

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS TOLEDO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BIANCA LEONESSA

## **Dimensionamento de Ligações da Madeira Submetidas ao Cisalhamento**

TOLEDO  
2016

BIANCA LEONESSA

## **Dimensionamento de Ligações da Madeira Submetidas ao Cisalhamento**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2016



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 36:

### **Dimensionamento de Ligações da Madeira Submetidas ao Cisalhamento**

por

**Bianca Leonessa**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 17:30h do dia **08 de Novembro de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim  
(UTFPR – TD)

---

Prof<sup>a</sup> Heloiza Candeia Ruthes  
(UTFPR – TD)

---

Prof. Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Prof<sup>a</sup> MSc. Silvana da Silva Ramme  
Coordenadora da COECI

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

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Franklin e Simone, que sempre me apoiaram e me motivaram a ir atrás de meus sonhos, eu agradeço por tudo que tenho e sou hoje;

A toda minha família, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, permaneceram me apoiando e torcendo pelo meu futuro;

Ao meu noivo, Geofly Adonias, por me auxiliar durante todo o desenvolvimento deste trabalho, e por todo apoio, incentivo e compreensão durante as horas difíceis, de desânimo e cansaço;

Aos meus amigos, Adriana Limberger, Ana Bergmann, Daiane Rocha, Gustavo Aleandri e Raquel Wesseling, por todos os momentos compartilhados durante essa jornada, e pelo companheirismo que fizeram com que se tornassem minha família de Toledo;

Ao professor e orientador, Gustavo Savaris, pela sua orientação, apoio e confiança;

A todos os professores que fizeram parte da minha formação, por toda paciência e dedicação, que me permitiram estar aqui hoje;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de me graduar em Engenharia Civil;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

## RESUMO

Ligações mecânicas da madeira estão presentes na construção civil para trabalhar com as dimensões limitadas da madeira e conectar partes de uma estrutura. Desta forma, o dimensionamento dessas ligações deve ser realizado de forma segura. A NBR 7190/97, que trata de estruturas de madeira, não prevê o cisalhamento em linha e em bloco em seus cálculos, sendo estes dois tipos de ruptura tratados pela norma referência dos Estados Unidos, a NDS. Foi, então, realizado um estudo numérico com ligações feitas com um, três e seis parafusos, de acordo com as formulações de ambas as normas, para verificar a segurança no dimensionamento da NBR 7190/97. Os resultados mostraram que apesar das resistências serem tratadas de forma diferente pelas normas, as cargas de ruptura calculadas ficaram em uma proporção semelhante às das resistências. Além disso, foi verificado que o espaçamento entre os parafusos influencia na capacidade de carga da ligação.

**Palavras-chaves:** Ligações. Cisalhamento. Estruturas. Madeira. NBR 7190.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Grande Templo Oriental, Tōdai-ji, no Japão . . . . .	13
Figura 2 – Metropol Parasol, Espanha . . . . .	14
Figura 3 – Cisalhamento na madeira . . . . .	18
Figura 4 – Modelo de cisalhamento em linha . . . . .	19
Figura 5 – Modelo de cisalhamento em bloco . . . . .	19
Figura 6 – Espaçamentos mínimos . . . . .	20
Figura 7 – Determinação do valor $t$ . . . . .	21
Figura 8 – Ruptura por esmagamento (Modo 1) . . . . .	28
Figura 9 – Ruptura por esmagamento (Modo 2) . . . . .	28
Figura 10 – Ruptura por flexão do pino (Modo 3) . . . . .	29
Figura 11 – Ruptura por flexão do pino (Modo 4) . . . . .	29
Figura 12 – Área crítica do cisalhamento em linha . . . . .	31
Figura 13 – Área crítica do cisalhamento em bloco . . . . .	31
Figura 14 – Área líquida . . . . .	33
Figura 15 – Modelo dos corpos de prova . . . . .	35
Figura 16 – Dimensões mínimas da ligação de referência, em mm . . . . .	39
Figura 17 – Dimensões mínimas da ligação com três parafusos, em mm . . . . .	39
Figura 18 – Dimensões mínimas da ligação com seis parafusos, em mm . . . . .	39
Figura 19 – Parâmetros utilizados para os espaçamentos . . . . .	41
Figura 20 – Gráfico comparando as cargas calculadas do <i>Pinus</i> com sua carga de ruptura real . . . . .	46
Figura 21 – Gráfico comparando as cargas calculadas da <i>Picea</i> com sua carga de ruptura real . . . . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de $k_{mod,1}$ . . . . .	22
Tabela 2 – Classes de Carregamento . . . . .	23
Tabela 3 – Valores de $k_{mod,2}$ . . . . .	23
Tabela 4 – Classes de Umidade da Madeira . . . . .	23
Tabela 5 – Fator de umidade . . . . .	26
Tabela 6 – Fator de temperatura . . . . .	26
Tabela 7 – Fator de conversão de formato . . . . .	27
Tabela 8 – Fator de resistência . . . . .	27
Tabela 9 – Fator de geometria . . . . .	30
Tabela 10 – Resultados da capacidade de carga da ligação em <i>Pinus</i> . . . . .	41
Tabela 11 – Resultados da capacidade de carga da ligação em <i>Picea</i> . . . . .	42
Tabela 12 – Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para um parafuso . . . . .	43
Tabela 13 – Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para três parafusos . . . . .	43
Tabela 14 – Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para seis parafusos . . . . .	43
Tabela 15 – Capacidades de carga de acordo com a NDS para um parafuso . . . . .	44
Tabela 16 – Capacidades de carga de acordo com a NDS para três parafusos . . . . .	44
Tabela 17 – Capacidades de carga de acordo com a NDS para seis parafusos . . . . .	44
Tabela 18 – Comparação entre as menores capacidades de carga obtidas em cada norma . . . . .	45
Tabela 19 – Comparação entre resistências características . . . . .	45
Tabela 20 – Comparação entre as menores capacidades de carga obtidas em cada norma para uma mesma resistência inicial . . . . .	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AITC	<i>American Institution of Timber Construction</i>
ASD	<i>Allowable Stress Design</i>
AWC	<i>American Wood Council</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LRFD	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
LSL	<i>Lamineted Strand Lumber</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
NDS	<i>National Design Specification</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{cisbloco}$	Área crítica onde há o cisalhamento do bloco, em mm <sup>2</sup>
$A_{cislinha}$	Área crítica onde há o cisalhamento da linha, em mm <sup>2</sup>
$A_f$	Área do furo, em mm <sup>2</sup>
$A_g$	Área da seção bruta, em mm <sup>2</sup>
$A_n$	Área da seção líquida, em mm <sup>2</sup>
$\beta$	Parâmetro para o cálculo da resistência de um pino metálico
$\beta_{lim}$	Parâmetro limite para o cálculo da resistência de um pino metálico
$C_{\Delta}$	Fator de geometria
$C_F$	Fator de tamanho
$C_i$	Fator de incisão
$C_M$	Fator de umidade
$C_t$	Fator de temperatura
$d$	Diâmetro do pino, em mm
$d_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo do pino, em mm
$F_{A_n}$	Força máxima de tração resistida pela área da seção líquida da peça, em N
$F_{v_b}$	Força máxima de cisalhamento em bloco, em N
$F_{v_l}$	Força máxima de cisalhamento em linha suportada pela linha $i$ , em N
$F_{v_{l-1}}$	Força máxima de cisalhamento em linha suportada pela primeira fileira de pinos à margem da área cisalhada do bloco, em N
$F_{v_{l-n}}$	Força máxima de cisalhamento em linha suportada pela enésima fileira de pinos à margem da área cisalhada do bloco, em N
$f_c$	Resistência referência à compressão, em MPa
$f'_c$	Resistência admissível à compressão, em MPa

$f_{c0_m}$	Resistência média à compressão paralela às fibras, em MPa
$f_{cd}$	Resistência de projeto à compressão paralela às fibras, em MPa
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras, em MPa
$f_{ed}$	Resistência ao embutimento da madeira, em MPa
$f_t$	Resistência referência à tração, em MPa
$f'_t$	Resistência admissível à tração, em MPa
$f_{td}$	Resistência de projeto à tração paralela às fibras, em MPa
$f_{tk}$	Resistência característica à tração paralela às fibras, em MPa
$f_v$	Resistência referência ao cisalhamento, em MPa
$f'_v$	Resistência admissível ao cisalhamento, em MPa
$f_{vd}$	Resistência de projeto ao cisalhamento, em MPa
$f_{vk}$	Resistência característica ao cisalhamento, em MPa
$f_{yd}$	Resistência de projeto do pino metálico, em MPa
$f_{yk}$	Resistência característica do pino metálico, em MPa
$f_{12\%}$	Resistência média corrigida para umidade referência de 12%, em MPa
$f_{U\%}$	Resistência média para umidade de $U\%$ , em MPa
$g$	Folga para o furo do pino, em mm
$\gamma_s$	Coefficiente de minoração da resistência do aço
$h$	Altura da peça, em mm
$K_F$	Fator de conversão de formato
$k_{mod}$	Coefficiente de modificação
$L$	Comprimento da peça, em mm
$n_i$	Número de parafusos na linha $i$
$n_l$	Número de linhas de pinos na ligação
$n_{planos}$	Número de planos de cisalhamento na ligação

$n_T$	Número total de pinos na ligação
$\phi$	Fator de resistência
$R_v$	Capacidade de carga máxima de um parafuso, em N
$s_{crit}$	Menor espaçamento entre os pinos em linha, em mm
$s_{linha}$	Menor espaçamento entre duas linhas de pinos na ligação, em mm
$t$	Menor espessura da peça, em mm
$Z$	Capacidade de carga máxima de um parafuso, em N

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Delimitação da pesquisa	16
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>17</b>
2.1	Ligações entre peças de madeira	17
2.2	Resistência ao cisalhamento na madeira	17
2.3	Cisalhamento em ligações	18
2.4	Espaçamentos e dimensões propostas pela NBR 7190/97	20
2.5	Formulação proposta pela NBR 7190/97	21
2.5.1	Caracterização da madeira	21
2.5.2	Ruptura da ligação	24
2.6	Formulação proposta pela NDS	25
2.6.1	Caracterização da madeira	25
2.6.2	Ruptura da ligação	28
2.7	Ruptura por tração na área líquida	33
2.8	Pesquisas recentes sobre cisalhamento em peças de madeira	34
2.8.1	Estudos de Taylor e Line (2002)	34
2.8.2	Estudos de Smith, Asiz e Snow (2006)	35
2.8.3	Estudos de Rammer e Line (2006)	36
2.8.4	Estudos de Zarnani e Quenneville (2014)	36
2.9	Comentários finais	37
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>38</b>
3.1	Dimensionamento da ligação teórica utilizando as resistências do <i>Pinus Elliotti</i>	38
3.1.1	Resistências pela NBR 7190/97	40
3.1.2	Resistências pela NDS	40
3.2	Comparação com estudo experimental	41
<b>4</b>	<b>Apresentação e Análise dos Resultados</b>	<b>43</b>
4.1	Comparação entre as formulações propostas pela NBR 7190/97 e NDS utilizando as resistências do <i>Pinus Elliotti</i>	43

4.1.1	Estimativas da NBR 7190/97 . . . . .	43
4.1.2	Estimativas da NDS . . . . .	44
4.1.3	Comparação das estimativas . . . . .	44
4.2	Comparação da formulação das normas com resultados práticos . . . .	46
<b>5</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>48</b>
5.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	48
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história brasileira criou-se um preconceito ao pensar em construções de madeira por associá-la a um material utilizado por pessoas com baixo poder aquisitivo e, então, relacionando estas construções com sub-habitações ou até mesmo construções de pouca durabilidade. Porém, por se tratar de um material renovável, diversos países já adotaram a madeira como principal matéria-prima para a construção civil.

Algumas das grandes construções ao redor do mundo possuem a madeira como elemento estrutural, como é o caso do Grande Templo Oriental, Tōdai-ji, no Japão (Figura 1). Construído há mais de 1.300 anos, o templo é considerado a obra de madeira mais antiga do mundo (TODAIJI... , 2013).



**Figura 1: Grande Templo Oriental, Tōdai-ji, no Japão**  
Fonte: Website (TODAIJI... , 2013)

Já a maior obra de estrutura de madeira do mundo, atualmente, está localizada na Espanha. O Metropol Parasol (Figura 2) funciona como mercado central da cidade de Sevilha, e também conta com um museu arqueológico, um restaurante e terraços panorâmicos. Finalizada a construção em 2011, a estrutura possui 150 metros de comprimento, 70 metros de largura e 26 metros de altura (METROPOL... , 2014).



**Figura 2: Metropol Parasol, Espanha**  
Fonte: Website (METROPOL..., 2014)

Entretanto, no Brasil, uma das barreiras encontradas para a evolução desse setor ainda é o preconceito contra o uso da madeira. Um dos motivos dessa contínua aversão a estruturas de madeira é causado pelo uso de técnicas construtivas inadequadas. Além disso, o país possui uma forte tradição de construção em alvenaria de tijolos de barro, herdada da colonização portuguesa. Outro fator contribuinte para tal preconceito ocorreu em 1905 na cidade de Curitiba, onde o governo proibiu a construção de casas de madeira nas zonas centrais da cidade, alegando que obras de madeira davam um aspecto de pobreza para a região (SZUCS, 2006).

No Brasil, o sul e sudeste apresentam um destaque no uso da madeira para a construção civil por possuírem matéria-prima (pinho-do-Paraná de reflorestamento) e, também, devido à influência germânica, que trouxe um pouco de sua arquitetura para a região no século XX.

As vantagens do uso da madeira na construção civil são inúmeras. Entre elas, destacam-se: a resistência mecânica elevada capaz de resistir a esforços de tração e compressão, o fato de ser uma matéria-prima renovável, ser um isolante térmico natural com boa durabilidade e segurança contra altas temperaturas e oxidação, e a leveza do material, que é aproximadamente 60% mais leve que o concreto.

Comparando com obras de concreto, estima-se que casas de madeira sejam até 10% mais baratas. Sabe-se também que obras com estruturas de madeira têm seu tempo de execução mais curto, além de canteiros de obra mais secos, limpos e com menor descarte de materiais (LAHR, 2014).

Além das vantagens da utilização de estruturas de madeira já citadas, seu pro-

cesso de transformação de matéria-prima em produto final consome uma quantidade de energia consideravelmente menor que o processo de produção de aço, cal, tijolo, barro e cimento. Isso acontece porque esses materiais emitem carbono em seus processos de produção, ao contrário da madeira, que também estoca carbono enquanto matéria-prima (SOUZA; RODRIGUES; MASCIA, 2008).

Em contrapartida, algumas desvantagens devem ser consideradas. Entre elas estão a vulnerabilidade a agentes externos que podem levar à deterioração da madeira, a facilidade de propagação do fogo e suas dimensões limitadas.

Pesquisas com estruturas de madeira já apresentaram métodos que buscam amenizar os efeitos causados pelos agentes externos e pela combustão da madeira, como o tratamento contra fungos e cupins e a aplicação de substâncias que retardam a propagação do fogo em caso de incêndio. Apesar de ser um material inflamável, a madeira ainda resiste a altas temperaturas sem perder sua resistência. E para trabalhar com suas dimensões limitadas, são utilizadas ligações mecânicas da madeira.

Neste trabalho são apresentadas diferentes formulações para o dimensionamento de ligações mecânicas da madeira, comparando-as entre si e, também, com ensaios práticos realizados por outros autores.

## 1.1 Justificativa

A norma técnica utilizada como referência para o dimensionamento de estruturas da construção civil nos Estados Unidos, chamada NDS (*National Design Specification*), considera dois tipos de cisalhamento para o dimensionamento de ligações por pinos metálicos na madeira, cisalhamento em linha e em bloco, propondo uma formulação específica para verificar os espaçamentos entre as ligações.

A norma técnica brasileira que trata de estruturas de madeira, NBR 7190, atualizada pela última vez em 1997, não faz menção a esses dois tipos de cisalhamento. Todavia, a norma brasileira determina espaçamentos mínimos entre pregos e parafusos, vinculados ao diâmetro do pino, e podem ou não satisfazer a condição proposta pela norma americana.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Verificar se os espaçamentos mínimos entre pinos metálicos, propostos pela NBR 7190/97, garantem a segurança das ligações mecânicas da madeira quando submetidas ao cisalhamento.



### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as dimensões mínimas propostas pela NBR 7190/97 em comparação à formulação proposta pela NDS;
- Analisar a formulação proposta pelas normas, comparando-as com análises práticas de trabalhos já publicados;
- Verificar se os espaçamentos mínimos propostos pela NBR 7190/97 atendem as solicitações de cisalhamento em linha e em bloco.

### 1.3 Delimitação da pesquisa

O presente trabalho trata de ligações feitas com um, três e seis parafusos, em madeira com dois planos de cisalhamento. As ligações são calculadas de acordo com a NBR 7190/97 e a NDS, para verificar a ruptura por cisalhamento em linha e em bloco.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ligações entre peças de madeira

As ligações mecânicas são caracterizadas pelas conexões entre duas peças de madeira, que podem ser feitas com pinos metálicos (parafusos e pregos), cavilhas ou conectores (anéis metálicos e chapas metálicas). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) prevê em sua NBR 7190/97 um método de dimensionamento diferente para cada tipo de ligação.

Para os pinos metálicos (pregos e parafusos), é possível formular a capacidade de carga com base no comportamento plástico da madeira e do aço, pois a resistência das ligações por pinos dependerá da resistência ao escoamento do aço do pino e da resistência da madeira ao embutimento de pregos ou parafusos (OLIVEIRA; DIAS, 2005).

Todas as ligações mecânicas precisam cumprir os critérios de dimensionamento da NBR 7190/97, que são baseados nos conceitos supracitados. Estes critérios são embasados pelas forças que podem ser aplicadas e pelos tipos de ruptura possíveis da madeira.

Entre as forças aplicadas, podemos citar os esforços mais comuns, como a força de tração, de compressão e de cisalhamento. A força de tração é definida como uma sollicitação que tende a alongar a peça no sentido da reta de ação da força aplicada. A força de compressão é definida como uma sollicitação que tende a encurtar a peça no sentido da reta de ação da força aplicada. O cisalhamento é definido por uma sollicitação que tende a deslocar paralelamente, em sentidos opostos, duas seções de uma peça (OLIVEIRA, 2014).

A NBR 7190/97 prevê critérios de dimensionamento para ligações com pinos metálicos com base nesses tipos de ruptura, porém, ela não prevê um dimensionamento específico que previna a madeira de romper por cisalhamento.

### 2.2 Resistência ao cisalhamento na madeira

O cisalhamento consiste na separação das fibras da madeira, que pode ocorrer de três formas. A primeira seria quando a ação é perpendicular às fibras (cisalhamento vertical), porém este caso não é considerado crítico, pois antes de ocorrer esse tipo de cisalhamento, a peça apresentará problemas de esmagamento por compressão normal. As outras duas formas de cisalhamento ocorrem com a força aplicada no sentido longitudinal às fibras (cisalhamento horizontal) e a força aplicada perpendicular

às linhas dos anéis de crescimento (cisalhamento *rolling*) (SZUCS *et al.*, 2015).

Na maioria dos casos, o tipo de cisalhamento mais importante na madeira, que será tratado neste trabalho, é o cisalhamento horizontal, quando a ação é paralela às fibras. Esta ação faz com que a porção superior da peça deslize em relação à porção inferior, quebrando as ligações intercelulares e deformando a estrutura celular da madeira (RITTER, 1990). A Figura 3 mostra os três casos citados por Szucs *et al.* (2015), sendo (a) o cisalhamento vertical, perpendicular às fibras, (b) o cisalhamento horizontal, paralelo às fibras, e (c) o cisalhamento *rolling*, horizontal e perpendicular às fibras.

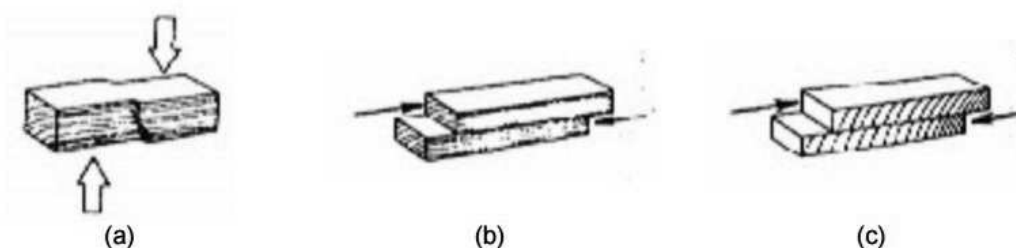


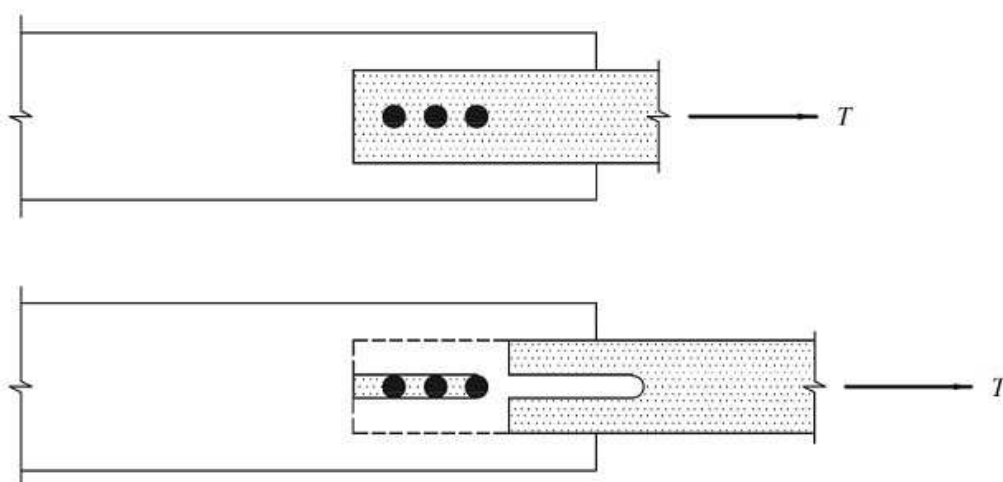
Figura 3: Cisalhamento na madeira  
Fonte: Ritter (1990)

### 2.3 Cisalhamento em ligações

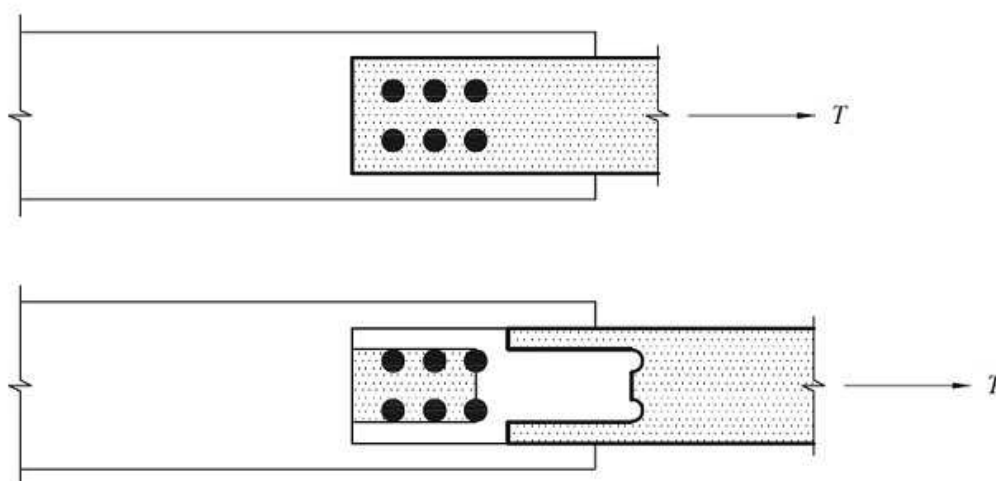
Para ligações mecânicas da madeira, podemos ainda separar o cisalhamento horizontal, paralelo às fibras, em dois casos: cisalhamento em linha e cisalhamento em bloco.

O cisalhamento em linha e em bloco são definidos na bibliografia americana, e consistem em os pinos metálicos rasgarem a madeira de forma paralela às fibras.

O cisalhamento em linha descreve a condição em que uma fila de conectores, submetidos a uma força ( $T$ ), arranca um “tampão” de madeira, como mostrado na Figura 4. Essa falha é devido ao espaçamento inadequado dos pinos ao longo dos planos de ruptura. O cisalhamento em bloco, por sua vez, ocorre quando duas ou mais filas de conectores estão estreitamente espaçadas. Ao invés de rasgar a madeira em cada linha, um único bloco de material, submetido a uma força ( $T$ ), é arrancado da madeira com todos os conectores, como mostrado na Figura 5 (AITC, 2012).



**Figura 4: Modelo de cisalhamento em linha**  
Fonte: AITC (2012)



**Figura 5: Modelo de cisalhamento em bloco**  
Fonte: AITC (2012)

A contribuição dos planos de cisalhamento para resistência da ligação não pode ser simplesmente considerada em função de suas áreas, porque a carga resultante das ligações não é partilhada uniformemente entre os planos. Isso ocorre devido a rigidez desigual dos volumes adjacentes da madeira (ZARNANI; QUENNEVILLE, 2014).

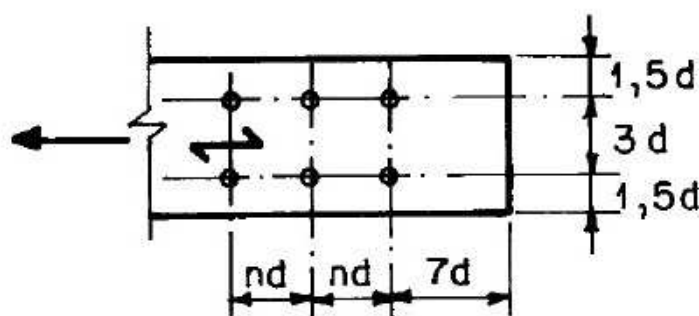
A norma proposta pelo *American Wood Council* (AWC) é utilizada como referência nos Estados Unidos, e em seu apêndice E trata do cisalhamento em linha e em bloco de ligações, propondo os cálculos necessários para um dimensionamento mais seguro (AWC, 2014a). O *American Institution of Timber Construction* (AITC) possui artigos com testes e experimentos nessa área sobre cisalhamento da madeira, e inclusive possui algumas normas próprias com base nos artigos deste tema.

Outras normas internacionais pesquisadas não possuem o mesmo critério proposto no apêndice E da NDS para o projeto de ligações mecânicas da madeira. A

*Eurocode 5*, norma válida para todos os países membros da União Europeia, prevê um espaçamento mínimo para as ligações entre si e entre linhas, porém não faz nenhuma referência ao cisalhamento em linha e em bloco (CEN/TC 250, 2014).

#### 2.4 Espaçamentos e dimensões propostas pela NBR 7190/97

Os espaçamentos mínimos para peças tracionadas recomendados pela NBR 7190/97 são mostrados na Figura 6, sendo  $d$  o diâmetro,  $n = 4$  para parafusos e  $n = 6$  para pregos, cavilhas e parafusos ajustados.



**Figura 6: Espaçamentos mínimos**  
Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)

- a) entre o centro de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras:  $n d$ .
- b) do centro do último pino à extremidade de peças tracionadas:  $7 d$ .
- d) entre os centros de dois pinos situados em duas linhas paralelas à direção das fibras, medido perpendicularmente às fibras:  $3 d$ .
- e) do centro de qualquer pino à borda lateral da peça, medido perpendicularmente às fibras, quando o esforço transmitido for paralelo às fibras:  $1,5 d$ .

(ABNT, 1997)

O diâmetro mínimo para um parafuso, de acordo com a norma brasileira, é de 10 mm. Já o diâmetro máximo do parafuso é dado pela Equação 1, sendo  $t$  o menor valor entre  $t_1$ ,  $\frac{t_2}{2}$  e  $t_3$  dados na Figura 7.

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{t}{2} \quad (1)$$

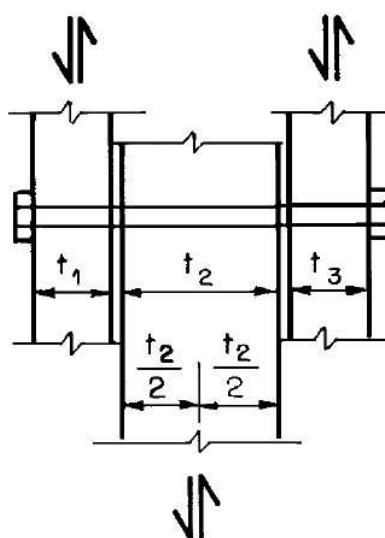


Figura 7: Determinação do valor  $t$   
 Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)

## 2.5 Formulação proposta pela NBR 7190/97

### 2.5.1 Caracterização da madeira

A NBR 7190/97 admite como valor de referência as resistências médias com umidade de 12%. Caso a madeira a ser estudada se encontre em umidade diferente da referência, é feita uma correção, dada pela Equação 2.

$$f_{12\%} = f_{U\%} \times \left[ 1 + \frac{3 \times (U\% - 12\%)}{100} \right] \quad (2)$$

Onde:

$f_{12\%}$ : resistência média corrigida para umidade referência de 12%, em MPa;

$f_{U\%}$ : resistência média para umidade de  $U\%$ , em MPa;

$U$ : valor de umidade, em porcentagem.

Por questões de segurança, visto que a madeira não é um material uniforme, as resistências médias são minoradas em resistências características e de projeto. Para calcular a capacidade de carga das ligações da madeira, então, são utilizados os valores de resistência minorados.

Desta forma, com as resistências médias já corrigidas para umidade de 12%, podem ser calculadas as resistências características, como mostradas nas Equações 3, 4 e 5, e, posteriormente, as resistências de projeto.

$$\frac{f_{ck}}{f_{c0m}} = 0,70 \quad (3)$$

$$\frac{f_{ck}}{f_{tk}} = 0,77 \quad (4)$$

$$\frac{f_{vk}}{f_{ck}} = 0,15 \quad (5)$$

Onde:

$f_{c0m}$ : resistência média à compressão paralela às fibras, em MPa;

$f_{ck}$ : resistência característica à compressão paralela às fibras, em MPa;

$f_{tk}$ : resistência característica à tração paralela às fibras, em MPa;

$f_{vk}$ : resistência característica ao cisalhamento, em MPa.

Para realizar os cálculos das resistências de projeto é necessário calcular um coeficiente de modificação ( $k_{mod}$ ) que é dado pela Equação 6.

$$k_{mod} = k_{mod,1} \times k_{mod,2} \times k_{mod,3} \quad (6)$$

O coeficiente parcial de modificação  $k_{mod,1}$  leva em conta a classe de carregamento e o tipo da madeira, podendo ser determinado de acordo com a Tabela 1. As classes de carregamento estão divididas em carregamento permanente, de longa, média e curta duração, e instantânea. A Tabela 2 exemplifica a duração da ação para cada classe.

**Tabela 1: Valores de  $k_{mod,1}$**

Classes de carregamento	Tipos de Madeira	
	Madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,85	0,65
Curta duração	1,00	1,00
Instantânea	1,10	1,10

**Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)**

**Tabela 2: Classes de Carregamento**

Classe de carregamento	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
Permanente	-
Longa duração	Mais de seis meses
Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Muito curta

Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)

O coeficiente parcial de modificação  $k_{mod,2}$  leva em conta a classe de umidade e o tipo da madeira, podendo ser determinado de acordo com a Tabela 3. As classes de umidade são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 3: Valores de  $k_{mod,2}$** 

Classes de umidade	Madeira serrada, madeira laminada colada, madeira compensada	Madeira recomposta
(1) e (2)	1,00	1,00
(3) e (4)	0,80	0,90

Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)

**Tabela 4: Classes de Umidade da Madeira**

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente	Umidade de equilíbrio da madeira
1	$\leq 65\%$	12%
2	65% – 75%	15%
3	75% – 85%	18%
4	$> 85\%$	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997)

O coeficiente parcial de modificação  $k_{mod,3}$  é adotado como 0,8 para madeira de segunda categoria e 1,0 para a de primeira categoria (ABNT, 1997).

Após adotar os valores dos coeficientes parciais de modificação, o  $k_{mod}$  foi determinado como visto na Equação 6, e então as resistências de projeto foram calculadas conforme as equações a seguir.

$$f_{cd} = k_{mod} \times \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (7)$$

$$f_{td} = k_{mod} \times \frac{f_{tk}}{1,8} \quad (8)$$

$$f_{vd} = k_{mod} \times \frac{f_{vk}}{1,8} \quad (9)$$

Onde:

$f_{cd}$ : resistência de projeto à compressão paralela às fibras, em MPa;



$f_{td}$ : resistência de projeto à tração paralela às fibras, em MPa;

$f_{vd}$ : resistência de projeto ao cisalhamento, em MPa.

Para uma força de tração paralela às fibras, a resistência ao embutimento é considerada igual à resistência à compressão, conforme descrita na Equação 10.

$$\frac{f_{ed}}{f_{cd}} = 1,0 \quad (10)$$

Onde:

$f_{ed}$ : resistência ao embutimento da madeira, em MPa.

### 2.5.2 Ruptura da ligação

Os tipos de ruptura considerados na norma brasileira para o dimensionamento de ligações mecânicas na madeira são os critérios de embutimento da madeira e flexão do pino.

O embutimento da madeira acontece quando o pino utilizado na ligação é mais resistente que a madeira, e ao ser aplicada uma força na peça, é gerado um cisalhamento na madeira que é esmagada pelo pino em seus planos de corte. A flexão do pino ocorre quando a madeira é mais resistente que o pino, e ao ser aplicada a força, os pinos entortam antes de haver o rompimento da peça de madeira (ALMEIDA, 1990).

Para isso, são calculados os parâmetros  $\beta$  e  $\beta_{lim}$  (Equações 11 e 12), que quando comparados entre si, determinam qual o tipo de ruptura.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (11)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \times \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_e}} \quad (12)$$

Onde:

$\beta$ : parâmetro para o cálculo da resistência de um pino metálico;

$\beta_{lim}$ : parâmetro limite para o cálculo da resistência de um pino metálico;

$f_{yd}$ : resistência de projeto do pino metálico, em MPa.

Sendo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (13)$$

Onde:

$f_{yk}$ : resistência característica do pino metálico, em MPa;

$\gamma_s$ : coeficiente de minoração da resistência do aço.

Sendo assim, se  $\beta \leq \beta_{lim}$ , a ruptura se dá por embutimento da madeira; se  $\beta > \beta_{lim}$ , a ruptura se dá por flexão do pino.

Para o critério de embutimento da madeira, a capacidade de carga de um parafuso é calculada pela Equação 14

$$R_v = 0,4 \times \frac{t^2}{\beta} \times f_{ed} \times n_{planos} \quad (14)$$

Onde:

$R_v$ : capacidade de carga máxima de um parafuso, em N;

$n_{planos}$ : número de planos de cisalhamento na ligação.

Para o critério de flexão do pino, a capacidade de carga de um parafuso é calculada pela Equação 15

$$R_v = 0,625 \times \frac{d^2}{\beta_{lim}} \times f_{yd} \times n_{planos} \quad (15)$$

Para calcular a capacidade de toda ligação, independente do tipo de ruptura, basta multiplicar  $R_v$  pela quantidade total de parafusos da ligação ( $n_T$ ).

## 2.6 Formulação proposta pela NDS

### 2.6.1 Caracterização da madeira

A NDS admite como valores de referência as resistências dadas nas tabelas apresentadas no manual suplementar da NDS. Porém, esses valores já estão corrigidos para resistir a uma carga com duração de 10 anos e com umidade menor que 19%. Por isso, de acordo com esse manual, esses valores de referência devem ser ajustados para uma resistência admissível com fatores propostos pelo critério *Allowable Stress Design* (ASD).

Para o caso de se utilizar a resistência média obtida através de ensaios práticos, é possível ajustar essas resistências utilizando outro critério, chamado *Load and*

*Resistance Factor Design* (LRFD). O LRFD também possui um fator que visa corrigir as resistências tabeladas no manual suplementar da NDS, chamado fator de conversão de formato ( $K_F$ ). Esse fator majora a resistência, pois esta, na tabela, é referente a um carregamento de 10 anos, sendo corrigida para um carregamento menor duração.

Então, são utilizados os seguintes fatores para ajustar as resistências de madeira cerrada:

- Fator de umidade ( $C_M$ ): Esse fator deve ser utilizado caso a peça a ser dimensionada possa apresentar uma umidade superior a 19% durante um longo período de sua vida útil. Desta forma, as resistências devem ser multiplicadas pelo fator de umidade, de acordo com a Tabela 5.

**Tabela 5: Fator de umidade**

Resistência Referência	$C_M$
$f_t$	1,0
$f_c$	0,80
$f_v$	0,97

Fonte: Adaptado de AWC (2014a)

- Fator de temperatura ( $C_t$ ): Esse fator deve ser utilizado caso a peça a ser dimensionada possa ser exposta a uma temperatura superior a 100° F durante sua vida útil. Desta forma, as resistências devem ser multiplicadas pelo fator de temperatura, de acordo com a Tabela 6.

**Tabela 6: Fator de temperatura**

Resistência Referência	Condição de Umidade	$C_t$	
		$100^\circ F < T \leq 125^\circ F$	$125^\circ F < T \leq 150^\circ F$
$f_t$	Seco ou Molhado	0,9	0,9
$f_c$ e $f_v$	Seco	0,8	0,7
	Molhado	0,7	0,5

Fonte: Adaptado de AWC (2014a)

- Fator de incisão ( $C_i$ ): Esse fator deve ser utilizado caso a peça a ser dimensionada possua fissuras paralelas às fibras, com dimensões maiores que 10 mm. Neste caso, o fator de incisão a ser utilizado deve ser de 0,8 para tração, compressão e cisalhamento.
- Fator de tamanho ( $C_F$ ): Esse fator deve ser utilizado apenas para resistência à compressão, caso uma das dimensões da seção transversal da peça seja maior que 12 polegadas, de acordo com a Equação 16.

$$C_F = \left(\frac{12}{t}\right)^{1/9} \leq 1,0 \quad (16)$$

Sendo  $t$  dado em polegadas.

- Fator de conversão de formato ( $K_F$ ): Todos os valores de referência dados nas tabelas do manual suplementar da NDS devem ser multiplicados pelo fator de conversão de formato, de acordo com a Tabela 7.

**Tabela 7: Fator de conversão de formato**

Resistência Referência	$K_F$
$f_t$	2,70
$f_c$	2,40
$f_v$	2,88

**Fonte: Adaptado de AWC (2014a)**

- Fator de resistência ( $\phi$ ): Todas as resistências usadas como referência devem ser multiplicadas pelo fator de resistência, de acordo com a Tabela 8.

**Tabela 8: Fator de resistência**

Resistência Referência	$\phi$
$f_t$	0,80
$f_c$	0,90
$f_v$	0,75

**Fonte: Adaptado de AWC (2014a)**

As resistências admissíveis podem ser, então, calculadas de acordo com as Equações 17, 18 e 19.

$$f'_t = f_t \times C_M \times C_t \times C_i \times K_F \times \phi \quad (17)$$

Onde:

$f'_t$ : Resistência admissível à tração, em MPa;

$f_t$ : Resistência referência à tração, em MPa.

$$f'_c = f_c \times C_M \times C_t \times C_i \times C_F \times K_F \times \phi \quad (18)$$

Onde:

$f'_c$ : Resistência admissível à compressão, em MPa;

$f_c$ : Resistência referência à compressão, em MPa.

$$f'_v = f_v \times C_M \times C_t \times C_i \times K_F \times \phi \quad (19)$$

Onde:

$f'_v$ : Resistência admissível ao cisalhamento, em MPa;

$f_v$ : Resistência referência ao cisalhamento, em MPa.

### 2.6.2 Ruptura da ligação

A NDS considera a ruptura da ligação mecânica na madeira com dois planos de cisalhamento de quatro modos:

- Modo I: a peça central da ligação é esmagada pelo pino, ocorrendo uma ruptura por esmagamento, como mostra a Figura 8.

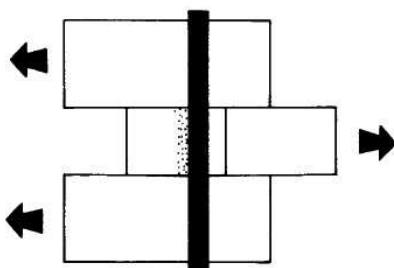


Figura 8: Ruptura por esmagamento (Modo 1)  
Fonte: AWC (2014a)

- Modo II: as talas laterais da ligação são esmagadas pelo pino, ocorrendo uma ruptura por esmagamento, como mostra a Figura 9.

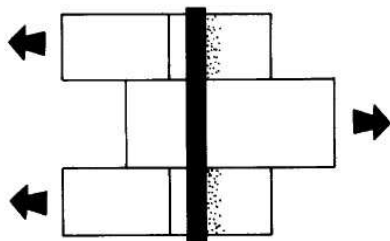


Figura 9: Ruptura por esmagamento (Modo 2)  
Fonte: AWC (2014a)

- Modo III: o pino é flexionado com um ponto de articulação por plano de cisalhamento, como mostra a Figura 10.

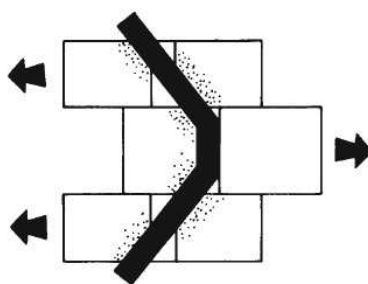


Figura 10: Ruptura por flexão do pino (Modo 3)  
Fonte: AWC (2014a)

- Modo IV: o pino é flexionado com dois pontos de articulação por plano de cisalhamento, como mostra a Figura 11.

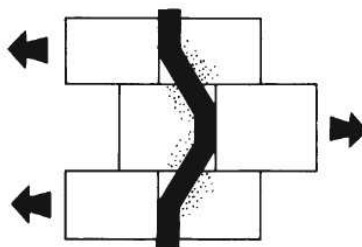


Figura 11: Ruptura por flexão do pino (Modo 4)  
Fonte: AWC (2014a)

As capacidades de carga para as rupturas de Modo I, II, III e IV são dadas respectivamente pelas Equações 20, 21, 22 e 24.

$$Z_1 = \frac{d \times l_m \times f_e}{C_{rd}} \quad (20)$$

Onde:

$Z_1$ : capacidade de carga máxima de um parafuso, em N;

$l_m$ : profundidade do pino na peça central, em mm;

$f_e$ : resistência ao embutimento da madeira, em MPa;

$C_{rd}$ : coeficiente de redução, igual a 4,0 para uma força aplicada no sentido das fibras.

$$Z_2 = \frac{2 \times d \times l_s \times f_e}{C_{rd}} \quad (21)$$

Onde:

$Z_2$ : capacidade de carga máxima de um parafuso, em N;

$l_s$ : profundidade do pino na tala lateral, em mm;

$$Z_3 = \frac{2 \times k_3 \times d \times l_s \times f_e}{(2 + C_{re}) \times C_{rd}} \quad (22)$$

Onde:

$Z_3$ : capacidade de carga máxima de um parafuso, em N;

$C_{re}$ : coeficiente de redução, igual a 1,0 para ligações feitas com mesma a madeira para talas laterais e peça central;

$k_3$ : coeficiente calculado pela Equação 23.

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2 \times (1 + C_{re})}{C_{re}} + \frac{2 \times f_y \times (2 + C_{re}) \times d^2}{3 \times f_e \times l_s^2}} \quad (23)$$

Onde:

$f_y$ : resistência à flexão do pino, em MPa.

$$Z_4 = \frac{2 \times d^2}{C_{rd}} \times \sqrt{\frac{2 \times f_e \times f_y}{3 \times (1 + C_{re})}} \quad (24)$$

Onde:

$Z_4$ : capacidade de carga máxima de um parafuso, em N.

A capacidade de carga utilizada para o dimensionamento da ligação é o menor valor obtido entre os quatro modos de ruptura citados acima, multiplicado por um fator de ajuste. O fator de ajuste utilizado para a ligação parafusada é o Fator de geometria ( $C_\Delta$ ), que para parafusos de diâmetro menor que  $1/4''$ ,  $C_\Delta = 1,0$ ; para diâmetros maiores, o valor de  $C_\Delta$  é dado pela Tabela 9.

**Tabela 9: Fator de geometria**

Tipo e Direção da Carga	Distância mínima entre último pino e extremidade da peça	
	Para $C_\Delta = 0,5$	Para $C_\Delta = 1,0$
Tração ou Compressão perpendicular às fibras	2d	4d
Compressão paralela às fibras	2d	4d
Tração paralela às fibras	Coníferas 3,5d	7d
	Angiospermas 2,5d	5d

Fonte: Adaptado de AWC (2014a)

De acordo com o apêndice E da NDS, a madeira com ligações mecânicas também pode apresentar outros três tipos de ruptura quando submetida a uma força

de tração: ruptura por cisalhamento em linha, ruptura por cisalhamento em bloco, e ruptura da área líquida que é também é tratada pela formulação proposta pela NBR 9710/97 e será vista posteriormente.

As rupturas por cisalhamento em linha e em bloco acontecem nas áreas críticas que estão sendo cisalhadas. Essas áreas onde ocorrem as rupturas por cisalhamento em linha e em bloco são mostradas, respectivamente, nas Figuras 12 e 13.

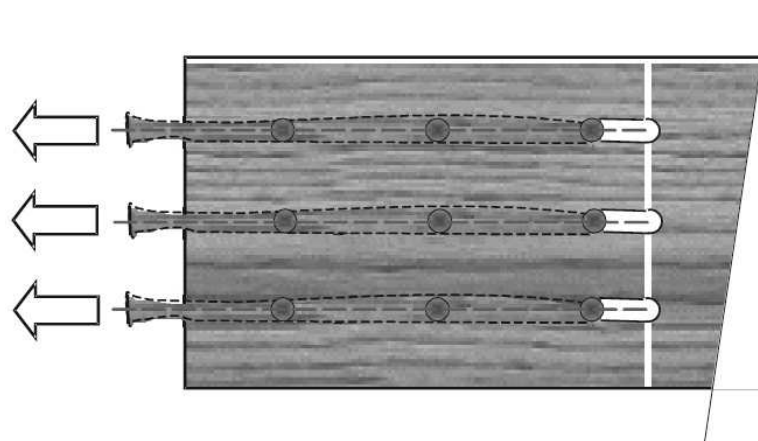


Figura 12: Área crítica do cisalhamento em linha  
Fonte: Taylor e Line (2002)

A área de cisalhamento em linha referente a um pino é dada pela Equação 25.

$$A_{cislinha} = s_{crit} \times t \quad (25)$$

Onde:

$A_{cislinha}$ : área crítica onde há o cisalhamento da linha, em mm<sup>2</sup>;

$s_{crit}$ : menor espaçamento entre os pinos em linha, em mm.

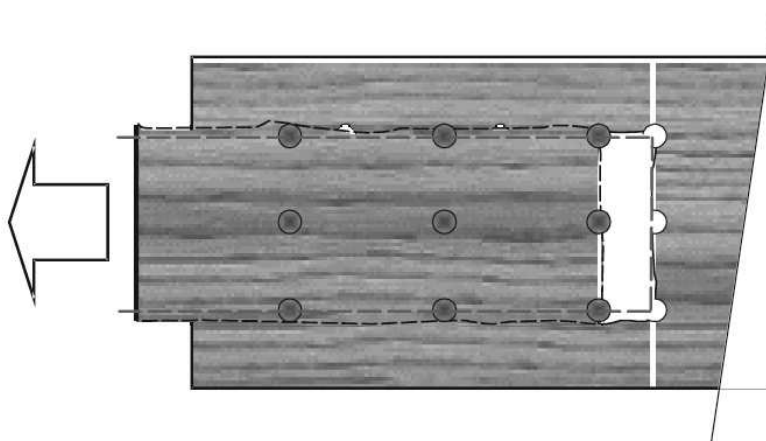


Figura 13: Área crítica do cisalhamento em bloco  
Fonte: Taylor e Line (2002)



A área de cisalhamento em bloco é dada pela Equação 26.

$$A_{cisbloco} = t \times (n_l - 1) \times [s_{linhas} - (d + g)] \quad (26)$$

Onde:

$A_{cisbloco}$ : área crítica onde há o cisalhamento do bloco, em mm<sup>2</sup>;

$s_{linha}$ : menor espaçamento entre duas linhas de pinos na ligação, em mm.

$g$ : folga para o furo do pino, que para a NDS é de 1,5875 mm.

A capacidade de carga para o cisalhamento em linha é calculada separadamente para cada linha da ligação, e é dada pela Equação 27

$$F_{vl} = n_i \times \frac{f'_v \times A_{cislinha}}{2} \quad (27)$$

Onde:

$F_{vl}$ : força máxima de cisalhamento em linha suportada pela linha  $i$ , em N;

$n_i$ : número de parafusos na linha  $i$ .

Para calcular a capacidade de carga total da ligação, somam-se as capacidades de carga encontradas para cada linha ( $F_{vl}$ ).

A capacidade de carga para o cisalhamento em bloco apenas é calculada caso exista mais de uma linha de pinos na ligação, e é dada pela Equação 28

$$F_{vb} = \frac{F_{vl-1}}{2} + \frac{F_{vl-n}}{2} + f'_t \times A_{cisbloco} \quad (28)$$

Onde:

$F_{vb}$ : força máxima de cisalhamento em bloco, em N;

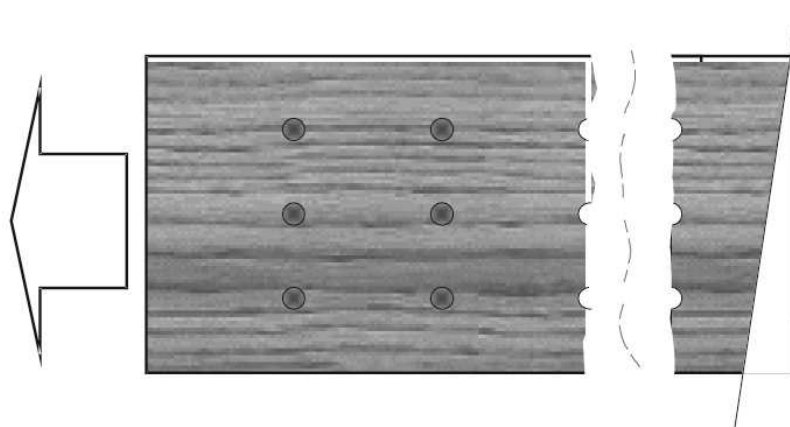
$F_{vl-1}$ : força máxima de cisalhamento em linha suportada pela primeira fileira de pinos à margem da área cisalhada do bloco, em N;

$F_{vl-n}$ : força máxima de cisalhamento em linha suportada pela enésima fileira de pinos à margem da área cisalhada do bloco, em N.

$F_{vl-1}$  e  $F_{vl-n}$  são calculados como na Equação 27 para as linhas que tangenciam a  $A_{cisbloco}$  da ligação, conforme visto na Figura 13.

## 2.7 Ruptura por tração na área líquida

Denomina-se área líquida a área total da seção transversal da madeira, descontada da área total de furos nessa seção. Então, a ruptura da área líquida se caracteriza por cortar a madeira onde ela apresentar sua menor área líquida, como mostrado na Figura 14.



**Figura 14: Área líquida**  
Fonte: Taylor e Line (2002)

A área líquida é dada pela Equação 29.

$$A_n = A_g - (n_l \times A_f) \quad (29)$$

Onde:

$A_n$ : área da seção líquida, em  $\text{mm}^2$ ;

$A_g$ : área da seção bruta, em  $\text{mm}^2$ ;

$n_l$ : número de linhas de pinos na ligação;

$A_f$ : área do furo, em  $\text{mm}^2$ .

Sendo:

$$A_g = h \times t \quad (30)$$

e

$$A_f = (d + g) \times t \quad (31)$$

Onde:

$h$ : altura da peça, em mm;

$t$ : menor espessura da peça, em mm;

$d$ : diâmetro do pino, em mm.

Para a área do furo, o diâmetro do pino precisa ser acrescido de uma folga ( $g$ ), que para parafusos, a norma brasileira considera 0,5 mm, e a norma estadunidense, 1,5875 mm.

Ambas as normas consideram a ruptura por tração na área líquida, e a capacidade de carga da ligação nesse caso é calculada pela Equação 32.

$$F_{An} = f_{td} \times A_n \quad (32)$$

Onde:

$F_{An}$ : força máxima de tração resistida pela área líquida da peça, em N.

Observação: O  $f_{td}$  é utilizado para a formulação da NBR 7190/97. Para a formulação da NDS, utiliza-se o  $f'_t$ .

## 2.8 Pesquisas recentes sobre cisalhamento em peças de madeira

Existem poucas pesquisas sobre o cisalhamento em linha e em bloco na bibliografia brasileira. Entretanto, esse tópico vem sendo bastante pesquisado em outros países, principalmente desde a implementação desses critérios de ruptura na NDS. A seguir são apresentados alguns desses trabalhos.

### 2.8.1 Estudos de Taylor e Line (2002)

Os autores realizaram um estudo numérico sobre como utilizar a formulação para dimensionamento de ligações mecânicas na madeira, proposta pelo Apêndice E da norma americana, e comentam sua importância.

Quando existe um grupo de pinos conectores trabalhando juntos, a capacidade de carga da ligação pode ser limitada pela ruptura da área líquida ou pela ruptura por cisalhamento em linha ou em bloco. Estas rupturas podem acontecer com tensões menores do que as previstas pela capacidade de carga do grupo de pinos. Os autores também mostram que aumentando a distância entre os pinos metálicos numa ligação, a capacidade de carga desta ligação também aumenta.

Em ligações com pinos de grande diâmetro, estes são capazes de transferir cargas individualmente à madeira, deixando alguns pinos sobrecarregados e outros pinos pouco solicitados. Ainda de acordo com os autores, aumentando o espaçamento

entre os pinos em linha e entre as linhas, pode-se utilizar uma menor quantidade de pinos e atingir a mesma capacidade de carga da ligação.

### 2.8.2 Estudos de Smith, Asiz e Snow (2006)

Neste trabalho experimental sobre diferentes configurações de ligação em madeira, os autores compararam o rompimento de quatro madeiras diferentes, *Laminated Strand Lumber* (LSL), *Laminated Veneer Lumber* (LVL), *Picea* e *Pinus*.

Os corpos de prova eram de mesma dimensão (1,5" por 5,5"), os parafusos possuíam o mesmo diâmetro ( $1/2$ " ) e a distribuição dos pinos na ligação se dava nos esquemas mostrados na Figura 15, sendo (1) três parafusos em uma linha, alterando os espaçamentos entre os pinos e a distância do primeiro pino à extremidade da peça; (2) seis parafusos em duas linhas, alterando os espaçamentos entre os pinos em linha e entre as linhas, e a distância do primeiro pino da linha à extremidade da peça; (3) apenas um parafuso, servindo como referência, variando sua distância à extremidade da peça.

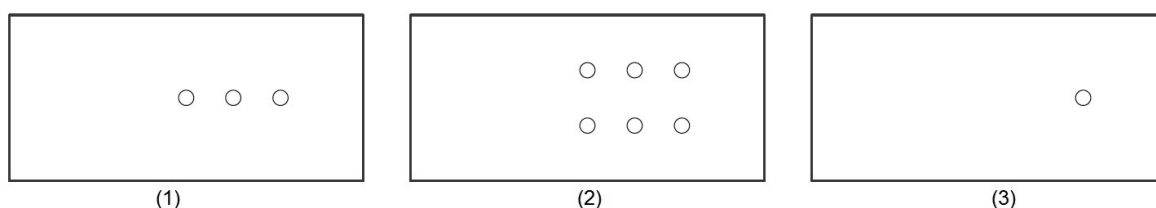


Figura 15: Modelo dos corpos de prova

Os ensaios foram realizados em uma máquina de tração de elevada capacidade. As ligações foram carregadas gradativamente, mantendo a carga por alguns segundos, e liberando-a. Esse procedimento foi repetido, aumentando a carga aplicada, até a ruptura da peça. As peças de LSL romperam por tração na área líquida da seção, já as peças de LVL, *Pinus* e *Picea* romperam por cisalhamento em linha, com exceção da configuração com seis parafusos na madeira *Picea*, onde as peças romperam por cisalhamento em bloco.

Um detalhamento dos testes mostrou a comparação entre os espaçamentos para cada esquema de ligação, em cada peça. Para a madeira LSL, a capacidade da ligação com seis parafusos foi em torno de seis vezes a capacidade da ligação com apenas um parafuso, não sendo significativo o efeito de grupo neste caso. Porém, para as madeiras LVL, *Picea* e *Pinus*, a capacidade das ligações com seis parafusos atingiu em torno de cinco vezes a capacidade de apenas um parafuso. Ainda para as madeiras LVL *Picea* e *Pinus*, quando aumentada a distância do primeiro parafuso da linha até a superfície tracionada, a capacidade de carga apresentava um considerável aumento, o que não aconteceu com as ligações na madeira LSL.

### 2.8.3 Estudos de Rammer e Line (2006)

Os autores buscaram avaliar a eficiência da formulação apresentada na NDS. Para isso, utilizaram dados de 16 trabalhos publicados desde 1921, que realizaram testes de tração paralela às fibras para ligações com pinos metálicos, e compararam seus resultados os classificando de acordo com o tipo de madeira, tipo de ligação, tipo da ruptura real e distribuição dos pinos.

Os 16 trabalhos utilizados juntos somam aproximadamente 200 ligações diferentes, e em quatro dessas ligações a capacidade de carga máxima calculada pela nova formulação não foi alcançada nos experimentos.

Observaram também que quando a relação espessura por diâmetro ( $t/d$ ) aumentava ou a distância do primeiro pino à margem tracionada diminuía, as rupturas aconteciam por uma fissuração que ia aumentando em direção ao meio da peça.

Os autores concluíram que a nova formulação proposta pela NDS aumenta em 32% a margem de segurança das ligações. Além disso, os autores também sugerem uma nova abordagem para o dimensionamento, não considerando uniforme a distribuição de tensões entre os pinos nos cálculos para o cisalhamento em linha e em bloco, levando a considerar a ruptura pela fissuração progressiva vista em alguns dos trabalhos.

### 2.8.4 Estudos de Zarnani e Quenneville (2014)

Estes autores estudaram o comportamento do cisalhamento em linha e em bloco em diferentes tipos de madeira. Porém, os testes foram realizados com chapas metálicas. As peças de madeira foram mantidas em uma estufa a 20°C, e umidade relativa de 65%, para atingir a condição de 12% de umidade na peça. A execução do ensaio foi semelhante ao realizado por Smith, Asiz e Snow (2006) mostrado na Subseção 2.8.2.

O diâmetro dos parafusos foi mantido constante em 20 mm, as chapas metálicas tinham espessura de 6,8 mm e foram feitas quatro, seis e oito linhas e colunas. Os autores compararam os tipos de ruptura real e de ruptura prevista pelos métodos teóricos, propostos pela norma *Eurocode 5* (CEN/TC 250, 2014).

Além dos três tipos de rupturas já vistos (área líquida, cisalhamento em linha e em bloco), os autores também consideraram o esmagamento da madeira como ruptura, e o classificaram como fratura frágil, dúctil e mista.

Fraturas frágeis devem ser evitadas, pois ocorrem de forma rápida, com pouca ou nenhuma deformação. Já as fraturas dúcteis ocorrem de forma lenta, após extensa deformação plástica, podendo considerar que este tipo de fratura “avisa” antes de romper. Segundo os autores, existe ainda uma fratura mista, onde existe uma mistura

entre frágil e dúctil.

Os autores obtiveram mais de 92% das previsões de fratura corretas, evidenciando a precisão do trabalho, e concluíram que quanto maior o número de rebites na ligação, maior a probabilidade de ocorrer uma fratura frágil.

## 2.9 Comentários finais

Mundialmente, a ruptura por cisalhamento na madeira começou a ser mais difundida e pesquisada após o ano 2000, podendo considerar um tema ainda pouco estudado, principalmente no Brasil, onde a norma que trata de estruturas de madeira foi revisada pela última vez em 1997, e não há muitos artigos publicados sobre esse tema.

### 3 METODOLOGIA

Para avaliar o cisalhamento da madeira, este trabalho se dividiu em duas partes. A primeira parte comparou as formulações propostas pelas normas brasileira e estadunidense, considerando os espaçamentos mínimos propostos na NBR 7190/97. A segunda parte comparou as formulações das normas com resultados práticos obtidos por Smith, Asiz e Snow (2006).

Para a comparação entre as formulações propostas pelas normas, foram utilizados os parâmetros de resistência do *Pinus Elliotti*, por se tratar de uma madeira que pode ser encontrada na região, devido às áreas de reflorestamento, e também por ser utilizada em construções norte-americanas, tendo suas resistências tratadas pela NDS.

Ainda nessa primeira parte, as ligações teóricas utilizadas foram calculadas considerando parafusos metálicos e sendo composta por uma peça central e duas talas laterais, resultando em dois planos de cisalhamento. A quantidade de parafusos em cada ligação estudada variou entre um, três e seis parafusos. A ligação com três parafusos foi feita em uma única linha, enquanto que a ligação com seis foi feita em duas linhas.

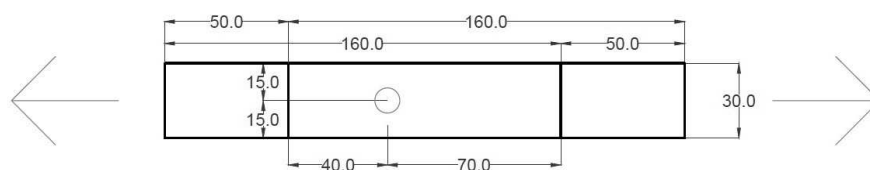
Já para a comparação com o estudo experimental, as resistências utilizadas nos cálculos foram obtidas em ensaios realizados no trabalho de Smith, Asiz e Snow (2006), e as ligações foram dimensionadas de acordo com os espaçamentos proposto por eles.

#### 3.1 Dimensionamento da ligação teórica utilizando as resistências do *Pinus Elliotti*

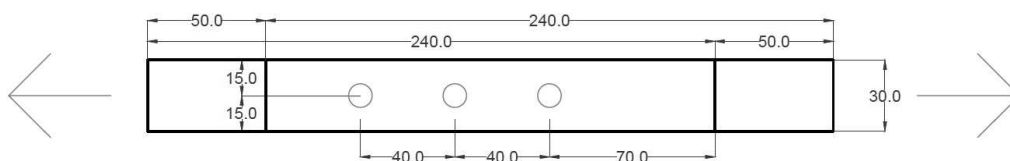
As ligações foram dimensionadas com os espaçamentos mínimos propostos pela NBR 7190/97, com o diâmetro mínimo de 10 mm, e espessura  $t$  aumentando gradativamente até que a ruptura passasse a ser considerada por flexão do pino, pois para que ocorra cisalhamento em linha ou em bloco, o pino deve ser mais resistente que a madeira, permitindo o rasgamento da peça. Caso contrário, a ruptura acontece nos pinos e não há rasgamento. Por esse motivo, para verificar o cisalhamento da ligação, a formulação proposta pela NBR 7190/97 deve considerar ruptura por embutimento da madeira.

Sendo assim, foi adotado um modelo teórico de peças de madeira com dois planos de cisalhamento, utilizado como base para os cálculos. Este modelo foi composto por três peças de dimensões iniciais, em mm, comprimento x altura x espessura, especificadas a seguir:

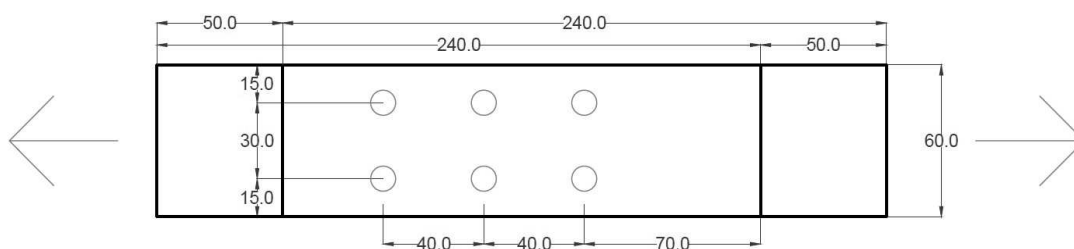
- Para a ligação referência feita com um parafuso serão utilizadas uma peça central de 160 x 30 x 40, e duas talas laterais de 160 x 30 x 20, como mostrado na Figura 16;
- Para a ligação com três parafusos serão utilizadas uma peça central de 240 x 30 x 40, e duas talas laterais de 240 x 30 x 20, como mostrado na Figura 17;
- Para a ligação com seis parafusos serão utilizadas uma peça central de 240 x 60 x 40, e duas talas laterais de 240 x 60 x 20, como mostrado na Figura 18.



**Figura 16: Dimensões mínimas da ligação de referência, em mm**



**Figura 17: Dimensões mínimas da ligação com três parafusos, em mm**



**Figura 18: Dimensões mínimas da ligação com seis parafusos, em mm**

As resistências utilizadas para o *Pinus Elliotti* foram obtidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pela Tabela 4B do manual suplementar da NDS. A resistência dada pelo IPT foi tratada de acordo com a formulação brasileira, enquanto as resistências tabeladas da NDS foram tratadas de acordo com a formulação estadunidense.



### 3.1.1 Resistências pela NBR 7190/97

As resistências médias do *Pinus Elliotti* dadas pelo IPT foram ensaiadas com umidade de 15%, havendo necessidade de correção de umidade, de acordo com a Equação 2. O valor de resistência à compressão média para umidade de 12% foi de 34,34 MPa.

As resistências características foram calculadas pelas Equações 3, 4 e 5, obtendo  $f_{ck} = 24,03$  MPa,  $f_{tk} = 31,21$  MPa e  $f_{vk} = 3,61$  MPa.

Para calcular as resistências de projeto é necessário determinar um  $k_{mod}$  de acordo com a Equação 6.

Considerando uma carga de curta duração, temos que  $k_{mod,1} = 1,0$ . Para uma umidade relativa do ambiente superior a 75%, utiliza-se  $k_{mod,2} = 0,8$ . É comum adotar  $k_{mod,3} = 0,8$  quando não se conhece a precedência da madeira, classificando-a como de segunda categoria. Sendo assim, foi calculado  $k_{mod} = 0,64$ .

Desta forma, as resistências de projeto à compressão, à tração e ao cisalhamento, utilizadas nas análises, foram calculadas pelas Equações 7, 8 e 9 e são, respectivamente,  $f_{cd} = 10,99$  MPa,  $f_{td} = 11,10$  MPa e  $f_{vd} = 1,28$  MPa.

Com as resistências de projeto da madeira determinadas, dá-se início aos cálculos de ruptura, de acordo com a NBR 7190/97, onde a menor carga de ruptura encontrada deve prever o tipo da ruptura.

### 3.1.2 Resistências pela NDS

As resistências de referência obtidas no manual suplementar da NDS foram de  $f_t = 1900$  psi,  $f_c = 2050$  psi e  $f_v = 175$  psi.

Sabendo que  $1psi = 0,006895MPa$ , as resistências apenas convertidas para o sistema internacional de unidade são de  $f_t = 13,10$  MPa,  $f_c = 14,13$  MPa e  $f_v = 1,21$  MPa.

Considerando as mesmas condições de umidade, carregamento e qualidade da madeira, as resistências admissíveis foram calculadas de acordo com as Equações 17, 18 e 19, considerando os fatores de umidade ( $C_M$ ), incisão ( $C_i$ ), conversão de formato ( $K_F$ ) e resistência ( $\phi$ ). Sendo assim,  $f'_t = 22,64$  MPa,  $f'_c = 19,54$  MPa e  $f'_v = 2,02$  MPa.

Com as resistências admissíveis dimensionadas, dá-se início aos cálculos de ruptura, de acordo com a NDS, onde a menor carga de ruptura encontrada deve prever o tipo da ruptura.

### 3.2 Comparação com estudo experimental

Os resultados práticos a serem utilizados foram obtidos por Smith, Asiz e Snow (2006) em seu trabalho sobre dimensionamento de ligações em estruturas de madeira, visto na subseção 2.8.2.

Como já apresentado, foram realizados ensaios com quatro madeiras diferentes, porém apenas duas foram utilizadas para essa comparação, pois a norma brasileira não considera madeiras compostas, como LSL e LVL. Foram utilizados, então, os resultados dos ensaios com o *Pinus* e com a *Picea*.

As dimensões da seção transversal da peça foram mantidas constantes (139,7 mm x 38 mm) e os parafusos tinham diâmetro de  $1/2"$ . Foram ensaiadas três configurações de pinos (um pino, três pinos em linha e seis pinos em duas linhas) e as peças centrais foram conectadas de forma a ter dois planos de cisalhamento. Os espaçamentos entre os pinos, entre pinos e extremidade da peça e entre as linhas foram variados de forma proporcional ao diâmetro do parafuso. As cargas de ruptura alcançadas nos ensaios estão nas Tabelas 10 e 11, com os parâmetros especificados na Figura 19.

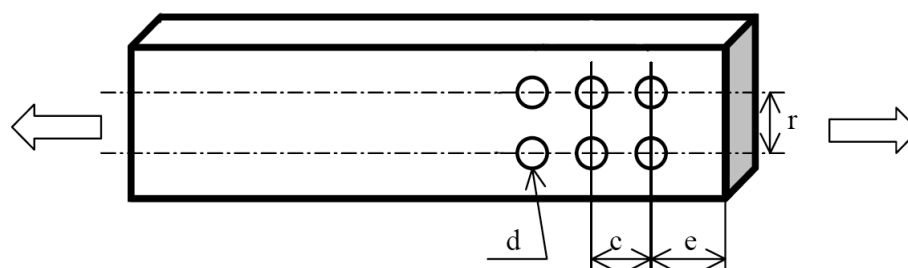


Figura 19: Parâmetros utilizados para os espaçamentos  
Fonte: Adaptado de Smith, Asiz e Snow (2006)

Tabela 10: Resultados da capacidade de carga da ligação em *Pinus*

Corpo de Prova	nº parafusos	d (mm)	e	c	r	Carga Ruptura (kN)
1	1	12,70	7 d			14,24
2		12,70	10 d			15,73
3	3	12,70	7 d	4 d		18,91
4		12,70	7 d	6 d		23,17
5		12,70	10 d	4 d		29,17
6	6	12,70	10 d	6 d		33,86
7		12,70	7 d	4 d	5 d	59,03
8		12,70	7 d	6 d	5 d	55,48
9		12,70	10 d	4 d	5 d	57,15
10		12,70	10 d	6 d	5 d	59,80
11		12,70	7 d	4 d	4 d	45,48
12	6	12,70	7 d	6 d	4 d	55,32
13		12,70	10 d	4 d	4 d	50,44
14		12,70	10 d	6 d	4 d	52,45

Fonte: Adaptado de Smith, Asiz e Snow (2006)

**Tabela 11: Resultados da capacidade de carga da ligação em *Picea***

Corpo de Prova	nº parafusos	d (mm)	e	c	r	Carga Ruptura (kN)
1	1	12,70	7 d			16,24
2		12,70	10 d			13,59
3	3	12,70	7 d	4 d		35,84
4		12,70	10 d	6 d		42,72
5	6	12,70	7 d	4 d	5 d	72,6
6		12,70	10 d	6 d	5 d	78,5

Fonte: Adaptado de Smith, Asiz e Snow (2006)

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, pode-se notar que as maiores cargas foram atingidas com os maiores espaçamentos.

Smith, Asiz e Snow (2006) também realizaram ensaios para determinar a resistência à tração das madeiras utilizadas, e obtiveram os valores de 31,60 MPa para o *Pinus* e 40,0 MPa para a *Picea*. Como os autores apresentaram apenas as resistências à tração, foi necessário fazer uma aproximação para as resistências à compressão e ao cisalhamento. Essa aproximação é prevista pela NBR 7190/97 de acordo com as Equações 3, 4 e 5.

Foram, então, calculadas cargas de ruptura de acordo com o referencial teórico apresentado, considerando as resistências obtidas e as dimensões dadas por Smith, Asiz e Snow (2006). Esses resultados, com coeficientes de segurança unitários, foram comparados com a carga de ruptura real obtida nos ensaios.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Comparação entre as formulações propostas pela NBR 7190/97 e NDS utilizando as resistências do *Pinus Elliotti*

Foram analisadas as equações de capacidade de carga propostas pelas duas normas, onde se observou algumas relações entre elas, tendo que o diâmetro  $d$  e a espessura  $t$  eram constantes nas análises.

#### 4.1.1 Estimativas da NBR 7190/97

A análise apresentada pela NBR 7190/97 baseia-se nos critérios de ruptura por tração na área líquida, embutimento da madeira e flexão do pino. Para as análises teóricas, foram apenas consideradas ligações com ruptura por embutimento da madeira que, sendo assim, resultam na capacidade de carga encontrada na Equação 14. Os resultados das análises são mostrados nas Tabelas 12, 13 e 14.

**Tabela 12: Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para um parafuso**

$t$ (mm)	$R_v$ (kN)	$F_{An}$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	1,76	4,33	Embutimento da Madeira
25	2,20	5,41	Embutimento da Madeira
32	2,81	6,93	Embutimento da Madeira
38	3,34	8,22	Embutimento da Madeira
45	3,96	9,74	Embutimento da Madeira
50	4,39	10,82	Embutimento da Madeira

**Tabela 13: Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para três parafusos**

$t$ (mm)	$R_v$ (kN)	$F_{An}$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	5,27	4,33	Tração na Área Líquida
25	6,59	5,41	Tração na Área Líquida
32	8,44	6,93	Tração na Área Líquida
38	10,02	8,22	Tração na Área Líquida
45	11,87	9,74	Tração na Área Líquida
50	13,18	10,82	Tração na Área Líquida

**Tabela 14: Capacidades de carga de acordo com a NBR 7190/97 para seis parafusos**

$t$ (mm)	$R_v$ (kN)	$F_{An}$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	10,55	8,66	Tração na Área Líquida
25	13,18	10,82	Tração na Área Líquida
32	16,88	13,85	Tração na Área Líquida
38	20,04	16,45	Tração na Área Líquida
45	23,73	19,48	Tração na Área Líquida
50	26,37	21,64	Tração na Área Líquida

A carga de ruptura por tração na área líquida é a mesma para um e três parafusos, por se tratar da mesma área da seção transversal da peça. Já as cargas de

capacidade dos parafusos são sempre proporcionais a quantidade de pinos na ligação.

#### 4.1.2 Estimativas da NDS

A NDS apresenta três formulações (ruptura na área líquida, cisalhamento em linha e em bloco) para prever qual a força máxima que pode ser aplicada na ligação. Sendo assim, apenas a menor força encontrada deve ser utilizada para futuros cálculos.

Dentre as configurações de ligações propostas neste trabalho, a ruptura por cisalhamento em linha resultou sempre na menor capacidade de carga. Os resultados são mostrados nas Tabelas 15, 16 e 17.

**Tabela 15: Capacidades de carga de acordo com a NDS para um parafuso**

$t$ (mm)	$F_{An}$ (kN)	$F_{vl}$ (kN)	$Z'$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	8,34	1,42	3,28	Cisalhamento em linha
25	10,42	1,77	3,28	Cisalhamento em linha
32	13,34	2,27	3,28	Cisalhamento em linha
38	15,84	2,69	3,28	Cisalhamento em linha
45	18,76	3,19	3,28	Cisalhamento em linha
50	20,84	3,54	3,28	Flexão do pino (Modo 4)

**Tabela 16: Capacidades de carga de acordo com a NDS para três parafusos**

$t$ (mm)	$F_{An}$ (kN)	$F_{vl}$ (kN)	$Z'$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	8,34	2,43	9,85	Cisalhamento em linha
25	10,42	3,03	9,85	Cisalhamento em linha
32	13,34	3,88	9,85	Cisalhamento em linha
38	15,84	4,61	9,85	Cisalhamento em linha
45	18,76	5,46	9,85	Cisalhamento em linha
50	20,84	6,07	9,85	Cisalhamento em linha

**Tabela 17: Capacidades de carga de acordo com a NDS para seis parafusos**

$t$ (mm)	$F_{An}$ (kN)	$F_{vl}$ (kN)	$F_{vb}$ (kN)	$Z'$ (kN)	Tipo de Ruptura
20	16,67	4,85	10,84	19,70	Cisalhamento em linha
25	20,84	6,07	13,55	19,70	Cisalhamento em linha
32	26,68	7,77	17,34	19,70	Cisalhamento em linha
38	31,68	9,22	20,59	19,70	Cisalhamento em linha
45	37,51	10,92	24,39	19,70	Cisalhamento em linha
50	41,68	12,13	27,10	19,70	Cisalhamento em linha

#### 4.1.3 Comparação das estimativas

Para o dimensionamento realizado com os espaçamentos mínimos da norma brasileira, a formulação proposta pela NDS resultou em capacidades de carga inferiores às calculadas de acordo com a NBR 7190/97. A Tabela 18 apresenta a comparação entre as capacidades de carga adotadas por cada norma.

Tabela 18: Comparação entre as menores capacidades de carga obtidas em cada norma

n° de parafusos	NBR (kN)	NDS (kN)	$NDS/NBR$ %
6	8,66	4,85	56,07%
	10,82	6,07	56,07%
	13,85	7,77	56,07%
	16,45	9,22	56,07%
	19,48	10,92	56,07%
	21,64	12,13	56,07%
3	4,33	2,43	56,07%
	5,41	3,03	56,07%
	6,93	3,88	56,07%
	8,22	4,61	56,07%
	9,74	5,46	56,07%
	10,82	6,07	56,07%
1	1,76	1,42	80,53%
	2,20	1,77	80,53%
	2,81	2,27	80,53%
	3,34	2,69	80,53%
	3,96	3,19	80,53%
	4,39	3,28	74,72%

Essas proporções podem ser justificadas pelo valor das resistências características que cada norma adota, pois nota-se uma proporção semelhante entre elas, de acordo com a Tabela 19.

Tabela 19: Comparação entre resistências características

Res. Característica	NBR (MPa)	NDS (MPa)	$NDS/NBR$
Compressão	24,03	14,13	59%
Tração	31,21	13,10	42%
Cisalhamento	3,61	1,21	33%

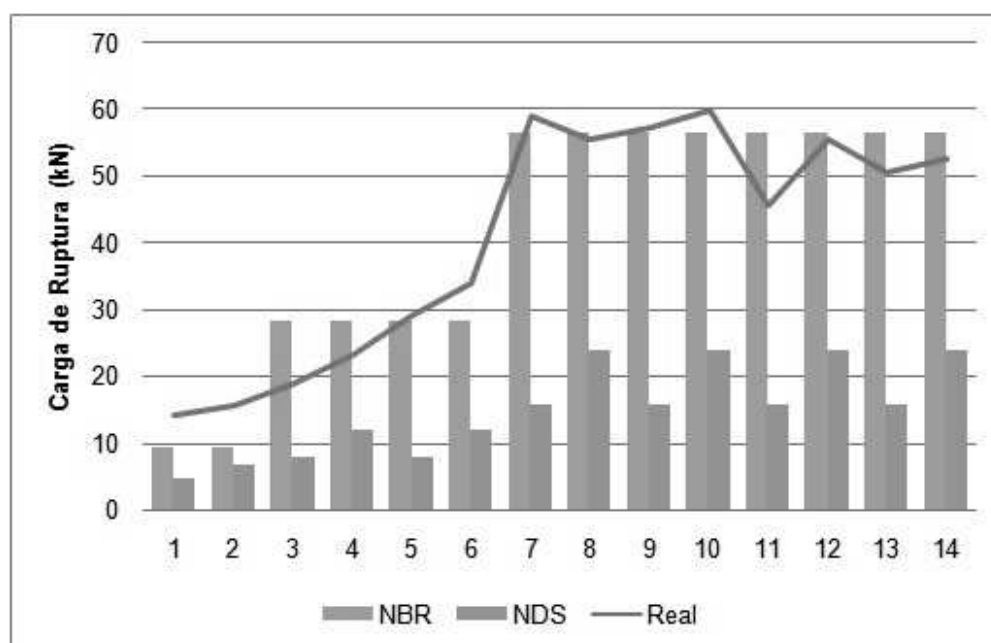
No caso de se utilizar uma mesma resistência média para as duas formulações, e aplicando os coeficientes de segurança dados em cada norma nessa resistência, as capacidades de carga adotadas para cada formulação passam a ser mais próximas, como mostrado na Tabela 20.

**Tabela 20: Comparação entre as menores capacidades de carga obtidas em cada norma para uma mesma resistência inicial**

n° de parafusos	NBR (kN)	NDS (kN)	$NDS/NBR$ %
6	12,56	12,29	97,83%
	15,71	15,36	97,83%
	20,10	19,67	97,83%
	23,87	23,35	97,83%
	28,27	27,66	97,83%
	31,41	30,73	97,83%
3	6,28	6,15	97,83%
	7,85	7,68	97,83%
	10,05	9,83	97,83%
	11,94	11,68	97,83%
	14,14	13,83	97,83%
	15,71	15,36	97,83%
1	2,09	3,59	171,20%
	2,62	4,48	171,20%
	3,35	5,74	171,20%
	3,98	6,81	171,20%
	4,71	8,07	171,20%
	5,24	8,96	171,20%

#### 4.2 Comparação da formulação das normas com resultados práticos

Os resultados das capacidades de carga máximas foram comparados com as cargas de ruptura reais, vistas nas Tabelas 10 e 11, e são mostradas nas Figuras 20 e 21.



**Figura 20: Gráfico comparando as cargas calculadas do *Pinus* com sua carga de ruptura real**

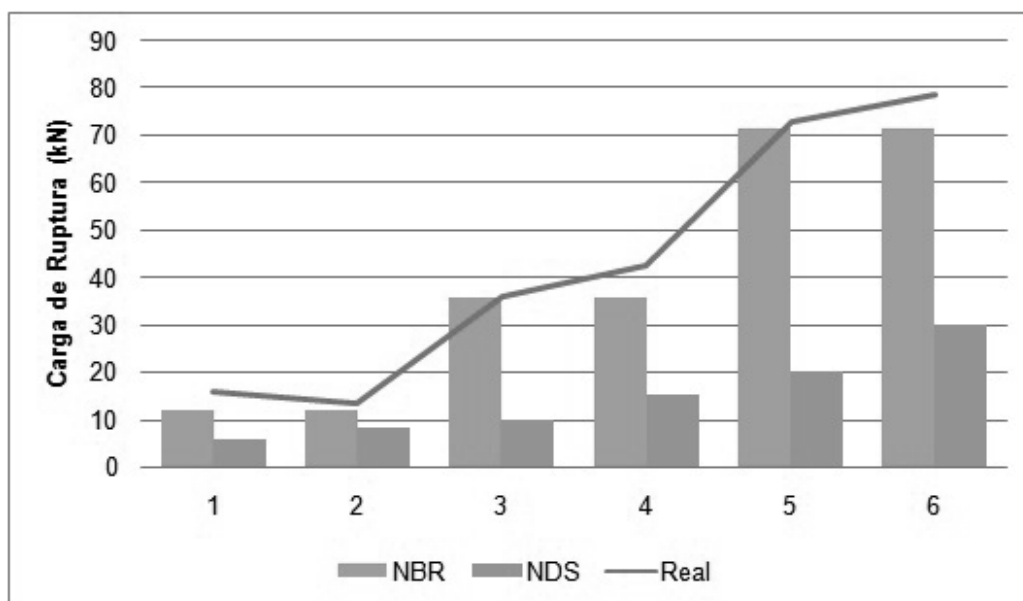


Figura 21: Gráfico comparando as cargas calculadas da *Picea* com sua carga de ruptura real

Podemos verificar na Figura 20, que para o *Pinus*, metade dos corpos de prova apresentaram carga de ruptura real abaixo da calculada pela NBR 7190/97, sendo que o corpo de prova de nº 3, dimensionado com os espaçamentos mínimos propostos pela NBR 7190/97, foi o que apresentou menor carga de ruptura real para três parafusos. O corpo de prova de nº 11 foi dimensionado de forma mais próxima dos espaçamentos mínimos para duas linhas, e também obteve o pior resultado prático para seis parafusos.

Entretanto, como o dimensionamento das ligações de acordo com a NBR 7190/97 é feito utilizando coeficientes de segurança que minoram a resistência da madeira e majoram a carga nela aplicada, essa diferença entre as resistências calculadas e reais deve ser amenizada.

Por outro lado, para a *Picea*, todas as cargas calculadas ficaram abaixo das reais. Os resultados dos corpos de prova nº 3 e 5 ficaram próximos à ruptura real, mas ainda apresentaram cargas de 70 N e 60 N, respectivamente, abaixo do limite. Estes mesmos corpos de prova foram os que mais se aproximaram dos espaçamentos mínimos propostos pela norma brasileira.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo verificar a segurança da NBR 7190/97, quanto aos espaçamentos mínimos entre os pinos metálicos, utilizando como base de comparação a formulação apresentada pela norma vigente nos Estados Unidos, a NDS, e os ensaios realizados por Smith, Asiz e Snow (2006).

A madeira, diferente de materiais como aço e concreto, deve trabalhar com uma maior margem de segurança, pois é um material heterogêneo e anisotrópico, isto é, não apresenta uniformidade ao longo de sua estrutura, e suas propriedades mecânicas se alteram conforme solicitada em diferentes direções. E também devido a sua heterogeneidade, o comportamento de peças de madeira submetidas a diferentes esforços apresenta menor previsibilidade, o que torna difícil um cálculo exato de capacidade de carga nas ligações da madeira. Entretanto, apesar desse cálculo não ser exato, é preciso buscar formas de aproximá-lo da realidade, aumentando a confiabilidade das ligações, sem precisar de uma margem de segurança inviável economicamente.

A partir das análises teóricas, podemos verificar que as normas brasileira e estadunidense consideram resistências diferentes para a mesma espécie de madeira, e apesar dos coeficientes de segurança utilizados também serem diferentes, a variação entre as cargas de ruptura calculadas permanecem em uma proporção semelhante à das resistências.

Pode-se observar também que, devido à norma brasileira não considerar nos cálculos os espaçamentos entre seus pinos, a resistência da ligação aumenta exclusivamente de forma proporcional à quantidade de parafusos na ligação. Porém, de acordo com os ensaios apresentados, os espaçamentos entre os pinos também influenciam na capacidade de carga da ligação.

Ainda quando comparadas as estimativas da NBR 7190/97 com as capacidades de carga reais, os valores obtidos foram semelhantes, e os coeficientes utilizados para o dimensionamento devem atender a segurança da ligação.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A realização dos ensaios, utilizando os espaçamentos mínimos propostos pela norma brasileira, pode auxiliar a encontrar uma formulação mais segura e econômica para NBR 7190/97.

A propagação das cargas em ligações mecânicas na madeira não é uniforme,

apesar de, para efeito de cálculo, essas cargas serem sempre divididas uniformemente pela quantidade de pinos da ligação. Sendo assim, pode ser estudada essa propagação das cargas, de modo a contribuir para o desenvolvimento de uma formulação mais segura e condizente com a realidade desse material estrutural.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. A. de O. *Estruturas de grande porte de madeira composta*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. *TIMBER CONSTRUCTION MANUAL*. 6. ed. New Jersey, 2012. 659 p.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. *NDS: National design specifications for wood construction*. 2015. ed. Leesburg, VA, SET 2014. 202 p.
- AMERICAN WOOD COUNCIL. *NDS Supplement: National design specifications - design values for wood construction*. 2015. ed. Leesburg, VA, NOV 2014. 86 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, AGO 1997. 107 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 5: Design of timber structures*. Bruxelas, NOV 2014. 123 p.
- LAHR, F. A. R. Estrutura de madeira tem vantagens, mas falta mão de obra especializada. Acesso em 21 de abril de 2016. 2014. Disponível em: <[http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/estrutura-de-madeira-tem-vantagens-mas-falta-mao-de-obra-especializada\\_8594\\_0\\_1](http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/estrutura-de-madeira-tem-vantagens-mas-falta-mao-de-obra-especializada_8594_0_1)>.
- METROPOL Parasol é a maior estrutura de madeira do mundo. 2014. Website. Acesso em dois de agosto de 2016. Disponível em: <[http://www.quadrainterior.com.br/portfolio\\_detalhe/metropol-parasol-e-a-maior-estrutura-de-madeira-do-mundo](http://www.quadrainterior.com.br/portfolio_detalhe/metropol-parasol-e-a-maior-estrutura-de-madeira-do-mundo)>.
- OLIVEIRA, L. G. *Apostila de Resistência dos Materiais*. São José dos Campos, FEV 2014.
- OLIVEIRA, M. A. M. e; DIAS, A. A. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 7, n. 26, p. 33 – 64, 2005.
- RAMMER, D. R.; LINE, P. Development of failure mechanisms for fasteners in the United States. In: *9th World Conference on Timber Engineering*. Portland, OR: [s.n.], 2006. p. 8.
- RITTER, M. A. Properties of wood and structural wood products. In: *Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1990. cap. 3.
- SMITH, I.; ASIZ, A.; SNOW, M. *Design Method for Connections in Engineered Wood Structures*. Fredericton, MAR 2006.
- SOUZA, M. F. S. M. de; RODRIGUES, R. B.; MASCIA, N. T. *Sistemas estruturais de edificações e exemplos*. Campinas, JUL 2008.
- SZUCS, C. A. *et al. Estruturas de Madeira*. Florianópolis, MAR 2015.

SZUCS, C. P. Sistema STELLA-UFSC: avaliação e desenvolvimento de sistema construtivo em madeira de reflorestamento voltado para programas de habitação social. In: *Inovação Tecnológica na Construção Habitacional*. [S.l.]: Amanda Vivan, 2006. v. 6, cap. 4, p. 67 – 115.

TAYLOR, R. J.; LINE, P. Is Your Wood Connection All Stressed Out? – It Needn't Be! *Wood Design Focus*, v. 12, n. 4, 2002.

TODAIJI: Great Eastern Temple in Japan's. 2013. Website. Acesso em dois de agosto de 2016. Disponível em: <<http://2013ritemail2014.blogspot.com.br/2013/04/todaiji-great-eastern-temple-in-japans.html>>.

ZARNANI, P.; QUENNEVILLE, P. Wood Block Tear-Out Resistance and Failure Modes of Timber Rivet Connections: A Stiffness-Based Approach. *Journal of Structural Engineering*, v. 140, n. 2, FEV 2014.