uma resistência para a ligação pino – madeira de 85172 N, sendo esse, muito inferior aos resultados da análise da ligação pino – chapa de aço, seguindo a metodologia da ABNT NBR 8800:2008.

A Tabela 8 e o gráfico da Figura 33 apresentam o comparativo entre os resultados obtidos segundo as análises teóricas e dos ensaios, ambos conduzidos conforme os procedimentos descritos anteriormente.

Tabela 8 – Comparativo entre os valores médios de resistências da ligação

	ABNT NBR 7190:1997	EC5 (sem efeito de corda)	EC5 (com efeito de corda)	Experimental
Resistência média da ligação (N)	70588,40	159658,5	176456,5	215046,7
Diferença percentual	304,7%	34,7%	21,9%	-

Figura 33 – Comparação entre os resultados analíticos e experimental



Observando os resultados apresentados na Tabela 5, nota-se que o resultado experimental foi superior em todos os comparativos, sendo cerca de 304,7% comparado a norma brasileira, 34,7% e 21,9% comparado a norma europeia, desconsiderando e considerando o efeito de corda, respectivamente.

Quanto à segurança, os resultados analíticos de ambas as normas são satisfatórios, visto que, apresentaram valores inferiores ao experimental. Tendo em vista os modos de falha, no modelo proposto pela ABNT NBR 7190:1997 a resistência da ligação é dada pelo modo de falha devido ao embutimento do pino na madeira. Já para o EUROCODE 5:2004, sem considerar o efeito de corda, o modo de falha é resultado da interpolação linear entre os modos devido ao embutimento do pino na madeira (l) e com a formação de rótula plástica no pino metálico (k).

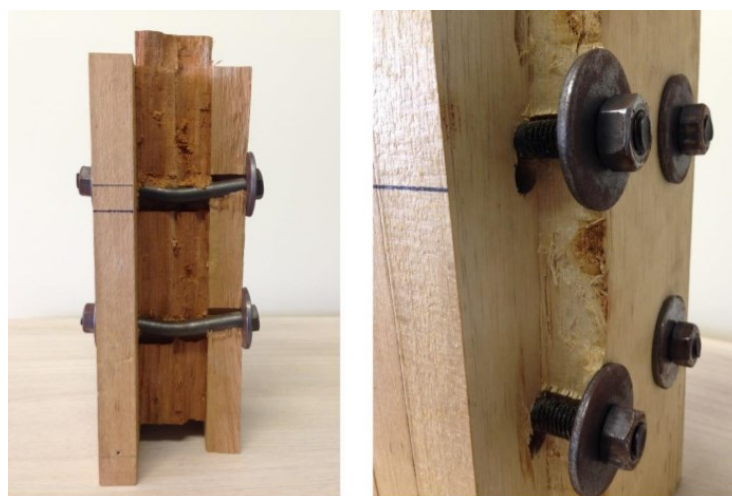
Outra análise a ser feita, é a comparação entre a ligação estudada por Silva Júnior (2017). O estudo feito pelo autor foi realizado com ligação madeira-madeira com parafusos sextavados passantes, sendo que foi utilizada a mesma espécie de madeira, assim como, o mesmo lote e especificações dos pinos metálicos do presente trabalho. Para o mesmo número de pinos, a ligação madeira-madeira apresentou um resultado experimental aproximadamente 21% inferior ao da madeira – aço, conforme o indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Modo de falha da ligação

Tipo	Resistência média da ligação (N)
Ligação madeira-aço	215046,7
Ligação madeira-madeira segundo Silva Júnior (2017)	177760

Nas ligações estudadas por Silva Júnior (2017), a resistência foi obtida pela força máxima para deformação de 15 mm, considerada a força última convencional. O modo de falha foi devido ao embutimento do pino na madeira com a formação de uma rótula plástica no pino em conjunto com o embutimento na madeira, como pode ser observado na Figura 34 e 35. No EUROCODE 5:2004 o modo de falha citado, para ligação madeira-madeira em dupla seção de corte, é denominado de j.

Figura 34 – Modo de falha da ligação madeira-madeira estudada por Silva Júnior



Fonte: Silva Júnior (2017)

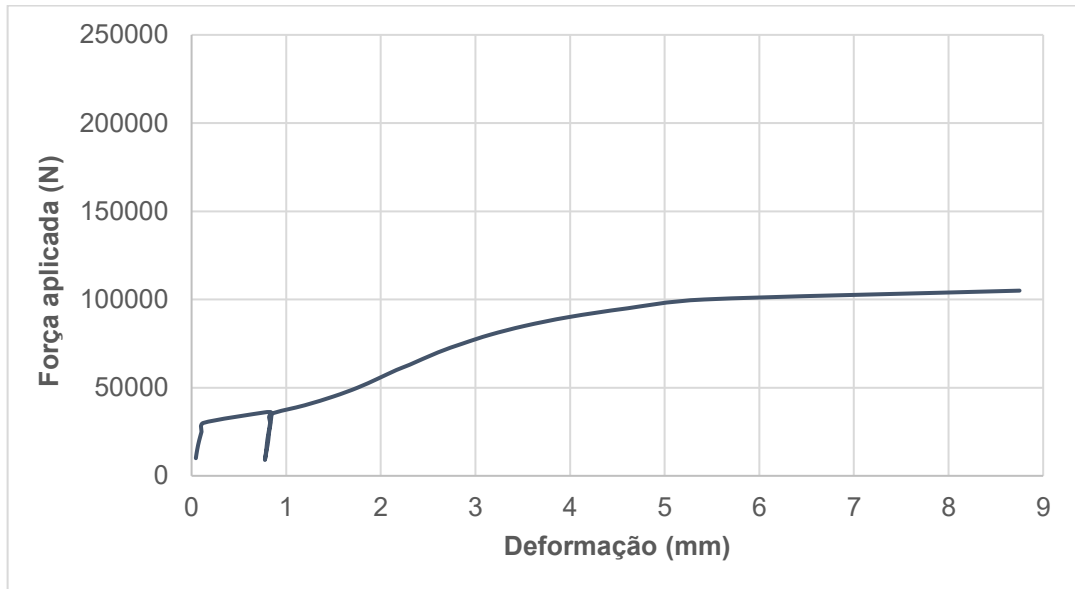
Figura 35 – Parafuso após a ruptura da ligação utilizado por Silva Júnior (2017)



A Figura 36 mostra graficamente o comportamento da ligação estudada por Silva Júnior (2017), sendo que o deslocamento da ligação não chega em 15 mm, pois

foram retirados os relógios comparadores antes da ruptura, para que fossem preservados os aparelhos.

Figura 36 – Parafuso após a ruptura da ligação utilizado por Silva Júnior (2017)



No presente trabalho, o modo de falha foi devido ao embutimento do pino na madeira (modo de falha j/l segundo o EUROCODE 5:2004), demonstrado na Figura 37, sendo que os parafusos utilizados não possuíam nenhuma rótula plástica após a ruptura, como indica a Figura 38.

Figura 37 – Modo de falha da ligação madeira - aço



Figura 38 – Parafusos após a ruptura da ligação



Diferente dos resultados de Silva Júnior (2017), as resistências das ligações do presente trabalho foram determinadas pela força última, resultando em deslocamentos máximos inferiores à 15 mm, como mostra o gráfico do comportamento da ligação na Figura 30, apresentada no item 6.3.

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pela pesquisa apresentada, é possível concluir:

- O modelo analítico apresentado pela norma brasileira proporciona valor de resistência da ligação consideravelmente inferior ao experimental. Ao dimensionar a estrutura para valores muito inferiores à resistência real, faz com que haja um maior consumo de materiais, tornando a estrutura mais pesada e menos eficiente;
- O modelo de cálculo para resistência apresentado pelo EUROCODE 5:2004 mostrou resultados superiores aos apresentados pela norma brasileira, além de possuírem valores a favor da segurança por serem inferiores aos experimentais. O valor de resistência considerando o Efeito de Corda, ficou mais próximo do valor experimental, com variação de 21,9%, enquanto o resultado sem o efeito variou em 34,7%;
- A metodologia apresentada pela norma europeia EUROCODE 5:2004, para a ligação estudada, se mostrou mais coerente quando comparada aos resultados experimentais, em relação a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997;
- Ao comparar os resultados da ligação madeira – aço com a estudada por Silva Júnior (2017), a resistência por parte da ligação com chapas metálicas obteve resultados superiores em 21%, para a mesma quantidade e tipo de parafusos e para a mesma espécie de madeira;
- Notou-se que as ligações com chapas metálicas apresentaram maior rigidez em relação a madeira – madeira, sendo que, sua ruptura aconteceu com deslocamento inferior a 15 mm, diferente dos resultados apresentados por Silva Júnior (2017);
- Houve também uma mudança do modo de falha da ligação quando os resultados do presente trabalho são comparados com os encontrados por Silva Júnior (2017), onde a ligação madeira – madeira apresentou embutimento na madeira nas peças externas em conjunto com o surgimento de uma rótula plástica no parafuso no interior da peça de madeira central, sendo que para madeira – aço, a ruptura foi caracterizada apenas pelo embutimento na peça de madeira. A mudança do modo de falha entre as ligações estudadas para

também foi influenciada pela rigidez da chapa metálica, que foi utilizada com espessura mínima recomendada pela norma brasileira ABNT NBR 7190:1997. A utilização da chapa na ligação, faz com que o efeito de embutimento nas peças externas encontrado por Silva Júnior (2017) não ocorra, assim como, auxilia na não formação de rótula plástica do pino metálico.

- As divergências entre os resultados do presente trabalho em comparação com Silva Júnior (2017), foram devido a influência do uso da chapa metálica, assim como, pode ter sofrido influência devido ao método de ensaio, que no caso das ligações madeira - aço foi realizado por tração e nas ligações madeira – madeira foi realizado por compressão tradicional (*push out*).

Contudo, o tema possui diversas linhas de estudos que podem ser pesquisadas futuramente como: estudo da ligação com pregos, parafusos passantes de diferentes diâmetros e aços, parafusos auto atarraxantes, uso de outras espécies de madeira, ligações madeira – aço com chapas centrais, ligações madeira – madeira tracionadas, entre outros.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L., **REVISTA ÁRVORE**, v. 38, N.2, p. 347-352, 2014.

ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira**. 1987.174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Carlos, São Paulo, 1987.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS/ AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. **NDS: American national design and specification for wood construction**. Washington: ANSI/AF&PA, 2001.

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

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

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

BLASS, H. J.; KRAEMER, V. **Effective bending capacity of dowel-type fasteners**. In International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission CIB-W18, (pp. 71–80), Stuttgart, 2001.

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

CONSTRUDEIA. **Idéias para sua construção**. Disponível em: <<http://construdeia.com/prego/>>. Acesso em: 26 de maio de 2017.

DEBARBOUILLE, Khorasani. **Consequences of using Eurocode 5 for design of steel-timber connections**. 2011. 38p. Master Thesis (Department of Civil Engineering) – Linnaeus University, Växjö 2011.

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

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

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

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

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

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

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

_____. **ISO 7089 – Plain Washers – Normal series – Product grade A.** Brussels, (2000).

LEUTNER, Aline M. **Resistência de ligações com parafuso passante com porca e arruela em madeira.** 2013. 127f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2013.

GÓES, J. L. N; SILVA JUNOR, J. Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes. In: CLEM+CMAD, 2, 2017, Buenos Aires. 2017. **Anais eletrônicos...**Buenos Aires: UNNOBA, 2017. Disponível em: <<http://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T6-33.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2017

HILÁRIO, Ricardo S. M. O. **Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Metodologia e disposição regulamentares relativamente a ligações.** 2013. 67p. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

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. Dissertação (doutorado), Technische Universiteit Delft, Delft University Press, Netherlands, 1998.

MAIA, Bruna. **Resistência de ligações pregadas em madeira.** 2013. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2016.

OLIVEIRA, Marcos A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira.** 2001. 138f. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – São Carlos, 2001.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

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

PORTAL METÁLICA. **Para entender os elementos de fixação.** Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/para-entender-os-elementos-de-fixacao>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

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

SANTOS, C.L.; JESUS, A. M. P.; MORAIS, J.J.L.; LOUSADA, J. L. P. C. Bearing properties of portuguese pine wood beneath a laterally loaded dowel. **CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS MATERIAIS**, v. 20, n. 1-2, p.45-51, 2008.

SCHWANZ, Marcos V. **Elaboração de software educacional para dimensionamento de ligações em madeira com pinos metálicos segundo Eurocode 5 (2008)**. 2014. 132f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2014.

SILVA JUNIOR, Josué. **Avaliação experimental da resistência de ligações em corte duplo em madeira com parafusos passantes**. 2017. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2017.

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

TOMAZ, Daniel F. **Fenômenos de segunda ordem em ligações parafusadas em madeira**. 2015. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, Campo Mourão, 2015.

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.

YALDA, Khorasani. **Feasibility study of hybrid wood steel structures**. 2011. 71p. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science – Faculty of graduate studies (Civil Engineering) – University of British Columbia, Vancouver, 2011.

APÊNDICE A – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCODE 5:2004

Para os cálculos analíticos segundo o EUROCODE 5:2004, os valores de resistência à compressão e ao embutimento da madeira, resistência última do aço do parafuso, 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. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 8 no item 6.3.

A.1 Chapas finas e grossas desconsiderando o efeito de corda

Como a chapa possui espessura intermediária aos limites recomendados pelo o EUROCODE 5:2004, é necessário fazer a interpolação entre os menores valores para chapa fina e chapa grossa.

A.1.1 Chapas finas:

- Modo de falha (j)

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{e,2,k}$$

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot 11,80 \cdot 49,80 \cdot 75,07 = 22057,06 \text{ N}$$

- Modo de falha (k)

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,2,k}}$$

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot 167400,95 \cdot 11,80 \cdot 75,07} = 19804,60 \text{ N}$$

A.1.2 Chapas grossas:

- Modo de falha (l):

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{e,2,k}$$

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot 11,80 \cdot 49,80 \cdot 75,07 = 22057,06 \text{ N}$$

- Modo de falha (m):

$$F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{h,2,k}}$$

$$F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{167400,95 \cdot 11,80 \cdot 75,07} = 28007,93 \text{ N}$$

Os resultados apresentados pelos modos j e l ao ser interpolados, fornecem uma resistência de $F_{v,Rk} = 19957,31 \text{ N}$. Para encontrar a resistência equivalente às duas seções de corte e para quatro parafusos:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{\text{parafusos}} \cdot n_{\text{seção de corte}}$$

$$R_k = 19957,81 \cdot 4 \cdot 2 = 159658,50 \text{ N}$$

A.2 Chapas finas e grossas considerando o efeito de corda

A.2.1 Cálculo do Efeito de Corda:

- Embutimento da arruela na parte externa da ligação:

$$A_{ef} = \text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot (12 \cdot t)^2}{4} \\ \frac{\pi \cdot (4 \cdot d)^2}{4} \end{array} \right.$$

$$A_{ef} = \text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot (12 \cdot 6,35)^2}{4} \\ \frac{\pi \cdot (4 \cdot 11,80)^2}{4} \end{array} \right. = \text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} 4558,05 \text{ mm}^2 \\ 1748,85 \text{ mm}^2 \end{array} \right.$$

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, temos:

$$f_{c90,k} = 0,25 \cdot f_{c0,k} = 0,25 \cdot 70,36 = 17,59 \text{ MPa}$$

Assim,

$$F_{ax,Rk} = A_{ef} \cdot 3 \cdot f_{c90,k} = 1748,85 \cdot 3 \cdot 17,59 = 92286,81 \text{ N}$$

- Tração no pino:

$$F_{ax,Rk} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} f_{uk}$$

$$F_{ax,Rk} = \frac{\pi \cdot 11,80^2}{4} \cdot 872,50 = 95367,22 \text{ N}$$

Assim, considerando os resultados acima, temos:

$$\text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{92286,81}{4} \\ \frac{95367,22}{4} \\ 17221,40 \cdot 0,25 \text{ (modo de falha k)} \\ 24354,72 \cdot 0,25 \text{ (modo de falha m)} \end{array} \right.$$

$$\text{minimo} \left\{ \begin{array}{l} 20071,70 \text{ N} \\ 47683,60 \text{ N} \\ 4305,35 \text{ (modo de falha } k) \\ 6088,68 \text{ (modo de falha } m) \end{array} \right.$$

A.2.2 Chapas finas:

- Modo de falha (j)

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{e,2,k}$$

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot 11,80 \cdot 49,80 \cdot 75,07 = 22057,06 \text{ N}$$

- Modo de falha (k)

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,2,k} + \text{efeito de corda}}$$

$$F_{v,Rk} = 19804,60 + 4305,35 = 24109,95 \text{ N}$$

A.2.3 Chapas grossas:

- Modo de falha (l):

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot d \cdot t_2 \cdot f_{h,2,k}$$

$$F_{v,Rk} = 0,5 \cdot 11,80 \cdot 49,80 \cdot 75,07 = 22057,06 \text{ N}$$

- Modo de falha (m):

$$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,k} \cdot d \cdot f_{e,2,k} + \text{efeito de corda}}$$

$$F_{v,Rk} = 28007,93 + 6088,68 = 34095,91 \text{ N}$$

Os resultados apresentados forneceram o valor mínimo do mesmo modo de falha, não necessitando assim de interpolação. Para encontrar a resistência equivalente às duas seções de corte e para quatro parafusos:

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{\text{parafusos}} \cdot n_{\text{seção de corte}}$$

$$R_k = 22057,06 \cdot 4 \cdot 2 = 176456,48 \text{ N}$$

A.3 Efeito *Block Shear* e *Plug Shear*

Segundo o EUROCODE 5:2004, o efeito deve ser considerado através da relação:

$$F_{bs,Rk} = \text{máximo} \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot A_t \cdot f_{t,o,k} \\ 0,7 \cdot A_v \cdot f_{v,k} \end{array} \right.$$

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997:

$$f_{t,o,k} = \frac{f_{c,o,k}}{0,77} = \frac{70,36}{0,77} = 91,37 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 0,15 \cdot f_{c,0,k} = 0,15 \cdot 70,36 = 10,55 \text{ MPa}$$

Assim:

$$L_{tot,t} = \sum_i l_{t,i} = 75 \text{ mm}$$

$$A_t = L_{tot,t} \cdot t_1 = 75 \cdot 49,80 = 3735 \text{ mm}^2$$

A área sujeita à força cortante, é determinada pela relação:

$$A_v = \left\{ \begin{array}{l} L_{tot,v} \cdot t_1 \\ \frac{L_{tot,v}}{2} \cdot (L_{tot,t} + 2 \cdot t_{ef}) \end{array} \right.$$

Como os possíveis modos de falha para esse tipo de ligação são: j,k,l e m, a primeira relação deve ser a utilizada.

$$A_v = L_{tot,v} \cdot t_1 = (60 + 94) \cdot 49,80 = 7918,2 \text{ mm}^2$$

Então:

$$F_{bs,Rk} = \text{máximo} \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 3735 \cdot 91,37 \\ 0,7 \cdot 7918,20 \cdot 10,55 \end{array} \right. = \text{máximo} \left\{ \begin{array}{l} 511900,4 \text{ N} \\ 58475,91 \text{ N} \end{array} \right.$$

O valor de resistência a ser considerado devido ao efeito é de 511900,4 N.

A.4 Análise dos resultados

A Tabela A.1 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela A.1 – Resultados teóricos obtidos pela metodologia de cálculo do EUROCODE 5:2004

Método de cálculo	Força calculada para dois planos de corte e quatro parafusos (N)
Chapas laterais finas e grossas em dupla seção de corte (sem efeito de corda)	159658,50
Chapas laterais finas e grossas em dupla seção de corte (com efeito de corda)	176456,48
<i>Block shear / Plug shear</i>	511900,4

De acordo com o recomendado pela norma, o valor a ser considerado é o menor entre os parâmetros calculados. Sendo assim, será desconsiderado o Efeito *Block Shear* e *Plug Shear*, por apresentar um resultado muito acima dos outros modos

de falha. Para comparar com os resultados experimentais, serão utilizados os valores com e sem o Efeito de Corda.

APÊNDICE B – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO SEGUNDO A ABNT NBR 7190:1997

Para os cálculos analíticos segundo a ABNT NBR 7190:1997, os valores de resistência à compressão e ao embutimento da madeira, resistência última do aço do parafuso, 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. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 8 no item 6.3.

B.1 Ligação pino – madeira

Inicialmente, deve calcular o parâmetro β_1 , conforme a equação abaixo:

$$\beta_1 = \frac{t}{d}$$

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o valor de t a ser utilizado na equação de β_1 deve ser a espessura da madeira central dividida por 2. Como a espessura é de 49,80 mm, e o diâmetro do parafuso de 11,80 mm, temos:

$$\beta_1 = \frac{24,90}{11,80} = 2,11$$

O segundo parâmetro a ser calculado é o β_{lim} :

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

Segundo a ABNT NBR 8800:2008 para parafusos ISO Classe 8.8, temos a relação:

$$f_{y,k} = 0,80 \cdot f_{u,k}$$

Como o valor de $f_{y,k}$ não foi obtido experimentalmente, será utilizada essa relação, assim temos:

$$f_{y,k} = 0,80 \cdot 872,50 = 698 \text{ MPa}$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{698}{75,07}} = 3,811$$

Como $\beta_{lim} > \beta_1$:

$$R_{vk,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta_1} f_{e,k}$$

$$R_{vk,1} = 0,40 \frac{(29,4)^2}{2,11} 75,07 = 8823,54 \text{ N}$$

O valor de $R_{vd,1}$ é dado por parafuso e por seção de corte, assim:

$$R_k = 8823,54 \cdot 2,4 = 70588,30 \text{ N}$$

B.2 Ligação pino – chapa metálica

De acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190:1997 em ligações com pinos metálicos do tipo madeira – aço deve ser verificado a resistência da ligação pino – chapa metálica conforme as recomendações da ABNT NBR 8800:2008.

B.2.1 Cisalhamento do pino:

Considerando que o plano de corte passa pela rosca:

$$F_{v,Rd} = 0,4 \frac{A_b f_{u,k}}{\gamma_{a2}}$$

$$A_b = 1,18^2 \cdot \pi = 4,374 \text{ cm}^2$$

$$F_{v,Rd} = 0,4 \frac{(4,374) \cdot (87,25)}{1,35} = 113,076 \text{ kN}$$

O valor de $F_{v,Rd}$ é calculado por plano de corte e por parafuso, assim, como a chapa é utilizada no corpo de prova para ligação de duas peças de madeira, são utilizados 8 parafusos em 2 seções de corte:

$$F_{v,Rd} = 2,8 \cdot 113,076 = 1809,22 \text{ kN}$$

B.2.2 Pressão de contato em furos:

Considerando que a deformação para as forças de serviço não é uma limitação de projeto e como os furos são padrão:

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot l_f \cdot t \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}} \leq \frac{2,4 \cdot d_b \cdot t \cdot f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}}$$

l_f é o menor comprimento entre a borda do furo e a borda da chapa, e entre bordas de furos consecutivos, sendo assim, $l_f = 33,5 \text{ mm}$

$$F_{c,Rd} = \frac{1,2 \cdot (3,35) \cdot (0,63) \cdot (0,635)}{1,35} \leq \frac{2,4 \cdot 1,18 \cdot 0,635 \cdot (40)}{1,35}$$

$$F_{c,Rd} = 75 \leq 52,86$$

O valor encontrado é por furo e por seção de corte, então para a ligação em questão:

$$F_{c,Rd} = 52,86 \cdot 8,2 = 852,54 \text{ kN}$$

B.2.3 Tração na chapa:

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = A_g \frac{f_{y,chapa}}{\gamma_{a1}}$$

$$A_g = 0,635 \cdot 0,15 = 9,45 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = 9,45 \cdot \frac{25}{1,10} = 214,77 \text{ kN}$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = A_e \frac{f_{u,chapa}}{\gamma_{a2}}$$

$$A_e = 9,45 - 1,3 \cdot 2 \cdot 0,635 = 7,90 \text{ cm}^2$$

$$N_{t,Rd} = 7,90 \cdot \frac{40}{1,35} = 231,46 \text{ kN}$$

Para 2 seções de corte:

- Escoamento da seção bruta:

$$N_{t,Rd} = 2 \cdot 214,77 = 429,54 \text{ kN}$$

- Ruptura da seção líquida:

$$N_{t,Rd} = 2 \cdot 231,46 = 462,92 \text{ kN}$$

B.2.3 Colapso por rasgamento:

$$F_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nt}) \leq \frac{1}{\gamma_{a2}} (0,60 \cdot f_{y,chapa} \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_{u,chapa} \cdot A_{nt})$$

$$A_{gv} = 10 \cdot 0,635 = 6,35 \text{ cm}^2$$

$$A_{nv} = 6,35 - 1,95 \cdot 0,635 = 5,07 \text{ cm}^2$$

$$A_{gt} = 7,50 \cdot 0,635 = 4,725 \text{ cm}^2$$

$$A_{nt} = 4,725 - 1,3 \cdot 0,635 = 3,906 \text{ cm}^2$$

$$C_{ts} = 1,00$$

$$F_{t,Rd} = \frac{1}{1,35} (0,60 \cdot 40 \cdot 5,07 + 1,0 \cdot 40 \cdot 3,906) \leq \frac{1}{1,35} (0,60 \cdot 25 \cdot 6,35 + 1,0 \cdot 40 \cdot 3,906)$$

$$F_{t,Rd} = 205,86 \leq 186,30$$

Então, para duas seções de corte:

$$F_{t,Rd} = 186,30 \cdot 2 = 372,60 \text{ kN}$$

Assim, como o menor valor dos modos de ruptura calculados foi o do colapso por rasgamento, esse será o valor a ser utilizado para comparar com a ABNT NBR 7190:1997.

B.3 Análise dos resultados

Segundo recomendação da ABNT NBR 7190:1997, deve ser utilizado o menor valor entre os modos de falha calculados para a ligação pino – madeira e pino – chapa de aço.

Tabela B.1 – Resultados teóricos obtidos pela metodologia de cálculo da ABNT NBR 7190:1997

Método de cálculo	Força resistente calculada (kN)
ABNT NBR 7190:1997	70,58
ABNT NBR 8800:2008	372,60

Os cálculos realizados pela ABNT NBR 8800:2008 apresentaram valores muito superiores em relação a ABNT NBR 7190:1997, sendo então desconsiderados para a comparação com os resultados experimentais.