

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALINE MARQUES LEUTNER

**RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PARAFUSO PASSANTE COM
PORCA E ARRUELA EM MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2013

ALINE MARQUES LEUTNER

**RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PARAFUSO PASSANTE COM PORCA E
ARRUELA EM MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
do Curso Superior de Engenharia Civil,
Departamento de Engenharia Civil – COECI – da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR, para aprovação de viabilidade.

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

CAMPO MOURÃO

2013



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 19

RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COM PARAFUSO PASSANTE COM PORCA E ARRUELA EM MADEIRA

por

Aline Marques Leutner

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 8 horas e 30 minutos do dia 03 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Msc. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**

(UTFPR)

Prof. Dr. Davi Antunes de Oliveira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Orientador

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Profª Dr. Marcelo Guelbert

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

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar e principalmente me dar força nessa caminhada.

Aos meus incríveis e amados pais, Roberto e Valdicia, pelo incentivo, apoio e seu amor sem limites que me fizeram ter coragem nos momentos mais difíceis. Mãe, obrigada pelas inúmeras vezes que me escutou chorando no telefone, a maioria por fraqueza, por achar que não seria capaz, mas a senhora sempre me encorajou a continuar. Pai, obrigada por ser essa pessoa espetacular, forte, decidido, pois sempre fiz de tudo para o senhor se orgulhar de mim.

Aos homens da minha vida, meus irmãos, maior amor que tenho é por vocês, Renan e Gustavo. Vocês são tudo pra mim, meu apoio, minha fortaleza, meus amigos, os homens que mesmo brava não tenho dúvida que amo.

Aos meus padrinhos, Maria Helena que ao logo dessa jornada além de minha segunda mãe, se tornou minha amiga, sempre me aconselhando, se tornando cada dia um exemplo de vida a seguir. Ao meu padrinho Júlio, que me adotou como afilhada e hoje é o único padrinho que reconheço.

As melhores amigas que eu poderia ter na vida, Mariane e Andrezza, anjos que ganhei de presente. É por causa de vocês que hoje sei o significado de amizade pura e verdadeira, e sei que a distância não importa quando há amor. Não tenho como agradecer aos conselhos, aos puxões de orelha e por ficarem bravas comigo quando estava fazendo tudo errado. Muito obrigada pelas conversas, pelos desabafos, pela companhia em todos os momentos, obrigada por serem minhas amigas.

As companheiras dentro e fora sala de aula, Alessandra e Viviane, pois somos as três mulheres “sobreviventes” dessa turma. Só tenho a agradecer por estarem comigo com cafés, nas noites sem dormir, aos projetos que pareciam nunca ter fim e também aos tererês, aos chimarrões, as festas e aos finais de tarde na sacada.

À minha xará Aline Pitol que apareceu no momento certo da faculdade, se fosse antes Campo Mourão seria pequeno para duas Alines. A companheira que

arranjei e que fazem meus últimos dias de faculdade os melhores, mais divertidos, animados. Você é incrível!

À preta mais amada do mundo, Ariella, que sempre estará no meu coração, porque você foi minha parceira e amiga nos momentos difíceis e nos momentos de alegria. Obrigada pelas festas, pelas conversas, pelos abraços, pelas tardes de não fazer nada, por estar presente na minha vida.

Aos “meninos”, Du, Elder, Allan, Pitol, Roberto e Saymon, colegas e amigos de faculdade, pela ajuda e pelas risadas em sala.

Ao meu gordinho, Alexandre, e ao amigo (para não colocar delicia), Érico, por serem meus amigos.

A todos os amigos que de uma forma ou de outra estiveram presentes no meu dia-a-dia, que presenciaram os bons e maus momentos.

Ao meu mestre e orientador Jorge Góes, pois sem seu conhecimento e apoio não seria capaz de realizar esse trabalho. As inúmeras vezes que incomodei, na porta da sua sala de aula, para tirar dúvidas e o senhor me atendeu, meu muito obrigado.

A todos os professores que colaboraram para minha formação, dividindo um pouco de seu conhecimento comigo.

Finalmente, a todas as pessoas que participaram em algum momento desse caminho, que de algum modo me incentivaram, acreditaram em mim, me fizeram melhorar, crescer, aprender, de forma carinhosa ou dura, obrigada.

RESUMO

LEUTNER, A. M. (2013). Resistência de ligações com parafusos passante com porcas e arruelas em madeira. Campo Mourão, 2013. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

As construções de estruturas de madeira geralmente requerem ligações entre as peças que as compõem. Estas ligações devem garantir a segurança e a durabilidade da estrutura e ser compatível com as solicitações mecânicas avaliadas. As equações para o cálculo da resistência de ligações com pinos metálicos utilizadas na Revisão NBR 7190 (2012) e EUROCODE 5 (2004) são baseadas na teoria desenvolvida por Johansen (1949), porém a norma brasileira faz simplificações dessa teoria. O critério de dimensionamento segundo a Revisão da NBR 7190 (2012) para ligações com parafusos passantes conduz ao aumento do número de elementos nas ligações em relação ao observado no EUROCODE 5 (2004). Neste contexto, o objetivo desse trabalho é a análise teórica do modelo de dimensionamento segundo a Revisão NBR 7190 (2012) em comparação com EUROCODE 5 (2004).

Palavra chave: parafuso passante, ligações, resistência.

ABSTRACT

LEUTNER, A. M. (2013). Resistance joints with bolts with nuts and washers on timber. Campo Mourão, 2013. 72p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão.

The construction of timber structures generally requires joints between the parts that compose them. These joints must ensure security and durability to the structure and be compatible with the evaluated mechanical requests. The equations to the calculation of resistance to joints with steel dowels used in Review NBR 7190 (2012) and EUROCODE 5 (2004) are based upon a theory developed by Johansen (1949), but the Brazilian standard used simplifications. The Review NBR 7190 (2012) criterion for the design of joints for bolts leads to the increase of element number in the joint in relation to the observed one in the EUROCODE 5. In this argument, the objective of this work is the theoretical analysis of the design method results of the Review NBR 7190 (2012) compared to EUROCODE 5 (2004).

Keywords: bolt, joint, resistance.

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas

b_e	distância do eixo do pino mais afastado à borda do lado da solicitação
c	coeficiente de relação entre as resistências ao embutimento das peças de madeira.
d	diâmetro do pino metálico
f	valor da resistência da madeira
f_{ek}	valor da força de embutimento da madeira
f_{ed}	valor de cálculo da força de embutimento da madeira
f_u	valor da resistência última a tração
$f_{v,0}$	valor da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{v,d}$	valor da resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo às fibras
h	altura total da seção transversal da peça principal
n	número de pinos efetivos
n_o	número de pinos convencional
t	espessuras da madeira ou da penetração pino
x_w	valor característico

Letras romanas maiúsculas

A	área da seção
E	modo de elasticidade
F	força aplicada
$F_{ax,Rx}$	resistência ao arrancamento
M_k	valor característico do momento fletor
M_d	valor de cálculo do momento fletor
R_k	resistência característica da ligação
R_d	resistência de cálculo da ligação
U	teor de umidade da madeira
V_d	força de cisalhamento em projeto produzido no membro de espessura t

Letras gregas

α	ângulo de inclinação da força F em relação às fibras
β	coeficiente de redução do módulo de resistência, relação entre a resistência ao embutimento das peças ligadas
β_{lim}	coeficiente limite de redução do módulo de resistência, relação entre a resistência ao embutimento das peças ligadas

ε	Deformação
γ_M	coeficiente da propriedade do material
ρ_k	massa específica da madeira
σ	tensão normal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos tipos comuns de entalhes.....	19
Figura 2 – Ligações com anéis metálicas.	21
Figura 3 – Ligações com cavilhas	22
Figura 4 – Tipos comuns de pregos	23
Figura 5 – Esquema de parafuso.	23
Figura 6– Característica simplificada da resistência ao embutimento.....	24
Figura 7 – Espessuras t_1 e t_2 em uma seção de corte.....	24
Figura 8 – Resistência característica de cálculo em uma seção de corte	26
Figura 9 – Modelo de falha 1b em t_1	27
Figura 10 – Modelo de falha 1b em t_2	27
Figura 11 – Modelo de falha 1a.....	28
Figura 12 – Modelo de falha 2a.....	30
Figura 13 – Modelo de falha 2b.....	31
Figura 14 – Modelo de falha 3.....	33
Figura 15 – Ligações com tração normal às fibras.....	36
Figura 16 – Espaçamento em ligações com pinos	38
Figura 17 – Pinos metálicos em corte simples	39
Figura 18 – Pinos metálicos em corte duplo.....	39
Figura 19–Força combinada agindo em um ângulo as fibras.....	40
Figura 20 – Definição do espaçamento e distância para ligações.....	44
Figura 21 – Modelo de corpos de prova A_1	51
Figura 22 – Modelo de corpos de prova A_2	51
Figura 23 – Modelo de corpos de prova B_1	52
Figura 24 – Modelo de corpos de prova B_2	52
Figura 25 – Modelo de corpos de prova C_1	53
Figura 26 – Modelo de corpos de prova C_2	53
Figura 27 – Modelo de corpos de prova D_1	54
Figura 28 – Modelo de corpos de prova D_2	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente para propriedade do material.....	25
Tabela 2 – Classe de resistência das coníferas	50
Tabela 3 – Classe de resistência das folhosas	50
Tabela 4 – Resistência das ligações para corpo de prova A ₁ (kN).....	55
Tabela 5– Resistência das ligações para corpo de prova A ₂ (kN).....	57
Tabela 6 – Resistência das ligações para corpo de prova B ₁ (kN).....	58
Tabela 7 – Resistência das ligações para corpo de prova B ₂ (kN).....	59
Tabela 8 – Resistência das ligações para corpo de prova C ₁ (kN)	60
Tabela 9 – Resistência das ligações para corpo de prova C ₂ (kN)	62
Tabela 10 – Resistência das ligações para corpo de prova D ₁ (kN)	63
Tabela 11 – Resistência das ligações para corpo de prova D ₂ (kN)	64
Tabela 12–Resistência da ligação com parafuso de 3/8” (kN).....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência modelo corpo de prova A	56
Gráfico 2 – Resistência do modelo do corpo de prova A ₂	57
Gráfico 3 – Resistência do modelo do corpo de prova B ₁	58
Gráfico 4 – Resistência do modelo do corpo de prova B ₂	59
Gráfico 5 – Resistência do modelo do corpo de prova C ₁	61
Gráfico 6 – Resistência do modelo do corpo de prova C ₂	62
Gráfico 7 – Resistência do modelo do corpo de prova D ₁	63
Gráfico 8 – Resistência do modelo do corpo de prova D ₂	64
Gráfico 9 – Resistência de ligação com parafuso 3/8 " em corte simples.	65
Gráfico 10 – Resistência de ligação com parafuso 3/8 " em corte duplo.	66
Gráfico 11 – Resistência de ligação com parafuso 3/8 " com coeficientes de minoração e sem adição da força de arrancamento em corte simples.	67
Gráfico 12 – Resistência de ligação com parafuso 3/8" com coeficientes de minoração e sem adição da força de arrancamento em corte duplo.	68

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	15
2OBJETIVOS.....	16
2.1OBJETIVO GERAL	16
2.2OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3JUSTIFICATIVA.....	17
4REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1LIGAÇÕES EM MADEIRAS	18
4.1.1Tipos comuns de ligações.....	18
4.1.1.1 Transmissão de esforço por contato direto – Entalhes ou Encaixes	19
4.1.1.2 Transmissão de esforços com elementos externos.....	20
4.2COMPORTAMENTO MECÂNICO LIGAÇÕES – MODELO DE JOHANSEN	24
4.2.1 Corte simples	26
4.2.1.1 Modelo de falha 1b.....	26
4.2.1.2 Modelo de falha 1a.....	27
4.2.1.3 Modelo de falha 2a.....	29
4.2.1.4 Modelo de falha 2b.....	31
4.2.1.5 Modelo de falha 3.....	32
4.2.2 Dupla seção de corte.....	33
4.3DOCUMENTOS NORMATIVOS	35
4.3.1Revisão NBR 7190.....	35
4.3.1.1Pré-furação.....	36
4.3.1.2Espaçamento	37
4.3.1.3Resistência das ligações com pinos metálicos.....	38
4.3.2 EUROCODE 5.....	40
4.3.2.1 Parafusos passantes com porca e arruela	43
4.3.2.1.1 Momento devido à flexão	43
4.3.2.1.2Espaçamento	43
4.3.2.1.3 Numero efetivo de parafusos	44
4.3.2.1.4 Resistência ao arrancamento.....	45
4.4DISCUSSÕES DA REVISÃO BIBLIGRÁFICA	46
5AVALIAÇÃO TEÓRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DA REVISÃO DA NORMA BRASILEIRA NBR 7190 (2012) E DO EUROCODE 5 (2004).....	49
5.1MODELO DE CORPO DE PROVA A ₁	51
5.2MODELO DE CORPO DE PROVA A ₂	51

5.3	MODELO DE CORPO DE PROVA B ₁	52
5.4	MODELO DE CORPO DE PROVA B ₂	52
5.5	MODELO DE CORPO DE PROVA C ₁	53
5.6	MODELO DE CORPO DE PROVA C ₂	53
5.7	MODELO DE CORPO DE PROVA D ₁	54
5.8	MODELO DE CORPO DE PROVA D ₂	54
6	ANALISE DOS RESULTADOS	55
6.1	COMPARAÇÃO POR MODELO DE PROVA	55
6.1.1	Modelo de corpo de prova A ₁	55
6.1.2	Modelo de corpo de prova A ₂	56
6.1.3	Modelo de corpo de prova B ₁	57
6.1.4	Modelo de corpo de prova B ₂	58
6.1.5	Modelo de corpo de prova C ₁	60
6.1.6	Modelo de corpo de prova C ₂	61
6.1.7	Modelo de corpo de prova D ₁	62
6.1.8	Modelo de corpo de prova D ₂	63
7	CONCLUSÕES	69
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO A		71
ANEXO B		78
ANEXO C		83
ANEXO D		88
ANEXO E		93
ANEXO F		98
ANEXO G		103
ANEXO H		108
ANEXO I		113
ANEXO J		11327

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material muito utilizado na construção, isso se deve ao fato de ser um elemento presente na natureza, sendo várias espécies comerciais e encontradas no mercado, além de apresentar facilidade no manuseio. Porém, somente nos últimos anos a madeira e seus subprodutos começaram a se difundir no Brasil como elemento estrutural, sendo assim, há um aumento na demanda de estudos científicos para aprimorar o seu uso.

Para utilização da madeira como elemento estrutural há grande dificuldade de se obter peças com dimensões requeridas em projeto. Fazendo-se necessário uniões entre peças disponíveis que atendam as solicitações mecânicas e ainda ofereçam segurança e durabilidade. Por serem consideradas de um ponto crítico da estrutura, as ligações requerem estudos experimentais que avaliem seu real comportamento.

No mundo inteiro vem se estudando modelos de cálculos que aproximem das condições usuais. No que diz respeito à resistência de ligações com pinos metálicos, constituída de pregos e parafusos, as principais normas internacionais fazem uso do modelo de Johansen. Exemplo disso é a Norma Europeia, EUROCODE 5 (1993), que apresenta sua metodologia de cálculo baseado conforme tal modelo.

A Norma Brasileira Revisão NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (2012) apresenta recomendações específicas de cálculo para ligações com adesivos, com pinos metálicos, cavilhas e conectores. A ligação com pinos metálicos é a mais utilizada no Brasil devido a sua facilidade de aplicação e o baixo custo do material. Porém, a metodologia de cálculo para obtenção da resistência de ligação com pinos metálicos é simplificada, embora seja baseada no modelo de Johansen, é restrita a certas configurações de peças.

O estudo comparativo entre a Norma Brasileira e a Norma Europeia faz-se necessário para verificar a validade dos modelos de cálculo, para obtenção do valor de resistência de ligações com pinos metálicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar modelos de resistência de ligações com parafuso passante com porca e arruela em madeira, avaliando modelos teóricos de documentos normativos nacionais e internacionais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os modelos teóricos de resistência de ligações por parafuso passante com porca e arruela em madeira;
- Comparar teoricamente os modelos presentes em documentos normativos nacionais e internacionais sobre o tema;
- Sugerir novos estudos para ligações em madeira, considerando os resultados obtidos no presente trabalho.

3 JUSTIFICATIVA

Devido à elevada importância das ligações de estruturas de madeira, por ser considerado um ponto crítico na estrutura requerente de alta segurança, surge a necessidade de maiores estudos sobre o tema.

No que diz respeito a ligações com pinos metálicos, a Norma Brasileira Revisão NBR 7190 (2012) indica um modelo de dimensionamento diferenciado em relação a outras normas internacionais. Ainda pode se destacar que a mesma não apresenta método de cálculo de rigidez das ligações.

Sendo assim, surge a necessidade de investigar o modelo da norma, a fim de constatar a validade do mesmo ou de sugerir alterações no texto normativo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRAS

A utilização de madeira como elemento estrutural vem aumentando consideravelmente ao longo do tempo, devido a suas boas propriedades mecânicas. Com isso, há um aumento nos estudos científicos para aprimorar esse material e difundir-lo no meio construtivo.

De acordo com Calil Júnior, Lahr e Dias (2003, p.111) é difícil encontrar no mercado peças de madeiras de comprimento superior a sete metros para espécies tropicais, e cinco metros para espécies de reflorestamento. Pfeil e Pfeil (2003, p. 52) especificam que no caso de madeira serrada em geral o comprimento das peças não ultrapassa quatro ou cinco metros. Com isso faz-se necessário à utilização de elementos de ligação para obtenção de comprimento de peças desejáveis.

Ainda para os autores a ligação é um ponto fundamental na estrutura de madeira, sendo que uma falha nessa região pode levar a estrutura ao colapso. Como exemplo, pode-se citar uma estrutura triangular treliçada de um telhado duas águas, onde há presença de ligações nos diversos elementos que a compõem (nós) e o comprometimento de qualquer uma das uniões pode levar a estrutura à ruína.

4.1.1 Tipos comuns de ligações

As ligações podem ser separadas em dois grandes grupos, as com transmissão dos esforços por contato direto entre as peças, (entalhes ou encaixes), e as com presença de elementos externos que mantêm as peças de madeiras unidas (adesivos, chapas metálicas, anéis metálico, cavilhas e pinos metálicos).(CALIL JÚNIOR, LAHR, DIAS, 2003, p.111).

4.1.1.1 Transmissão de esforço por contato direto – Entalhes ou Encaixes

É considerado um método tradicional de se fazer junção entre peças de madeira, sendo que antigamente era muito utilizado, mas seu uso vem decrescendo devido à exigência de mão-de-obra especializada.

Segundo Dias (2013) nesse tipo de ligação as faces das peças devem ser transmissoras de esforços e antes do carregamento devem estar perfeitamente encaixadas, sem folgas. Para manter os entalhes fixos são utilizados cavilhas, pregos, colas ou parafusos, considerados apenas para a fixação e não sendo considerados nos cálculos.

Calil Júnior, Lahr e Dias (2003, p.116) especificam que tal tipo de ligação deve ser empregada para esforços de compressão, e caso haja inversão de esforço causado pela ação do vento deve-se prever outra forma de combater esforços de tração.

Na Figura 1 são mostrados esquemas dos tipos comuns de entalhes entre peças estruturais, e em alguns casos pode-se observar a presença de elementos para manter a estrutura fixa.

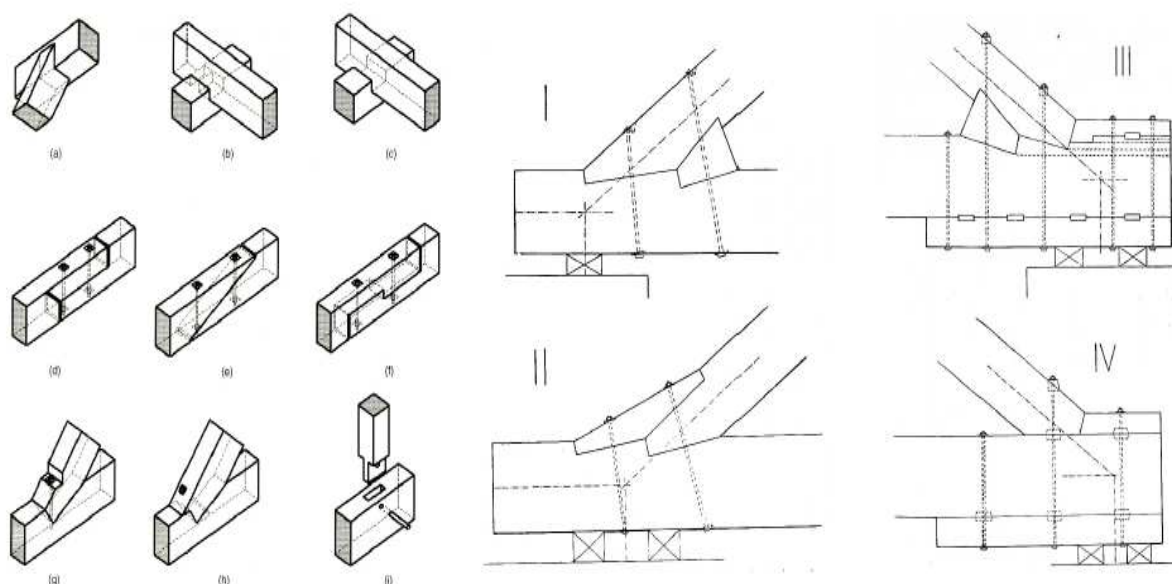


Figura 1 – Esquema dos tipos comuns de entalhes
Fonte: Dias (2013)

4.1.1.2 Transmissão de esforços com elementos externos

A utilização de elementos externos para unir peças de madeiras abrange a maior parte dos elementos de ligação como, por exemplo:

- Adesivos

Pfeil e Pfeil (2003, p.52) definem como um tipo de ligação moderno que envolve alta tecnologia, por apresentar rigoroso controle no processo de colagem, levando em consideração desde a propriedade de umidade da madeira até partes do processo de fabricação como utilização da cola, pressão e temperatura.

A Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) restringe a utilização de ligações com cola para juntas longitudinais de madeira laminada colada, sendo que tal tipo de madeira deve ter sido seca ao ar livre ou em estufas.

- Chapas Metálicas

Conforme Dias (2013) são chapas providas de dentes estampados ou pregos, onde os dentes absorvem os esforços transferindo-os para outro grupo de dentes.

Conforme Pfeil e Pfeil (2003), esse tipo de ligação é comumente utilizado em treliças pré-fabricadas, onde são prensadas contra as peças de madeira, sendo que para Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) as chapas metálicas com dentes estampados deve ter seus valores de resistência especificados pelo fabricante, para uma seção de corte.

- Anéis metálicos

Segundo Dias (2013) anéis metálicos são peças posicionadas na interface da madeira por meio de entalhes, sendo feito com uma serra-copo do diâmetro do conector. Para manter a ligação em posição utiliza-se para parafusos passantes colocados dentro do anel.

Pfeil e Pfeil (2003) considera o surgimento dos conectores de anéis é devido à procura por ligações rígidas com uma grande área de contato com a madeira, visto que a resistência de ligações com pinos metálicos é limitada pela tensão de apoio e pela flexão.

Conforme a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) para ligações estruturais somente é permitido anéis de diâmetro interno de 64mm e 102mm, devendo ser acompanhados por parafusos de 12mm e 19mm, respectivamente. A montagem com anel metálico pode ser melhor visualizada na Figura 2.

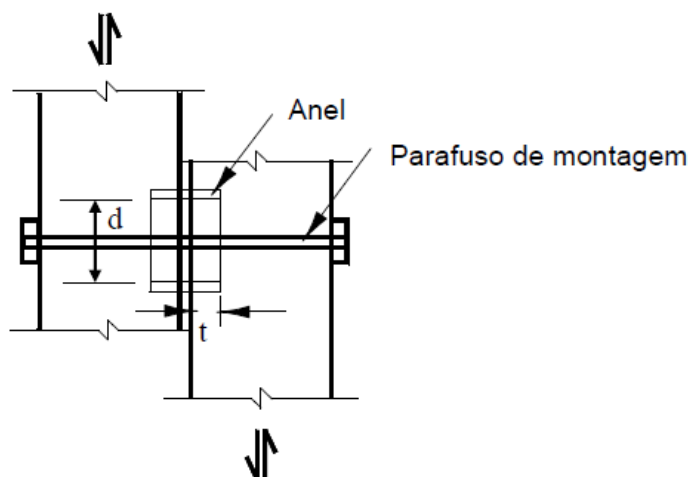


Figura 2 – Ligações com anéis metálicas.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012).

- Cavilhas

A cavilhas são pinos cilíndricos fabricados em madeira e cravados para unir peças de madeiras, devendo “ser torneadas e feitas com madeiras duras, folhosas da classe D60, ou com madeiras moles de $\rho_{\text{aparente}} = 600 \text{ kg/m}^3$ impregnadas com resinas que aumentem sua resistência” (ASSOCIAÇÃO... , 2012, p.56). Para sua utilização em sistemas estruturais a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) especifica somente os diâmetros de 16mm, 18mm e 20mm, com pré-furação de diâmetro d_0 igual ao diâmetro da cavilha e somente em corte duplo, sendo o corte simples empregado apenas em ligações secundárias.

Segundo Dias (2013) para não haver retração e com isso a cavilha ficar folgada dentro das peças de madeira, é necessário que esteja completamente seca antes da utilização. A ligação com cavilha é demonstrada na Figura 3.

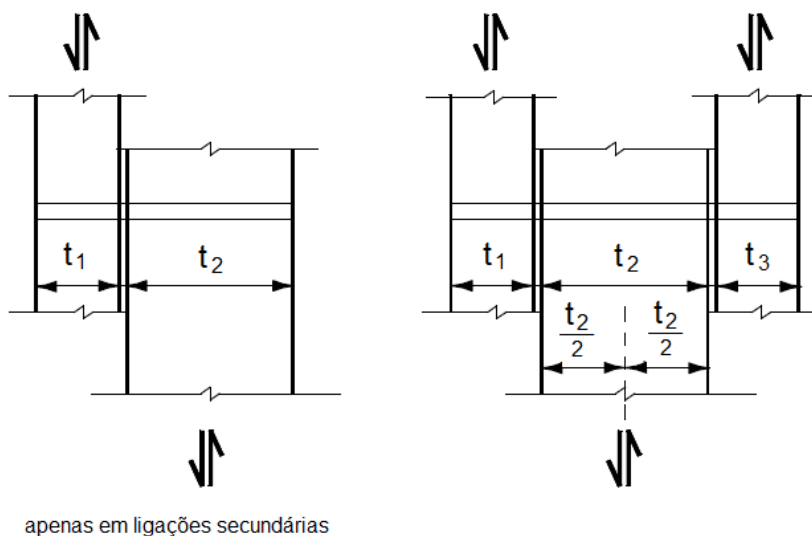


Figura 3 – Ligações com cavilhas
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012).

- Pinos metálicos

Dos diversos tipos de ligações, as com pinos metálicos são as mais utilizadas no Brasil devido a sua facilidade de aplicação, não necessitando mão de obra qualificada, e disponibilidade do material no mercado.

Pino metálico é um tipo de fixador formado geralmente por um eixo cilíndrico de aço muito utilizado para fazer uniões entre peças de madeiras. Usualmente utilizam-se dois tipos principais de pinos metálicos: pregos e parafusos.

Prego: a definição comum é de que esse elemento é um tipo de fixador, onde uma das extremidades é achatada (cabeça) e a outra pontiaguda, sendo cravado por impacto em um determinado material que se pretende fixar ou segurar. Segundo Pfeil e Pfeil (2003, p. 52) o prego pode ser utilizado “em ligações de montagem e ligações definitivas”, isso porque é um material de fácil aplicação e baixo custo.

O mercado apresenta variações desse produto não somente no tamanho, mas também na forma e no material, diversificando sua aplicação e se adaptando ao serviço requerido. É possível ver algumas dessas variações de prego na Figura 4.










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

Figura 4 – Tipos comuns de pregos
Fonte: AGROADS (2013)

Parafuso: Segundo Metálica (2013) parafuso é um elemento de fixação com eixo cônico ou cilíndrico, com rosca parcial ou total, Figura 5. As variações dos tipos de parafusos são devido ao modelo de cabeça, a haste, o formato da rosca e o modo de acionamento.

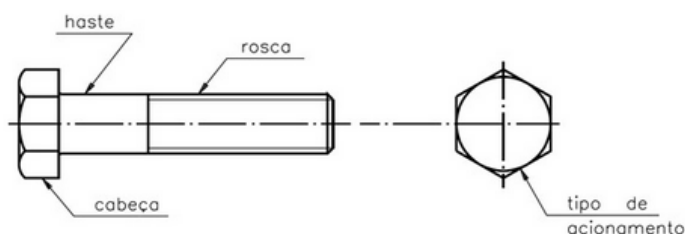


Figura 5 – Esquema de parafuso.
Fonte: Metálica (2013)

Em geral, apresentam-se dois tipos de parafusos, os passantes e não passantes, também denominados auto-atarraxantes. Pfeil e Pfeil (2003) indicam que os parafusos auto-atarraxantes são muito utilizados em marcenaria e pouco empregados como elemento de ligação em estruturas de madeiras.

Em Timber Engineering STEP 1 (1995) surge três denominações diferentes para parafusos, sendo estas:

- Dowel: barra de aço lisa e ajustada ao furo;
- Bolt: parafuso passante com cabeça sextavada, porca e arruela;
- Screw: parafuso auto-atarraxante (rosca soberba).

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS LIGAÇÕES – MODELO DE JOHANSEN

Conforme Timber Engineering STEP 1 (1995) assume-se que tanto a madeira quanto o pino de ligação são ideais, ou seja, a madeira é considerada um material perfeitamente plástico e o pino metálico perfeitamente rígido. Sendo assim, a resistência característica ao embutimento da madeira é constante como mostrado na Figura 6. Esta aproximação simplifica a análise e segundo o documento tem pouca influência no resultado final.

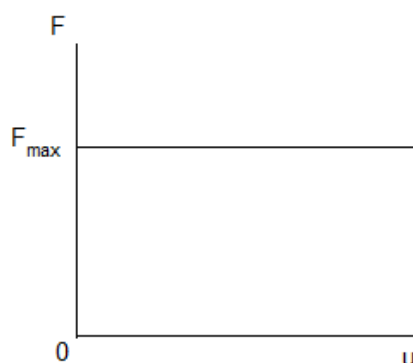


Figura 6 - Característica simplificada da resistência ao embutimento.
Fonte: TimberEngineering STEP 1 (1995).

As notações a serem utilizadas nesse trabalho serão:

t_1 e t_2 são as espessuras da madeira ou da penetração pino, visualizado na Figura 7.

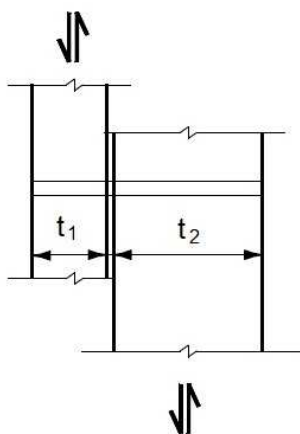


Figura 7 – Espessuras t_1 e t_2 em uma seção de corte.

D	é o diâmetro do pino metálico.
f_e	é o valor da força de embutimento da madeira.
M_k	é o valor característico do momento gerado pela flexão do pino.
γ_M	é o coeficiente da propriedade do material, com valores demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1– Coeficiente para propriedade do material

Combinação permanente	
Madeira maciça	1,3
Madeira laminada colada	1,25
LVL, plywood, OSB	1,2
Panéis de partículas	1,3
Placa de fibras, difícil	1,3
Placas de fibras, média	1,3
Placas de fibras, MDF	1,3
Placas de fibras, soft	1,3
Ligações	1,25
Placas de metal com pré-furação	1,0
Combinação acidental	
	1,0

Fonte: Adaptado EUROCODE 5 (2004)

$f_{e,d} = \frac{f_e}{\gamma_M}$ é o valor de cálculo da força de embutimento.
Sendo $f_{e,d,1}$ correspondente a espessura t_1 e $f_{e,d,2}$ correspondente a espessura t_2 ;

$M_d = \frac{M_k}{\gamma_M}$ é o valor de cálculo do momento gerado pela flexão do pino;

$c = \frac{f_{e,d,2}}{f_{e,d,1}}$ coeficiente de relação entre as resistências ao embutimento das peças de madeira;

R_d é o valor da resistência característica de cálculo, podendo ser visualizado sua aplicação na Figura 8.

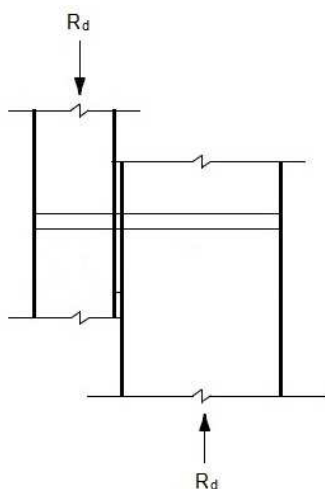


Figura 8 – Resistência característica de cálculo em uma seção de corte

4.2.1 Corte simples

A seguir serão apresentados alguns modelos de falha baseados nos modelos de Johansen, sendo que todas as seções apresentadas são em corte simples.

4.2.1.1 Modelo de falha 1b

Ocorrência de embutimento da madeira em apenas uma das peças sem ocorrência de deformação do pino metálico. Na Figura 9 o embutimento ocorre apenas na primeira peça denominada de t_1 , e na Figura 10 o embutimento ocorre somente na segunda peça denominada de t_2 .

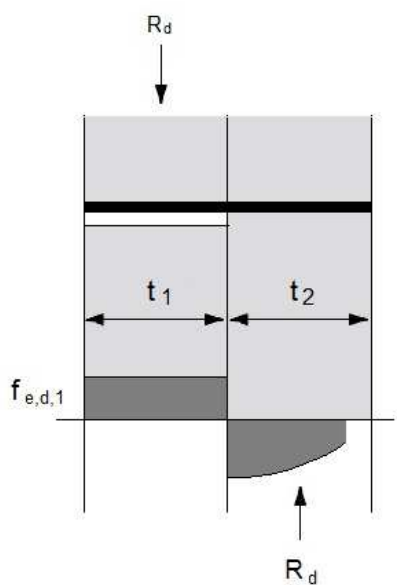


Figura 9 – Modelo de falha 1b em t_1

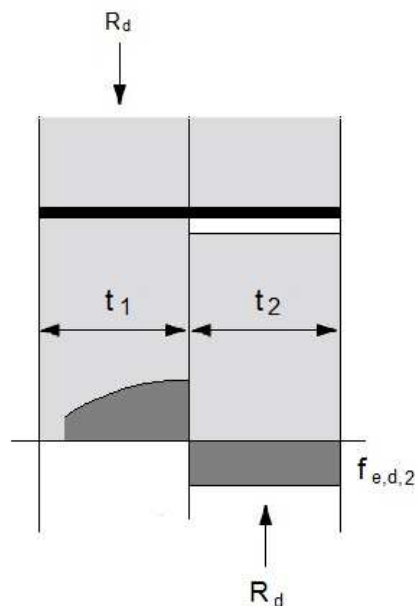


Figura 10 – Modelo de falha 1b em t_2

A resistência da ligação para o modelo de falha 1b é demonstrado na equação (1) para falha em t_1 e na Equação (2) para falha em t_2 .

$$R_d = f_{e,d,1} t_1 d \quad (1)$$

$$R_d = \begin{cases} f_{e,d,2} t_2 d \\ c f_{e,d,1} t_2 d \end{cases} \quad (2)$$

4.2.1.2 Modelo de falha 1a

Ocorrência de embutimento da madeira nas duas peças de madeira simultaneamente, sem deformação do pino metálico, como demonstrado na Figura 11.

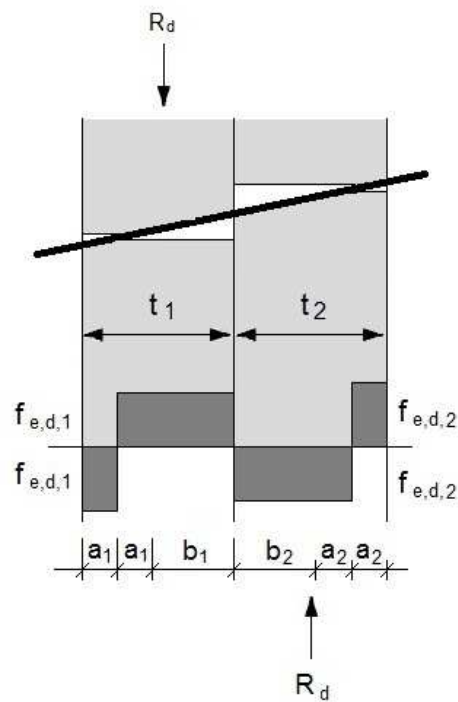


Figura 11– Modelo de falha 1a

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

Sabendo que a resistência é calculada como:

$$R_d = -(f_{e,d,1} d a_1) + (f_{e,d,1} d a_1) + (f_{e,d,1} d b_1)$$

Temos

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

Também podendo ser expressa como:

$$R_d = f_{e,d,1} d b_1 = f_{e,d,2} d b_2 = c f_{e,d,1} d b_2$$

Pois

$$b_1 = c b_2$$

Momento na interface

$$\begin{aligned} &= f_{e,d,1} d \left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) \\ &= f_{e,d,2} d \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \\ &= c f_{e,d,1} d \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Equacionando e substituindo:

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

Teremos:

$$\frac{b_1^2 c + 1}{2 c} = c a_2^2 + a_1^2$$

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

E

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

Substituindo teremos:

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

Resolvendo para b_1 temos:

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

Como especificado:

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

$$R_d = \frac{f_{e,d,1} d t_1}{1+c} \left[\sqrt{c + 2c^2 \left[1 + \frac{t_1}{t_2} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + c^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - c \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (3)$$

4.2.1.3 Modelo de falha 2a

Ocorrência de embutimento da madeira nas duas peças e deformação do pino metálico devido à flexão na segunda peça, como mostrado na Figura12.

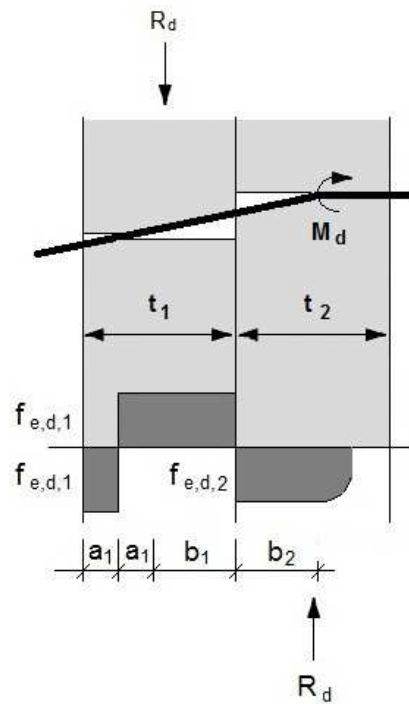


Figura 12 – Modelo de falha 2a

O cálculo da resistência da ligação para o modelo de falha 2a é especificado pela Equação (4) e deduzido na sequência.

Sabendo que:

$$R_d = f_{e,d,1} d b_1 = f_{e,d,2} d b_2 = c f_{e,d,1} d b_2$$

$$b_1 = c b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_d = -f_{e,d,2} d \frac{b_2^2}{2} + f_{e,d,1} d (b_1 + a_1) \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{e,d,1} d a_1 \left(b_1 + b_2 + \frac{3a_1}{2} \right)$$

Substituindo:

$$f_{e,d,2} = c f_{e,d,1} \quad \text{E} \quad a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

Fornece:

$$b_1^2 + t_1 \frac{2c}{2+c} b_1 - \frac{c t_1^2}{2+c} - \frac{M_d}{f_{e,d,1} d} \frac{4c}{2+c} = 0$$

Logo

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

Substituindo b_1 em:

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

Temos:

$$R_d = \frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2 + c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_d}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right] \quad (4)$$

4.2.1.4 Modelo de falha 2b

Ocorrência de embutimento da madeira nas duas peças e com deformação do pino metálico por flexão na primeira peça, esquematizado na Figura 13.

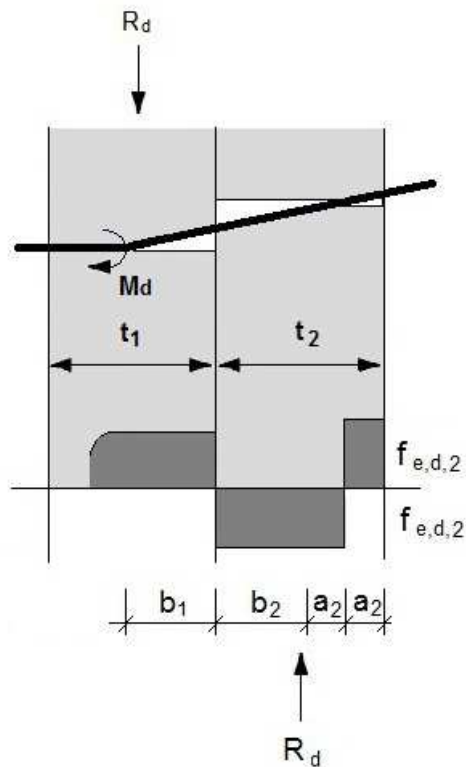


Figura 13 – Modelo de falha 2b

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

Como antes:

$$b_1 = c b_2$$

Fazendo o equilíbrio dos momentos:

$$\Sigma M_d = f_{e,d,1} d \left[\frac{-b_1^2}{2} + c b_2 \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + c a_2 \left(b_1 + t_2 - \frac{3a_2}{2} \right) - c a_2 \left(b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} \right) \right]$$

Substituindo:

$$b_1 = c b_2$$

E

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

Temos:

$$b_2^2 + \frac{c}{2c} \frac{4 t_2 b_2}{(2c+1)} - \left(\frac{c t_2^2}{4} + \frac{M_d}{f_{e,d,1} d} \right) \frac{4}{c(2c+1)} = 0$$

Resolvendo para b_2 :

$$b_2 = \frac{-t_2}{2c+1} + \sqrt{\frac{t_2^2}{(2c+1)^2} + \frac{t_2^2}{2c+1} + \frac{4M_d}{f_{e,d,1} d c(2c+1)}}$$

Sendo

$$R_d = c f_{e,d,1} d b_2$$

Assim:

$$R_d = \frac{f_{e,d,1} d t_2}{1+2c} \left[\sqrt{2c^2(1+c) + \frac{4\beta(1+2c)M_d}{f_{e,d,1} d t_2^2}} - c \right] \quad (5)$$

4.2.1.5 Modelo de falha 3

Considerando que há ocorrência de deformação do pino metálico devido a flexão e embutimento da madeira nas duas peças, podendo ser visualizado na Figura 14.

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

Com a somatória dos momentos temos:

$$M_d + M_d = f_{e,d,1} d b_1 \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - c f_{e,d,1} d \frac{b_2^2}{2}$$

Lembrando que:

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

Substituindo e resolvendo para b_1 :

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 M_d}{f_{e,d,1} d}} \sqrt{\frac{2c}{1+c}}$$

Sendo:

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

Temos:

$$R_d = \sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_d f_{e,d,1} d} \quad (6)$$

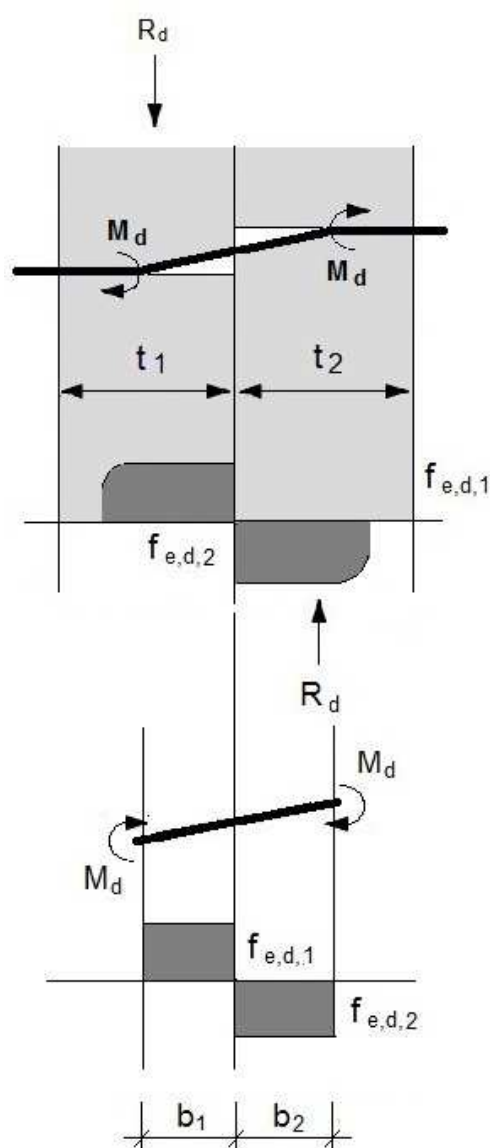


Figura 14 – Modelo de falha 3.

4.2.2 Dupla seção de corte

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

$$R_d = 2 (f_{e,d,1} t_1 d) \quad \begin{array}{l} \text{Modelo de falha 1b} \\ \text{(Figura 9)} \end{array} \quad (7)$$

$$R_d = 2 (0,5 f_{e,d,1} t_2 d c) \quad \begin{array}{l} \text{Modelo de falha 1b} \\ \text{(Figura 10)} \end{array} \quad (8)$$

$$R_d = 2 \left(\frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2 + c} \left[\sqrt{2c(1 + c) + \frac{4 c(2 + c)M_d}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right] \right) \quad \begin{array}{l} \text{Modelo de falha 2} \\ \text{(Figura 12 ou 13)} \end{array} \quad (9)$$

$$R_d = 2 \left(\sqrt{\frac{2 c}{1 + c}} \sqrt{2 M_d f_{e,d,1} d} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Modelo de falha 3} \\ \text{(Figura 14)} \end{array} \quad (10)$$

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

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

Ainda, o modelo de Johansen menciona que se deve acrescentar 10% da resistência total da ligação para abranger os efeitos das forças axiais.

4.3 DOCUMENTOS NORMATIVOS

Neste trabalho serão comparados os critérios de dimensionamento de ligações com pinos metálicos em estruturas de madeiras da norma brasileira e europeia. A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190 - em revisão e processo de publicação - (2012) é genérica e apresenta apenas uma equação para embutimento da madeira e uma para flexão do pino ambas em uma seção de corte, já a Norma Europeia EUROCODE 5 (2004) é mais completa, apresentando várias equações para análise em corte simples e corte duplo, abrangendo os modelos de falha descritos por Johansen, considerando ainda força de atrito entre a madeira e o pino e a força de arrancamento.

4.3.1 Revisão NBR 7190

O critério de dimensionamento conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) apresenta apenas um modelo para pinos metálicos, não sendo diferenciado para pregos e parafusos. Ou seja, o documento normativo nacional assume que o comportamento mecânico das ligações feitas com pregos e parafusos passantes é equivalente. Ainda com relação ao documento normativo nacional, o mesmo não apresenta modelo específico para cálculo de ligações em madeira com parafusos ajustados (dowel) e pregos (nail) e desconsidera a utilização de parafusos auto-atarraxantes (screw) para elementos estruturais.

Segundo a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2011, p. 52) para evitar o fendilhamento na madeira nas regiões das ligações, é necessário respeitar as especificações de espaçamentos e pré-furação e fazer a verificação conforme Equação (11) para que nas regiões de ligação não haja a ruptura por tração normal às fibras, Figura 15.

$$F \sin \alpha \leq f_{v,d} b_e t \quad (11)$$

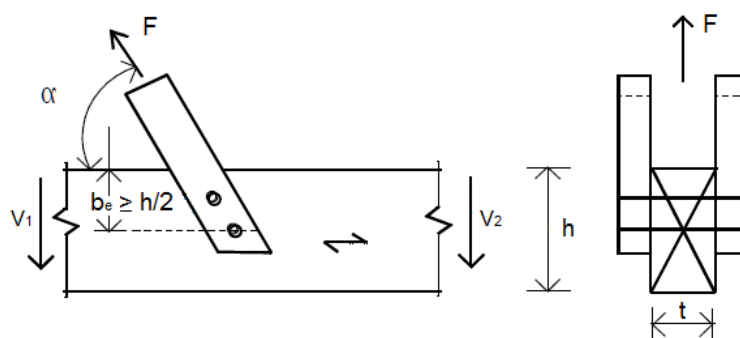


Figura 15 – Ligações com tração normal às fibras
Fonte: Associação brasileira de normas técnicas (2011, p.52)

onde:

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

4.3.1.1 Pré-furação

A Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.., 2011, p. 53) especifica que no caso de estruturas com ligações pregadas é obrigatório que seja feita a pré-furação na madeira, sendo o diâmetro efetivo dos pregos (d_{ef}) maior que o diâmetro da pré-furação (d_0), recomendando-se os valores a seguir:

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

Porém, abre-se uma exceção para estruturas provisórias permitindo “o uso de ligações pregadas sem pré-furação com as seguintes condições: uso de madeira leve ($\rho < 600 \text{ kg/m}^3$); diâmetro do prego d não maior que $1/6 d$ espessura da peça mais fina de madeira e pregos espaçados de $10d$ ” (PFEIL; PFEIL, 2003, p. 59).

Pfeil e Pfeil (2003, p. 64) esclarecer que a norma brasileira NBR 7190-1997 não considera parafusos auto-atarraxantes como conectores de peças estruturais de madeira.

Ainda, a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.. ,2012, p. 53) considera que as ligações com parafusos de porcas e arruelas (parafuso passante) sejam consideradas rígidas, a pré-furação deve ser feita com o diâmetro da pré-furação (d_0) não maior que o diâmetro do parafuso (d) com acréscimo de 5mm, logo a ligação será considerada deformável caso o diâmetro d_0 seja maior que o diâmetro d do parafuso.

4.3.1.2 Espaçamento

Conforme especificado Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO... ,2012, p. 59) para ligações com pinos:

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

Como descrito acima, os espaçamentos são ilustrados na Figura (16) .

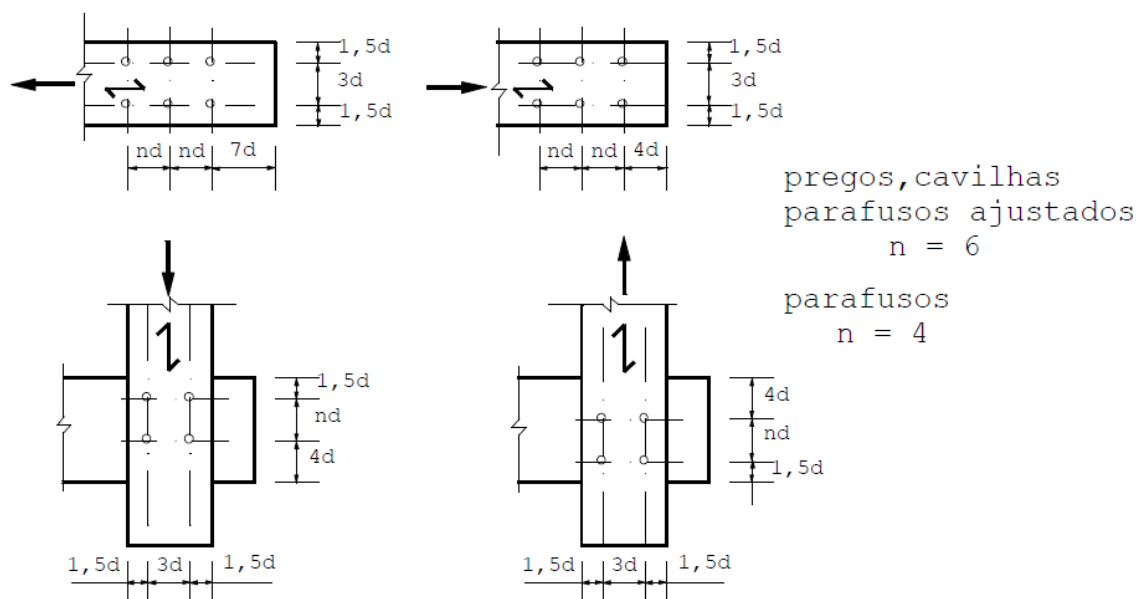


Figura 16 – Espaçamento em ligações com pinos
Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012, p. 60).

4.3.1.3 Resistência das ligações com pinos metálicos

Segundo Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.., 2012, p. 54), o número de pinos em uma ligação influencia na resistência total da ligação, sendo que até oito pinos em linha, dispostos paralelamente à força aplicada, a resistência total é a somatória da resistência individual de cada pino, acima de oito pinos os suplementares devem ser considerados $2/3$ da resistência individual. Assim, com “n” sendo o número de pinos efetivos, temos o número convencional de pinos calculado conforme Equação (12).

$$n_0 = 8 + \frac{2}{3} (n - 8) \quad (12)$$

Para uma seção de corte é levado em consideração à resistência ao embutimento (f_{wed}), a resistência ao escoamento do pino (f_{yd}), o diâmetro do pino (d) e a espessura convencional t , sendo o valor de tal espessura o menor entre t_1 e t_2 , como exposto na Figura 17.

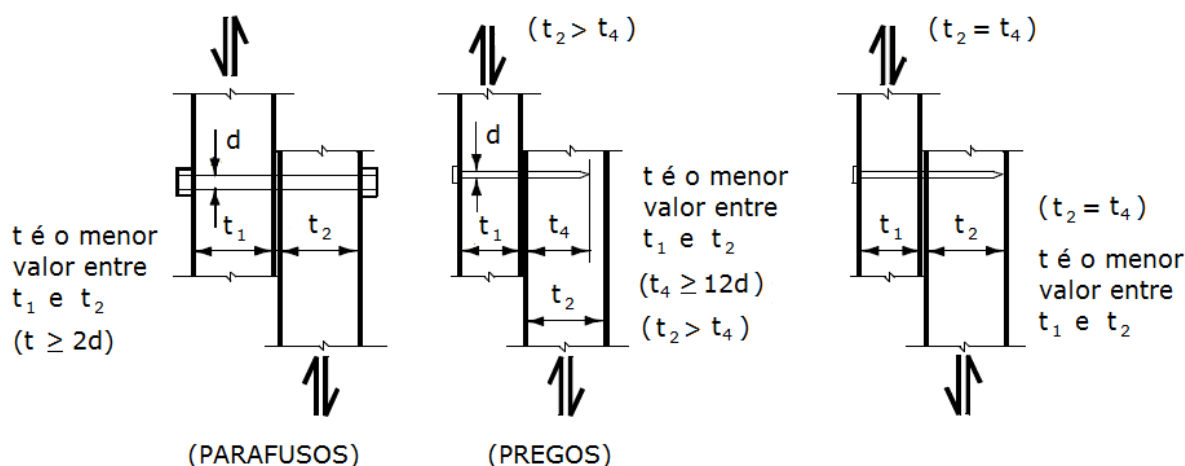


Figura 17 – Pinos metálicos em corte simples
 Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012, p.54).

Em seções de corte duplo, a espessura convencional t é a menor espessura entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções e $t_2/2$ e t_3 na outra seção, mostrada na Figura 18.

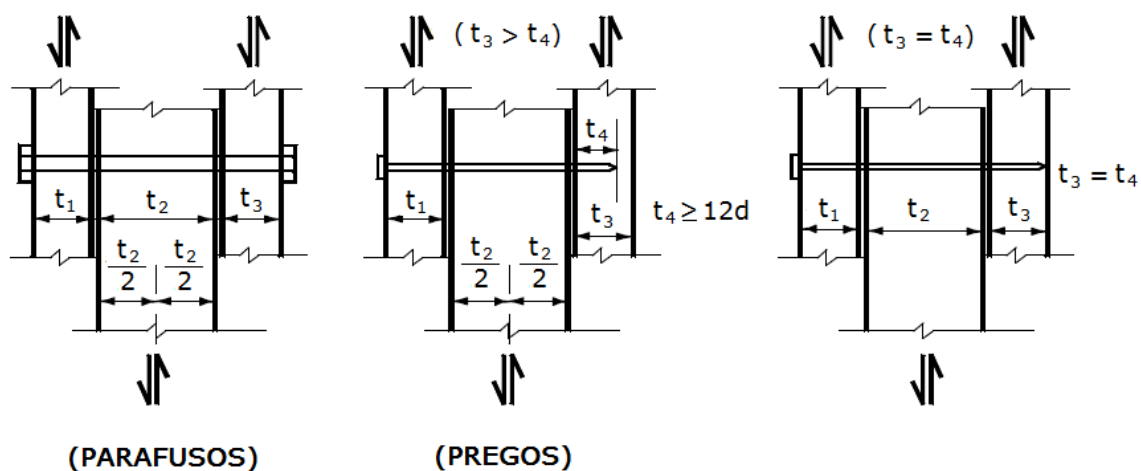


Figura 18 – Pinos metálicos em corte duplo
 Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012, p.56).

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

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (13)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (14)$$

onde:

- t é a espessura especificada nas Figuras 17 e 18;
- d é o diâmetro do pino metálico;

$f_{y,k}$ é o valor da resistência de escoamento do pino

$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_s}$ é o valor da resistência de cálculo do escoamento do pino, com $\gamma_s = 1,1$

Os dois casos apresentados na Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.., 2012, p. 55) são:

- Equação (15) quando $\beta \leq \beta_{lim}$: ocorrência de embutimento na madeira.

$$R_d = 0,50 t d f_{e,d} \quad (15)$$

- Equação (16) quando $\beta \geq \beta_{lim}$: ocorrência de flexão do pino

$$R_d = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{y,d} \quad (16)$$

4.3.2 EUROCODE 5

Segundo EUROCODE 5 (2004) e conforme a Figura 19, exceto quando houver um cálculo mais detalhado, deve ser demonstrado que a seguinte condição é satisfeita pela Equação (17).

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (17)$$

$$F_{v,Ed} = \max. \left\{ \begin{array}{l} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{array} \right. \quad (18)$$

onde:

$F_{90,Rd}$ resistência de projeto ao fendilhamento;

$F_{v,Ed,1}$, $F_{v,Ed,2}$ resistência de projeto ao cisalhamento de cada lado do conector.

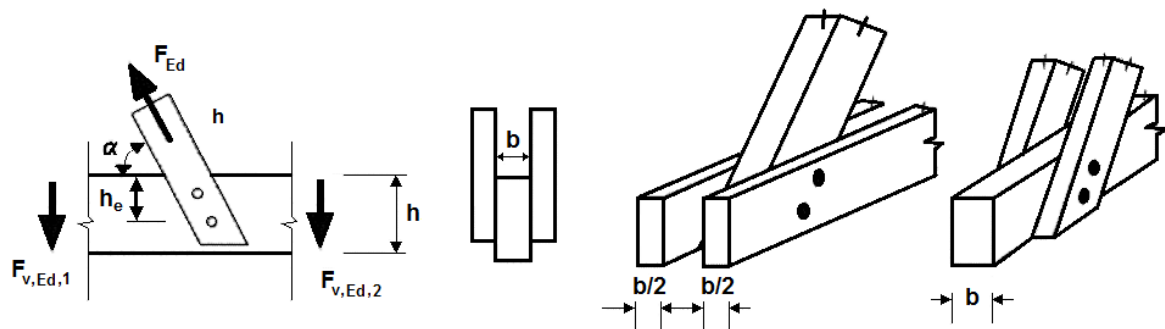


Figura 19 - Força combinada agindo em um ângulo as fibras

Fonte: EUROCODE5 (2004)

Para se calcular a resistência ao fendilhamento de madeiras com baixa densidade (denominadas em inglês como softwoods), deve-se utilizar a Equação 19, como descrita a seguir:

$$F_{90,Rd} = 14bw \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad (19)$$

Sendo w um fator de modificação especificado na Equação (21):

$$w = \begin{cases} \max. \left\{ \left(\frac{w_{pl}}{100}\right)^{0,35} \right. & \text{para chapa de dentes estampados} \\ 1 & \text{para todos os outros conectores} \end{cases} \quad (20)$$

Os símbolos são definidos a seguir:

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

Quando ocorrer alternância de esforços na ligação a resistência da ligação deve ser reduzida. O efeito sobre a intensidade da ligação de ações de longo prazo ou a médio prazo, alternando entre uma força de tração ($F_{t,Ed}$) e uma força de compressão ($F_{c,Ed}$) deve ser levado em consideração, projetando a ligação para ($F_{t,Ed} + 0,5 F_{c,Ed}$) e ($F_{c,Ed} + 0,5 F_{t,Ed}$).

O valor de projeto para resistência da ligação com pinos metálicos (pregos, parafusos passantes, parafusos auto-atarraxantes ou pino com pouca rugosidade) entre peças de madeira ou derivados de madeira deve ser o menor das fórmulas a seguir:

- Uma seção de corte

$$\left(\begin{array}{l} f_{e,d,1} t_1 d \\ f_{e,d,1} t_2 d c \end{array} \right. \quad (21)$$

$$(22)$$

$$\frac{f_{e,d,1} t_1 d}{1+c} \left[\sqrt{c + 2c^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + c^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - c \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (23)$$

$$1,05 \frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2+c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_{y,d}}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (24)$$

$$1,05 \frac{f_{e,d,1} t_2 d}{1+2c} \left[\sqrt{2c^2(1+c) + \frac{4c(1+2c)M_{y,d}}{f_{e,d,1} d t_2^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (25)$$

$$1,15 \sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_{y,d} f_{e,d,1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (26)$$

- Duas seções de corte

$$R_d = \min. \left\{ \begin{array}{l} 2 (f_{e,d,1} t_1 d) \quad (27) \\ 2 (0,5 f_{e,d,1} t_2 d c) \quad (28) \\ 2 \left(1,05 \frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2+c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_{y,d}}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right) \quad (29) \\ 2 \left(1,15 \sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_{y,d} f_{e,d,1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right) \quad (30) \end{array} \right.$$

Onde: $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ Resistência característica ao arrancamento do conector

Nas Equações (23) até (26), (29) e (30), o primeiro termo é a capacidade de carga de acordo com a teoria de Johansen, enquanto o segundo termo ($F_{ax,Rk}/4$) é a contribuição da resistência ao arrancamento. A contribuição para a capacidade de carga, devido a resistência ao arrancamento deve ser limitada aos seguintes percentagens da parcela de Johansen:

- Pregos redondos	15%
- Pregos quadrados e com ranhuras	25%
- Outros pregos	50%
- Parafuso auto-atarraxante	100%
- Parafuso com porca e arruela	25%
- Pinos	0%

Sendo que se $F_{ax,Rk}$ não for conhecida, deve ser tomada como zero.

Ainda, deve ser considerada uma resistência adicional aos conectores tipo pino metálico nos casos de falha modo 2 e 3. Isso se deve ao atrito entre o conector e a madeira e também devido às restrições que as cabeças dos parafusos e as arruelas promovem na ligação. Levando em consideração esse atrito, o EUROCODE 5 (2004) tem os coeficientes 1,05 e 1,15, no início das equações.

4.3.2.1 Parafusos passantes com porca e arruela.

Segundo o EUROCODE 5 (2004) para ligações entre peças de madeira e LVL os parafusos passantes com porca e arruela até 30mm de diâmetros e ângulo α com as fibras, é feito as seguintes considerações:

$$f_{e,\alpha} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{e,0} = 0,082 (1 - 0,01d) \rho_k \quad \text{N/mm}^2$$

$$k_{90} = \begin{cases} = 1,35 + 0,015d & \text{para madeiras macias} \\ = 1,30 + 0,015d & \text{LVL} \\ = 0,90 + 0,015d & \text{para madeiras duras} \end{cases}$$

Com a densidade (ρ_k) em kg/m³ e o diâmetro (d) em mm.

4.3.2.1.1 Momento devido à flexão

Quando ocorre a flexão do pino o mesmo produz um momento característico, sendo que para parafusos de eixo redondos com o material em aço deve ser calculado conforme Equação (31).

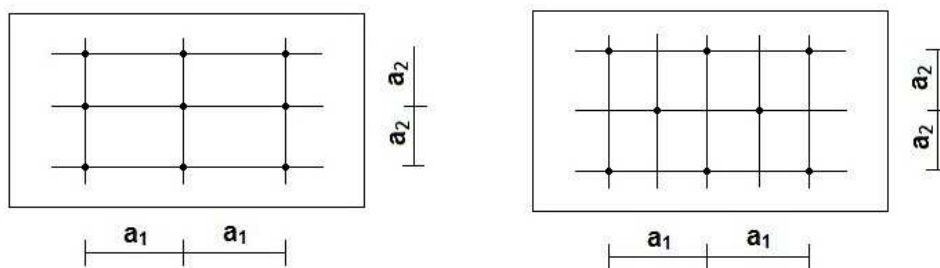
$$M_d = 0,3 f_u d^{2,6} \quad (31)$$

Sendoa resistência à tração (f_u) em N/mm².

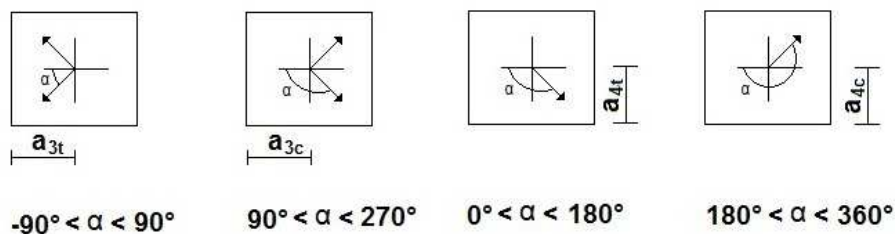
4.3.2.1.2 Espaçamento

Os espaços e distâncias para utilização dos parafusos são especificados pelo EUROCODE 5 (2004) conforme a Quadro 1, com seus símbolos definidos na Figura 20.

Espaço perpendicular e paralelo a fibra:



Distância de extremidade e borda:



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

Figura 20 – Definição do espaçamento e distância para ligações.
Fonte: Adaptada EUROCODE 5 (2004)

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

Quadro 1 – Espaçamento e distâncias mínimas para parafusos
Fonte: Adaptado de EUROCODE 5 (2004)

4.3.2.1.3 Numero efetivo de parafusos

Número efetivo de parafusos para uma linha com n parafusos na direção paralela as fibras, pode ser calculado conforme Equação (32).

$$n_{ef} = \min. \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,94} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right. \quad (32)$$

onde:

a_1 distância entre os parafusos

d diâmetro do parafuso

n número de parafusos

n_{ef} número efetivo de parafusos

Se a linha com n parafusos estiver na direção perpendicular às fibras o número efetivo de parafusos será igual ao número de parafusos ($n_{ef} = n$).

4.3.2.1.4 Resistência ao arrancamento

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$) utilizada para parafusos passantes é o menor valor entre:

- Resistência de tração do parafuso:

$$\frac{\pi d^2}{4} f_{yd} \quad (33)$$

- Resistência ao embutimento da arruela na madeira

$$\left(\frac{\pi d_2^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4} \right) 3 f_{ed} \quad (34)$$

4.4 DISCUSSÕES DA REVISÃO BIBLIGRÁFICA

O modelo de Johansen mesmo tendo sido formulado na década de 40 ainda é o mais utilizado nas principais normas internacionais. Mesmo havendo estudos de outros modelos, ainda não são conclusivos para aplicação em normas.

Os modelos teóricos para o calculada resistência de ligações com pinos metálicos, realizado tanto pela NBR7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) quanto pelo EUROCODE 5 (1993), derivam do modelo de Johansen, porém existem diferenças entre os textos.

O projeto de revisão da norma NBR 7190 baseia-se no modelo de Johansen como no EUROCODE 5, entretanto simplifica os modelos de ruptura para apenas dois casos: embutimento da madeira e flexão do pino. Ocorre que as equações apresentadas na norma brasileira só são válidas para determinados casos de configuração de geometria e materiais.

A Equação (15) da norma brasileira é a mesma Equação (3) do modelo de Johansen, considerando que as peças de madeiras a serem unidas são de mesma espécie, ou seja, que a resistência ao embutimento é a mesma ($f_{e,d,1} = f_{e,d,2}$), e que as espessuras serão iguais ($t_1 = t_2$). Segue a dedução da equação da norma brasileira a partir do modelo de Johansen para obtenção da Equação (35).

Considerando:

$$c = \frac{f_{e,d,2}}{f_{e,d,1}} = 1$$

e

$$\frac{t_2}{t_1} = 1$$

Substituindo na equação (3) temos:

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

Resolvendo:

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

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

$$R_d = 0,414 f_{e,d} d t \quad (35)$$

A atual versão da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO... , 1997) apresenta o fator de multiplicação igual a 0,4, já o projeto de revisão do norma NBR 7190/2012 apresenta o fator de multiplicação de 0,5. Não havendo explicação teórica que demonstre a alteração.

Quando o cálculo é realizado para flexão do pino, a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO.. ,2012) utiliza a Equação (6), considerando que as peças de madeiras unidas sejam a mesma ($f_{e,d,1} = f_{e,d,2}$) e apenas a utilização de parafuso passante com porcas e arruelas. Assim a Equação (37) é obtida através de a dedução a seguir.

Sendo

$$c = \frac{f_{e,d,2}}{f_{e,d,1}} = 1$$

Substituindo na Equação (26) temos:

$$R_d = \sqrt{\frac{2 (1)}{1 + 1}} \sqrt{2 M_d f_{e,d,1} d}$$

$$R_d = \sqrt{2 M_d f_{e,d,1} d}$$

No EUROCODE 5 (1993) o valor de cálculo do momento (M_d) é especificado, conforme a Equação (36).

$$M_d = 0,8 f_u \frac{d^3}{6} \quad (36)$$

Substituindo o valor do momento temos:

$$R_d = \sqrt{2 \left(0,8 f_{y,d} \frac{d^3}{6} \right) f_{e,d,1} d}$$

$$R_d = \sqrt{0,266 d^4 f_{y,d} f_{e,d,1}}$$

$$R_d = 0,516 d^2 \sqrt{f_{y,d} f_{e,d,1}} \quad (37)$$

Sendo assim, pode-se afirmar que as equações expostas na Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) são para casos restritos.

Já o EUROCODE 5 (2004) seguem as equações conforme o modelo de Johansen sem restrições, logo o cálculo é mais detalhado, podendo ser mais confiável.

Para avaliar a eficiência dos modelos de cálculo da Revisão NBR 7190 e EUROCODE 5 (2004) são necessárias simulações numéricas e uma investigação experimental. Neste trabalho realizamos apenas a investigação numérica, comparando resultados das normas para situações corriqueiras.

5 AVALIAÇÃO TEÓRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DA REVISÃO DA NORMA BRASILEIRA NBR 7190 (2012) E DO EUROCODE 5 (2004).

Para a avaliação teórica são simulados os dimensionamentos de ligações parafusadas utilizando parafuso sextavado rosca parcial com porca e arruela, sendo de aço de alta resistência atendendo a ASTM A325 e outro grupo com parafuso francês com porca sextavada e arruela, sendo o aço de baixa resistência atendendo ASTM A307.

Conforme NBR 8800/2008 os valores mínimos da resistência à ruptura e da resistência ao escoamento de parafusos é apresentado no Quadro 2, sendo todos conforme suas respectivas normas e especificações. Ainda, é especificando que os parafusos fabricados com aço temperado não podem ser soldados nem aquecidos.

Especificação	f_y MPa	f_u MPa	Diâmetro d	
			Mm	Pol
ASTM A307	-	415	-	$\frac{1}{2} \leq d \leq 4$
ISSO 898-1 Classe 4.6	235	400	$12 \leq d \leq 36$	-
ASTM A325 ^a	635	825	$16 \leq d \leq 24$	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1$
	560	725	$24 \leq d \leq 36$	$1 \leq d \leq 1 \frac{1}{2}$
ISO 4016 Classe 8.8	640	800	$12 \leq d \leq 36$	-
ASTM A490	895	1035	$16 \leq d \leq 36$	$\frac{1}{2} \leq d \leq 1 \frac{1}{2}$
ISSO 4016 Classe 10.9	900	1000	$12 \leq d \leq 36$	-

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

Quadro 2 – Materiais usados em parafusos

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Serão utilizadas espécies diferentes de madeira, uma de reflorestamento e outra nativa, Pinus e Itaúba, respectivamente. Para as análises serão utilizados os valores de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, módulo de elasticidade à compressão e densidade aparente, conforme as classes de resistência segunda Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012), Tabelas 2e Tabela 3.

Tabela 2– Classe de resistência das coníferas

Coníferas (valores na condição padrão de referencia U = 12%)				
Classes	f_{c0k} (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (20012)

Tabela 3 – Classe de resistência das folhosas

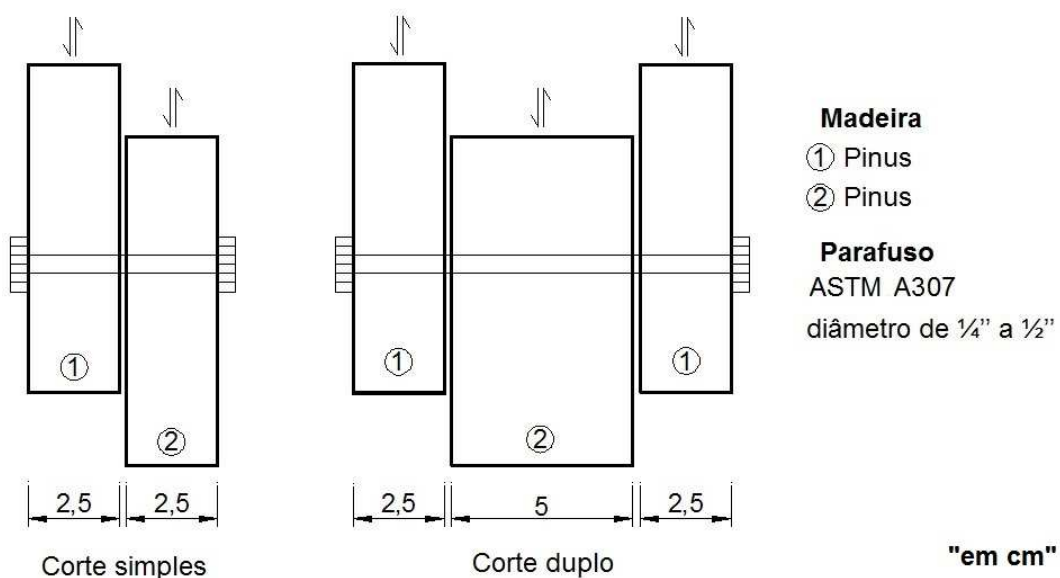
Folhosas (valores na condição padrão de referencia U = 12%)				
Classes	f_{c0k} (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	$\rho_{aparente}$ (kg/m ³)
D20	20	4	9500	650
D30	30	5	14500	800
D40	40	6	19500	950
D50	50	7	22000	970
D60	60	8	24500	1000

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (20012)

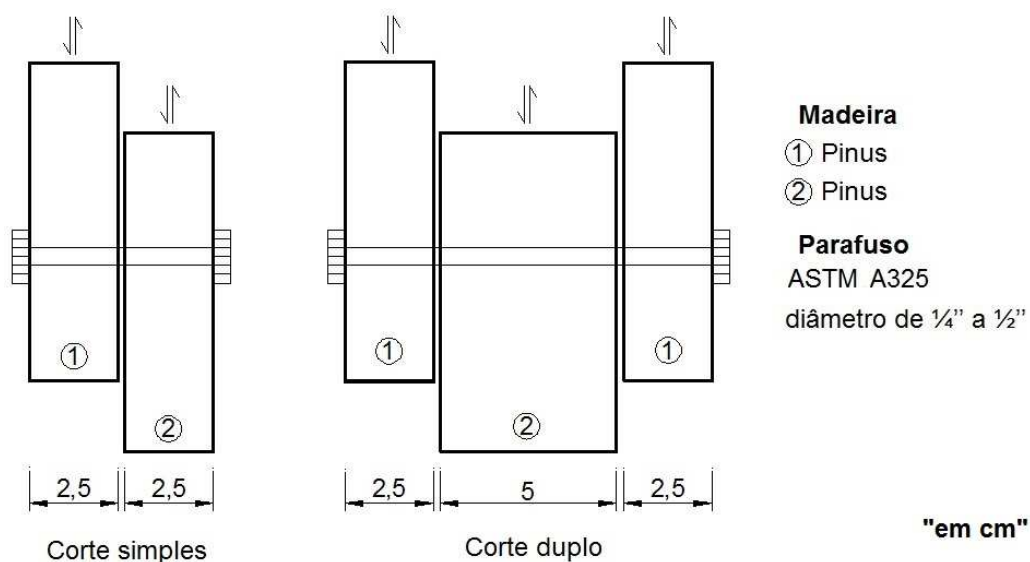
A madeira pinus é considerada como uma madeira de classe C30, sendo a Itaúba uma madeira de classe D40, logo os valores utilizados para resistência característica ao embutimento serão o f_{c0k} , tanto para os cálculos conforme a Revisão NBR 7190 (2012) quanto para os cálculos do EUROCODE 5 (2004). Isso se deve ao fato do EUROCODE 5 (2004) apresentar uma fórmula empírica para obtenção da resistência ao embutimento com base em madeiras europeias, podendo interferir na análise dos resultados das resistências.

As simulações realizadas nesse trabalho tem como principio utilizar corpos de prova que sejam os mais usuais em estruturas de madeiras, ou seja, a espécie das madeiras e parafusos são de facilmente encontrados no comércio sendo as dimensões (espessura t do corpo de prova) comumente observadas.

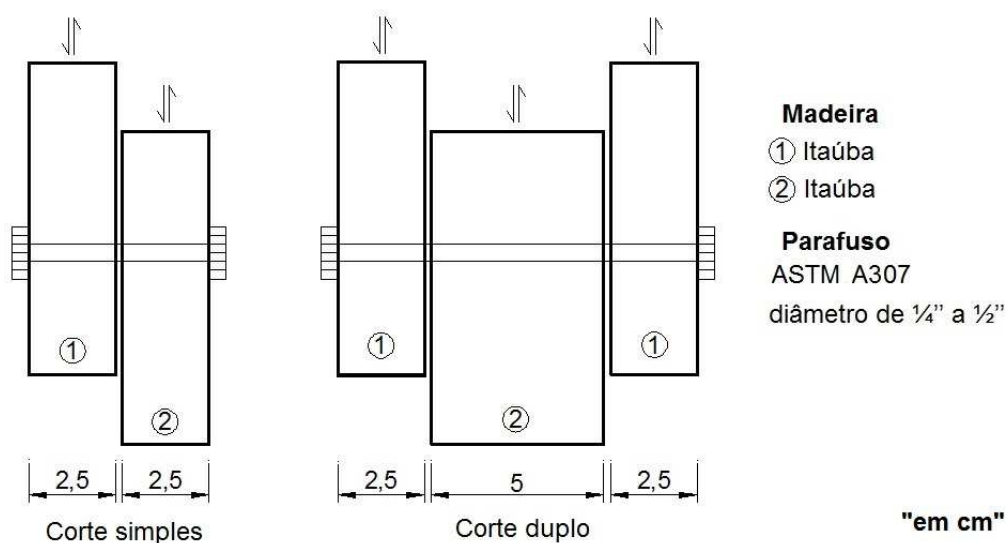
Sendo assim, será apresentado na Figura 21 até Figura 28 ilustrações dos modelos dos corpos de prova, especificando em cada uma as espessuras, o tipo de madeira e o tipo de parafuso utilizado.

5.1 MODELO DE CORPO DE PROVA A₁Figura 21 – Modelo de corpos de prova A₁.

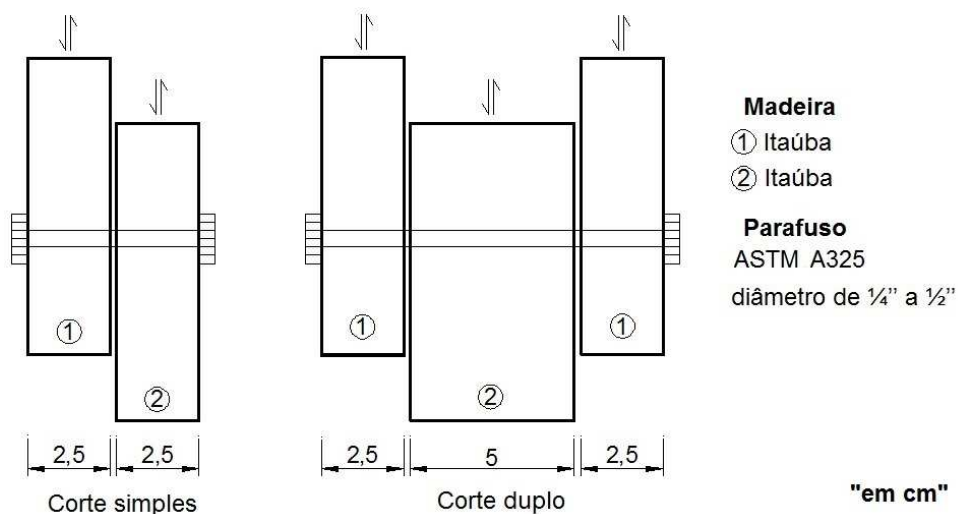
Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO A.

5.2 MODELO DE CORPO DE PROVA A₂Figura 22 – Modelo de corpos de prova A₂.

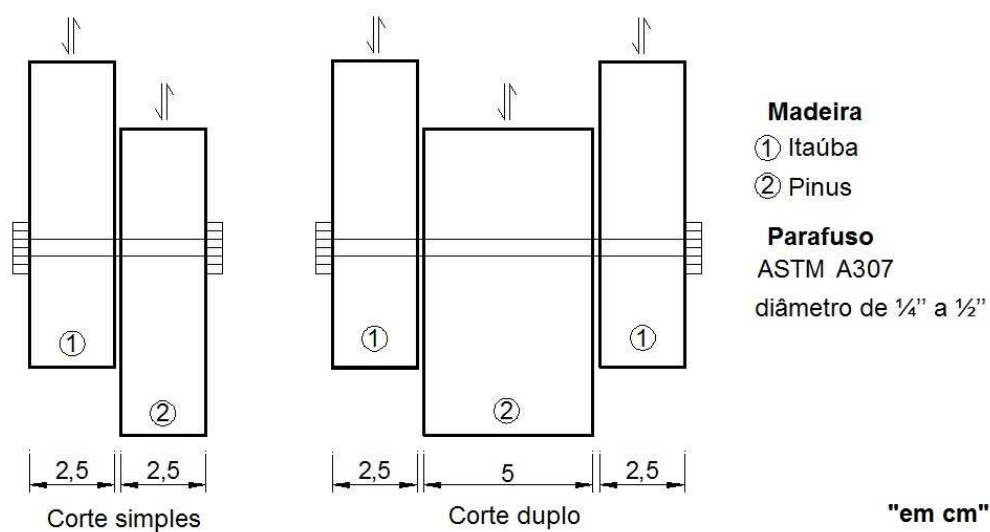
Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO B.

5.3 MODELO DE CORPO DE PROVA B₁Figura 23 – Modelo de corpos de prova B₁.

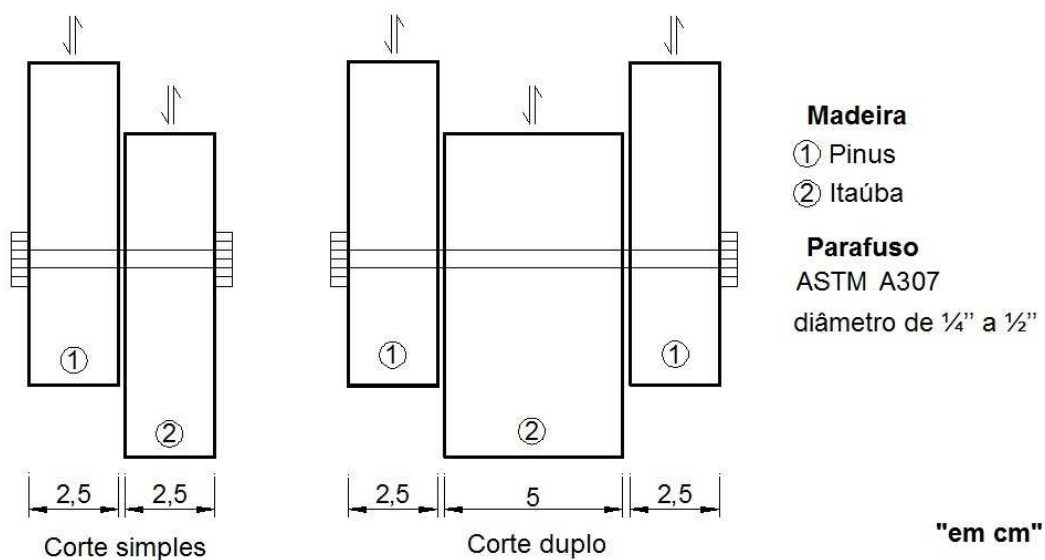
Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO C.

5.4 MODELO DE CORPO DE PROVA B₂Figura 24 – Modelo de corpos de prova B₂.

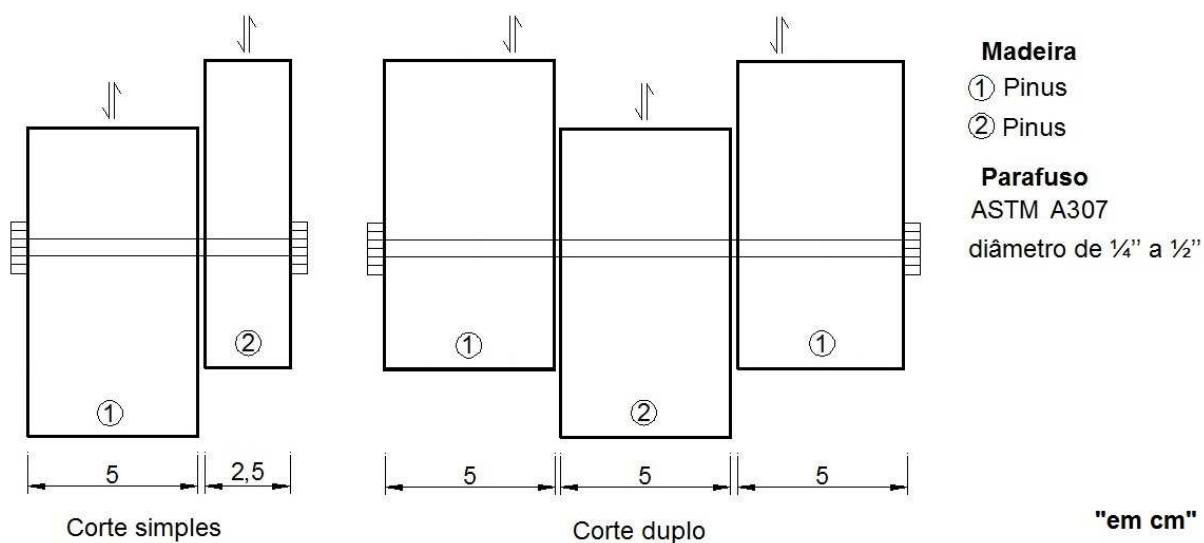
Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO D.

5.5 MODELO DE CORPO DE PROVA C₁Figura 25 – Modelo de corpos de prova C₁.

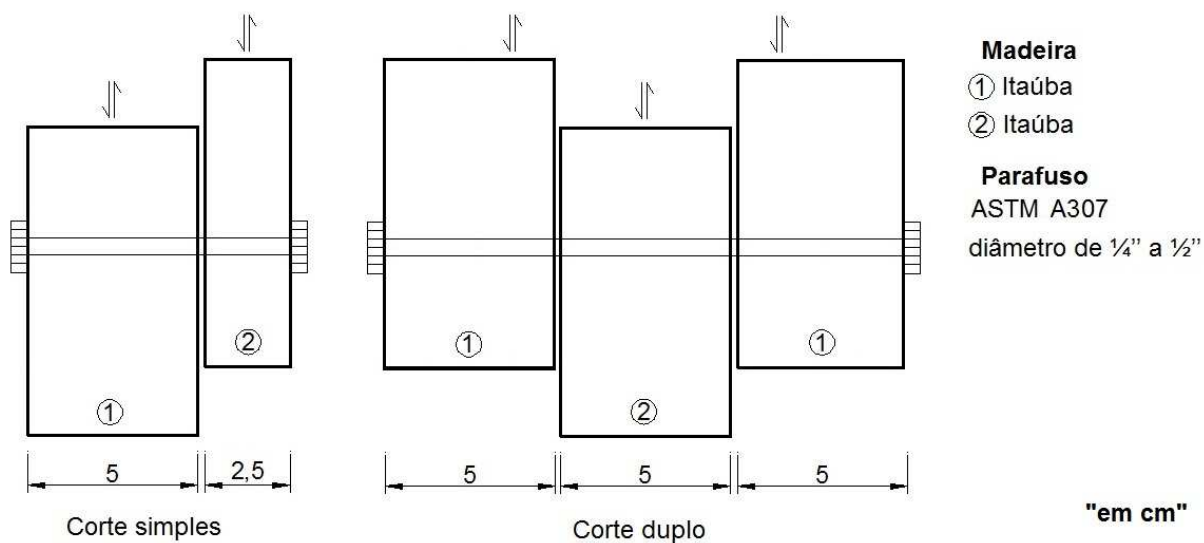
Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO E.

5.6 MODELO DE CORPO DE PROVA C₂Figura 26 – Modelo de corpos de prova C₂.

Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO F.

5.7 MODELO DE CORPO DE PROVA D₁Figura 27 – Modelo de corpos de prova D₁.

Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO G.

5.8 MODELO DE CORPO DE PROVA D₂Figura 28 – Modelo de corpos de prova D₂.

Os cálculos para cada uma das simulações efetuadas são descritos no ANEXO H.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 COMPARAÇÃO POR MODELO DE PROVA

6.1.1 Modelo de corpo de prova A₁

Diâmetros do parafuso de ¼” (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 3
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de 5/16” (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso 3/8” (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de ½” (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 4 – Resistência das ligações para corpo de prova A₁ (kN)

		¼”	5/16”	3/8”	½”
Corte Simples	Revisão NBR 7190	1,72	3,00	3,75	4,76
	EUROCODE 5	2,47	3,11	3,80	4,93
Corte duplo	Revisão NBR 7190	3,44	6,00	7,50	9,53
	EUROCODE 5	5,03	6,81	9,30	13,27

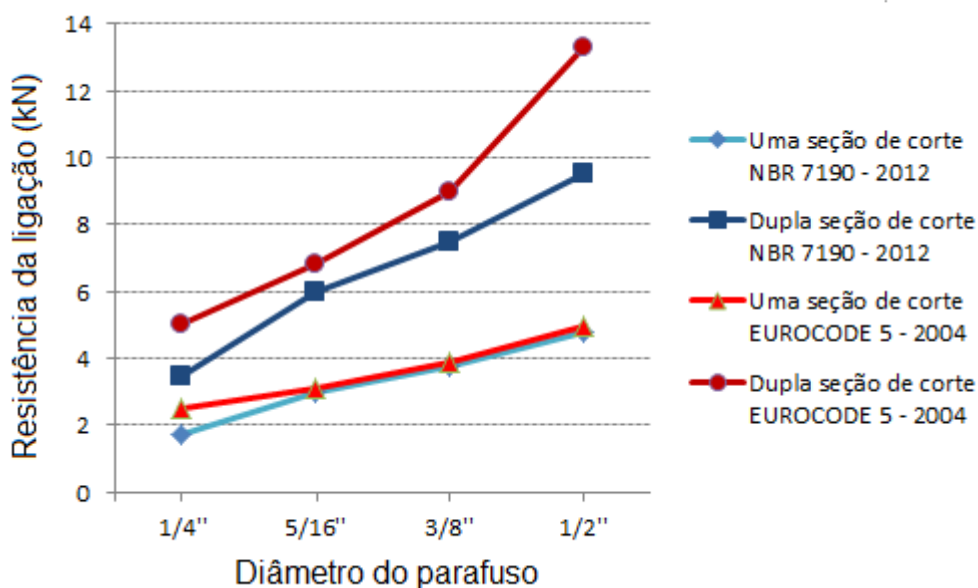


Gráfico 1– Resistência modelo corpo de prova A

6.1.2 Modelo de corpo de prova A₂

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 5/16" (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso 3/8" (10 milímetros)

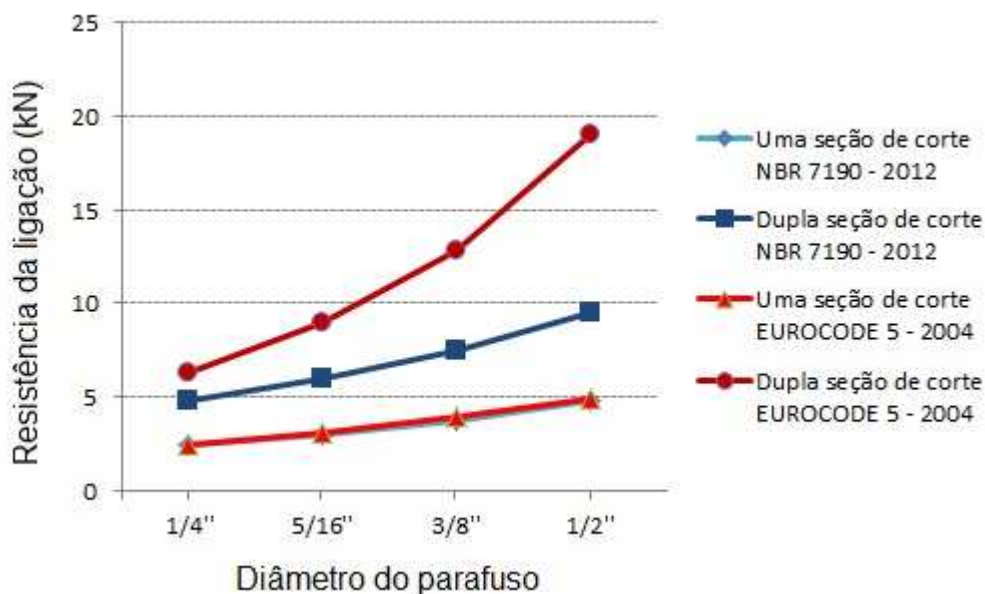
- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 5– Resistência das ligações para corpo de prova A₂ (kN)

		1/4"	5/16"	3/8"	1/2"
Corte simples	Revisão NBR 7190	2,38	3	3,75	4,76
	EUROCODE 5	2,47	3,11	3,88	4,93
Corte duplo	Revisão NBR 7190	4,76	6	7,50	9,53
	EUROCODE 5	6,27	8,94	12,84	19,05

Gráfico 2 – Resistência do modelo do corpo de prova A₂

6.1.3 Modelo de corpo de prova B₁

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 3
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de 5/16" (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso 3/8" (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira

- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 6 – Resistência das ligações para corpo de prova B₁ (kN)

		1/4"	5/16"	3/8"	1/2"
Corte simples	Revisão NBR 7190	2,02	4	5	6,35
	EUROCODE 5	3,02	4,14	5,18	6,58
Corte duplo	Revisão NBR 7190	4,03	8	10	12,7
	EUROCODE 5	6,04	8,57	11,53	16,18

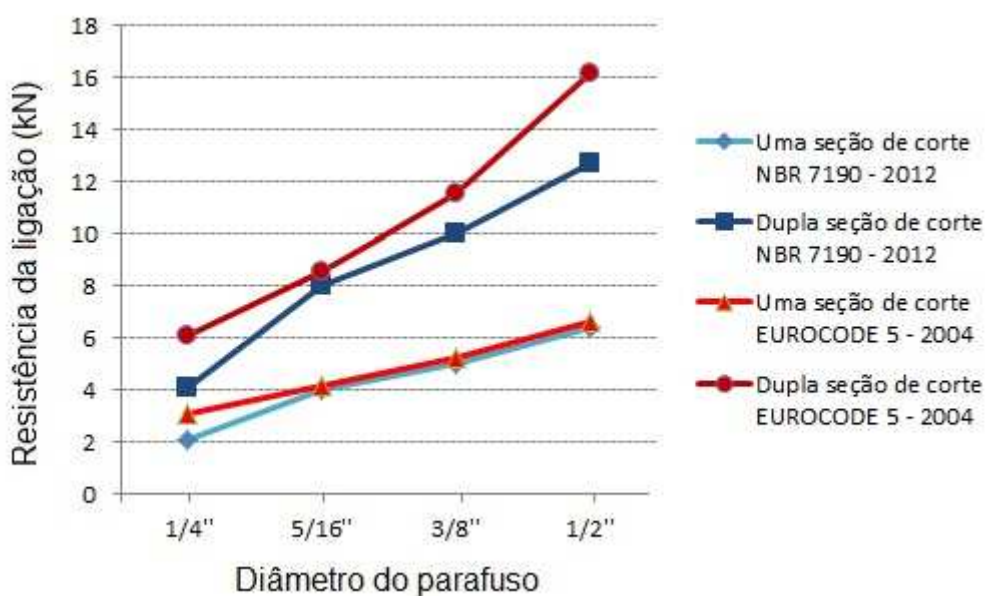


Gráfico 3 – Resistência do modelo do corpo de prova B₁

6.1.4 Modelo de corpo de prova B₂

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a

- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de $5/16$ '' (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso $3/8$ '' (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de $1/2$ '' (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 7 – Resistência das ligações para corpo de prova B₂ (kN)

		$1/4$ ''	$5/16$ ''	$3/8$ ''	$1/2$ ''
Corte simples	Revisão NBR 7190	3,18	4	5	6,35
	EUROCODE 5	3,29	4,14	5,18	6,58
Corte duplo	Revisão NBR 7190	6,35	8	10	12,70
	EUROCODE 5	7,70	10,81	15,29	22,62

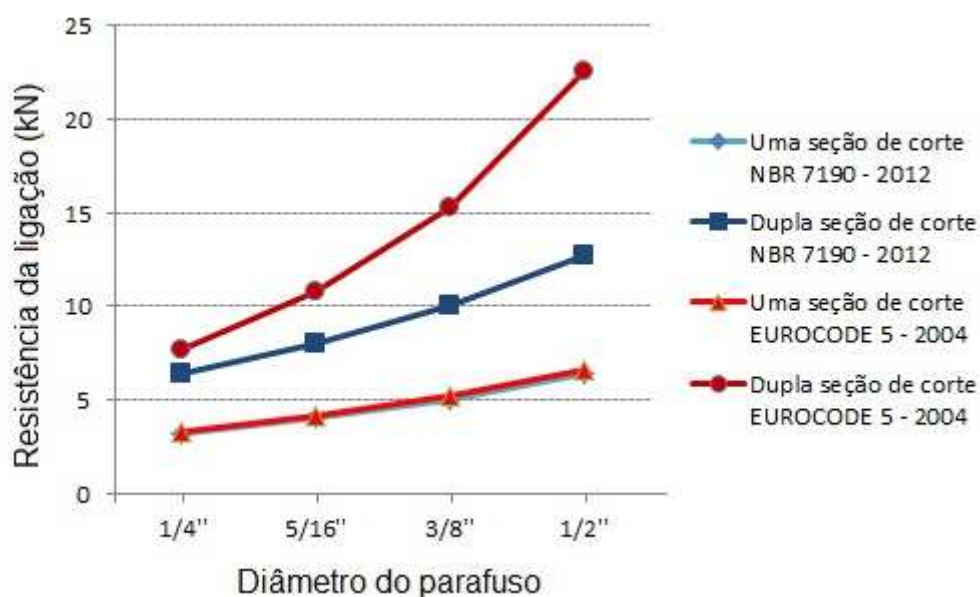


Gráfico 4– Resistência do modelo do corpo de prova B₂

6.1.5 Modelo de corpo de prova C₁**Diâmetros do parafuso de ¼” (6,35 milímetros)**

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de 5/16” (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso 3/8” (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de ½” (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 8 – Resistência das ligações para corpo de prova C₁ (kN)

		¼”	5/16”	3/8”	½”
Corte simples	Revisão NBR 7190	1,72	3	3,75	4,76
	EUROCODE 5	2,64	3,58	4,52	5,74
Corte duplo	Revisão NBR 7190	3,44	6	7,5	9,53
	EUROCODE 5	5,59	8,10	10,87	15,22

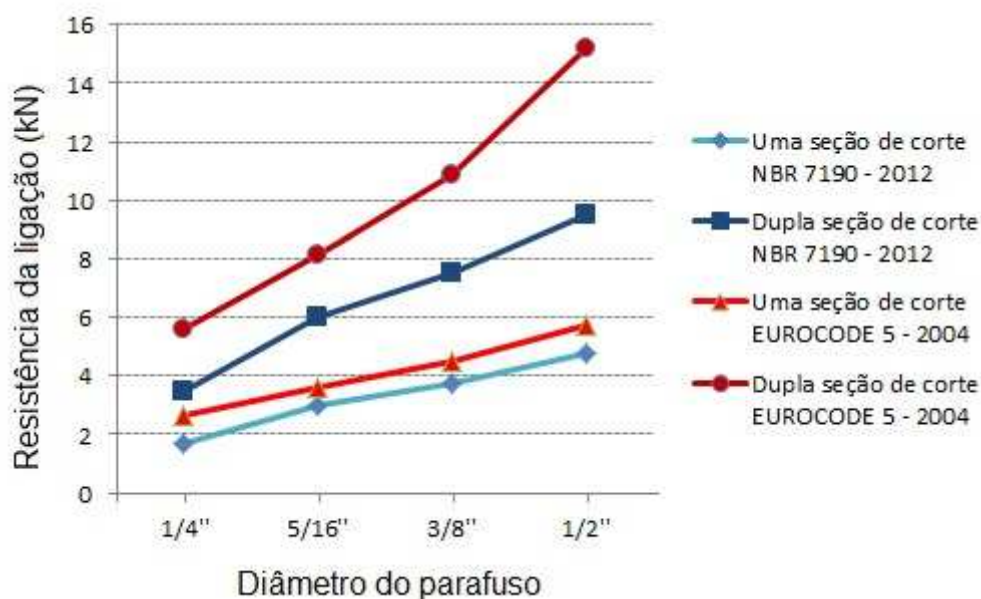


Gráfico 5 – Resistência do modelo do corpo de prova C₁

6.1.6 Modelo de corpo de prova C₂

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 5/16" (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 3/8" (10 milímetros)

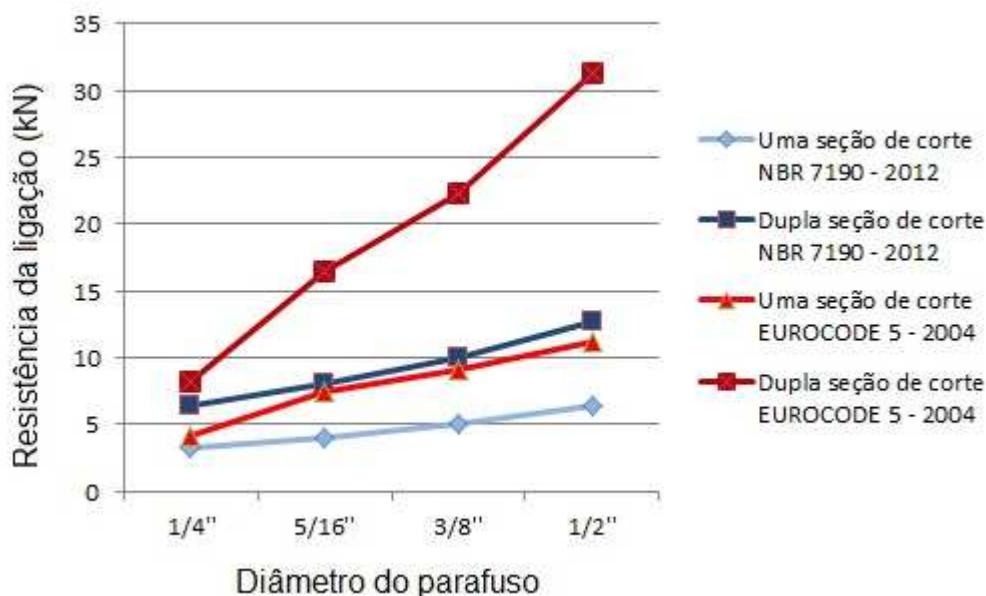
- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 2

Tabela 9 – Resistência das ligações para corpo de prova C₂ (kN)

		1/4"	5/16"	3/8"	1/2"
Corte simples	Revisão NBR 7190	1,72	3	3,75	4,76
	EUROCODE 5	2,64	3,58	4,52	5,74
Corte duplo	Revisão NBR 7190	3,44	6	7,50	9,53
	EUROCODE 5	5,28	7,16	9,80	14,02

**Gráfico 6 – Resistência do modelo do corpo de prova C₂**

6.1.7 Modelo de corpo de prova D₁

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de 5/16" (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso 3/8" (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira

- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Tabela 10 – Resistência das ligações para corpo de prova D₁ (kN)

		1/4"	5/16"	3/8"	1/2"
Corte simples	Revisão NBR 7190	1,72	3	3,75	4,76
	EUROCODE 5	2,52	3,91	4,65	6,64
Corte duplo	Revisão NBR 7190	3,44	6	7,50	9,53
	EUROCODE 5	5,23	7,93	11,85	18,22

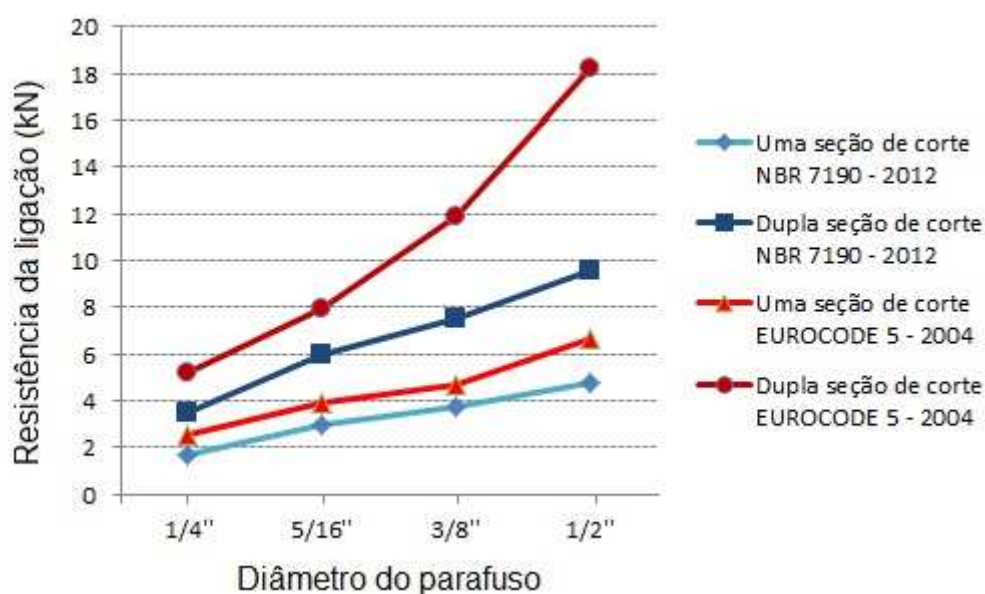


Gráfico 7– Resistência do modelo do corpo de prova D₁

6.1.8 Modelo de corpo de prova D₂

Diâmetros do parafuso de 1/4" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Flexão do pino
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b

- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso de $5/16$ '' (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 3

Diâmetros do parafuso $3/8$ '' (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 2b
- Corte duplo: modelo de falha 1b

Diâmetros do parafuso de $1/2$ '' (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012) - Embutimento da madeira
- EUROCODE 5 (2004) - Corte simples: modelo de falha 1a
- Corte duplo: modelo de falha 1b

Tabela 11 – Resistência das ligações para corpo de prova D_2 (kN)

		$1/4$ ''	$5/16$ ''	$3/8$ ''	$1/2$ ''
Corte simples	Revisão NBR 7190	3,18	4	5	6,35
	EUROCODE 5	3,85	5,40	7,64	10,79
Corte duplo	Revisão NBR 7190	6,35	8	10	12,70
	EUROCODE 5	9,63	14,60	20	25,83

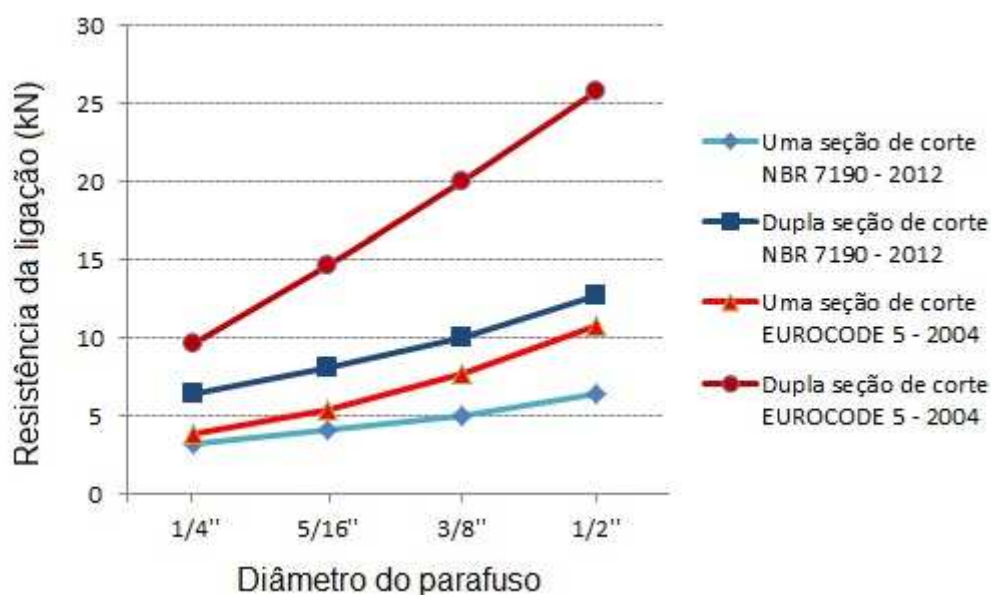


Gráfico 8 – Resistência do modelo do corpo de prova D_2

6.2 COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM PARAFUSO $3/8$ ” (10 milímetros)

A Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) restringe a utilização dos diâmetros dos parafusos, sendo o mínimo de 9,5mm e o máximo de $d \leq t/2$. Logo, para todos os corpos de prova especificados nesse estudo, fica restrito que a utilização do parafuso seja de $3/8$ ” (10 milímetros), sendo assim, será feita uma análise para tal diâmetro de parafuso.

6.2.1 Uma seção de corte

No Gráfico 9 podemos provar que o modelo da Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) dá resultados muito próximos do modelo do EUROCODE 5 (2004) para corpos de prova simétricos, entretanto quando mudamos a geometria dos corpos de prova pode-se verificar discordâncias.

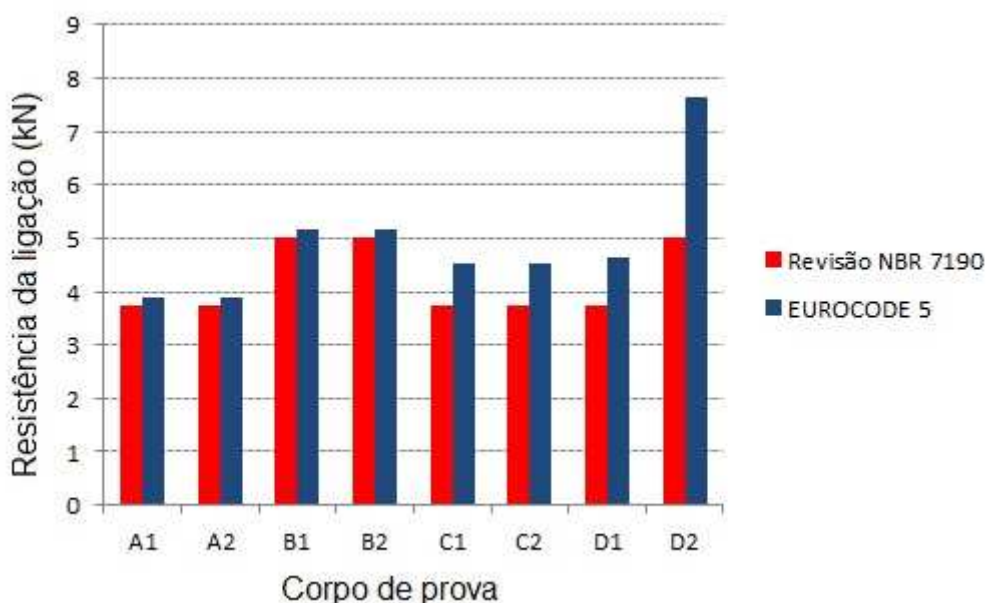


Gráfico 9 – Resistência de ligação com parafuso $3/8$ ” em corte simples.

6.1.2 Dupla seção de corte

No Gráfico 10 podemos verificar que os valores calculados segundo a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) e EUROCODE 5 (2004) divergem bastante, confirmando a indicação da revisão bibliográfica, onde ficou claro que a norma brasileira atende somente casos específicos, enquanto a norma europeia simula diferentes comportamentos. As diferenças de resistência da ligação chegam a 100%.

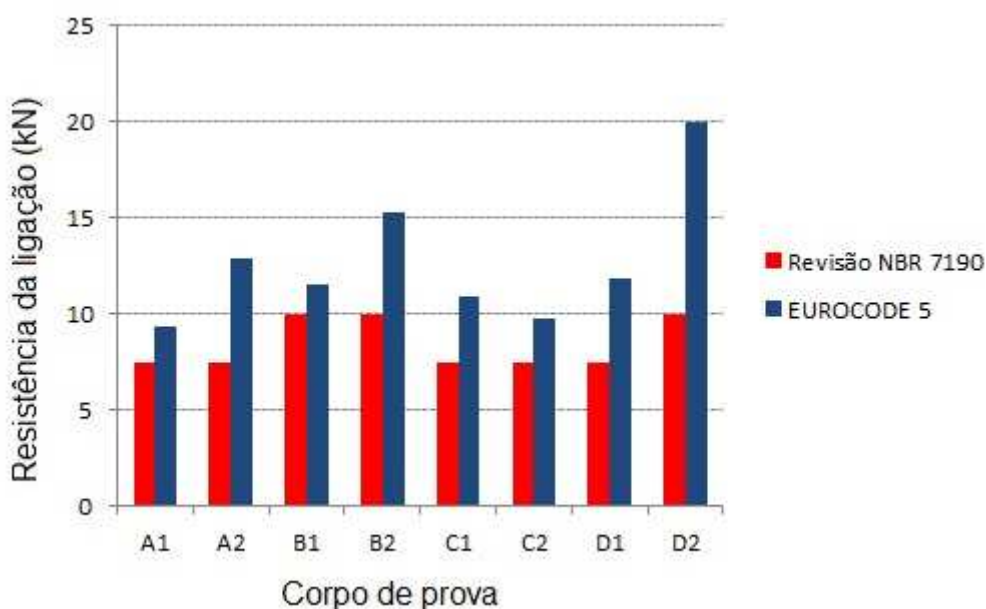


Gráfico 10 - Resistência de ligação com parafuso $\frac{3}{8}$ " em corte duplo.

6.3 COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO PARAFUSO $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros) COM VALORES DE CÁLCULO E CONSIDERANDO JOHANSEN PURO.

Nesta seção são utilizados os valores de cálculo, sendo tais, os valores de minoração da propriedade do material (γ_M) e o coeficiente de modificação (K_{mod}) para os corpos de prova descritos no capítulo 5 deste trabalho. Os cálculos são apresentados no anexo I.

Tabela 12 - Resistência da ligação com parafuso de $\frac{3}{8}$ '' (kN)

		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂
Corte simples	Revisão NBR 7190	1,45	1,45	1,93	1,93	1,45	1,45	1,45	1,93
	Johansen	1,20	1,20	1,60	1,60	1,39	1,39	1,85	2,21
Corte duplo	Revisão NBR 7190	2,90	2,90	3,86	3,86	2,90	2,90	2,90	3,86
	Johansen	3,70	5,65	4,41	6,55	4,14	3,92	4,88	5,79

Nota-se no Gráfico 11, a resistência da ligação pela Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) é maior que pelo modelo de Johansen puro utilizando os coeficientes de minoração do material em corpos de provas simétricos e sem variação do material. Deve-se lembrar, como explicado na seção 4.4 deste trabalho (Discussões da revisão bibliográfica), que a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 1997) utilizada na fórmula de embutimento da madeira o coeficiente de multiplicação igual a 0,4 e a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) utiliza o valor de 0,5. Caso o valor de 0,4 fosse mantido, os valores da norma brasileira seriam os mesmo do modelo de Johansen.

Porém, quando o corpo de prova é diferenciado, a resistência da ligação pela Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) é consideravelmente menor que pelo modelo de Johansen.

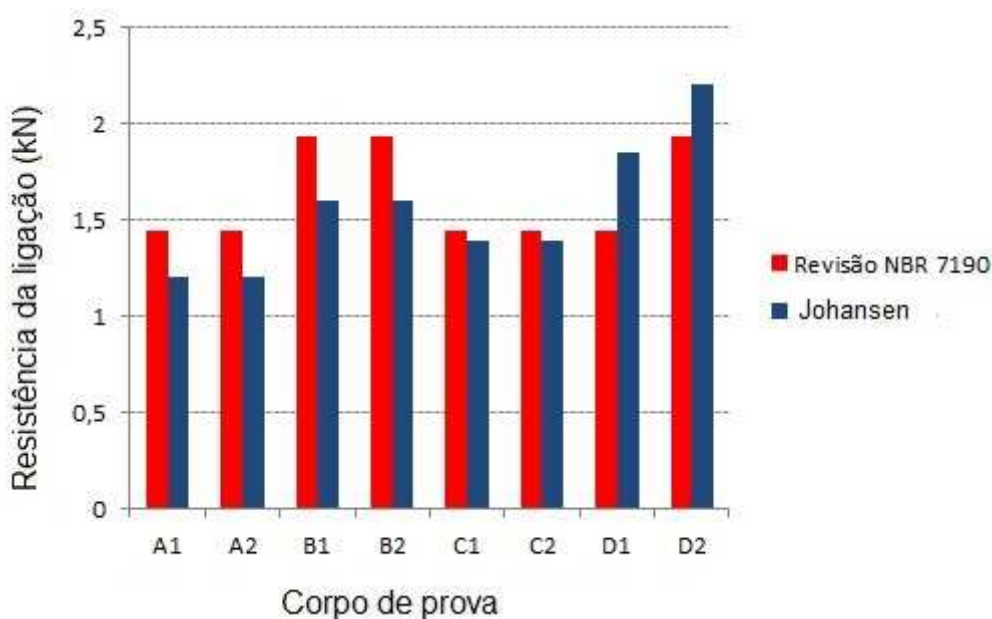


Gráfico 11 – Resistência de ligação com parafuso $\frac{3}{8}$ '' com coeficientes de minoração e sem adição da força de arrancamento em corte simples.

Para seção de corte duplo, utilizando os corpos de prova mencionados nesse trabalho, os valores da Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) é sempre menor que pelo modelo de Johansen, com variação de chegando até 58%.

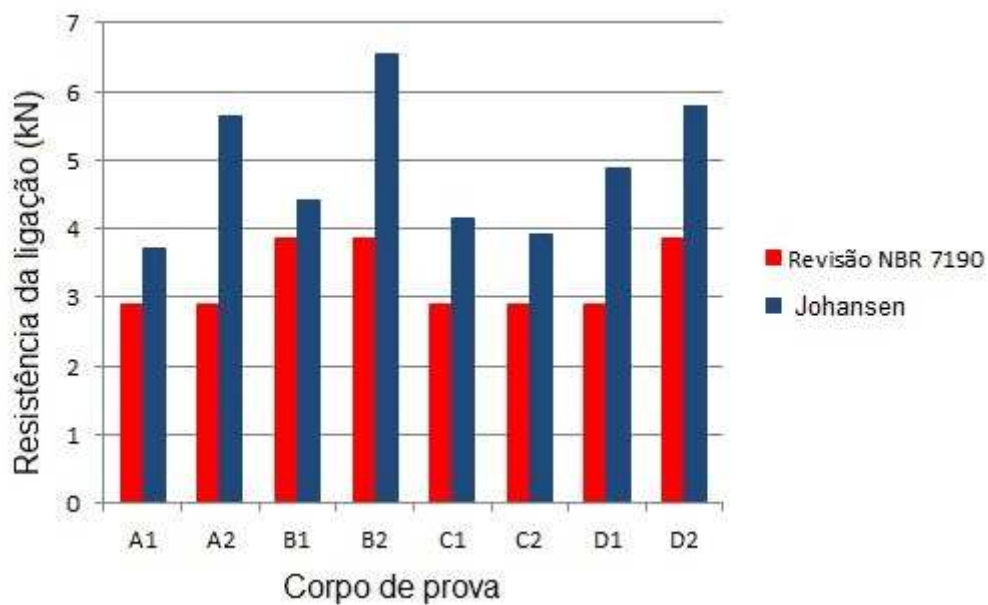


Gráfico 12– Resistência de ligação com parafuso $\frac{3}{8}$ ” com coeficientes de minoração e sem adição da força de arrancamento em corte duplo.

7 CONCLUSÕES

Do estudo teórico desenvolvido neste trabalho sobre modelos de dimensionamento de ligações em madeira, pode-se concluir:

- O modelo de cálculo mais utilizado no mundo ainda é o do Johansen.
- O modelo da norma brasileira advém do Johansen com algumas simplificações, sendo estas que sempre as espessuras entre os elementos a serem unidos serão as mesmas e a espécie da madeira será a mesma.
- A Revisão da NBR 7190 (2012) trás o valor de multiplicação de 0,5 para a fórmula de embutimento da madeira ao invés de 0,414, como deduzido nesse trabalho, sem motivos comprovados;
- As simulações evidenciaram a diferença significativa no comportamento mecânico das ligações entre o modelo da norma brasileira e a norma europeia.
- As maiores diferenças ocorreram quando são consideradas diferentes espécies de madeira nas ligações e também quando existem diferentes espessuras de peças de madeira, podendo atingir 100% de diferença.
- Em geral o modelo do EUROCODE 5 (2004) promove maior resistência do que o modelo da norma brasileira.
- No modelo do EUROCODE 5 são previstos incrementos na resistência das ligações considerando o atrito do parafuso na madeira e também a resistência ao arrancamento. Estes incrementos devem ser verificados experimentalmente.
- Considerando o modelo de Johansen puro (sem atrito e resistência ao arrancamento) os resultados para seção dupla de corte são sempre superiores aos da norma brasileira, entretanto, para o caso de uma seção de corte, pode ocorrer variações de comportamento, ora superior ora inferior;
- As simulações deixam evidente que o modelo do EUROCODE 5 é mais indicado para estimativa da capacidade das ligações em madeira, entretanto, sugere-se que seja realizada uma investigação experimental para ser confrontada com a teórica.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROADS. **Pregos**. Disponível em:

<http://www.agroads.com.br/pregos_42954.html>. Acesso em: 18 fev. 2013.

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

_____. **Revisão NBR 7190**: projeto estruturas de madeiras. Rio de Janeiro, 2012.

-----**NBR 8800**: projeto estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2004.

CALIL JÚNIOR, Carlito; LAHR, Francisco A. R.; DIAS, Antonio Alves.

Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira. Baueri – São Paulo: Manole Ltda, 2003.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures**. Brussels: (1993).

_____. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures**. Brussels: (2004).

DIAS, Alan. **Ligações em Estruturas de Madeira**. Carpintaria: blog estruturas de madeira. Disponível em:

<http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2013_02_01_archive.html>. Acesso em: 20 março 2013.

METÁLICA. **Parafusos: definição e tipos**. Disponível em:

<<http://www.metalica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

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

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

ANEXO A

Diâmetros do parafuso de ¼” (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Os dados utilizados para resolução são:

t	=	2,5	Cm
d	=	6,35	Mm
f _{ek}	=	30	MPa
f _{yk}	=	250	MPa

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = \frac{t}{d} = \frac{2,5}{1} = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yk}}{f_{ek}}} = 1,25 \sqrt{\frac{250}{30}} = 3,608$$

Sendo $\beta > \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre flexão do pino, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

- Uma seção de corte:

$$R_{vk,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yk} = 0,625 \frac{0,635^2}{3,608} 250 = 1,72 \text{ kN}$$

- Dupla seção de corte:

$$R_{vk,2} = 2 R_{vk,1} = 2 \times 1,72 = 3,44 \text{ kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Os dados utilizados são:

t ₁	=	2,5	Cm
t ₂	=	2,5	Cm
d	=	6,35	Mm
f _{ek}	=	30	MPa
f _{yk}	=	250	MPa

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 0,3 f_u d^{2,6} = 0,3 (250) 6,35^{2,6} = 9.167,97 \text{ N.mm}$$

Arruela:

Diâmetro externo	=	12	Mm
Diâmetro interno	=	6,4	Mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

-Resistência à tração do parafuso:

$$F_{ax,Rk} = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) f_{yk} = \left(\frac{\pi 6,3^2}{4}\right) 250 = 7.913,29 \text{ N}$$

- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:

$$F_{ax,Rk} = \left[\left(\frac{\pi d_{a1}^2}{4}\right) - \left(\frac{\pi d_{a2}^2}{4}\right)\right] f_{yk} = \left[\left(\frac{\pi 12^2}{4}\right) - \left(\frac{\pi 6,4^2}{4}\right)\right] 250 =$$

$$F_{ax,Rk} = 7.279,8 \text{ N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 7.279,8N

Para obter a resistência da ligação em uma seção de corte serão utilizadas as equações (21) a (26), logo temos que:

$$(21) \quad R_k = f_{e,k,1} t_1 d = (30)(25)(10) = 4.725,0 \text{ N}$$

$$(22) \quad R_k = f_{e,k,1} t_2 d c = (30)(25)(10)(1) = 4.725,0 \text{ N}$$

$$(23) \quad R_k = \frac{f_{e,k,1} t_1 d}{1+c} \left[\sqrt{c + 2c^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right] + c^3 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - c \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = \frac{(30)(25)(6,35)}{1+1} \left[\sqrt{1 + 2(1)^2 \left[1 + \frac{25}{25} + \left(\frac{25}{25}\right)^2 \right] + (1)^3 \left(\frac{25}{25}\right)^2} - 1 \left(1 + \frac{25}{25} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1.972,7 + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Sendo 25% da equação de Johansen (493,17 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 1.972,7 + 493,17 = 2.465,87 \text{ N}$$

$$(24) \quad R_k = 1,05 \frac{f_{e,k,1} t_1 d}{2+c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_k}{f_{e,k,1} d t_1^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,05 \frac{(30)(25)(6,35)}{2+1} \left[\sqrt{2(1)(1+1) + \frac{4(1)(2+1)(9.167,97)}{(30)(6,35)(25)^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,05 (1.935,18) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Sendo 25% da equação de Johansen (483,8 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 1,05 (1.935,18) + 483,8 = 2515,74 \text{ N}$$

$$(25) \quad R_k = 1,05 \frac{f_{e,k,1} t_2 d}{1+2c} \left[\sqrt{2c^2(1+c) + \frac{4c(1+2c)M_k}{f_{e,k,1} d t_2^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,05 \frac{(30)(25)(6,35)}{1+2(1)} \left[\sqrt{2(1)^2(1+1) + \frac{4(1)[1+2(1)](9.167,97)}{(30)(6,35)(25)^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,05 (1.935,18) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Sendo 25% da equação de Johansen (483,8 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 1,05 (1.935,18) + 483,8 = 2515,74 \text{ N}$$

$$(26) \quad R_k = 1,15 \sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_k f_{e,k,1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,15 \sqrt{\frac{2(1)}{1+1}} \sqrt{2 (9.167,97)(30)(6,35)} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$R_k = 1,15 (1.868,96) + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Sendo 25% da equação de Johansen (467,24 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 1,15(1.868,96) + 467,24 = 2.626,5 \text{ N}$$

Logo, a menor valor para uma seção de corte é $R_k = 2,47 \text{ kN}$.

Para obter a resistência da ligação em dupla seção de corte serão utilizadas as equações (27) a (30), logo temos que:

$$(27) \quad R_k = 2 (f_{e,k,1} t_1 d) = 2 (30)(25)(10) = 9.525,0 \text{ N}$$

$$(28) \quad R_k = 2 (f_{e,k,1} t_2 d c) = 2 (30)(25)(10)(1) = 9.525,0 \text{ N}$$

$$(29) \quad R_k = 2 \left(1,05 \frac{f_{e,k,1} t_1 d}{2 + c} \left[\sqrt{2c(1 + c) + \frac{4c(2 + c)M_k}{f_{e,k,1} d t_1^2}} - c \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

$$R_k = 2 \left(1,05 \frac{(30)(25)(6,35)}{2 + 1} \left[\sqrt{2(1)(1 + 1) + \frac{4(1)(2 + 1)(9.167,97)}{(30)(6,35)(25)^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

$$R_k = 2 \left[1,05 (1.935,18) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right]$$

Sendo 25% da equação de Johansen (483,8 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 2[1,05 (1.935,18) + 483,8] = 5.031,47 \text{ N}$$

$$(30) \quad R_k = 2 \left(1,15 \sqrt{\frac{2c}{1 + c}} \sqrt{2 M_k f_{e,k,1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

$$R_k = 2 \left(1,15 \sqrt{\frac{2(1)}{1 + 1}} \sqrt{2 (9.167,97)(6,35)} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

$$R_k = 2 \left[1,15 (1.868,96) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right]$$

Sendo 25% da equação de Johansen (467,24 N) menor que o mínimo valor da força de arrancamento (7.279,8 N), utiliza-se 25% da equação de Johansen.

$$R_k = 2[1,15 (1.868,96) + 467,24] = 5.233,01 \text{ N}$$

Logo, a menor valor para dupla seção de corte é $R_k = 5,03 \text{ kN}$.

Seguindo esse mesmo princípio de cálculo temos:

Diâmetros do parafuso de $5/16$ ” (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 6 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 16.714,57 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 12.560 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 19.767,3 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 12.560 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$$R_k : \quad \text{Modelo de falha 1b} \quad 6.000,00 \quad \text{N} \quad = \quad 6,00 \quad \text{kN}$$

Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
Modelo de falha 1a	3.106,60	N	=	3,11	kN
Modelo de falha 2a	3.406,60	N	=	3,41	kN
Modelo de falha 2b	4.406,60	N	=	3,42	kN
Modelo de falha 3	3.965,48	N	=	3,97	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 3,11$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 2	6.813,20	N	=	6,81	kN
	Modelo de falha 3	7.930,97	N	=	7,93	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 6,81$ kN

Diâmetros do parafuso $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3,75 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 7,5 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 29.858,04 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

-Resistência à tração do parafuso:	19.625,0	N
- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:	20.479,8	N

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 19.625,0 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1a	3.883,25	N	=	3,88	kN
	Modelo de falha 2a	4.651,52	N	=	4,65	kN
	Modelo de falha 2b	4.651,52	N	=	4,65	kN
	Modelo de falha 3	5.925,63	N	=	5,93	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 3,88$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 2	9.303,04	N	=	9,30	kN
	Modelo de falha 3	11.851,25	N	=	11,85	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 9,30$ kN

Diâmetros do parafuso de ½” (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$B = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 55.584,15 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 24 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 13 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 31.653,16 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 28.754,6 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 28.754,6N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1a	4.931,73	N	=	4,93	kN
	Modelo de falha 2a	6.636,57	N	=	6,64	kN
	Modelo de falha 2b	6.636,57	N	=	6,64	kN
	Modelo de falha 3	9.111,31	N	=	9,11	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: R_k = 4,93 kN

Dupla seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 2	13.273,13	N	=	13,27	kN
	Modelo de falha 3	18.222,63	N	=	18,22	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: R_k = 13,27 kN

ANEXO B

Diâmetros do parafuso de ¼" (6,35 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 5,751$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 2,38 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 23.286,63 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 12 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 6,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 20.099,76 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 7.279,8 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 7.279,8N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

	Modelo de falha 1b	4.762,50	N	=	4,76	kN
	Modelo de falha 1b	4.762,50	N	=	4,76	kN
$R_k :$	Modelo de falha 1 ^a	2.465,87	N	=	2,47	kN
	Modelo de falha 2 ^a	3.135,51	N	=	3,14	kN
	Modelo de falha 2b	3.135,51	N	=	3,14	kN
	Modelo de falha 3	4.170,07	N	=	4,17	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 2,47$ kN

Dupla seção de corte

$$R_k : \quad \text{Modelo de falha 1b} \quad 9.525,00 \quad \text{N} \quad = \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
Modelo de falha 2	6.271,01	N	=	6,27	kN
Modelo de falha 3	8.340,15	N	=	8,34	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 6,27$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ '' (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 5,751$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

Uma seção de corte – $R_{vk,1}$:	3	KN
Dupla seção de corte – $2R_{vk,1}$:	6	KN

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 42.455,01 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

Diâmetro externo	=	16	mm
Diâmetro interno	=	8,4	mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

- Resistência à tração do parafuso:	31.902,4	N
- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:	13.101,3	N

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 13.101,3N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

	Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
R_k :	Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
	Modelo de falha 1 ^a	3.106,60	N	=	3,11	kN

Modelo de falha 2 ^a	4.471,04	N	=	4,47	kN
Modelo de falha 2b	4.471,04	N	=	4,47	kN
Modelo de falha 3	6.319,94	N	=	6,32	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 3,11 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 2	8.942,09	N	=	8,94	kN
	Modelo de falha 3	12.639,89	N	=	12,64	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 8,94 \text{ kN}$

Diâmetros do parafuso $\frac{3}{8}$ ” (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 5,751$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : 3,75 \text{ kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : 7,5 \text{ kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 75.839,42 \text{ (N. mm)}$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \text{ mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso: } 49.847,5 \text{ N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira: } 20.470,8 \text{ N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 20.470,8N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1 ^a	3.883,25	N	=	3,88	kN
	Modelo de falha 2 ^a	6.420,44	N	=	6,42	kN
	Modelo de falha 2b	6.420,44	N	=	6,42	kN
	Modelo de falha 3	9.443,90	N	=	9,44	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: R_k = 3,88 kN

Dupla seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 2	12.840,88	N	=	12,84	kN
	Modelo de falha 3	18.887,79	N	=	18,89	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: R_k = 12,84 kN

Diâmetros do parafuso de ½” (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 5,751$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 141.183,7 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

Diâmetro externo = 24 mm

Diâmetro interno = 13 mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

- Resistência à tração do parafuso: 80.399,03 N

- Resistência ao embutimento da arruela na madeira: 28.754,60 N

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 28.154,60N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1 ^a	4.931,73	N	=	4,93	kN
	Modelo de falha 2 ^a	9.633,10	N	=	9,63	kN
	Modelo de falha 2b	9.633,10	N	=	9,63	kN
	Modelo de falha 3	14.521,04	N	=	14,52	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: R_k = 4,93 kN

Dupla seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 2	19.266,20	N	=	19,27	kN
	Modelo de falha 3	29.042,09	N	=	29,04	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1b: R_k = 19,05 kN

ANEXO C

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 3,125$$

Sendo $\beta > \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre flexão do pino, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 2,02 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 4,03 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 9.167,97 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 12 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 6,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 7.913,30 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 9.706,4 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 7.913,30N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1 ^a	3.287,82	N	=	3,29	kN
	Modelo de falha 2 ^a	3.209,37	N	=	3,21	kN
	Modelo de falha 2b	3.209,37	N	=	3,21	kN
	Modelo de falha 3	3.021,31	N	=	3,02	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 3,02 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 2	6.418,74	N	=	6,42	kN
	Modelo de falha 3	6.042,64	N	=	6,04	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 6,04$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ " (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 3,125$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 8 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 16.714,57 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 12.560,00 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 17.469,40 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 12.560 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$$R_k : \quad \text{Modelo de falha 1b} \quad 8.000,00 \quad \text{N} \quad = \quad 8,00 \quad \text{kN}$$

Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
Modelo de falha 1 ^a	4.142,14	N	=	4,14	kN
Modelo de falha 2 ^a	4.287,26	N	=	4,29	kN
Modelo de falha 2b	4.287,26	N	=	4,29	kN
Modelo de falha 3	4.578,95	N	=	4,68	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 4,14$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 2	8.574,53	N	=	8,57	kN
	Modelo de falha 3	9.157,89	N	=	9,16	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 8,57$ kN

Diâmetros do parafuso de $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 3,125$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 5 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 10 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 29.858,04 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

-Resistência à tração do parafuso:	19.625,00	N
- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:	27.294,50	N

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 19.625,0N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1 ^a	5.177,67	N	=	5,18	kN
	Modelo de falha 2 ^a	5.767,32	N	=	5,77	kN
	Modelo de falha 2b	5.767,32	N	=	5,77	kN
	Modelo de falha 3	6.842,32	N	=	6,84	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 5,18$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 2	11.534,64	N	=	11,53	kN
	Modelo de falha 3	13.684,65	N	=	13,68	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 11,53$ kN

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 3,125$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 6,35 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 12,7 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 55.584,15 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 24 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 13 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 31.653,16 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 38.339,4 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 31.653,16N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1 ^a	6.575,64	N	=	6,58	kN
	Modelo de falha 2 ^a	8.089,81	N	=	8,09	kN
	Modelo de falha 2b	8.089,81	N	=	8,09	kN
	Modelo de falha 3	10.520,84	N	=	10,52	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 6,58$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 2	16.179,62	N	=	16,18	kN
	Modelo de falha 3	21.041,68	N	=	21,04	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 16,18$ kN

ANEXO D

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{im} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\begin{aligned} \text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} &: & 3,18 & \text{KN} \\ \text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} &: & 6,35 & \text{KN} \end{aligned}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 23.286,63 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\begin{aligned} \text{Diâmetro externo} &= & 12 & \text{mm} \\ \text{Diâmetro interno} &= & 6,4 & \text{mm} \end{aligned}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{-Resistência à tração do parafuso:} & & 20.099,76 & \text{N} \\ \text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} & & 9.766,40 & \text{N} \end{aligned}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 9.766,40 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1 ^a	3.287,82	N	=	3,29	kN
	Modelo de falha 2 ^a	3.852,48	N	=	3,85	kN
	Modelo de falha 2b	3.852,48	N	=	3,85	kN
	Modelo de falha 3	4.815,19	N	=	4,82	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 3,29$ kN

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN

Modelo de falha 2	7.704,95	N	=	7,70	kN
Modelo de falha 3	9.630,38	N	=	9,63	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 7,70$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ '' (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 8 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 42.455,01 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 31.902,40 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 17.468,40 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 17.468,40 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

	Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
R_k :	Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
	Modelo de falha 1 ^a	4.142,14	N	=	4,14	kN

Modelo de falha 2 ^a	5.403,73	N	=	5,40	kN
Modelo de falha 2b	5.403,73	N	=	5,40	kN
Modelo de falha 3	7.297,64	N	=	7,30	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 4,14$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 2	10.807,47	N	=	10,81	kN
	Modelo de falha 3	14.595,28	N	=	14,60	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 10,81$ kN

Diâmetros do parafuso de $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 5 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 10 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 75.839,42 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{- Resistência à tração do parafuso:} \quad 49.847,50 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 27.294,50 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 27.294,50 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1 ^a	5.177,67	N	=	5,18	kN
	Modelo de falha 2 ^a	7.644,47	N	=	7,64	kN
	Modelo de falha 2b	7.644,47	N	=	7,64	kN
	Modelo de falha 3	10.904,87	N	=	10,90	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: R_k = 5,18 kN

Dupla seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 2	15.288,93	N	=	15,29	kN
	Modelo de falha 3	21.809,74	N	=	21,81	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: R_k = 15,29 kN

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 6,35 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 12,7 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 141.183,7 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 24 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 13 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 80.399,03 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 38.339,4 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 38.339,40N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1 ^a	6.575,64	N	=	6,58	kN
	Modelo de falha 2 ^a	11.312,10	N	=	11,31	kN
	Modelo de falha 2b	11.312,10	N	=	11,31	kN
	Modelo de falha 3	16.767,46	N	=	16,77	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 6,58 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 2	22.624,20	N	=	22,62	kN
	Modelo de falha 3	33.534,92	N	=	33,53	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 22,62 \text{ kN}$

ANEXO E

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta > \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre flexão do pino, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\begin{aligned} \text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} &: & 1,75 & \text{KN} \\ \text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} &: & 3,49 & \text{KN} \end{aligned}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 9.167,97 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\begin{aligned} \text{Diâmetro externo} &= & 12 & \text{mm} \\ \text{Diâmetro interno} &= & 6,4 & \text{mm} \end{aligned}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{-Resistência à tração do parafuso:} & & 7.913,29 & \text{N} \\ \text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} & & 38.339,40 & \text{N} \end{aligned}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 7.913,29N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1b	4.762,50	N	=	4,76	kN
	Modelo de falha 1a	2.868,11	N	=	2,87	kN
	Modelo de falha 2a	3.035,11	N	=	3,04	kN
	Modelo de falha 2b	2.640,94	N	=	2,64	kN
	Modelo de falha 3	2.797,20	N	=	2,80	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 2,64 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN

Modelo de falha 2	6.070,23	N	=	6,07	kN
Modelo de falha 3	5.594,39	N	=	5,59	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 5,59$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ " (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 6 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 16.714,57 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 12.560,00 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 17.468,40 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 12.560 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
	Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
	Modelo de falha 1a	3.613,37	N	=	3,61	kN
	Modelo de falha 2a	4.048,70	N	=	4,05	kN

Modelo de falha 2b	3.582,05	N	=	3,58	kN
Modelo de falha 3	4.239,28	N	=	4,24	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 3,58$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 2	8.097,40	N	=	8,10	kN
	Modelo de falha 3	8.478,56	N	=	8,48	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 8,10$ kN

Diâmetros do parafuso $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3,75 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 7,5 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 29.858,04 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 19.625,0 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 27.294,5 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 19.625,0 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1a	4.516,72	N	=	4,52	kN
	Modelo de falha 2a	5.436,76	N	=	5,44	kN
	Modelo de falha 2b	4.900,90	N	=	4,90	kN
	Modelo de falha 3	6.334,76	N	=	6,33	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 4,52\text{kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 2	10.873,51	N	=	10,87	kN
	Modelo de falha 3	12.669,52	N	=	12,67	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 10,87\text{ kN}$

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 55.584,15 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

Diâmetro externo	=	24	mm
Diâmetro interno	=	13	mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

- Resistência à tração do parafuso:	31.653,16	N
- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:	38.339,40	N

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 38.339,40N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.700,0	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1a	5.736,23	N	=	5,74	kN
	Modelo de falha 2a	7.608,13	N	=	7,61	kN
	Modelo de falha 2b	7.010,56	N	=	7,01	kN
	Modelo de falha 3	9.740,40	N	=	9,74	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 5,74$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 2	15.216,26	N	=	15,22	kN
	Modelo de falha 3	19.480,81	N	=	19,48	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 15,22$ kN

ANEXO F

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta > \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre flexão do pino, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\begin{aligned} \text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} &: & 1,75 & \text{KN} \\ \text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} &: & 3,49 & \text{KN} \end{aligned}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 9.167,97 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\begin{aligned} \text{Diâmetro externo} &= & 12 & \text{mm} \\ \text{Diâmetro interno} &= & 6,4 & \text{mm} \end{aligned}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\begin{aligned} \text{-Resistência à tração do parafuso:} & & 7.913,29 & \text{N} \\ \text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} & & 7.279,8 & \text{N} \end{aligned}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 7.279,78 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	4.762,50	N	=	4,76	kN
	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1a	2.868,11	N	=	2,87	kN
	Modelo de falha 2a	2.640,94	N	=	2,64	kN
	Modelo de falha 2b	3.035,11	N	=	3,05	kN
	Modelo de falha 3	2.797,20	N	=	2,80	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2a: $R_k = 2,64 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN

Modelo de falha 2	5.281,88	N	=	5,28	kN
Modelo de falha 3	5.594,39	N	=	5,59	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 5,28$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ " (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 6 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 16.714,57 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 12.560,00 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 13.101,30 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 12.560 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
	Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
	Modelo de falha 1a	3.613,37	N	=	3,61	kN
	Modelo de falha 2a	3.582,05	N	=	3,58	kN

Modelo de falha 2b	4.048,70	N	=	4,05	kN
Modelo de falha 3	4.239,28	N	=	4,24	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2a: $R_k = 3,58$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 2	7.164,10	N	=	7,16	kN
	Modelo de falha 3	8.478,56	N	=	8,48	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 7,16$ kN

Diâmetros do parafuso $\frac{3}{8}$ ” (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3,75 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 7,5 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 29.858,04 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 19.625,00 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 20.470,80 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 19.625,0 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1a	4.516,72	N	=	4,52	kN
	Modelo de falha 2a	4.900,90	N	=	4,90	kN
	Modelo de falha 2b	5.436,76	N	=	5,44	kN
	Modelo de falha 3	6.334,76	N	=	6,33	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 4,52\text{kN}$

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 2	9.801,80	N	=	9,80	kN
	Modelo de falha 3	12.669,52	N	=	12,67	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 9,80\text{ kN}$

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 55.584,15 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

Diâmetro externo	=	24	mm
Diâmetro interno	=	13	mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

- Resistência à tração do parafuso:	31.653,16	N
- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:	28.754,60	N

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 28.754,60 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1a	5.736,23	N	=	5,74	kN
	Modelo de falha 2a	7.010,56	N	=	7,01	kN
	Modelo de falha 2b	7.608,13	N	=	7,61	kN
	Modelo de falha 3	9.740,40	N	=	9,74	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 5,74$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 2	14.021,13	N	=	14,02	kN
	Modelo de falha 3	19.480,81	N	=	19,48	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 14,02$ kN

ANEXO G

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta > \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre flexão do pino, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 1,75 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 3,49 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 9.167,97 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 12 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 6,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 7.913,29 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 7.279,80 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 7.279,80 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1 ^a	4.044,85	N	=	4,04	kN
	Modelo de falha 2 ^a	4.362,52	N	=	4,36	kN
	Modelo de falha 2b	2.515,74	N	=	2,52	kN
	Modelo de falha 3	2.616,54	N	=	2,62	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 2,52 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN

Modelo de falha 2	8.725,04	N	=	8,73	kN
Modelo de falha 3	5.233,08	N	=	5,23	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 5,23$ kN

Diâmetros do parafuso de $5/16$ " (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 6 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 16.714,57 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 12.560,00 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 13.101,30 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 12.560 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 1b	6.000,00	N	=	6,00	kN
	Modelo de falha 1 ^a	5.095,87	N	=	5,10	kN
	Modelo de falha 2 ^a	5.625,86	N	=	5,63	kN

Modelo de falha 2b	3.406,60	N	=	3,41	kN
Modelo de falha 3	3.965,48	N	=	3,97	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 3,41$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	24.000,00	N	=	24,00	kN
	Modelo de falha 1b	12.000,00	N	=	12,00	kN
	Modelo de falha 2	11.251,72	N	=	11,25	kN
	Modelo de falha 3	7.930,97	N	=	7,93	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 7,93$ kN

Diâmetros do parafuso $\frac{3}{8}$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3,75 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 7,5 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 29.858,04 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 19.625,0 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 20.470,80 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 19.625,0 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 1b	7.500,00	N	=	7,50	kN
	Modelo de falha 1 ^a	6.369,84	N	=	6,37	kN
	Modelo de falha 2 ^a	7.254,42	N	=	7,25	kN
	Modelo de falha 2b	4.651,52	N	=	4,65	kN
	Modelo de falha 3	5.925,63	N	=	5,93	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 4,65\text{kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	30.000,00	N	=	30,00	kN
	Modelo de falha 1b	15.000,00	N	=	15,00	kN
	Modelo de falha 2	14.508,84	N	=	14,51	kN
	Modelo de falha 3	11.851,25	N	=	11,85	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 11,85\text{ kN}$

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 3,608$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4,76 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 9,53 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 55.584,15 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

Diâmetro externo = 24 mm

Diâmetro interno = 13 mm

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

- Resistência à tração do parafuso: 31.653,16 N

- Resistência ao embutimento da arruela na madeira: 28.754,60 N

Portanto menor valor é resistência ao arrancamento = 28.754,60N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 1b	9.525,00	N	=	9,53	kN
	Modelo de falha 1 ^a	8.089,70	N	=	8,09	kN
	Modelo de falha 2 ^a	9.641,93	N	=	9,64	kN
	Modelo de falha 2b	6.636,57	N	=	6,64	kN
	Modelo de falha 3	9.111,31	N	=	9,11	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: R_k = 6,64 kN

Dupla seção de corte

R _k :	Modelo de falha 1b	38.100,00	N	=	38,10	kN
	Modelo de falha 1b	19.050,00	N	=	19,05	kN
	Modelo de falha 2	19.283,87	N	=	19,28	kN
	Modelo de falha 3	18.222,63	N	=	18,22	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: R_k = 18,22 kN

ANEXO H

Diâmetros do parafuso de ¼”(6,3 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,937$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 3,18 \quad \text{KN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 6,35 \quad \text{KN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 23.286,63 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 12 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 6,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 20.099,76 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 9.766,40 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 9.766,40 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	6.350,00	N	=	6,35	kN
	Modelo de falha 1a	5.393,13	N	=	5,39	kN
	Modelo de falha 2a	6.092,99	N	=	6,09	kN
	Modelo de falha 2b	3.852,48	N	=	3,85	kN
	Modelo de falha 3	4.815,19	N	=	4,82	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 3,85 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN

Modelo de falha 2	12.185,98	N	=	12,19	kN
Modelo de falha 3	9.630,38	N	=	9,63	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 9,63 \text{ kN}$

Diâmetros do parafuso de $5/16''$ (8 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 3,125$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 4 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 8 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 42.455,01 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 16 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 8,4 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 31.902,40 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 17.468,40 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 17.468,40 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
R_k :	Modelo de falha 1b	8.000,00	N	=	8,00	kN
	Modelo de falha 1a	6.794,49	N	=	6,79	kN

Modelo de falha 2a	7.996,41	N	=	8,00	kN
Modelo de falha 2b	5.403,73	N	=	5,40	kN
Modelo de falha 3	7.297,64	N	=	7,30	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 5,4$ kN

Dupla seção de corte

R_k :	Modelo de falha 1b	32.000,00	N	=	32,00	kN
	Modelo de falha 1b	16.000,00	N	=	16,00	kN
	Modelo de falha 2	15.992,83	N	=	15,99	kN
	Modelo de falha 3	14.595,28	N	=	14,60	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_k = 14,60$ kN

Diâmetros do parafuso de $3/8$ " (10 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 5 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 10 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 75.839,42 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 20 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 10,5 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 49.847,50 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 27.294,50 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 27.294,50 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 1b	10.000,00	N	=	10,00	kN
	Modelo de falha 1a	8.493,12	N	=	8,49	kN
	Modelo de falha 2a	10.537,53	N	=	10,54	kN
	Modelo de falha 2b	7.644,47	N	=	7,64	kN
	Modelo de falha 3	10.904,87	N	=	10,90	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_k = 7,64$ kN

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	40.000,00	N	=	40,00	kN
	Modelo de falha 1b	20.000,00	N	=	20,00	kN
	Modelo de falha 2	21.075,05	N	=	21,08	kN
	Modelo de falha 3	21.809,74	N	=	21,81	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1b: $R_k = 20$ kN

Diâmetros do parafuso de 1/2" (12,7 milímetros)

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 1,969$$

$$\beta_{lim} = 4,980$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vk,1} : \quad 6,35 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vk,1} : \quad 12,7 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_k = 141.183,7 \quad (\text{N. mm})$$

Arruela:

$$\text{Diâmetro externo} = 24 \quad \text{mm}$$

$$\text{Diâmetro interno} = 13 \quad \text{mm}$$

Resistência característica ao arrancamento do conector ($F_{ax,Rk}$), equações (31) e (32), respectivamente:

$$\text{-Resistência à tração do parafuso:} \quad 80.399,03 \quad \text{N}$$

$$\text{- Resistência ao embutimento da arruela na madeira:} \quad 38.339,4 \quad \text{N}$$

Portanto menor valor é resistência à tração do parafuso = 38.339,40 N

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 1b	12.700,00	N	=	12,70	kN
	Modelo de falha 1a	10.786,26	N	=	10,79	kN
	Modelo de falha 2a	14.413,78	N	=	14,41	kN
	Modelo de falha 2b	11.312,10	N	=	11,31	kN
	Modelo de falha 3	16.767,46	N	=	16,77	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_k = 10,79 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_k :$	Modelo de falha 1b	50.800,00	N	=	50,80	kN
	Modelo de falha 1b	25.400,00	N	=	25,40	kN
	Modelo de falha 2	28.827,55	N	=	28,83	kN
	Modelo de falha 3	33.534,92	N	=	33,53	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_k = 28,83 \text{ kN}$

ANEXO I

Valores de cálculo

$$K_{\text{mod}} = K_{\text{mod1}} \cdot K_{\text{mod2}} \cdot K_{\text{mod3}}$$

- K_{mod1} : Classe de carregamento permanente, conforme tabela13;
- K_{mod2} :Classe de umidade 1, conforme quadro 4;
- K_{mod3} :

- Para coníferas: classe SE-D (classificação visual e mecânica), conforme quadro 5;
- Para folhosas: classe S2 (classificação visual e mecânica), conforme quadro 6.

Tabela 13 – Definição de classe de carregamento e valores de k_{mod1}

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Vida útil da construção	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Mais de seis meses	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012)

Tabela 14 – Definição de classe de carregamento e valores de k_{mod}

Classes de umidade	Madeira serrada	Madeira recomposta
	Madeira roliça Madeira laminada colada Madeira compensada	
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70	0,90

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012)

Tabela 15 – Valores de k_{mod3} para coníferas (para madeira classificada)

Classificação	Classe	Tipo de classificação	
		Apenas visual	Visual e mecânica
Densas (D)	SE-D	0,70	0,90
	S1-D	0,60	0,80
	S2-D	0,50	0,70
	S3-D	0,40	0,60

Não-Densas (ND)	SE-ND	0,60	0,80
	S1-ND	0,50	0,70
	S2-ND	0,40	0,60
	S3-ND	0,30	0,50

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012).

Tabela 16 – Valores de k_{mod3} para folhosas (para madeira classificada)

Classes	Tipo de classificação	
	Apenas visual	Visual e mecânica
SE	0,90	1,00
S1	0,85	0,95
S2	0,80	0,90
S3	0,75	0,85

Fonte: Adaptado Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012).

- $K_{mod1} = 0,60$
- $K_{mod2} = 1,00$
- $K_{mod3} = 0,90$ (tanto para madeira conífera como para madeira folhosa)

Portanto:

$$K_{mod} = (0,60) (1,00) (0,90) = 0,54$$

Segundo a Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012) o coeficiente de minoração (γ_M) para estados limites últimos decorrentes de tensões de compressão paralela às fibras tem o valor básico $\gamma_M=1,4$. O coeficiente de ponderação para estados limites últimos decorrentes de tensões de tração paralela às fibras tem o valor básico $\gamma_M=1,8$. O coeficiente de ponderação para estados limites último decorrentes de tensões de cisalhamento paralelo às fibras tem o valor básico $\gamma_M=1,8$.

Sendo:

$$f_{e,d} = k_{mod} \frac{f_{e,k}}{\gamma_M}$$

Assim:

$$f_{e,d} = 0,54 \frac{30}{1,4} = 11,57 \text{ MPa}$$

O aço também deve ser transformado em valor de cálculo, logo:

$$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

Assim:

$$f_{y,d} = \frac{250}{1,1} = 227,27 \text{ MPa}$$

Corpo de prova A₁

- NBR 7190 (2012)

Os dados utilizados para resolução são:

$$\begin{aligned} t &= 2,5 \text{ cm} \\ d &= 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm} \\ f_{e,d} &= 11,57 \text{ MPa} = 1,157 \text{ kN/cm}^2 \\ f_{y,d} &= 227,27 \text{ MPa} = 22,73 \text{ kN/cm}^2 \end{aligned}$$

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{t}{d} = \frac{2,5}{1} = 2,500 \\ \beta_{lim} &= 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} = 1,25 \sqrt{\frac{227,27}{11,57}} = 5,540 \end{aligned}$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

- Uma seção de corte:

$$R_{vd,1} = 0,50 t d f_{e,d} = 0,50 (2,5)(1)(22,73) = 1,45 \text{ kN}$$

- Dupla seção de corte:

$$R_{vd,2} = 2 R_{vk,1} = 2 \times 1,45 = 3,90 \text{ kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Os dados utilizados são:

$$\begin{aligned} T &= 2,5 \text{ cm} \\ D &= 10 \text{ mm} \\ f_{e,d} &= 11,57 \text{ MPa} = 11,57 \text{ N/mm}^2 \\ f_{y,d} &= 227,27 \text{ MPa} = 227,27 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 0,3 f_u d^{2,6} = 0,3 (227,27) 10^{2,6} = 27.143,67 \text{ N.mm}$$

Para obter a resistência da ligação em uma seção de corte serão utilizadas as equações (21) a (26), logo temos que:

$$(21) \quad R_d = f_{e,d,1} t_1 d = (11,57)(25)(10) = 2.892,50 \text{ N}$$

$$(22) \quad R_d = f_{e,d,1} t_2 d c = (11,57)(25)(10)(1) = 2.892,50 \text{ N}$$

$$(23) \quad R_d = \frac{f_{e,d,1} t_1 d}{1+c} \left[\sqrt{c + 2c^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + c^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - c \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$$

$$R_d = \frac{(11,57)(25)(10)}{1+1} \left[\sqrt{1 + 2(1)^2 \left[1 + \frac{25}{25} + \left(\frac{25}{25} \right)^2 \right] + (1)^3 \left(\frac{25}{25} \right)^2} - 1 \left(1 + \frac{25}{25} \right) \right]$$

$$R_d = 1.198,26 \text{ N}$$

$$(24) \quad R_d = \frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2+c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_{y,d}}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right]$$

$$R_d = \frac{11,57(25)(10)}{2+1} \left[\sqrt{2(1)(1+1) + \frac{4(1)(2+1)(27.143,67)}{(11,57)(10)(25)^2}} - 1 \right]$$

$$R_d = 1.847,70 \text{ N}$$

$$(25) \quad R_d = \frac{f_{e,d,1} t_2 d}{1+2c} \left[\sqrt{2c^2(1+c) + \frac{4c(1+2c)M_{y,d}}{f_{e,d,1} d t_2^2}} - c \right]$$

$$R_d = \frac{(11,57)(25)(10)}{1+2(1)} \left[\sqrt{2(1)^2(1+1) + \frac{4(1)[1+2(1)](27.143,67)}{(11,57)(10)(25)^2}} - 1 \right]$$

$$R_d = 1.847,70 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 (26) \quad R_d &= \sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_{y,d} f_{e,d,1} d} \\
 R_d &= \sqrt{\frac{2(1)}{1+1}} \sqrt{2 (27.143,67)(11,57)(10)} \\
 R_d &= 4.035,62 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Logo, a menor valor para uma seção de corte é $R_d = 1,20 \text{ kN}$.

Para obter a resistência da ligação em dupla seção de corte serão utilizadas as equações (27) a (30), logo temos que:

$$(27) \quad R_d = 2 (f_{e,d,1} t_1 d) = 2 (11,57)(25)(10) = 5.785,71 \text{ N}$$

$$(28) \quad R_d = 2 (f_{e,d,1} t_2 d c) = 2 (11,57)(25)(10)(1) = 5.785,71 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 (29) \quad R_d &= 2 \left(\frac{f_{e,d,1} t_1 d}{2+c} \left[\sqrt{2c(1+c) + \frac{4c(2+c)M_d}{f_{e,d,1} d t_1^2}} - c \right] \right) \\
 R_d &= 2 \left(\frac{(11,57)(25)(10)}{2+1} \left[\sqrt{2(1)(1+1) + \frac{4(1)(2+1)(27.143,67)}{(11,57)(10)(25)^2}} - 1 \right] \right) \\
 R_d &= 3.695,40 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (30) \quad R_d &= 2 \left(\sqrt{\frac{2c}{1+c}} \sqrt{2 M_d f_{e,d,1} d} \right) \\
 R_d &= 2 \left(\sqrt{\frac{2(1)}{1+1}} \sqrt{2 (27.143,67)(10)} \right) \\
 R_d &= 5.012,71 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Logo, a menor valor para dupla seção de corte é $R_d = 3,70$ kN.

Seguindo esse mesmo princípio de cálculo temos:

Corpo de prova A₂

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 8,829$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,45 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 2,90 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 68.944,92 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	2.892,86	N	=	2,89	kN
	Modelo de falha 1b	2.892,86	N	=	2,89	kN
	Modelo de falha 1a	1.198,26	N	=	1,20	kN
	Modelo de falha 2a	2.824,73	N	=	2,82	kN
	Modelo de falha 2b	2.824,73	N	=	2,82	kN
	Modelo de falha 3	6.431,71	N	=	6,43	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,20$ kN

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 2	5.649,45	N	=	5,65	kN

$$\text{Modelo de falha 3} \quad 7.988,95 \quad \text{N} \quad = \quad 7,99 \quad \text{kN}$$

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 5,65 \text{ kN}$

Corpo de prova B₁

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 4,798$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,93 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 3,86 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 27.143,67 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
$R_d :$	Modelo de falha 1a	1.597,68	N	=	1,60	kN
	Modelo de falha 2a	2.106,58	N	=	2,21	kN
	Modelo de falha 2b	2.206,58	N	=	2,21	kN
	Modelo de falha 3	4.659,93	N	=	4,66	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,60 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
$R_d :$	Modelo de falha 2	4.413,15	N	=	4,41	kN
	Modelo de falha 3	5.788,18	N	=	5,79	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 4,41$ kN

Corpo de prova B₂

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 7,646$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,93 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 3,86 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 68.944,92 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1a	1.597,68	N	=	1,60	kN
	Modelo de falha 2a	3.274,46	N	=	3,27	kN
	Modelo de falha 2b	3.274,46	N	=	3,27	kN
	Modelo de falha 3	7.426,70	N	=	7,43	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,60$ kN

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 2	6.548,92	N	=	6,55	kN
	Modelo de falha 3	9.224,84	N	=	9,22	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 6,55 \text{ kN}$

Corpo de prova C₁

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 5,540$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,45 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 2,90 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 27.143,67 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1b	2.892,86	N	=	2,89	kN
	Modelo de falha 1a	1.393,73	N	=	1,39	kN
	Modelo de falha 2a	2.067,78	N	=	2,07	kN
	Modelo de falha 2b	1.959,25	N	=	1,96	kN
	Modelo de falha 3	4.314,26	N	=	4,31	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,39 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 2	4.135,56	N	=	4,14	kN
	Modelo de falha 3	5.358,81	N	=	5,36	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 4,14$ kN

Corpo de prova C₂

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 5,540$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,45 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 2,90 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 27.143,67 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	2.892,86	N	=	2,89	kN
	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1a	1.393,73	N	=	1,39	kN
	Modelo de falha 2a	1.959,25	N	=	1,96	kN
	Modelo de falha 2b	2.067,78	N	=	2,07	kN
	Modelo de falha 3	4.314,26	N	=	4,31	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,39$ kN

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 2	3.918,49	N	=	3,92	kN
	Modelo de falha 3	5.358,81	N	=	5,36	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 3,92$ kN

Corpo de prova D₁

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 5,540$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,45 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 2,90 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 27.143,67 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 1b	2.892,86	N	=	2,89	kN
	Modelo de falha 1a	1.965,55	N	=	1,97	kN
	Modelo de falha 2a	2.437,83	N	=	2,44	kN
	Modelo de falha 2b	1.847,70	N	=	1,85	kN
	Modelo de falha 3	4.035,62	N	=	4,04	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 1a: $R_d = 1,85$ kN

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	11.571,43	N	=	11,57	kN
	Modelo de falha 1b	5.785,71	N	=	5,79	kN
	Modelo de falha 2	4.875,65	N	=	4,88	kN
	Modelo de falha 3	5.012,71	N	=	5,01	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 2: $R_d = 4,88 \text{ kN}$

Corpo de prova D₂

- NBR 7190 (2012)

Utilizando as equações (13) e (14) temos que os parâmetros β e β_{lim} com os seguintes valores:

$$\beta = 2,500$$

$$\beta_{lim} = 4,798$$

Sendo $\beta \leq \beta_{lim}$, a norma brasileira sugere que ocorre embutimento da madeira, logo se utiliza a equação (16) para cálculo da resistência da ligação:

$$\text{Uma seção de corte} - R_{vd,1} : \quad 1,93 \quad \text{kN}$$

$$\text{Dupla seção de corte} - 2R_{vd,1} : \quad 3,86 \quad \text{kN}$$

- EUROCODE 5 (2004)

Momento devido à flexão do pino conforme a equação (29):

$$M_d = 27.143,67 \quad (\text{N. mm})$$

Para obter a resistência da ligação serão utilizadas as equações (18) a (28), logo temos que:

Uma seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 1b	3.857,14	N	=	3,86	kN
	Modelo de falha 1a	2.620,73	N	=	2,62	kN
	Modelo de falha 2a	3.088,33	N	=	3,09	kN
	Modelo de falha 2b	2.206,58	N	=	2,21	kN
	Modelo de falha 3	4.659,93	N	=	4,66	kN

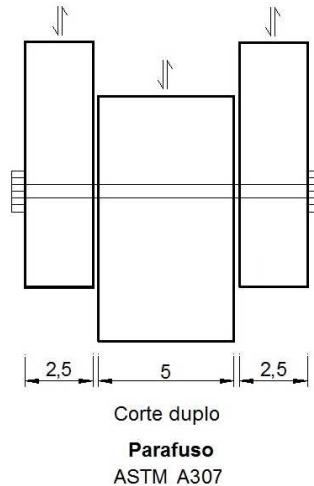
O valor utilizado é o do modelo de falha 2b: $R_d = 2,21 \text{ kN}$

Dupla seção de corte

$R_d :$	Modelo de falha 1b	15.428,57	N	=	15,43	kN
	Modelo de falha 1b	7.714,29	N	=	7,71	kN
	Modelo de falha 2	6.176,65	N	=	6,18	kN
	Modelo de falha 3	5.788,18	N	=	5,79	kN

O valor utilizado é o do modelo de falha 3: $R_d = 5,79 \text{ kN}$

ANEXO J

 $K_{mod} = 0,54$ (conforme cálculo ANEXO I)


$$f_{e,d} = K_{mod} \frac{f_{e,k}}{\gamma_M}$$

- $\gamma_M = 1,4$ (para madeira)

$$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

- $\gamma_M = 1,1$ (para o aço).

Tabela 13 – Resistência de ligações com parafuso passante com porca e arruela em dupla seção de corte (kN)

Parafuso	Norma	Classe da madeira							
		C20	C25	C30	D20	D30	D40	D50	D60
1/4"	Revisão NBR 7190 (2012)	1,22	1,53	1,83	1,22	1,83	2,45	3,06	3,22
	EUROCODE 5 (2004)	1,80	2,09	2,37	1,80	2,37	2,92	3,46	4,00
5/16"	Revisão NBR 7190 (2012)	1,54	1,93	2,31	1,54	2,31	3,09	3,86	4,63
	EUROCODE 5 (2004)	2,61	2,99	3,36	2,61	3,36	4,07	4,77	5,46
3/8"	Revisão NBR 7190 (2012)	1,93	2,41	2,89	1,93	2,89	3,86	4,82	5,79
	EUROCODE 5 (2004)	3,81	4,32	4,80	3,81	4,80	5,74	6,64	7,52
1/2"	Revisão NBR 7190 (2012)	2,45	3,06	3,67	2,45	3,67	4,90	6,12	7,35
	EUROCODE 5 (2004)	5,79	6,12	7,18	5,79	7,18	8,46	9,67	10,84