

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
LABORATÓRIO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS

JULIANO SILVEIRA BAENA

**COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO
DE LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS (PARAFUSOS) EM
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

São Carlos - SP

2015

JULIANO SILVEIRA BAENA

**COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO
DE LIGAÇÕES POR PINOS METÁLICOS (PARAFUSOS) EM
ESTRUTURAS DE MADEIRA**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Linha de pesquisa: Estruturas de Madeira

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos - SP

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B139c Baena, Juliano Silveira
Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira / Juliano Silveira Baena; orientador Antonio Alves Dias . São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Ligações por Pinos Metálicos. 2. Critérios de Dimensionamento. 3. Estruturas de Madeira. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JULIANO SILVEIRA BAENA.**

Título da dissertação: "Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira".

Data da defesa: 19/10/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Antonio Alves Dias (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Carlito Calil Junior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Julio Cesar Molina**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Itapeva)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Sergio Lima Segantine**

Resultado:

APROVADO

APROVADO

Aprovado

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à Deus, à minha mãe Ieda, ao meu pai Paulo e à minha irmã Claudia.

AGRADECIMENTOS

A Deus pois sem ele não seria capaz de realizar nada na vida.

Aos meus pais Ieda e Paulo que me deram apoio, estrutura e condições para completar mais essa fase em minha vida.

A minha irmã Claudia por todo apoio.

Ao Prof. Dr. Antonio Alves Dias, pela orientação e amizade.

Aos meus amigos do LaMEM: Arnaldo, Jairo, Silvio, Samuel, Tiago, Felipe e Diego.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

RESUMO

BAENA, J. S. **Comparação dos critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos (parafusos) em estruturas de madeira.** 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Um dos tipos de ligação mais comum em estruturas de madeira é aquele feito por meio de parafusos solicitados transversalmente (pino metálico). A revisão da ABNT NBR:7190 de 1997, que introduziu os conceitos do Método dos Estados Limites, apresentou alteração nos critérios de dimensionamento dessas ligações, levando a resultados diferentes em relação à norma anterior, de 1982, de acordo com o meio técnico-científico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma comparação dos critérios de dimensionamento das normas ABNT NBR:7190, versões 1997 e 1982, com as normas EUROCODE 5: 2004, LRFD: 1996, AS: 1994, que possuem grande tradição na utilização de estruturas de madeira. Após a realização da comparação teórica entre os critérios, foi realizada experimentação em modelos de ligação, para a situação com maior divergência. Para pequenas relações entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino, os resultados obtidos na comparação teórica indicaram que os valores de resistência calculados pela ABNT NBR7190: 1997 são inferiores aos calculados pelas outras normas, enquanto que, para valores elevados dessa relação e com madeira de maior resistência, os valores obtidos pela norma brasileira podem ser superiores.

Palavras chaves: Pinos Metálicos. Ligações. Estruturas de Madeira.

ABSTRACT

BAENA, J. S. **Comparison of design criteria for laterally loaded metal dowel-type (bolts) fasteners in timber structures**. 2015. 115 p. Master's Dissertation (Master's in Structural Engineering) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, 2015.

Bolts laterally loaded (metal dowel-type) are the most commonly used connectors in timber structures. The review of the NBR: 7190 1997 standard that introduced the concepts of the states limit method showed changes in design criteria of bolts, reaching different results compared to the previous standard, 1982, according to the scientific technician staff. In this context, the aim of this study was to compare the design criteria of NBR standards: 7190, versions 1997 and 1982, and standards of other countries with great tradition in the use of timber structures. After the theoretical comparison of the criteria, an experimental evaluation in connections was done considering the case with greater divergence. For small relationships between the thickness of the timber member and the bolt diameter, theoretical results indicated that the strength values calculated by ABNT NBR7190: 1997 are lower than those calculated by other standards, while for high values of this relationship and wood of higher strength classes, the values obtained by Brazilian standards may be higher.

Key words: Bolts. Connections. Timber Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modos de ruptura das ligações por pinos metálicos (a) plastificação do pino, (b) embutimento, (c) cisalhamento da madeira, (d) fendilhamento. Fonte:ALMEIDA, 1987.....	31
Figura 2: Ligação com pino rígido (a) e flexível (b) para uma seção de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949 (Adaptada).....	34
Figura 3: Ligação com pino rígido para duas seções de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949 (Adaptada).....	35
Figura 4: Ligação com pino rígido (a) e pino flexível (b) para duas seções de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949 (Adaptada).....	36
Figura 5: Ligações com uma seção de corte.Fonte: ABNT NBR7190: 1997 (Adaptada).....	42
Figura 6: Ligações com duas seções de corte.Fonte: ABNT NBR7190: 1997 (Adaptada)....	44
Figura 7: Modos de ruptura para uma seção de corte.Fonte: EUROCODE 5: 2004.	46
Figura 8: Modos de ruptura para duas seções de corte. Fonte: EUROCODE 5: 2004.	48
Figura 9: Modos de ruptura para uma e duas seções de corte com cobrejuntas metálicas. Fonte: EUROCODE 5: 2004.....	49
Figura 10. Modos modos de ruptura dos pinos matálicos (pregos e parafusos) segundo o LRFD:1996 (Adaptada).	52
Figura 11. Pregos solicitados ao cisalhamento em (a) ligações de peças lado-a-lado e (b) ligações de topo.....	56
Figura 12. Pregos solicitados ao arrancamento em (a) ligações de peças lado-a-lado e (b) ligações de topo.....	56
Figura 13. (a) e (b) Parafusos em ligações com carregamentos na direção paralela às fibras segundo AS:1994(Adaptada).	57
Figura 14. (a) e (b) Parafusos em ligações com carregamentos na direção normal às fibras segundo AS:1994(Adaptada).	58
Figura 15. Momento de plastificação para ligações pregadas. Fonte: Veloso et al. (2002) (Adaptada).....	63
Figura 16. Classe C-20; direção paralela às fibras.....	80
Figura 17. Classe C-25; direção paralela às fibras.....	81
Figura 18. Classe C-30; direção paralela às fibras.....	82
Figura 19. Classe C-40; direção paralela às fibras.....	83
Figura 20. Classe C-60; direção paralela às fibras.....	84

Figura 21. Classe C-20; direção normal às fibras.....	85
Figura 22. Classe C-25; direção normal às fibras.....	86
Figura 23. Classe C-30; direção normal às fibras.....	87
Figura 24. Classe C-40; direção normal às fibras.....	88
Figura 25. Classe C-60; direção normal às fibras.....	89
Figura 26. AS:1994 ; direção paralela às fibras.	90
Figura 27. AS:1994 ; direção normal às fibras.....	91
Figura 28. Dimensões dos corpos de prova embutimento na direção paralela e normal às fibras, respectivamente.	95
Figura 29. Máquina universal AMSLER e EMIC.....	96
Figura 30. Ensaio embutimento paralelo às fibras.	97
Figura 31. Ensaio de embutimento normal às fibras.	97
Figura 32. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção paralela às fibras.	98
Figura 33. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção normal às fibras.	98
Figura 34. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção paralela às fibras.	99
Figura 35. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção normal às fibras.	99
Figura 36. Força embutimento na direção paralela às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Pinus.	102
Figura 37. Força de embutimento na direção normal às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Pinus.	103
Figura 38. Força de embutimento na direção paralela às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Cupiúba.....	104
Figura 39. Força de embutimento na direção normal às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Cupiúba.....	105
Figura 40. Corpo de prova na ruptura, direção paralela às fibras.....	106
Figura 41. Corpo de prova na ruptura, direção normal às fibras.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de α_e para diferentes diâmetros de pinos. Fonte: ABNT NBR7190: 1997.	40
Tabela 2: Resistência da ligação com pregos com uma seção de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Fonte: LRFD:1996.	52
Tabela 3: Resistência da ligação com parafusos com uma seção de corte de acordo com seis modos de ruptura. Fonte: LRFD: 1996.	53
Tabela 4: Resistência da ligação com parafusos com duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Fonte: LRFD:1996.	54
Tabela 5: Valor da Resistência Característica, Q_{kl} (N) para a direção paralela às fibras. Fonte: AS: 1994.	60
Tabela 6: Valor da Resistência Característica, Q_{kp} (N) para a direção normal às fibras. Fonte: AS: 1994.	61
Tabela 7: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, f_{e0} (MPa), para coníferas.	68
Tabela 8: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, f_{e0} (MPa), para dicotiledôneas.	68
Tabela 9: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras, f_{e90} (MPa), para coníferas.	69
Tabela 10: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras, f_{e90} (MPa), para dicotiledôneas.	69
Tabela 11: Resistência da ligação paralela às fibras para duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Simplificado.	75
Tabela 12: Resistência da ligação normal às fibras para duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Simplificado.	75
Tabela 13: Espécies de Madeira classificadas por grupo e densidade. Fonte: AS: 1994 (Adaptada).	77
Tabela 14: Valores de $\beta=t/d$ (equação 28, extraído da norma ABNT NBR7190: 1997) considerados pela norma AS:1994.	77
Tabela 15: Resultados dos ensaios complementares para a espécie <i>Pinus</i>	100
Tabela 16: Resultados dos ensaios complementares para a espécie <i>Cupiúba</i>	101
Tabela 17: Valores característicos da resistência a compressão e ao embutimento, em MPa.	101

Tabela 18: Resistência da ligação, força última e deslocamento relativo para Pinus.	107
Tabela 19: Resistência da ligação, força última e deslocamento relativo para Cupiúba.....	107
Tabela 20: Valores característicos da resistência da ligação.....	107
Tabela 21: Comparação dos valores experimentais e teóricos para a espécie Pinus.....	108
Tabela 22: Comparação dos valores experimentais e teóricos para a espécie Cupiúba.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFPA - American Forest and Paper Association

AS - Norma Australiana

ASTM - American Society for Testing and Materials

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

EN - Norma Europeia

EUROCODE - Comissão Europeia de Normas Técnicas

LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira

LRFD - Load and Resistance Factor Design

NDS - American National Design and Specification for Wood Construction

NBR - Norma Brasileira Registrada

SET - Departamento de Engenharia de Estruturas

USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

α_e - coeficiente em função do diâmetro do pino metálico

β - coeficiente calculado em função da espessura da madeira e diâmetro do pino metálico (NBR7190:1997); razão entre as resistências ao embutimento da peça central e lateral (EUROCODE 5:2004)

β_{lim} - coeficiente calculado em função da resistência de escoamento do pino metálico e a resistência ao embutimento da madeira

d - diâmetro do pino metálico

f_{c0} - resistência da madeira à compressão na direção paralela às fibras

f_{c90} - resistência da madeira à compressão na direção normal às fibras

$f_{d,lig}$ - tensão resistente de cálculo

f_e - resistência da madeira ao embutimento

f_{e0} - resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras

f_{e90} - resistência da madeira ao embutimento na direção normal às fibras

$f_{e\alpha}$ - resistência da madeira ao embutimento para forças em qualquer direção das fibras

f_y - resistência de escoamento do pino metálico

f_{yd} - resistência de cálculo de escoamento do pino metálico

f_{yk} - resistência característica de escoamento do pino metálico

$F_{ax,Rk}$ - valor característico da resistência ao arrancamento do pino metálico

F_e - força de embutimento do pino metálico no corpo de prova

F_{es} - resistência ao embutimento da peça principal da ligação (central)

F_{em} - resistência ao embutimento da peça secundária da ligação (cobrejunta)

F_u - força última obtida em ensaio

$F_{v,Rk}$ - é a resistência característica de um parafuso

F_{yb} - resistência ao escoamento do aço do parafuso

$f_{h,\alpha,k}$ - resistência característica da madeira ao embutimento para forças em qualquer direção

$f_{h,0,k}$ - resistência característica da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras

$f_{h,90,k}$ - resistência característica da madeira ao embutimento na direção normal às fibras

k - produto entre coeficientes de modificação, tabelados de acordo com o pino metálico

k_{17} - coeficiente de modificação para ligações com vários pinos metálicos

k_{90} - fator que leva em consideração a densidade da madeira e o diâmetro do pino metálico

l_p - comprimento de penetração do prego na madeira

$M_{máx}$ - momento máximo no pino metálico

M_{np} - momento de plastificação do prego

$M_{y,Rk}$ - momento característico de escoamento do pino metálico

MPa - mega pascal

m - metro

m^3 - metro cúbico

mm- milímetro

n - número de pregos

p - ponto de penetração do prego

Q - resistência da ligação

Q_k - resistência característica do pino metálico

q - resistência de um pino metálico

q_u - carregamento último

R - resistência de um pino à flexão

R_e - resistência da ligação; razão entre as resistências de embutimento da peça central e lateral (LRFD:1996)

R_t - razão entre a espessura da peça central pela espessura da peça lateral da madeira

$R_{vd,1}$ - resistência da ligação para uma seção de corte

ρ_{ap} - densidade aparente da madeira

ρ_k - densidade aparente característica da madeira

ρ - densidade da madeira

σ_c - valor médio da resistência a compressão paralela às fibras para o caso da umidade acima do ponto de saturação

$\sigma_{s,adm}$ - tensão admissível de tração do prego

$\sigma_{w,adm}$ - tensão admissível de compressão da madeira

γ_s - coeficiente de segurança

t - é o menor dos valores entre a espessura da peça lateral (t_1) e a espessura da peça central da madeira dividida por 2 ($t_2/2$) (NBR7190:1997)

t_1 - espessura da peça lateral da madeira

t_2 - espessura da peça central da madeira

t_s - espessura da peça lateral da madeira

t_m - espessura da peça central

Z - resistência da ligação

z - é a abscissa de momento máximo no pino

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Objetivo do Trabalho Proposto.....	28
1.2	Justificativas do Trabalho Proposto.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	Introdução.....	29
2.2	Ligações por Pinos Metálicos.....	29
2.3	Modelos Teóricos.....	33
2.3.1	Modelo de Johansen (1949).....	33
2.3.2	Modelo de Moller (1951).....	37
2.4	Resistência da Madeira ao Embutimento.....	39
2.4.1	Critério da ABNT NBR7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.....	39
2.4.2	Critério do EUROCODE 5:2004 - Design of Timber Structures.....	40
2.4.3	Critério da LRFD:1996 - Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC).....	41
2.5	Critérios de Dimensionamento.....	42
2.5.1	ABNT NBR7190: 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.....	42
2.5.2	ABNT NBR7190: 1982 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira.....	44
2.5.3	EUROCODE 5: 2004 - Design of Timber Structures.....	46
2.5.4	LRFD:1996 - Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC).....	51
2.5.5	AS: 1994 – Timber Structures - Part 1 - Design methods.....	55
2.6	Trabalhos Técnico-Científicos a Respeito de Ligações com Pinos Metálicos.....	62
2.7	Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	66
3	COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DAS NORMAS.....	67
3.1	Resistência ao Embutimento.....	68
3.2	Parâmetros.....	69
3.2.1	Tipos de Ligações Analisadas.....	71
3.2.2	Ajustes para a Norma ABNT NBR7190: 1982.....	71
3.2.2.1	Ligação Paralela às Fibras.....	71
3.2.2.2	Ligação Normal às Fibras.....	72
3.2.3	Ajustes para a Norma EUROCODE 5:2004.....	73
3.2.3.1	Ligação Paralela às Fibras.....	73
3.2.3.2	Ligação Normal às Fibras.....	74

3.2.4	Ajustes para a Norma LRFD: 1996	74
3.2.4.1	Ligação Paralela às Fibras	74
3.2.4.2	Ligação Normal às Fibras	75
3.2.5	Ajustes para a Norma AS: 1994	76
3.3	Método utilizado para a Comparação entre as Normas.....	78
3.4	Resultados Obtidos.....	79
3.5	Análise dos Resultados.....	92
3.5.1	Solicitação Paralela às Fibras	92
3.5.2	Solicitação Normal às Fibras	93
4	Avaliação experimental.....	94
4.1	Materiais e Métodos	94
4.1.1	Materiais	94
4.1.2	Métodos	94
4.1.2.1	Ensaio Complementares	95
4.1.2.2	Ensaio da Ligação.....	98
4.2	Resultados Obtidos.....	100
4.2.1	Ensaio Complementares	100
4.2.2	Ensaio da Ligação	101
4.3	Análise dos Resultados.....	109
5	CONCLUSÕES.....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

1 INTRODUÇÃO

A madeira nos dias de hoje é utilizada para múltiplas finalidades. Na construção civil podemos destacar a utilização da madeira em diversas situações como, por exemplo: em soluções para coberturas (residenciais, comerciais, industriais); em cimbramentos (utilizados em estruturas de concreto); para transposição de obstáculos (pontes, viadutos, passarelas); para armazenamento (silos); em linhas de transmissão (energia elétrica, telefonia) e outros. A madeira também é muito utilizada para confecção de componentes utilizados em edificações, como painéis divisórios, portas, forros, pisos e outros.

Para a construção de estruturas de madeira existe a necessidade da ligação entre os diversos elementos estruturais. A fim de suportarem os esforços solicitantes na estrutura garantindo segurança na sua utilização, estas ligações podem ser realizadas com anéis metálicos, cavilhas de madeira, chapas de dentes estampados, ligações coladas (por adesivos) e por pinos metálicos (pregos, parafusos e barras de aço).

As ligações por pinos metálicos são as mais utilizadas em estruturas de madeira, tanto em pequenas estruturas quanto nas estruturas maiores como, por exemplo, pontes e treliças. No Brasil, o documento normativo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) "Projeto de Estruturas de Madeira" (ABNT NBR7190:1997) aborda os critérios de dimensionamento para as ligações com pinos metálicos. Nesse documento foram introduzidos os conceitos do Método dos Estados Limites, diferentemente da versão anterior (1982) da mesma norma que utilizava o conceito de Tensões Admissíveis. São considerados o diâmetro do pino, a espessura da peça de madeira, à resistência a flexão do pino e a resistência da madeira ao embutimento como os fatores que determinam a rigidez da ligação.

O meio técnico-científico em suas pesquisas tem notado que o dimensionamento de ligações por pinos metálicos tem conduzido ao aumento do número de elementos nas ligações se comparados pela antiga norma ABNT NBR7190:1982 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, para algumas situações.

Neste trabalho foram desenvolvidas comparações, de forma teórica, entre a norma ABNT NBR7190:1997 e as normas ABNT NBR7190:1982, EUROCODE 5:2004, AS:1994, LRFD:1996, a fim de reavaliar os critérios de dimensionamento de ligações por pinos metálicos proposto pela norma brasileira.

1.1 Objetivo do Trabalho Proposto

O objetivo deste trabalho foi comparar os critérios de dimensionamento das ligações por pinos metálicos (parafusos) da ABNT NBR7190:1997 com os documentos normativos ABNT NBR7190:1982, EUROCODE 5:2004, LRFD:1996, AS:1994.

1.2 Justificativas do Trabalho Proposto

Em 1997 foi realizado uma revisão da ABNT NBR7190, onde foram introduzidos os conceitos do Método dos Estados Limites em substituição ao Método das Tensões Admissíveis (1982). Nessa revisão foram realizadas alterações substanciais na formulação para o cálculo da resistência de ligações por pinos metálicos. O dimensionamento dessas ligações tem levado a valores elevados do número de conectores se comparados com a antiga norma vigente de 1982.

Nas ligações por pinos metálicos são considerados dois modos de ruptura: embutimento do pino na madeira e a flexão do pino metálico. Uma das razões desse aumento é que quando a solicitação da ligação se dá pelo embutimento do pino na madeira, a norma brasileira utiliza um coeficiente minorador de 0,4 Eq.(30) o que causa um aumento no número de elementos na ligação. Outro fator importante é que a resistência ao embutimento da madeira é calculada com base na resistência à compressão paralela às fibras ou de forma experimental (com base na deformação de 2%). Observam-se diferenças entre os critérios de dimensionamento da atual norma se comparados com as normas de outros países.

Neste contexto, o aumento de conectores na ligação leva a estrutura a ter um custo elevado e muitas vezes inviabilizam a colocação dos parafusos nas peças de madeira (como treliças). Sendo assim, é necessário a verificação dos critérios de dimensionamento da atual norma brasileira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será realizada uma introdução a respeito dos critérios de dimensionamento das ligações por pinos metálicos em estruturas de madeira. Serão abordados os critérios de dimensionamento segundo os documentos normativos ABNT NBR7190:1982, ABNT NBR7190:1997, EUROCODE 5:2004, AS:1994 e LRFD:1996.

2.1 Introdução

Para que a madeira possa ser utilizada como elemento estrutural existe a necessidade de execução de ligações entre seus elementos. Essas ligações são necessárias pois as peças de madeira possuem comprimentos limitados. Através da ligação de uma ou mais peças de madeira, forma-se um elemento estrutural capaz de alcançar vãos maiores e resistir a grandes esforços.

Com o desenvolvimento tecnológico, novos equipamentos e tipos de ligações têm surgido no ramo da construção de estruturas de madeira. Esse avanço facilita a substituição das ligações tradicionalmente empregadas (dente, tarugo, chapa, cola) por ligações mecânicas (pregos, parafusos e pinos) sendo utilizadas em diversos sistemas estruturais. Essas ligações mecânicas permitem a construção de nós rígidos ou elementos de rigidez significativamente maior que a dos demais, o que garante uma idealização mais realista do comportamento das ligações (ALMEIDA, 1987).

Nas estruturas de madeira os maiores esforços são concentrados nas regiões das ligações e por esse motivo elas são consideradas os pontos fundamentais para a segurança da estrutura. Poderá ocorrer o colapso da estrutura caso haja falha de uma ou mais ligações (CALIL JUNIOR et al., 2003).

Para que uma ligação realizada em estruturas de madeira possa ser considerada consistente é necessário o conhecimento de alguns aspectos, destacando-se: os possíveis tipos de ruptura, o comportamento resistente do material, a rigidez, a durabilidade e a facilidade de execução (MOREIRA, 2004).

As ligações podem ser separadas em dois tipos, sendo nos entalhes ou encaixes, onde a transmissão dos esforços é realizada por contato direto entre as peças de madeira, ou pela utilização de elementos externos que são responsáveis pela fixação e a transmissão dos esforços solicitantes entre as peças de madeira, como é o caso dos pinos metálicos que são os elementos de ligação mais utilizados em estruturas de madeira (CALIL JUNIOR et al., 2003).

2.2 Ligações por Pinos Metálicos

Como dito anteriormente, as ligações por pinos metálicos são as mais utilizadas na construção de estruturas de madeira, pois, apresentam grandes vantagens em relação a outros

tipos de ligações comumente encontrados. Podemos destacar algumas dessas vantagens: grande variedade de modelos, não necessita de mão-de-obra especializada para sua utilização, baixo custo em relação a outros conectores, não apresentam mudanças de propriedades mecânicas nas diversas condições ambientais de utilização (CALIL JUNIOR et al., 2003).

Os pinos metálicos, em meados do século XVII, eram utilizados em estruturas que empregavam peças com pequenas dimensões, com a função de transmitir os esforços entre duas peças estruturais de madeira (ALMEIDA, 1987).

Um dos primeiros estudos realizados no mundo sobre o tema foi realizado por Johansen (1949) servindo de base para o documento normativo EUROCODE 5:2004. No Brasil Almeida (1987) realizou o primeiro estudo sobre embutimento em ligações com pinos metálicos.

Johansen (1949) verificou que a resistência das ligações por pinos metálicos depende da resistência da madeira ao embutimento e da resistência do pino à flexão. O comportamento tanto do embutimento na madeira quanto da flexão do pino são plásticos e com isso a capacidade de carga de um pino pode ser formulada através desse comportamento.

O que determina o comportamento da ligação é a relação entre a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência da madeira ao embutimento e a tensão limite de escoamento do pino, pois a força máxima se dará pela flexão do pino ou pelo embutimento do pino na madeira.

No estudo das ligações pregadas, Almeida (1987), apresenta os conceitos de resistência do embutimento do pino na madeira e afirma que a pressão de contato aplicada pelo pino à parede do furo causa um estado múltiplo de tensões na região do furo. Essas tensões de embutimento podem decorrer da cravação do pino na peça de madeira ou de uma ação externa.

Quando a ligação é solicitada por um carregamento externo, ocorre uma alteração dos esforços, com concentrações de tensões na região comprimida da parede do furo, cuja intensidade depende do diâmetro do prego e das propriedades da madeira.

Essa distribuição de tensão é condicionada pela deformabilidade da madeira, ocorrendo na direção paralela às fibras e normal às mesmas. A resistência normal às fibras também pode causar essa distribuição de tensão devido à possibilidade de um início de fendilhamento por tração normal às fibras.

Almeida (1987) estudou os modos de ruptura e os estados limites das ligações pregadas e parafusadas, chegando a quatro modos de ruptura: plastificação do pino metálico por flexão, embutimento do pino na madeira, cisalhamento e fendilhamento da madeira (Figura 1).

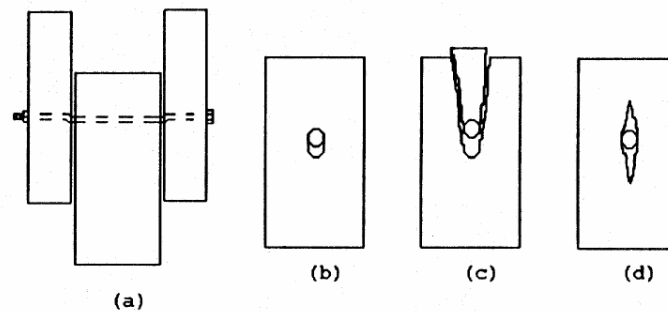


Figura 1: Modos de ruptura das ligações por pinos metálicos (a) plastificação do pino, (b) embutimento, (c) cisalhamento da madeira, (d) fendilhamento. Fonte:ALMEIDA, 1987.

Para o caso (a), quando a ruptura da ligação é ocasionada pela plastificação do pino metálico, ocorre a flexão do pino e eventual plastificação parcial da parede do furo. Para a verificação da segurança da ligação, o cálculo da resistência deve ser considerada como função do momento fletor de plastificação do pino metálico.

Para o caso (b), quando a ruptura da ligação é ocasionada pelo embutimento do pino na madeira, ocorre o esmagamento da parede do furo com a penetração do pino na madeira. Esse modo de ruptura ocorre quando a relação entre a espessura da madeira (t) e o diâmetro do pino metálico (d) possuem valores muito baixos ($\beta = t/d$) ou quando a ligação é fabricada com madeira de baixa resistência.

Para os casos (c) e (d), onde ocorre cisalhamento e fendilhamento da madeira, Almeida (1987) chegou a conclusão que esses modos de ruptura podem ser evitados através de regras construtivas que limitem o diâmetro de pré-furação, os espaçamentos mínimos e as distâncias para cada situação em que são empregadas os pinos metálicos na ligação.

As resistências ao embutimento e à compressão, ambas na direção paralela às fibras da madeira são parâmetros importantes para o dimensionamento de ligações. Mack (1960) apud Almeida (1987) realizou diversos experimentos a fim de obter a expressão da resistência ao embutimento da madeira chegando à Equação 1.

$$f_e = \frac{F_u}{n \cdot t \cdot d} \quad (1)$$

Onde:

f_e : resistência ao embutimento;

F_u : força última obtida em ensaio;

n: número de pregos;

t: espessura da peça de madeira.

d: diâmetro do pino.

Almeida (1987) afirma que a resistência de embutimento do prego na madeira, depende da resistência da madeira num estado múltiplo de tensões. De acordo com o método proposto pelo autor, a resistência da ligação foi definida como a razão entre a força determinada no ensaio e a área da parede do furo. O valor desta área é dado por: $A = t \times d$. Esta definição é adotada por Johansen (1949), que observou em seus ensaios em várias espécies de madeira um comportamento plástico na ruptura das peças.

A ABNT NBR: 8681 - Ações e segurança nas estruturas, define os estados limites de uma estrutura como sendo aqueles que causam um desempenho inadequado às finalidades da construção.

Almeida (1987) estudou esses estados limites nas ligações por pinos metálicos. Através de análises experimentais, o autor identificou as cargas de primeiro e segundo limite nas ligações por pinos metálicos. Essas cargas estão relacionadas ao regime de elasticidade e plastificação, respectivamente. O primeiro limite corresponde ao fim do regime elástico. O segundo limite corresponde ao fim da deformação controlada, sendo esse limite o estado limite último da ligação.

Como a ligação é composta por dois materiais diferentes, o estado limite de elasticidade pode decorrer do início de plastificação por flexão dos pinos ou por início de plastificação local por compressão da madeira da parede dos furos (embutimento). A ligação terá comportamento elástico enquanto não se atingir a carga de início de plastificação, ou seja, quando descarregada a ligação não apresentará deformações residuais, Almeida (1987).

Após a carga de primeiro limite, as deformações plásticas tendem a aumentar indefinidamente chegando assim na carga de segundo limite. Almeida (1987) afirma que as ligações pregadas e parafusadas apenas podem suportar as forças do segundo limite à custa de grandes deformações, o que não pode ser admitido nas estruturas, pois proporcionam grandes deslocamentos relativos de suas peças de madeira.

2.3 Modelos Teóricos

Nesta seção serão abordados alguns modelos teóricos desenvolvidos para o dimensionamento das ligações por pinos metálicos, levando em conta a resistência da madeira ao embutimento e a flexão do pino metálico. Esses modelos teóricos serviram como subsídios para a formulação das equações utilizadas em alguns documentos normativos.

2.3.1 Modelo de Johansen (1949)

O modelo de cálculo do EUROCODE 5:2004 para a determinação da resistência de ligações entre peças de madeira está fundamentado na teoria denominada de "Teoria do Escoamento". Os princípios dessa teoria foram propostos em 1941, pelo cientista dinamarquês K. W. Johansen . O modelo de Johansen (1949), apud Almeida (1987) afirma que para um grande deslocamento, em uma ligação com apenas uma seção de corte e um pino de rigidez suficiente para que seja desprezada a deformação por flexão, ocorrerá uma pressão f_e praticamente sobre todo o pino, e uma distribuição de força cortante V e momento fletor M (Figura 2). Segundo Johansen (1949) a resistência de um pino e o momento máximo podem ser calculados respectivamente através das Equações 2 e 3 .

$$R = f_e \cdot d \cdot z \quad (2)$$

Onde:

R: resistência de um pino à flexão;

d: diâmetro do pino;

z: é a abscissa de momento máximo no pino.

f_e : resistência ao embutimento da madeira.

$$M_{\max} = f_e \cdot d \cdot x^2 = \frac{f_e \cdot d \cdot z^2}{2} \quad (3)$$

Onde:

M_{\max} = momento máximo no pino metálico;

$$x = z \sqrt{\frac{1}{2}}$$

Na ligação, a espessura da cobrejunta (t_1) pode ser dada pela Equação 4.

$$t_1 = z + 2x = z(1 + \sqrt{2}) \quad (4)$$

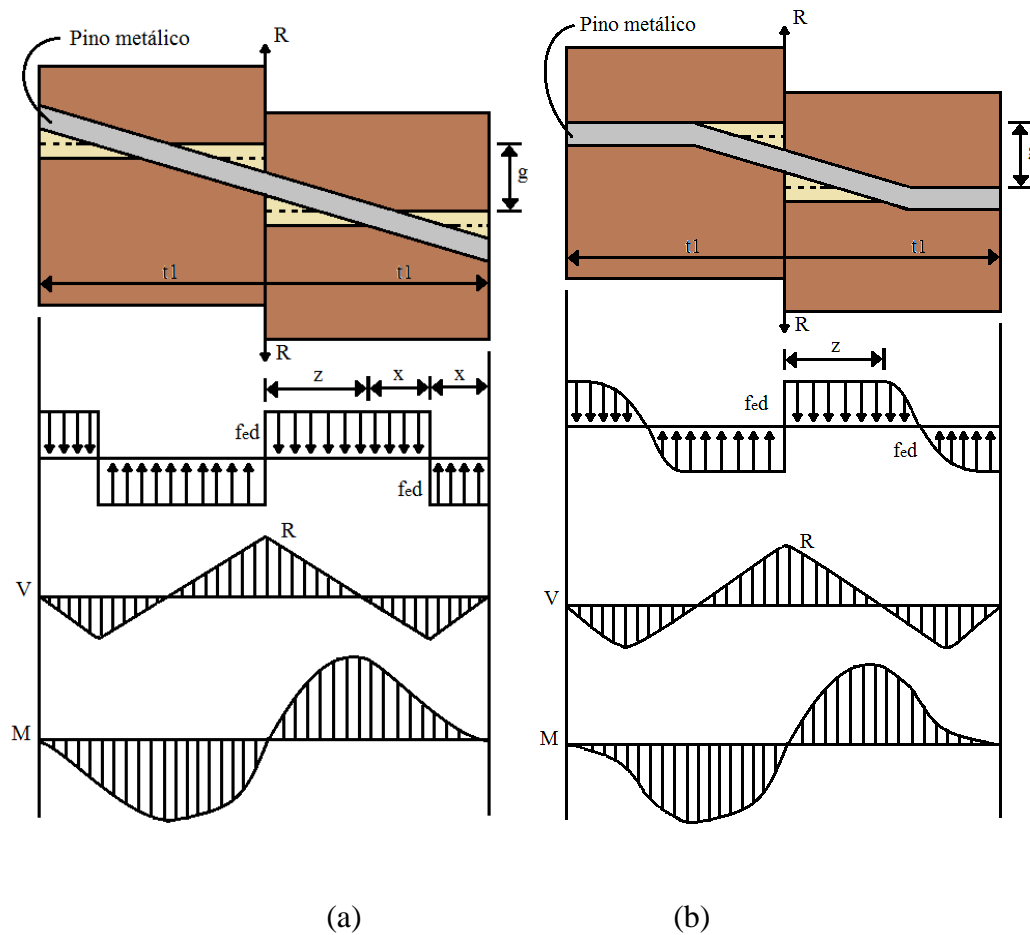


Figura 2: Ligação com pino rígido (a) e flexível (b) para uma seção de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949

(Adaptada).

O momento fletor máximo é obtido pela Equação 5.

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \cdot R \cdot z \quad (5)$$

Se o pino metálico não possuir rigidez suficiente ele será fletido (figura 2-b), e, no limite de escoamento do pino na flexão o momento é dado pela equação 6, onde a força cortante é zero.

$$M_{\max} = f_y \frac{\pi}{32} d^3 \quad (6)$$

Onde:

f_y : resistência ao escoamento do aço do pino metálico.

Igualando-se as equações 5 e 6 e substituindo o valor de $z = R/(f_e \cdot d)$ nessas equações a resistência de um pino à flexão é dada pela Equação 7.

$$R = 0,442d^2 \sqrt{f_y \cdot f_e} \quad (7)$$

Em uma conexão com dois planos de corte e um pino rígido (Figura 3), temos as Equações 8 e 9 para a resistência do pino à flexão.

$$R = 2f_e \cdot d \cdot t_1 \text{ quando } t_2 > 2t_1 \quad (8)$$

$$R = f_e \cdot d \cdot t_2 \text{ quando } t_2 \leq 2t_1 \quad (9)$$

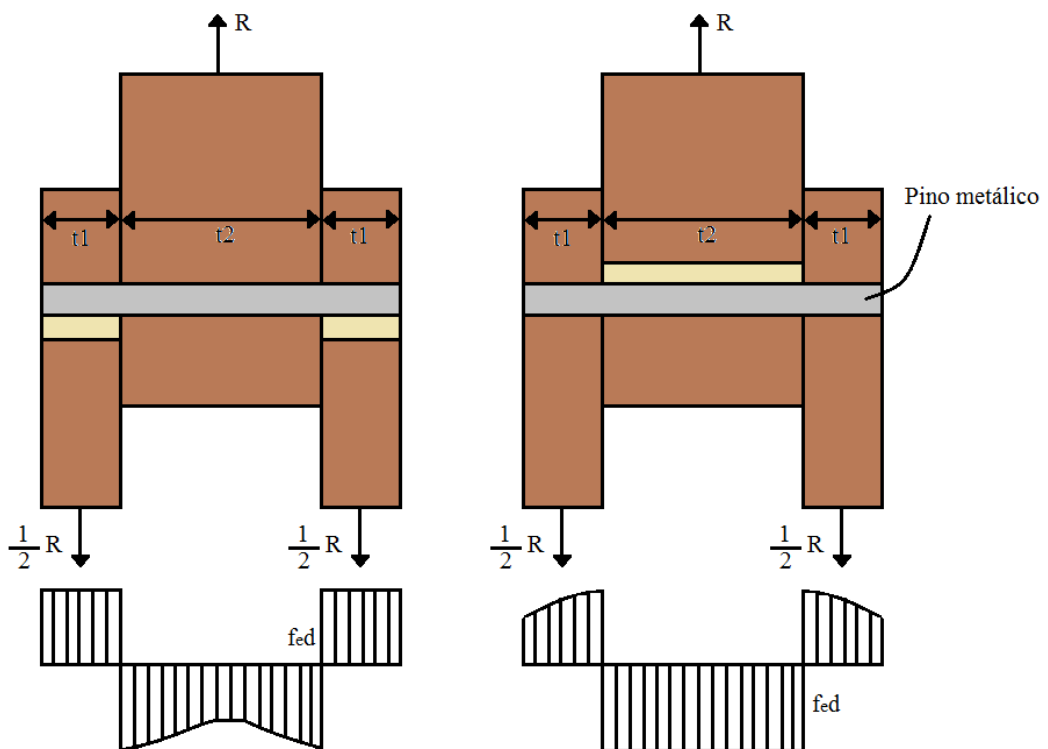


Figura 3: Ligação com pino rígido para duas seções de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949 (Adaptada).

Quando for utilizado pino metálico com baixa rigidez, ocorrerá a flexão do pino no centro da peça de madeira, podendo ocorrer em dois pontos. A madeira deve encontrar-se em um estado plástico de deformação. Sendo assim, o estado limite último se caracteriza pela flexão do pino. Johansen (1949) considera o pino rígido quando o estado limite último se caracteriza pelo embutimento do pino na madeira.

De acordo com o equacionamento de Johansen (1949), o momento máximo e a resistência para um pino com baixa rigidez para duas seções de corte deverão ser calculadas pelas Equações 10 e 11 (Figura 4).

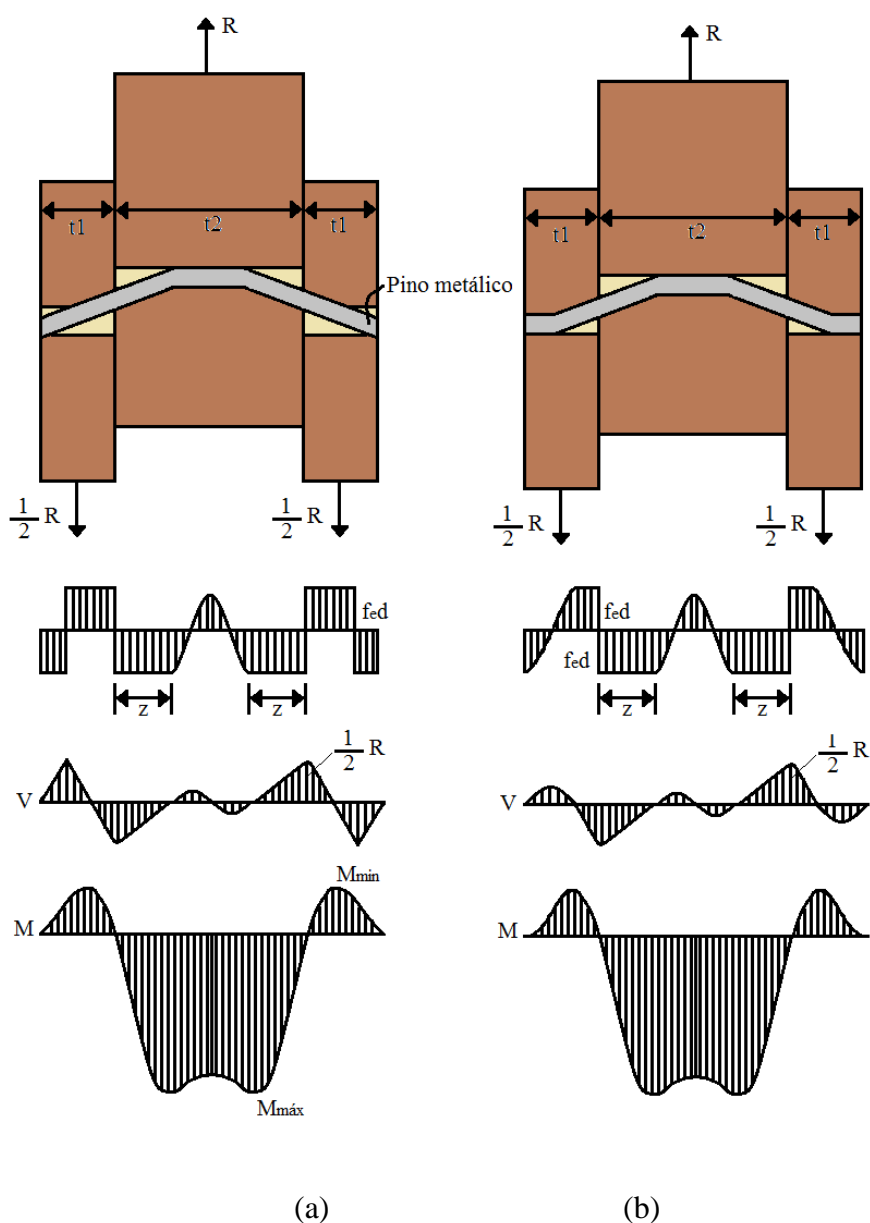


Figura 4: Ligação com pino rígido (a) e pino flexível (b) para duas seções de corte. Fonte:JOHANSEN, 1949 (Adaptada).

$$M_{\max} = \frac{\pi}{32} f_e dz = \frac{1}{2} Rz - f_e dx^2 = f_e dz^2 - \frac{1}{4} f_e d(t_1 - z)^2 \quad (10)$$

$$R = \left(\frac{1}{4} f_e t_1^2 + \frac{3}{5} f_y d^2 \right) \sqrt{\frac{f_e}{f_y}} \quad (11)$$

2.3.2 Modelo de Moller (1951)

O método desenvolvido por Moller (1951), apud Almeida (1987) mostra-se o mais consistente para a determinação da força última da ligação pregada, pois determina a resistência da ligação, considerando a resistência de embutimento da madeira e a plastificação do prego.

Moller (1951) sugeriu a hipótese do prego como sendo uma viga apoiada sobre a parede do furo realizado na madeira, e propõe uma expressão para determinar a resistência das ligações pregadas, admitindo que o valor do carregamento por unidade de comprimento do prego seja igual à resistência ao embutimento multiplicada pelo diâmetro do prego. Moller (1951) considerou outros parâmetros: a espessura das peças de madeira, o momento fletor de plastificação do prego e a carga distribuída última necessária para provocar o embutimento da madeira pelo pino metálico.

O método de Moller (1951) adota que o estado limite último do corpo de prova seja determinado pela plastificação do prego por flexão ou pelo embutimento da madeira. Adota também que qualquer acréscimo de resistência além deste estado último é devido ao efeito de segunda ordem que ocorre no corpo de prova. Em suas análises Moller (1951) definiu que a resistência da ligação (R_e , em corte simples) em função do momento de plastificação do prego (M_{np}) e do carregamento último (q_u) que provoca o embutimento da madeira pelo pino metálico é dada pela Equação 12.

$$R_e = \sqrt{2M_{np} \cdot q_u} \quad (12)$$

Onde:

R_e : resistência da ligação;

M_{np} : momento de plastificação do prego;

q_u : carregamento último.

Sendo $q_u = f_e \cdot d$ obtemos a Equação 13.

$$R = \sqrt{2M_{np} \cdot f_e \cdot d} \quad (13)$$

De acordo com a teoria da plasticidade, o momento de plastificação de uma seção circular é dado por $M_y = (f_y \cdot d^3)/6$. Substituindo esse valor de $M_y = M_{np}$, (Equação 14).

$$R = 0,6d^2 \sqrt{f_y f_e} \quad (14)$$

A resistência obtida por Moller (1951) é semelhante à usada por Stoy (1943) apud Almeida (1987), que fornece a resistência admissível da ligação para pregos solicitados por corte simples (Equação 15).

$$R_{adm} = 0,8d^2 \sqrt{\sigma_{s,adm} \cdot \sigma_{w,adm}} \quad (15)$$

Onde:

$\sigma_{s,adm}$: é a tensão admissível de tração do prego;

$\sigma_{w,adm}$: é a tensão admissível de compressão da madeira.

No dimensionamento de ligações por pinos metálicos entre elementos estruturais de madeira são considerados basicamente dois modos de ruptura: flexão do pino metálico ou embutimento do pino na madeira.

Então, para realização do dimensionamento das ligações em estruturas de madeira, torna-se necessário o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira, como por exemplo, a resistência ao embutimento e à compressão, ambas nas direções paralela e normal em relação às fibras da madeira, além da resistência ao escoamento do aço do pino metálico.

2.4 Resistência da Madeira ao Embutimento

A seguir serão apresentados os critérios para a determinação da resistência da madeira ao embutimento. Os critérios serão mostrados através de duas formas: pela determinação de ensaios mecânicos e pela utilização de equações para determinar seu valor na ausência desses ensaios.

2.4.1 Critério da ABNT NBR7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira

A resistência da madeira ao embutimento é definido pela ABNT NBR7190:1997 como a razão entre a força F_e que causa a deformação específica residual de 2‰ e área de embutimento do pino $A_e = t \times d$, onde t é a espessura da peça de madeira e d é o diâmetro do pino metálico, conforme mostrado na Equação 16.

$$f_e = \frac{F_{e2\%}}{t \cdot d} \quad (16)$$

A resistência de embutimento varia de acordo com a orientação das fibras. Portanto, a norma brasileira estabelece que seja determinado a resistência de embutimento paralela (f_{e0}) e normal (f_{e90}) às fibras à partir dos ensaios especificados no anexo B.17.

Caso não seja possível a realização desses ensaios, a determinação da resistência da madeira ao embutimento pode ser calculada com base na resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), conforme as Equações 17 e 18.

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (17)$$

$$f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_e \quad (18)$$

O parâmetro α_e serve para levar em consideração o efeito da dimensão do parafuso na compressão normal às fibras da madeira. Os valores de α_e são apresentados na Tabela 1 em função do diâmetro do pino.

Tabela 1: Valores de α_e para diferentes diâmetros de pinos. Fonte: ABNT NBR7190: 1997.

d (cm)	≤ 0,62	0,95	1,25	1,6	1,9	2,2	2,5	3,1	3,8	4,4	5,0	≥ 7,5
α_e	2,5	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,0

Para se calcular resistência da madeira ao embutimento em qualquer direção ($f_{e\alpha}$) inclinada de um ângulo α em relação às fibras a ABNT NBR7190:1997 recomenda que seja utilizada a equação de Hankinson, conforme mostrado na Equação 19.

$$f_{e\alpha} = \frac{f_{e0} \cdot f_{e90}}{f_{e0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{e90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (19)$$

2.4.2 Critério do EUROCODE 5:2004 - Design of Timber Structures

A resistência da madeira ao embutimento segundo EUROCODE 5:2004 é definida de forma experimental pelo documento normativo EN 383:2007 - Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. Esse documento define que a resistência da madeira ao embutimento (f_e) é igual ao valor da máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que provoca um descolamento relativo de 5mm entre o pino metálico e o corpo de prova (F_{5mm}), dividida pelo produto entre o diâmetro do parafuso (d) e a espessura da peça (t), conforme a Equação 20.

$$f_e = \frac{F_{m\acute{a}x} \text{ ou } F_{5mm}}{t \cdot d} \quad (20)$$

A confecção dos corpos de prova assim como os demais detalhes do ensaio podem ser verificados na norma EN 383:2007.

O EUROCODE 5:2004 apresenta expressões para a determinação da resistência ao embutimento, denominada f_h , limitada a parafusos com diâmetros menores ou iguais a 30 mm. A resistência ao embutimento na direção paralela às fibras é calculada através da densidade aparente característica (ρ_k) e do diâmetro do pino metálico (d), conforme a Equação 21.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (21)$$

Para qualquer outro ângulo α , a resistência ao embutimento pode ser calculada através da Equação 22.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (22)$$

Os valores de k_{90} são calculados para madeiras macias (menos densas) e duras (mais densas) em função do diâmetro do pino metálico, conforme mostrado nas Equações 23 e 24.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (23)$$

$$k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad (24)$$

2.4.3 Critério da LRFD:1996 - Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC)

O documento normativo LRFD:1996 apresenta os valores de resistência ao embutimento para algumas espécies de madeira dos Estados Unidos em seu suplemento sobre ligações. Esses valores são calculados de acordo com as equações utilizadas no documento normativo NDS:2001 - American National Design and Specification for Wood Construction.

Para o cálculo da resistência ao embutimento tanto na direção paralela (f_{e0}) como na direção normal (f_{e90}) às fibras é levado em conta a densidade aparente da madeira (ρ) e diâmetro do pino metálico, conforme as Equações 25 e 26.

$$f_{e0} = 0,07725 \cdot \rho \quad (25)$$

$$f_{e90} = 212 \cdot (0,001 \cdot \rho)^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (26)$$

Para estimar a resistência ao embutimento da madeira de forma experimental deve-se seguir o indicado no documento normativo ASTM D5764:2007. A resistência ao embutimento é determinada a partir do quociente entre a força que causa um deslocamento residual de 5% em relação ao diâmetro do pino, e a área resistente ao embutimento dada pelo produto entre a espessura (t) e o diâmetro do pino metálico (d), conforme a Equação 27.

$$f_e = \frac{F_{e5\%}}{t \cdot d} \quad (27)$$

Os detalhes do ensaio e do corpo de prova podem ser verificados no documento normativo ASTM D5764:2007.

2.5 Critérios de Dimensionamento

A seguir serão apresentados os critérios de dimensionamento para as ligações com pinos metálicos de acordo com os seguintes documentos normativos: brasileiro (ABNT NBR 7190: 1982/1997), europeu (EUROCODE 5: 2004), australiano (AS: 1994) e americano (LRFD:1996).

2.5.1 ABNT NBR7190: 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira

Segundo a norma brasileira de madeira, a ligação por pinos metálicos deve ser verificada a partir de duas situações para o dimensionamento da ligação em uma seção de corte: resistência ao embutimento da madeira (f_e) das peças interligadas, levando em conta suas espessuras (Figura 5) e a resistência de escoamento do pino metálico (f_{yd}), levando em conta o seu diâmetro.

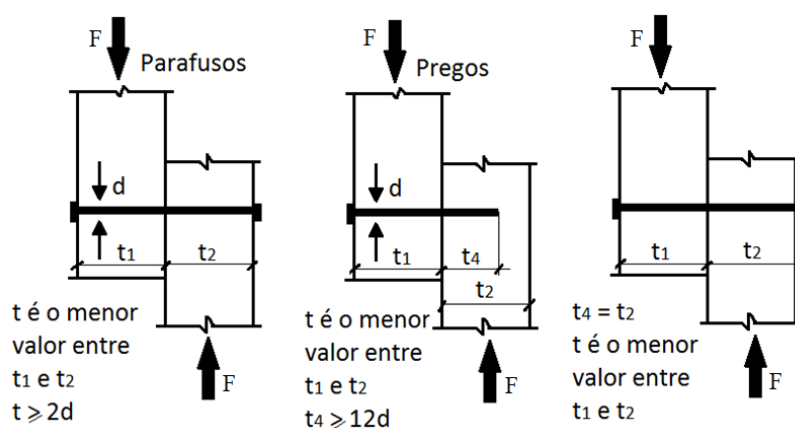


Figura 5: Ligações com uma seção de corte. Fonte: ABNT NBR7190: 1997 (Adaptada).

A relação entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino é dada pelo parâmetro β (Equação 28).

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (28)$$

A obtenção da resistência da ligação por pinos metálicos é calculada em função do parâmetro β da ligação, comparando-o com o parâmetro β_{lim} (Equação 29). Esta comparação determinará o modo de ruptura mais provável a ocorrer na ligação. O mesmo critério de obtenção da resistência da ligação é válido tanto para pregos como para parafusos.

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\alpha,d}}} = 1,25 \sqrt{\frac{\frac{f_{yk}}{\gamma_s}}{f_{e\alpha,d}}} \quad (29)$$

Onde:

f_{yd} : é o valor de cálculo da tensão de escoamento do pino metálico;

$f_{e\alpha,d}$: é o valor de cálculo da resistência da madeira ao embutimento;

f_{yk} : é o valor característico da tensão de escoamento do pino metálico;

γ_s : coeficiente de segurança adotado igual a 1,1.

Como já mostrado anteriormente, a resistência de cálculo da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras e na direção normal podem ser estimadas pelas Equações 17 e 18.

Comparando os valores de β e β_{lim} , pode-se determinar a resistência de um pino metálico correspondente a uma seção de corte ($R_{vd,1}$), de acordo com os modos de ruptura que podem ocorrer na ligação: embutimento da madeira ou flexão do pino metálico.

Para o caso em que $\beta \leq \beta_{lim}$ o modo de ruptura da ligação será o embutimento do pino metálico na madeira, podendo a resistência de uma seção de corte ser determinada pela Equação 30.

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{e\alpha,d} \quad (30)$$

Substituindo o valor de β dado pela Equação 28, obtém-se a Equação 31:

$$R_{vd,1} = 0,40 \cdot f_{\text{exd}} \cdot t \cdot d \quad (31)$$

Para o caso em que $\beta > \beta_{\text{lim}}$ o modo de ruptura da ligação será a flexão do pino metálico, podendo a resistência de uma seção de corte ser determinada pela Equação 32.

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{\text{lim}}} \cdot f_{yd} \quad (32)$$

A ABNT NBR7190: 1997 apresenta a mesma formulação para a ligação em corte simples ou em corte duplo. A Figura 6 mostra a espessura para ligações com duas seções de corte, considerando-se t como o menor dos valores entre t_1 e $t_2/2$ em uma das seções, e entre $t_2/2$ e t_3 na outra seção.

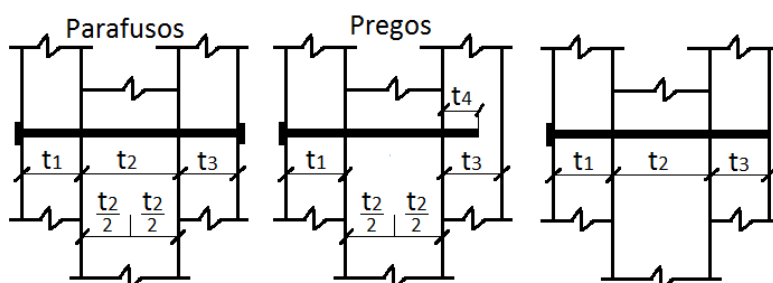


Figura 6: Ligações com duas seções de corte. Fonte: ABNT NBR7190: 1997 (Adaptada).

2.5.2 ABNT NBR7190: 1982 - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira

De acordo com a norma ANBT NBR7190: 1982, a força admissível em um parafuso no caso da força aplicada na direção paralela e normal às fibras, eram dadas, respectivamente, pelas Equações 33 e 34.

$$\bar{F} = 0,8 \cdot \bar{\sigma}_p \cdot \omega \cdot b \cdot \delta \quad (33)$$

$$\bar{F}_n = \bar{\sigma}_n \cdot \omega \cdot \eta \cdot b \cdot \delta \quad (34)$$

Onde:

σ_p : é a tensão básica de compressão paralela às fibras da madeira;

σ_n : é a tensão básica de compressão normal às fibras da madeira;

b : é a largura da peça central da ligação (não são considerados valores de b superiores ao dobro da largura da peça lateral com menor espessura).

δ : é o diâmetro do pino metálico

η : é o coeficiente apresentado como α_e na Tabela 1.

O parâmetro ω é calculado em função de ω' pelo qual se classifica a ligação em relação a rigidez. A ligação é considerada rígida se $\omega' \geq 100$, semi-rígida se $100 > \omega' > 33,3$ e flexível se $\omega' \leq 33,3$. Para o caso das forças aplicadas na direção paralela e normal às fibras, respectivamente, ω' é calculado conforme as Equações 35 e 36.

$$\omega' = 59 \cdot \frac{\sigma_e}{\sigma_p} \cdot \frac{\delta^2}{b^2} \quad (35)$$

$$\omega' = 26,2 \cdot \frac{\sigma_e}{\sigma_n} \cdot \frac{\delta^2}{b^2} \quad (36)$$

Onde:

σ_e : é a tensão no limite de escoamento do aço do parafuso;

As Equações 37 e 38 mostram o cálculo do coeficiente ω em função de ω' .

$$\omega = 0,226 + 0,0063 \cdot \omega' + 0,0000575\omega'^2 \quad \text{quando } \omega' \leq 33,3 \quad (37)$$

$$\omega = 0,25 + 0,0075 \cdot \omega' \quad \text{quando } \omega' \geq 33,3 \quad (38)$$

No caso em que a ligação é definida como rígida ou semirrígida não se utilizam valores superiores a 1 para o ω .

Os valores de $\bar{\sigma}_p$ e $\bar{\sigma}_n$ são iguais a 18% e a 4,5% do valor médio da resistência da madeira na compressão paralela às fibras (σ_c), respectivamente. O valor da resistência a compressão paralela às fibras era calculado para a umidade acima do ponto de saturação das fibras.

Caso se deseje aplicar a força em outras direções, o valor da resistência pode ser calculado através da Equação de Hankinson.

2.5.3 EUROCODE 5: 2004 - Design of Timber Structures

O EUROCODE 5: 2004 apresenta uma formulação para cada seção de corte tanto para pregos quanto para parafusos. Para uma seção de corte, a norma europeia sugere a análise de seis diferentes tipos de ruptura para a ligação (Figura 7).

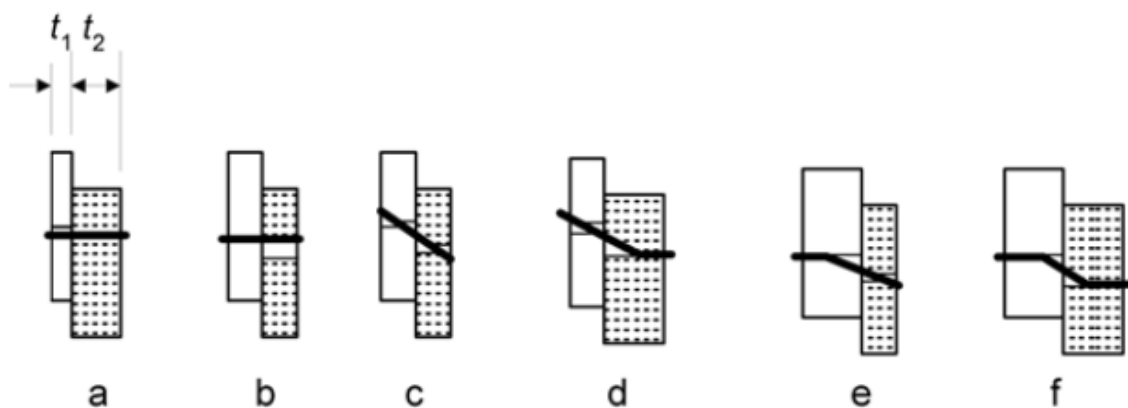


Figura 7: Modos de ruptura para uma seção de corte. Fonte: EUROCODE 5: 2004.

A partir da Figura 7, tem-se que: os modos de ruptura (a) e (b) representam a falha da ligação por embutimento do pino metálico em uma das duas peças de madeira; o modo de ruptura (c) representa a falha por embutimento simultâneo do pino metálico nas duas peças de madeira; os modos de ruptura (d) e (e) representam a falha da ligação por flexão do pino metálico, causado em uma das duas peças de madeira; o modo de ruptura (f) representa a falha por flexão simultânea do pino metálico, causada pelas duas peças de madeira.

Como o valor característico de resistência de um pino metálico por plano de corte, o EUROCODE 5: 2004 determina o menor valor entre as relações contidas na Equação 39.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (a)} \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \text{ (b)} \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \cdot \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (c)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (d)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (e)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (f)} \end{array} \right. \quad (39)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$: é o valor característico de resistência de um parafuso, em MPa;

t_1 e t_2 : espessura da madeira ou a penetração do pino nesta, em mm;

$f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$: são os valores característicos da resistência ao embutimento para espessura t_1 e t_2 , em MPa;

β : é a razão entre $f_{h,2,k}$ e $f_{h,1,k}$, adimensional;

$M_{y,Rk}$: é o valor característico do momento de escoamento do pino.

$F_{ax,Rk}$: é o valor característico de resistência ao arrancamento do pino.

O valor característico do momento de escoamento do pino metálico é calculado pela Equação 40.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (40)$$

Onde:

$f_{u,k}$: é a resistência a última a tração do aço.

Para duas seções de corte, a norma europeia sugere quatro modos de ruptura para a ligação (Figura 8).

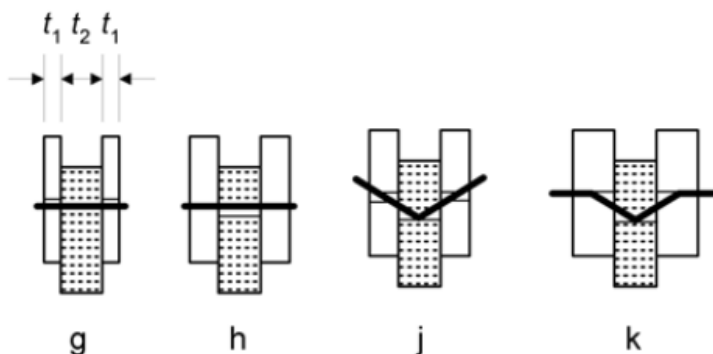


Figura 8: Modos de ruptura para duas seções de corte. Fonte: EUROCODE 5: 2004.

Neste ponto é importante destacar a diferença existente entre o EUROCODE 5:2004 e a ABNT NBR7190: 1997 no tocante à espessura da peça central. O Eurocode admite a espessura total da peça central enquanto que a norma brasileira usa a metade da espessura. Em termos da resistência, as equações do Eurocode fornecem os valores por parafuso, e a norma brasileira por plano de corte.

A partir da análise dos modelos da Figura 8, tem-se: os modos de ruptura (g) e (h) representam a falha da ligação por embutimento na madeira exterior e interior, respectivamente; os modos (j) e (k) representam a falha da ligação por flexão do pino metálico, causado pela madeira exterior e interior, respectivamente.

Como valor característico de resistência de um pino metálico, o EUROCODE 5: 2004 determina o menor valor entre as relações contidas na Equação 41.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (g) \\ 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta \quad (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (k) \end{array} \right. \quad (41)$$

O EUROCODE 5: 2004 apresenta uma formulação para o caso de cobrejuntas metálicas. Para o caso de uma e duas seções de corte, a norma europeia sugere a análise por diferentes tipos de ruptura para a ligação (Figura 9).

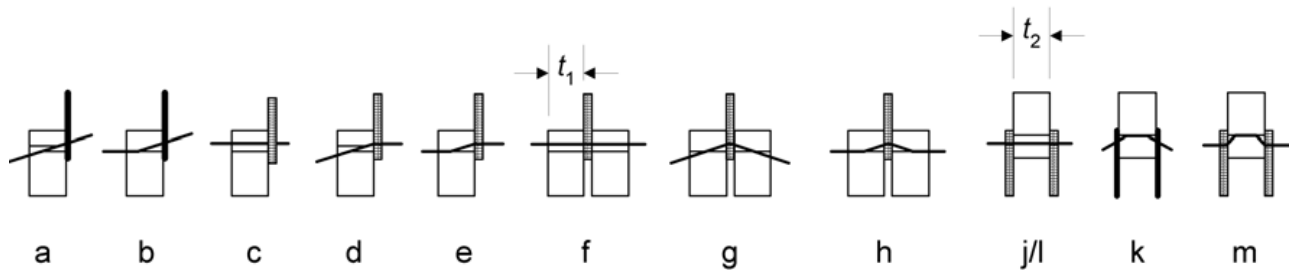


Figura 9: Modos de ruptura para uma e duas seções de corte com cobrejuntas metálicas. Fonte: EUROCODE 5: 2004.

De acordo com o EUROCODE 5: 2004, as cobrejuntas metálicas com espessura inferior ou igual a $0,5 \cdot d$ são classificadas como finas. Entretanto, as cobrejuntas classificadas como grossas possuem espessuras maiores ou iguais a d com tolerância de $0,1d$, sendo d o diâmetro do pino metálico. Para outros valores a resistência característica dos conectores é calculada através de interpolação linear entre os valores limites das placas finas e grossas

Como valor característico de resistência de um pino metálico, o EUROCODE 5: 2004 determina para uma cobrejunta metálica com espessura fina, para uma seção de corte, o menor valor entre as relações contidas na Equação 42.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (a)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \text{ (b)} \end{array} \right. \quad (42)$$

Para uma cobrejunta metálica com espessura grossa, para uma seção de corte, o valor característico de resistência é dado como o menor valor entre as relações contidas na Equação 43.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (c)} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \text{ (d)} \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (e)} \end{array} \right. \quad (43)$$

Para uma cobrejunta metálica com qualquer espessura em que esta esteja como peça central, para duas seções de corte, o valor característico de resistência é dado como o menor valor entre as relações contidas na Equação 44.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (g) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (h) \end{array} \right. \quad (44)$$

Para uma cobrejunta metálica como membro exterior de espessura fina, para duas seções de corte, o valor característico de resistência é dado como o menor valor entre as relações contidas na Equação 45.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (j) \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (k) \end{array} \right. \quad (45)$$

Para uma cobrejunta metálica como membro exterior com espessura grossa, para duas seções de corte, o valor característico de resistência é dado como o menor valor entre as relações contidas na Equação 46.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (l) \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (m) \end{array} \right. \quad (46)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$: é o valor característico de resistência de um parafuso, em MPa;

$f_{h,k}$: é o valor característico da resistência ao embutimento para espessura t_1 e t_2 , em MPa;

t_1 : espessura da madeira ou a penetração do pino nesta, em mm;

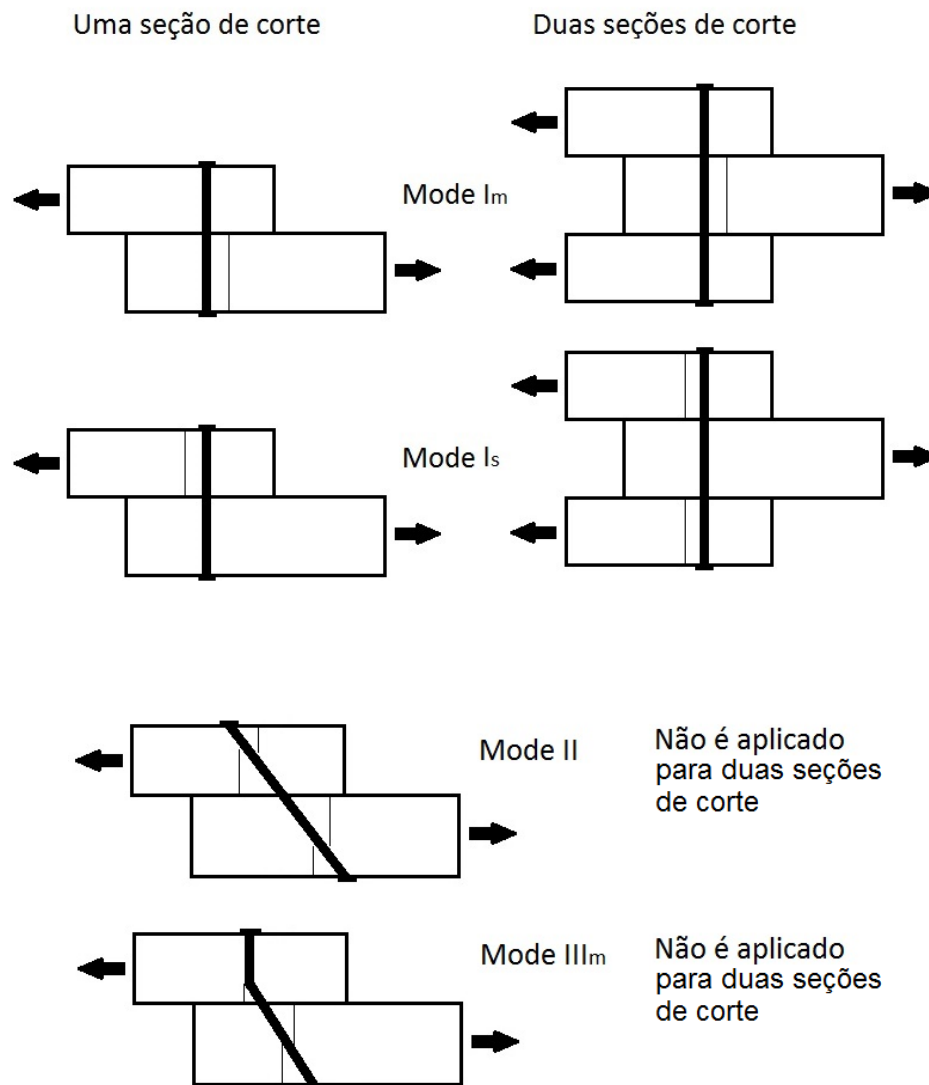
t_2 : espessura da madeira no elemento central, em mm;

d : diâmetro do pino metálico.

$M_{y,Rk}$: é o valor característico do momento de escoamento do pino.

2.5.4 LRFD:1996 - Load and Resistance Factor Design (AFPA & AWC)

Os modos de ruptura dos pinos metálicos (pregos e parafusos) segundo o documento normativo LRFD:1996 (American Forest & Paper Association e American Wood Council) são apresentados na Figura 10.



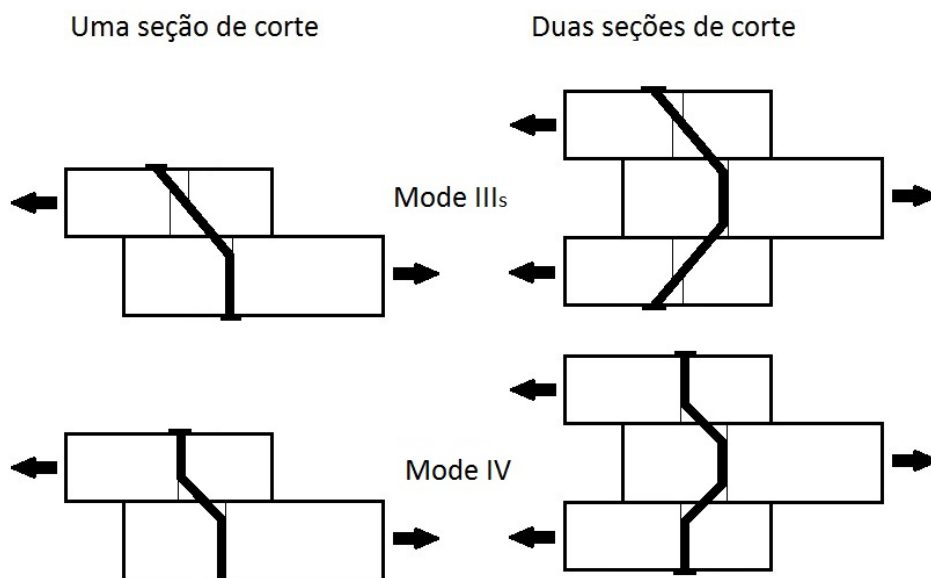


Figura 10. Modos modos de ruptura dos pinos metálicos (pregos e parafusos) segundo o LRFD:1996 (Adaptada).

Para ligações de duas peças de madeira com um prego com uma seção de corte a LRFD:1996 determina que a resistência da ligação seja o menor valor encontrado entre as Equações 47 e 50 (Tabela 2).

Tabela 2: Resistência da ligação com pregos com uma seção de corte de acordo com quatro modos de ruptura.

Fonte: LRFD:1996.

Modos de Ruptura	Equações
I_s	$Z = \frac{3,3 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{es}}{K_d}$ Equação 47
III_m	$Z = \frac{3,3 \cdot k_1 \cdot d \cdot p \cdot F_{em}}{K_d \cdot (1 + 2 \cdot R_e)}$ Equação 48
III_s	$Z = \frac{3,3 \cdot k_2 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{em}}{K_d \cdot (2 + R_e)}$ Equação 49
IV	$Z = \frac{3,3 \cdot d^2}{K_d} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_{em} \cdot F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$ Equação 50

Onde:

Z = resistência da ligação;

F_{em} = resistência ao embutimento da peça de madeira principal da ligação;

F_{es} = resistência ao embutimento da peça de madeira secundário da ligação (cobrejunta);

t_s = espessura da peça de madeira secundária (cobrejunta);

d = diâmetro do pino;

$R_e = F_{em} / F_{es}$;

p = ponto de penetração do prego;

$K_d = 2,2$ para $d \leq 0,17''$ (4,3 mm); $10d + 0,5$ para $0,17'' < d < 0,25''$ (4,3mm < d < 6,4 mm); 3 para $\geq 0,25''$ (6,4 mm).

$$k_1 = (-1) + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot p^2}}$$

$$k_2 = (-1) + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (2 + R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot t_s^2}}$$

Para ligações parafusadas entre duas peças de madeira com uma seção de corte a LRFD:1996 determina que a resistência da ligação seja o menor valor encontrado entre as Equações 51 e 56 (Tabela 3).

Tabela 3: Resistência da ligação com parafusos com uma seção de corte de acordo com seis modos de ruptura.

Fonte: LRFD: 1996.

Modos de Ruptura	Equações	
I_m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{K_\theta}$	Equação 51
I_s	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{es}}{K_\theta}$	Equação 52
II	$Z = \frac{0,93 \cdot k_1 \cdot d \cdot F_{es}}{K_\theta}$	Equação 53
III_m	$Z = \frac{1,04 \cdot k_2 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{(1 + 2 \cdot R_e) K_\theta}$	Equação 54
III_s	$Z = \frac{1,04 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e) K_\theta}$	Equação 55
IV	$Z = \left(\frac{1,04 \cdot d^2}{K_\theta} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_{em} \cdot F_{yb}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$	Equação 56

Onde:

$$K_{\theta} = 1 + 0,25 (\theta/90^{\circ})$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{R_e + 2 \cdot R_e^2 \cdot (1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 \cdot R_e^3 - R_e \cdot (1 + R_t)}}{(1 + R_e)}$$

$$k_2 = (-1) + \sqrt{2 \cdot (1 + R_e) + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (1 + 2 \cdot R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot t_m^2}}$$

$$k_3 = (-1) + \sqrt{\frac{2 \cdot (1 + R_e)}{R_e} + \frac{2 \cdot F_{yb} \cdot (2 + R_e) \cdot d^2}{3 \cdot F_{em} \cdot t_s^2}}$$

$$R_t = t_m / t_s;$$

t_m = espessura da peça de madeira principal.

F_{yb} = é a tensão de escoamento do pino metálico;

Para ligações parafusadas entre três peças de madeira com duas seções de corte a LRFD:1996 determina que a resistência da ligação seja o menor valor encontrado entre as Equações 57 e 60 (Tabela 4).

Tabela 4: Resistência da ligação com parafusos com duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura.

Fonte: LRFD:1996.

Modos de Ruptura	Equações	
I_m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot F_{em}}{K_{\theta}}$	Equação 57
I_s	$Z = \frac{1,66 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{es}}{K_{\theta}}$	Equação 58
III_s	$Z = \frac{2,08 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot F_{em}}{(2 + R_e) \cdot K_{\theta}}$	Equação 59
IV	$Z = \left(\frac{2,08 \cdot d^2}{K_{\theta}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_{em} \cdot F_{yb}}{3 \cdot (1 + R_e)}}$	Equação 60

A norma americana LRFD:1996 ainda aplica uma correção da resistência da ligação Z caso está não esteja de acordo com os espaçamentos e penetração adequada do pino na madeira. Esses ajustes são dados em função de fatores com temperatura, profundidade de penetração do pino na madeira, número de pinos utilizados na ligação, e outros, são encontrados na seção 2.6 da norma americana. Para efeito de comparação com a norma ABNT NBR7190:1997 esses ajustes não serão considerados.

2.5.5 AS: 1994 – Timber Structures - Part 1 - Design methods

O documento normativo australiano AS: 1994 apresenta uma formulação genérica para o dimensionamento da ligação para vários tipos de conectores metálicos (pregos, parafusos e anéis). Primeiramente realiza-se o dimensionamento da resistência para apenas um conector de acordo com Equação 61.

$$q = k \cdot Q_k \quad (61)$$

Onde:

q = resistência de um pino;

k = produto entre os coeficientes de modificação de acordo com os tipos de conectores;

Q_k = resistência característica relacionada ao tipo de conector (valor tabelado na própria norma em função da espécie da madeira).

Para dimensionar a resistência da ligação utiliza-se a Equação 62.

$$Q = k_{17} \cdot n \cdot q \quad (62)$$

Onde:

Q = resistência da ligação;

n = número de conectores utilizados na ligação;

k_{17} = coeficientes de modificação para ligações realizadas com vários conectores (valor tabelado na própria norma conforme o número de parafusos).

A resistência da ligação em estruturas de madeira deve ser realizada para satisfazer o estado limite de tensão (Equação 63).

$$\phi \cdot Q = S^* \quad (63)$$

Onde:

ϕ = fator de resistência referente ao tipo de conector;

Q = resistência de uma ligação referente ao modo de ruptura;

S^* = efeito da ação de momentos fletores, cargas axiais e forças de cisalhamento produzidas pelas cargas de projeto para estados limites conforme especificado em AS 1170.1.

A norma AS: 1994 apresenta dois tipos de ligações pregadas, sendo a diferenciação entre elas ocasionada de acordo com o tipo de solicitação no prego. A ligação Tipo 1 é aquela onde o prego recebe uma carga cisalhante (Figura 11), por sua vez, na ligação Tipo 2 o prego é solicitado ao arrancamento (Figura 12).

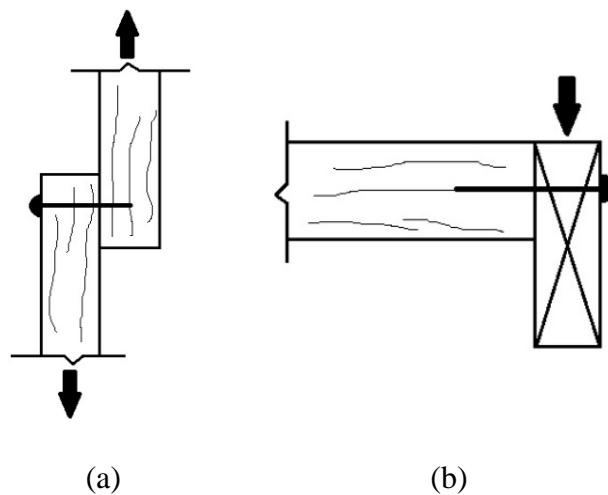


Figura 11. Pregos solicitados ao cisalhamento em (a) ligações de peças lado-a-lado e (b) ligações de topo.

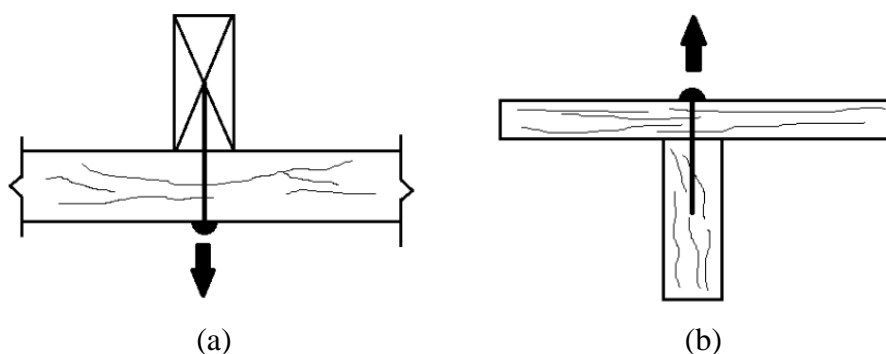


Figura 12. Pregos solicitados ao arrancamento em (a) ligações de peças lado-a-lado e (b) ligações de topo.

A resistência de ligações para um prego do Tipo 1 são determinadas pela Equação 64.

$$q = k_1 \cdot k_{13} \cdot k_{14} \cdot k_{16} \cdot Q_k \quad (64)$$

Onde:

k_1 = coeficiente relacionado à duração da carga;

$k_{13} = 1$ para pregos ligando duas peças de madeira com a mesma direção das fibras; 0,6 para pregos ligando duas peças de topo;

$k_{14} = 1$ para pregos em uma seção de corte; 2 para pregos em duas seções de corte.

$k_{16} = 1,2$ para pregos utilizados em compensados; caso contrário o valor adotado deve ser 1.

A resistência de ligações para um prego do Tipo 2 são determinadas pela Equação 65.

$$q = k_{13} \cdot l_p \cdot Q_k \quad (65)$$

Onde:

$k_{13} = 1$ para arrancamento do prego em peças ligadas lado-a-lado; 0,25 para o arrancamento do prego em peças ligadas de topo.

l_p = comprimento de penetração do prego na madeira.

A norma AS: 1994 apresenta dois tipos de ligações parafusadas, com carregamento paralelo (Figura 13) e perpendicular (Figura 14) às fibras.

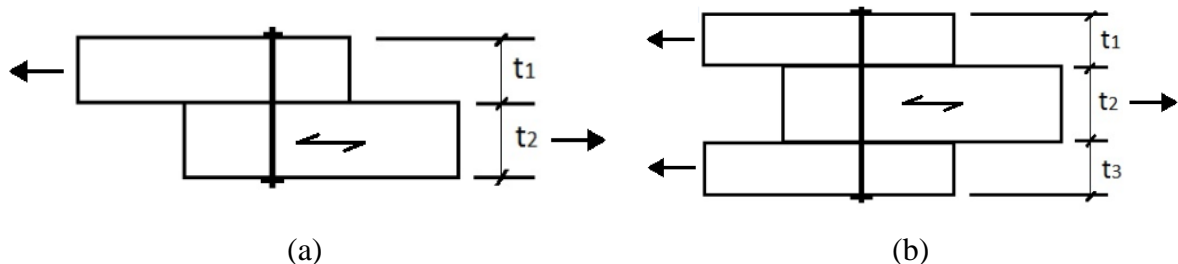


Figura 13. (a) e (b) Parafusos em ligações com carregamentos na direção paralela às fibras segundo AS:1994(Adaptada).

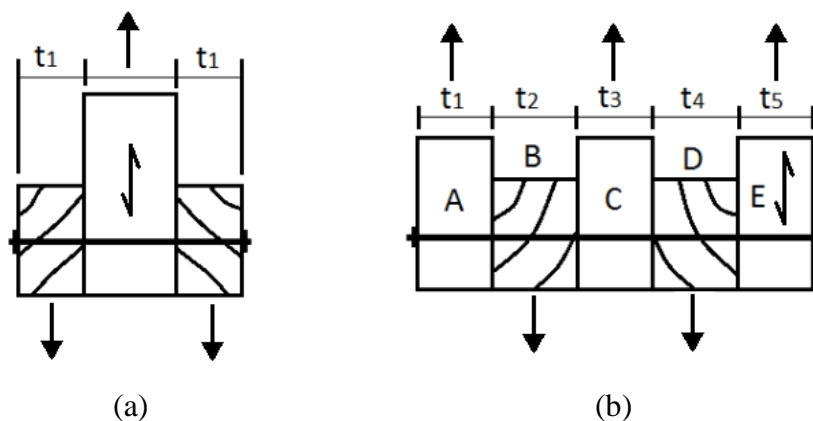


Figura 14. (a) e (b) Parafusos em ligações com carregamentos na direção normal às fibras segundo AS:1994(Adaptada).

A resistência das ligações com um único parafuso agindo em um ou dois planos de corte, carregadas nas direções paralela e perpendicular, para vários diâmetros de parafusos e espessuras efetivas da madeira levando em consideração madeira tratada e não tratada, pode ser encontrada na AS: 1994.

A resistência de ligações parafusadas carregadas lateralmente com apenas um parafuso ou então com um conjunto de parafusos pode ser determinada pela Equação 66.

$$q = k_1 \cdot k_{16} \cdot Q_{sk} \quad (66)$$

Onde:

k_1 = coeficiente relacionado à duração do carregamento da estrutura. Para carregamentos à longo prazo (5 anos) é utilizado o valor de 0,69; para carregamentos permanentes (50 anos) é utilizado o valor de 0,57.

$k_{16} = 1,2$ para parafusos que transferem cargas através de chapas metálicas (o parafuso transfere a carga para a chapa metálica, respeitando os espaçamentos indicados na norma); 1 para casos contrários;

Q_{sk} = valores tabelados por espécies e pelas resistências características derivadas das direções entre a carga aplicada na ligação e as direções das fibras da madeira (Q_{skp} para direção paralela às fibras; Q_{skl} para a direção normal às fibras) .

Para determinação da resistência das ligações pregadas e parafusadas utiliza-se a Equação 62.

As Tabelas 5 e 6 foram retiradas da norma AS: 1994. Elas fornecem os valores da resistência característica para a solicitação paralela e normal às fibras, respectivamente, em função do grupo de ligações, da espessura da peça central e do diâmetro do pino.

Tabela 5: Valor da Resistência Característica, Q_{kl} (N) para a direção paralela às fibras. Fonte: AS: 1994.

Grupo (Joint)	Espessura (mm)	Resistência Característica Q_{kl} (N)								
		Diâmetro(mm)								
		6	8	10	12	16	20	24	30	36
JD1	40	4100	7400	11500	16500	22200	27600	33000	41500	49900
	50	4100	7400	11500	16500	27600	34700	41500	51900	62300
	70	4100	7400	11500	16500	29300	45500	58000	74100	87600
	85	4100	7400	11500	16500	29300	45500	65700	87600	105800
	100	4100	7400	11500	16500	29300	45500	65700	101100	124700
JD2	20	3300	4400	5600	6700	8800	11100	13500	16900	19900
	30	3500	6200	8400	10100	13500	16900	19900	24900	30000
	40	3500	6200	9800	13500	17900	22200	26600	33400	40100
	50	3500	6200	9800	14200	22200	28000	33400	41800	50200
	70	3500	6200	9800	14200	24900	39100	46800	58300	70800
	85	3500	6200	9800	14200	24900	39100	55900	71800	84300
	100	3500	6200	9800	14200	24900	39100	55900	84300	101100
JD3	20	2600	3500	4400	5300	7100	8800	10400	13100	15800
	30	3200	5300	6600	7800	10400	13100	15800	19900	23600
	40	3200	5600	8800	10400	14200	17500	20900	26300	31700
	50	3200	5600	8800	12500	17500	21900	26300	33000	39400
	70	3200	5600	8800	12500	22600	30700	36700	46200	55300
	85	3200	5600	8800	12500	22600	35000	44800	55900	67100
	100	3200	5600	8800	12500	22600	35000	50600	65700	77500
JD4	20	2100	2800	3500	4200	5700	7100	8400	10800	12800
	30	2600	4200	5300	6400	8400	10800	12800	15800	19200
	40	2600	4500	7100	8400	11500	14200	16900	21200	25600
	50	2600	4500	7100	10100	14200	17900	21200	26600	32000
	70	2600	4500	7100	10100	18200	24900	29700	37100	44500
	85	2600	4500	7100	10100	18200	28300	36100	45200	54300
	100	2600	4500	7100	10100	18200	28300	40800	53200	63700
JD5	20	1690	2200	2800	3400	4500	5600	6700	8400	10100
	30	2200	3400	4200	5000	6700	8400	10100	12500	15200
	40	2200	3900	5600	6700	9100	11100	13500	16900	20200
	50	2200	3900	6200	8400	11100	14200	16900	20900	25300
	70	2200	3900	6200	8800	15500	19500	23600	29300	35400
	85	2200	3900	6200	8800	15800	23900	28600	35700	42800
	100	2200	3900	6200	8800	15800	24600	33700	42100	50200
JD6	20	1350	1790	2200	2700	3600	4400	5300	6700	8100
	30	1920	2700	3300	4000	5300	6700	8100	10100	12100
	40	1920	3400	4400	5300	7100	8800	10800	13500	16200
	50	1920	3400	5300	6700	8800	11100	13500	16900	19900
	70	1920	3400	5300	7800	12500	15500	18500	23300	28000
	85	1920	3400	5300	7800	13800	18900	22600	28300	34000
	100	1920	3400	5300	7800	13800	21200	26600	33400	40100

Tabela 6: Valor da Resistência Característica, Q_{kp} (N) para a direção normal às fibras. Fonte: AS: 1994.

Grupo (Joint)	Espessura (mm)	Resistência Característica Q_{kp} (N)								
		Diâmetro(mm)								
		6	8	10	12	16	20	24	30	36
JD1	50	4300	5900	7400	8800	11800	14800	17500	21900	26300
	70	4300	6600	9400	12100	16500	20600	24600	30700	37100
	85	4300	6600	9400	12100	18900	24900	30000	37400	44800
	100	4300	6600	9400	12100	18900	26300	34400	44100	52900
JD2	20	1350	1820	2300	2700	3600	4500	5400	6700	8100
	30	2000	2700	3400	4100	5400	6700	8100	10100	12100
	40	2700	3600	4500	5400	7100	9100	10800	13500	16200
	50	3400	4500	5700	6700	12500	11500	13500	16900	20200
	70	4000	6100	7800	9400	12800	15800	18900	23600	28300
	85	4000	6100	8400	11100	15500	19200	22900	28600	34700
	100	4000	6100	8400	11100	17200	22600	27000	34000	40800
JD3	20	1010	1350	1690	2000	2700	3400	4000	5100	6100
	30	1520	2000	2500	3000	4000	5100	6100	7800	9100
	40	2000	2700	3400	4000	5400	6700	8100	10100	12100
	50	2500	3400	4200	5100	6700	9400	10100	12800	15200
	70	3500	4700	5900	7100	9400	11800	14200	17900	21200
	85	3700	5700	7100	8800	11500	14500	17200	21600	26000
	100	3700	5700	8100	10100	13500	16900	20200	25300	30300
JD4	20	740	1010	1250	1480	1990	2500	3000	3700	4500
	30	1110	1480	1890	2300	3000	3700	4500	5600	6700
	40	1480	1990	2500	3000	4000	5000	6000	7400	9100
	50	1890	2500	3100	3700	5000	6200	7400	9400	11100
	70	2600	3500	4400	5200	7100	8800	10400	13100	15800
	85	3100	4200	5300	6400	8400	10400	12800	15800	19200
	100	3100	4800	6200	7400	10100	12500	14800	18900	22600
JD5	20	530	710	880	1040	1420	1750	2100	2600	3200
	30	780	1040	1310	1580	2100	2600	3200	3900	4700
	40	1040	1420	1750	2100	2800	3500	4400	5300	6300
	50	1310	1750	2200	2600	3500	4400	5300	6600	7800
	70	1850	2500	3100	3700	4900	6100	7400	9100	11100
	85	2200	3000	3700	4500	6000	7400	9100	11100	13500
	100	2600	3500	4400	5300	7100	8800	10400	13100	15800
JD6	20	360	490	610	740	980	1210	1450	1820	2200
	30	550	740	910	1080	1450	1820	2200	2700	3300
	40	740	980	1210	1450	1950	2400	2900	3600	4400
	50	910	1210	1520	1820	2400	3000	3600	4500	5500
	70	1280	1690	2100	2600	3400	4200	5100	6400	7800
	85	1550	2100	2600	3100	4100	5200	6200	7800	9400
	100	1820	2400	3000	3600	4900	6100	7400	9100	10800

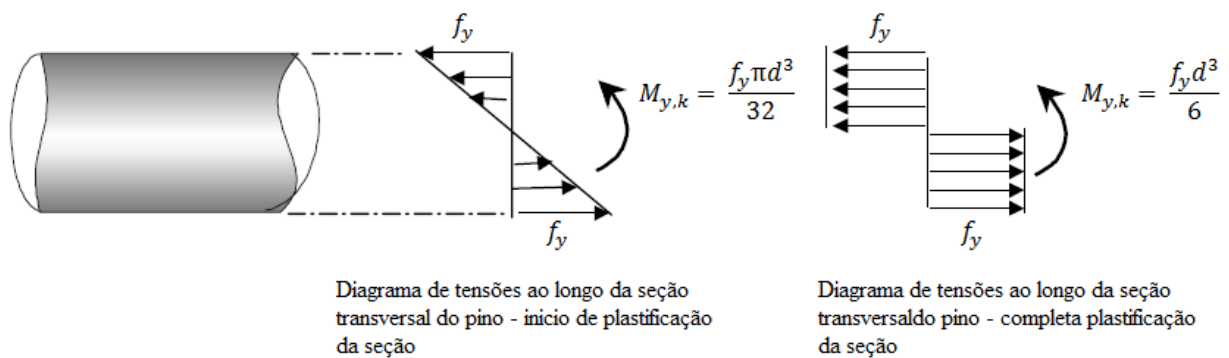
2.6 Trabalhos Técnico-Científicos a Respeito de Ligações com Pinos Metálicos

Veloso et al. (2000) investigaram através do Método dos Elementos Finitos (MEF) o comportamento de ligações mecânicas com pinos de aço em peças de madeira com base no documento normativo ABNT NBR7190: 1997 para verificação das hipóteses lançadas por Almeida (1990), para o cálculo das cargas de primeiro e segundo limite da ligação. Durante a pesquisa as simulações foram realizadas em corpos-de-prova onde o carregamento foi aplicado monotonicamente até que fosse atingido o estado limite último da ligação. Foram desenvolvidos quatro corpos de prova fabricados com madeira classe C-60 e prego com resistência de escoamento de 660 MPa e módulo de elasticidade de 177000 MPa (esses valores foram determinados experimentalmente por ALMEIDA (1987)). Os corpos de prova foram criados no ambiente do programa ANSYS, admitindo-se não-linearidade geométrica e o comportamento elasto-plástico e isótropo tanto da madeira como do pino metálico. Para a discretização da ligação foram utilizados elementos planos e elementos de barra para a madeira e pino, respectivamente. Algumas conclusões obtidas pelos autores desse trabalho foram: observou-se que para casos de flexão do prego, os momentos fletores atuantes da simulação atingiram valores superiores aos momentos fletores calculados de 1º limite (início de plastificação da seção) e próximos dos de 2º limite (completa plastificação da seção); para os casos embutimento do prego na madeira verificou-se que houve plastificação simultânea do prego e da madeira; os resultados obtidos numericamente em relação às hipóteses empregadas por ALMEIDA (1990) para o cálculo da carga de segundo limite da ligação apresentam boa concordância com os resultados experimentais.

Oliveira (2001) avaliou os critérios de dimensionamento do documento normativo ANBT NBR7190: 1997 por meio da análise de resultados experimentais. Os ensaios foram realizados para solicitações na direção paralela e normal às fibras para cinco espécies de madeira. Os corpos de prova foram retirados de vigas de madeira e posteriormente utilizados nos ensaios de resistência da ligação e caracterização da madeira. O diâmetro dos pinos metálicos utilizados eram de 10mm, 12,5mm e 16mm. Algumas conclusões obtidas pelo autor desse trabalho foram: quando o parafuso é submetido ao estado de embutimento do pino na madeira os resultados experimentais da resistência da ligação possuem valores maiores do que os calculados segundo o critério da norma brasileira ABNT NBR7190: 1997, sendo os dois valores da resistência calculados com base na deformação residual de 2%; o autor salienta que

a norma brasileira é a única a considerar uma deformação residual de 2‰ para calcular tanto a resistência ao embutimento como a resistência da ligação fazendo com que os valores da resistência da ligação sejam menores do que calculados em outros documentos normativos que consideram uma deformação residual maior.

Veloso et al. (2002) compararam as expressões de cálculo de ligações pregadas de madeira dos documentos normativos ABNT NBR7190: 1997 e EUROCODE 5: 2004. O estudo foi realizado para ligações constituídas por peças de madeira de diferentes resistências de embutimento. No modelo de cálculo da ABNT NBR7190: 1997 não é previsto o dimensionamento de ligações formadas por madeiras de diferentes resistências de embutimento ao contrário do documento normativo EUROCODE 5: 2004. Algumas conclusões obtidas pelos autores desse trabalho foram: quando as espessuras das peças central e lateral (t_2 e t_1) e as resistências ao embutimento ($f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$) forem iguais os valores da resistência da ligação são muito próximos para o caso em que o modo de ruptura se dá pelo embutimento da madeira, chegando a uma diferença de 3%; quando a ligação é constituída por peças de diferentes resistências de embutimento as diferenças entre os modelos tendem a aumentar, podendo atingir até 60%; quando o modo de ruptura nas duas normas é dado pela plastificação do pino metálico as diferenças entre os resultados obtidos pelos dois modelos é bem superior ao encontrado quando o modo de ruptura é o embutimento da madeira. Porém, quando aumenta-se o diâmetro do pino esta diferença tende a diminuir. Isto é provocado pelas diferenças nos cálculos dos momentos de plastificação (M_y) do pino metálico. A Figura 15 mostra a diferença entre os momentos de plastificação do pino metálico para ligações pregadas.



Modelo conforme ABNT NBR7190:1997 conforme hipóteses ALMEIDA (1990).

Figura 15. Momento de plastificação para ligações pregadas. Fonte: Veloso et al. (2002) (Adaptada).

Oliveira (2008) comparou o dimensionamento dos documentos normativos ANBT NBR7190: 1982, ANBT NBR7190: 1997 e EUROCODE 5: 2004 por meio de ligações parafusadas em uma treliça de madeira afim de verificar se há um aumento no número de conectores metálicos quando dimensionados pela norma atual. O dimensionamento da treliça de madeira foi realizado no Estados Limites Últimos com o objetivo de gerar valores reais de carregamentos, para posterior dimensionamento das ligações desta estrutura. Para o dimensionamento das ligações foram utilizados dados de seis espécies de madeira, sendo estas espécies divididas em três classes, de acordo com suas densidades: alta, média e baixa. O dimensionamento foi realizado na direção paralela e normal às fibras e também em uma direção intermediária de 65° para cada um dos documentos normativos. Em relação aos pinos metálicos utilizados, os diâmetros variaram entre 10 e 20 mm. Na ANBT NBR7190: 1997 para cada uma das direções acima o dimensionamento foi realizado com e sem o fator minorador 0,4 (equação 30) no caso em que se dá a resistência ao embutimento da madeira. Algumas conclusões obtidas pelo autor desse trabalho foram: em relação ao EUROCODE 5: 2004 a ABNT NBR7190: 1997 apresentou com a utilização do fator 0,4 valores 186% maiores no número de parafusos, sem esse fator os valores foram 40% menores que a norma europeia, sendo que a variação entre essas normas tendeu a diminuir com o aumento do diâmetro do parafuso; com relação a ABNT NBR7190: 1997 para se ultrapassar o valor do β_{lim} (equação 29) devem ser atingidas situações bastante fora da realidade, sendo improvável ocorrer o modo de ruptura por flexão do pino metálico ($\beta > \beta_{lim}$);

Almeida (2014) comparou os métodos de ensaio da ABNT NBR7190: 1997 com os documentos normativos EN383: 2007, ASTM D5764: 2007, EUROCODE 5: 2004, NDS: 2001 e LRFD: 1996, afim de estabelecer uma proposta para o método de ensaio da determinação da resistência da madeira ao embutimento. Durante a pesquisa foram utilizadas seis espécies de madeira e os diâmetros de 8mm, 10mm, 12mm e 16mm para os pinos metálicos. Os ensaios foram realizados de acordo com cada documento normativo na direção paralela e normal e às fibras, sendo confeccionado corpos de prova necessários para os ensaios. Algumas conclusões obtidas pelo autor desse trabalho foram: não foi possível realizar a experimentação de corpos de prova na direção normal às fibras para o método da ANBT NBR7190: 1997, pois a dimensão nesta direção (18 vezes o diâmetro do pino metálico) dificulta a obtenção de peças; para todos os casos de espécies de madeira e diâmetros de pinos metálicos utilizados na pesquisa observaram-se maiores valores médios da resistência da madeira ao embutimento determinados pelo método EN383: 2007, isto se deve pelo fato do método utilizar a força

máxima de embutimento ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que causa deslocamento relativo igual a 5mm (F_{5mm}) entre o pino metálico e o corpo de prova como critério para a determinação da resistência da madeira ao embutimento; por fim o autor concluiu que a adoção do método EN 383: 2007 para determinação da resistência da madeira é mais adequado que o critério adotado pelo documento normativo brasileiro, pois proporciona uma concordância com a resistência a compressão paralela às fibras, que é o parâmetro utilizado nos equacionamentos da norma brasileira para o cálculo da resistência de embutimento da madeira.

Piter et al. (2014) realizaram um estudo comparativo entre os documentos normativos: ABNT NBR 7190: 2010, EUROCODE 5: 2004 e do CIRSOC 601 para as ligações com pregos em estruturas de madeira. Para se analisar o comportamento mecânico das ligações pregadas se desenvolveu um trabalho experimental onde a resistência dos corpos de prova foram determinadas através de ensaios em laboratório e de cálculos empregando os critérios de cada documento normativo. A espécie de madeira utilizada para a confecção dos corpos de provas foi a *Eucalyptus grandis* e a ligação foi realizada com pregos com diâmetro de 2,5mm. Os ensaios foram realizados respeitando os critérios do EUROCODE 5: 2004 para ligações pregadas com duas seções de corte. O valor da resistência experimental das ligações pregadas foi de 1592N e o valor de cálculo da resistência da ligação foi de 1014N e 633N para o EUROCODE 5: 2004 e ABNT NBR7190: 2010, respectivamente. O autor explica que os resultados experimentais confirmaram um comportamento dúctil de todas as ligações e que os resultados experimentais estão de acordo com o EUROCODE 5: 2004, porém não são coerentes com os critérios de dimensionamento proposto pela ABNT NBR7190: 2010. O EUROCODE 5: 2004 apresenta quatro modos de ruptura para ligações pregadas com duas seções de corte, enquanto a ABNT NBR7190: 2010 considera apenas a resistência da ligação por embutimento do pino da madeira e a flexão do pino metálico. Para o autor, deve ser verificado os critérios de dimensionamento da ABNT NBR7190: 2010, pois para se identificar os modos de ruptura a norma brasileira compara os valores de β e β_{lim} e o autor verifica que os valores conduzem ao dimensionamento pelo embutimento do pino da madeira não ocorrendo a flexão do pino metálico.

Dias et al. (2014) realizaram um estudo comparativo das expressões da ABNT NBR 7190: 1982, ABNT NBR 7190: 1997 e do EUROCODE 5: 2004 para o cálculo de ligações com

pinos metálicos. A comparação foi realizada para todas as classes de resistência estabelecidas na ABNT NBR7190: 1997, tanto para a ligação na direção paralela quanto para a direção normal, para vários valores de relações entre a espessura da peça de madeira (t) e o diâmetro do parafuso (d) (parâmetro $\beta = t/d$). As comparações foram realizadas para o caso de corte duplo com cobrejuntas de madeira. Durante a pesquisa os autores optaram por utilizar a tensão resistente de cálculo (resistência de cálculo dividida pela área de contato do pino) como parâmetro de comparação entre os documentos normativos citados acima. Os valores de cálculo da resistência ao embutimento da ABNT NBR7190: 1997 para a direção paralela e normal às fibras foram obtidos a partir da resistência a compressão paralela às fibras. Para efeito de comparação das expressões com os outros documentos normativos foram realizados alguns ajustes nas propriedades de resistência. Algumas conclusões obtidas pelos autores desse trabalho foram: nos casos de embutimento na madeira as resistências obtidas pela ABNT NBR7190: 1997 foram inferiores aos valores encontrados pelas outras duas normas para os casos de valores menores do parâmetro β ; nos casos em que a flexão do pino metálico predomina, ocorrem maiores valores de β e a tensão resistente encontrada pela ABNT NBR 7190: 1997 supera os valores encontrados pelas outras duas normas; atualmente encontra-se em votação a modificação de um coeficiente da atual norma brasileira para o cálculo da resistência da ligação onde o caso de embutimento da madeira é crítico, em suas pesquisas, também compararam a modificação do coeficiente de 0,4 para 0,5 (eq 30) chegando a conclusão que essa alteração não foi suficiente para corrigir a distorção do critério de dimensionamento da norma brasileira vigente.

2.7 Conclusões da Revisão Bibliográfica

É essencial o entendimento do comportamento das ligações para a implementação de modelos de cálculos estruturais, pois sem o correto entendimento da ligação os estados limites últimos podem ser comprometidos, fazendo com que hajam erros de resultados teóricos relacionados ao comportamento real da estrutura.

A ABNT NBR7190: 1997 convencionou de forma experimental a resistência da madeira ao embutimento através da razão entre a força que causa uma deformação específica de 2% sobre a área resistente ($t \times d$). A norma europeia EUROCODE 5: 2004 convencionou a resistência ao embutimento igual ao valor da máxima força resistida pelo corpo de prova ($F_{m\acute{a}x}$) ou a força que provoca um descolamento relativo de 5mm entre o pino metálico e o corpo de prova (F_{5mm}), dividida pela área resistente. A norma americana LFRD:1996 convencionou a

resistência ao embutimento a partir da força que provoca uma deformação residual de 5% do diâmetro do pino metálico (d).

Na falta de realização de ensaios experimentais, a norma brasileira define a resistência ao embutimento da madeira como função da resistência a compressão paralela às fibras, enquanto nos outros documentos normativos a resistência ao embutimento depende apenas da densidade aparente da madeira (ρ_k) e do diâmetro do pino metálico. Essas diferenças levam a valores da resistência ao embutimento muito baixos quando calculados pelos critérios da norma brasileira.

Os modelos teóricos estudados apresentam formulações para a resistência da ligação, levando em consideração as seções de corte da peça, enquanto a ABNT NBR7190: 1997 não faz distinção entre as seções de corte de uma peça, e utiliza o mesmo critério de dimensionamento tanto para uma e duas seções de corte.

No dimensionamento de ligações por pinos metálicos entre elementos estruturais de madeira são considerados basicamente dois modos de ruptura: embutimento do pino na madeira ou flexão do pino metálico. Tem-se notado que a comparação entre o β e o β_{lim} para o cálculo do modo de ruptura da norma brasileira tem levado, de modo geral, a se obter a ruptura por embutimento da madeira, quase nunca ocorrendo a flexão do pino metálico. Outro fator que deve ser levado em consideração é a utilização do fator 0,4 (eq 30) para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira. Estudos recentes mostram que esse fator contribui para o aumento do número de elementos nas ligações. Atualmente, pesquisadores tem estudado a possível modificação desse fator para 0,5, porém estudos recentes mostram que essa modificação não é suficiente para corrigir a distorção da norma brasileira.

3 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DAS NORMAS

A seguir serão apresentados as comparações realizadas entre os documentos normativos: brasileiro (ABNT NBR 7190: 1982/1997), europeu (EUROCODE 5: 2004), americano (LRFD: 1996) e australiano (AS: 1994).

3.1 Resistência ao Embutimento

Conforme mostrado nos itens anteriores, a resistência da madeira ao embutimento pode ser estimada por meio de ensaios mecânicos ou pela utilização de equações para calcular seu valor. Quanto a essa segunda forma, existem diferenças nos critérios utilizadas pela norma brasileira quando comparada com outros documentos normativos com tradição em estruturas de madeira.

Com o objetivo de comparar essas equações, foram calculados os valores de cálculo da resistência ao embutimento, das classes de resistência definidas pela ABNT NBR7190: 1997, utilizando os documentos normativos ABNT NBR7190: 1997, EUROCODE 5: 2004 e LRFD: 1996. Em todos os casos, foram considerados o coeficiente de modificação (k_{mod}) igual a 0,56 e o coeficiente de ponderação das resistências (γ_m) igual a 1,4.

No caso da ABNT NBR7190: 1997, a resistência é calculada a partir da resistência na compressão paralela às fibras. No caso do EUROCODE 5: 2004, a partir do valor característico do densidade da madeira; o valor característico foi obtido multiplicando o valor médio da classe por 0,72, no caso de coníferas, e 0,79, no caso das dicotiledôneas, tendo em vista os resultados de variabilidade da densidade obtidos por Bortoletto Jr. (1993) e Nogueira (1991), que estudaram 6 espécies de pinus e 16 espécies de eucalipto, respectivamente. No caso LRFD: 1996, a resistência é obtida considerando o valor médio da densidade. As Tabelas 7, 8, 9 e 10 mostram os valores de cálculo de acordo com cada documento normativo.

Tabela 7: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, f_{c0} (MPa), para coníferas.

Norma	ABNTNBR7190:1997			EUROCODE 5:2004			LRFD:1996		
d (mm)	10	16	25	10	16	25	10	16	25
C20	8	8	8	10,6	9,9	8,9	15,5	15,5	15,5
C25	10	10	10	11,7	10,9	9,7	17,0	17,0	17,0
C30	12	12	12	12,8	11,9	10,6	18,5	18,5	18,5

Tabela 8: Resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, f_{c0} (MPa), para dicotiledôneas.

Norma	ABNTNBR7190:1997			EUROCODE 5:2004			LRFD:1996		
d (mm)	10	16	25	10	16	25	10	16	25
C20	8	8	8	15,2	14,1	12,6	20,1	20,1	20,1
C30	12	12	12	18,7	17,4	15,5	24,7	24,7	24,7
C40	16	16	16	22,2	20,7	18,5	29,4	29,4	29,4
C60	24	24	24	23,3	21,8	19,4	30,9	30,9	30,9

Tabela 9: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras, f_{e90} (MPa), para coníferas.

Norma	ABNTNBR7190:1997			EUROCODE 5:2004			LRFD:1996		
d (mm)	10	16	25	10	16	25	10	16	25
C20	3,9	3,0	2,5	7,1	6,6	5,9	9,8	7,8	6,2
C25	4,9	3,8	3,2	7,8	7,3	6,5	11,4	12,8	14,3
C30	5,9	4,6	3,8	8,5	7,9	7,1	12,0	11,3	10,7

Tabela 10: Resistência ao embutimento na direção normal às fibras, f_{e90} (MPa), para dicotiledôneas.

Norma	ABNTNBR7190:1997			EUROCODE 5:2004			LRFD:1996		
d (mm)	10	16	25	10	16	25	10	16	25
C20	3,9	3,0	2,5	14,4	13,5	12,0	14,4	11,4	9,1
C30	5,9	4,6	3,8	17,8	16,6	14,8	19,6	22,0	24,6
C40	7,8	6,1	5,1	21,1	19,7	17,6	23,3	22,0	20,8
C60	11,7	9,1	7,6	22,2	20,7	18,5	24,5	25,2	25,9

Observa-se que a resistência da madeira ao embutimento calculado pela ABNT NBR7190: 1997 levam a valores mais baixos em relação aos outros documentos normativos. A norma brasileira permite considerar a resistência ao embutimento com base na resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), enquanto as outras normas utilizam a densidade aparente da madeira (ρ_k) e o diâmetro do pino metálico (d) como base para sua formulação.

Assim, a aplicação das equações do EUROCODE 5: 2004 e do LRFD: 1996 para o cálculo da resistência ao embutimento no caso de madeiras brasileiras podem levar a resultados discrepantes principalmente devido a variação da densidade.

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é comparar os critérios de dimensionamento das ligações, os valores de resistência ao embutimento foram considerados a partir das equações da ABNT NBR7190: 1997, em todos os casos analisados.

3.2 Parâmetros

A seguir serão apresentados os tipos de ligações analisados e as considerações feitas para a comparação do critério de dimensionamento de ligações por pinos metálicos da norma brasileira ABNT NBR7190: 1997 com os critérios dos seguintes documentos

normativos: (ABNT NBR7190: 1982), europeu (EUROCODE 5: 2004), americano (LRFD: 1996) e australiano (AS: 1994).

O parâmetro escolhido para a comparação foi a tensão resistente de cálculo ($f_{d,lig}$). No caso da ABNT NBR 7190: 1997, esse valor foi obtido dividindo-se a resistência do parafuso por plano de corte pela área ($t \cdot d$), conforme mostra a equação 67:

$$f_{d,lig} = \frac{R_{V1,d}}{t \cdot d} \quad (67)$$

No caso das outras normas, esse valor foi calculado de forma análoga.

Foram utilizados pinos metálicos com os seguintes diâmetros: 8mm, 10mm, 12,5mm, 16mm, 20mm e 25mm. O valor característico da resistência ao escoamento do aço dos parafusos foi considerado igual a 240 MPa. O valor último da resistência a tração do aço foi considerado igual a 360 MPa. O coeficiente de ponderação utilizado para o cálculo da resistência de cálculo ao escoamento do aço (f_{yd}) foi considerado como 1,1 (γ_s).

As espessuras das peças e dos diâmetros dos parafusos foram definidos de forma a se ter o parâmetro β definido pela ABNT NBR7190: 1997, dado pela Equação 28, variando entre 2 a 6, o que abrange a quase totalidade dos casos práticos.

A comparação foi realizada para as classes de resistência da ABNT NBR7190: 1997, tanto para coníferas (C20, C25, C30) quanto para dicotiledôneas (C20, C30, C40, C60).

A resistência ao embutimento foi admitida em função do valor da resistência à compressão paralela às fibras, conforme mostrado nas equações 17 e 18.

A resistência de cálculo da compressão paralela às fibras foi obtida através da equação 68.

$$f_{c0,d} = \frac{f_{c0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_m} \quad (68)$$

Para a obtenção do coeficiente de modificação (k_{mod}) foram admitidas as condições: classe de carregamento de longa duração, umidade de equilíbrio da madeira em 12% e segunda categoria de madeira (sem classificação visual), levando a um $k_{mod}=0,56$. O fator de ponderação da resistência utilizado (γ_m) foi igual a 1,4.

É importante destacar que a ABNT NBR7190: 1997 não faz distinção entre os casos de cobrejuntas de madeira ou metálicas.

3.2.1 Tipos de Ligações Analisadas

As ligações estudadas nesse trabalho foram padronizadas para os seguintes casos:

- Ligações em corte duplo com cobrejuntas de madeira com metade da espessura da peça central e madeira da mesma espécie;
- Ligações em corte duplo com cobrejuntas metálicas (Figura 9, página 45);

3.2.2 Ajustes para a Norma ABNT NBR7190: 1982

Para efeito de comparação com a atual norma brasileira ABNT NBR7190: 1997 alguns ajustes foram realizados nas equações da antiga norma de 1982. Na formulação da versão antiga, era considerado o valor médio da resistência na compressão paralela às fibras para o caso da madeira saturada (σ_c). A atual norma brasileira considera o cálculo da resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}) para um teor de umidade de 12%. Sendo assim, para que a comparação fosse realizada de acordo com esse critério, considerou-se o valor médio da resistência igual ao valor característico dividido por 0,7 e, posteriormente, dividiu-o por 1,24 para considerar a diferença da resistência entre a madeira com a umidade de 12% e saturada. As equações 69 e 70 mostram a resistência a compressão paralela as fibras adaptadas para a umidade de 12% (σ_c).

$$f_{c0} = \frac{f_{c0,k}}{0,7} \quad (69)$$

$$\sigma_c = \frac{f_{c0}}{1,24} \quad (70)$$

3.2.2.1 Ligação Paralela às Fibras

O valor admissível da força de cada parafuso para a direção paralela às fibras foi obtido a partir da Equação 33, considerando a tensão básica de compressão paralela às fibras igual a 0,18 do valor médio da resistência da madeira na compressão paralela às fibras (σ_c), e

substituindo as equações 69 e 70. O valor admissível da tensão resistente de cálculo em função do valor característico da resistência a compressão paralela é dado pela Equação 71:

$$\frac{\bar{F}}{b \cdot \delta} = 0,1659 \cdot \omega \cdot f_{c0,k} \quad (71)$$

Como a versão de 1982 era baseado no Método das Tensões Admissíveis, os valores das ações não eram modificados por coeficientes de ponderação, e o valor admissível da resistência também considerava a variabilidade das ações. Para efeito de comparação com a versão de 1997, os valores admissíveis foram multiplicados por 1,4, valor correspondente ao coeficiente de ponderação das ações utilizado na atual norma brasileira, no caso de carregamento composto por apenas uma ação variável. Assim, nesse caso, o valor de cálculo da tensão resistente é dada pela Equação 72:

$$f_{d,lig} = 1,4 \cdot \frac{\bar{F}}{b \cdot \delta} = 0,2323 \cdot \omega \cdot f_{c0,k} \quad (72)$$

3.2.2.2 Ligação Normal às Fibras

Os valor admissível da força de cada parafuso para a direção normal às fibras foi obtido a partir da Equação 34, considerando a tensão básica de compressão paralela às fibras igual a 0,045 do valor médio da resistência da madeira na compressão paralela às fibras (σ_c), e substituindo as equações 69 e 70. O valor admissível da tensão resistente de cálculo em função do valor característico da resistência a compressão paralela é dado pela Equação 73:

$$\frac{\bar{F}}{b \cdot \delta} = 0,0518 \cdot \omega \cdot f_{c0,k} \cdot \eta \quad (73)$$

Para determinar o valor de cálculo da tensão resistente foram realizados os procedimentos de forma análoga a ligação paralela às fibras. Assim, nesse caso, o valor de cálculo da tensão resistente é dada pela Equação 74:

$$f_{d,lig} = 1,4 \cdot \frac{\bar{F}}{b \cdot \delta} = 0,07252 \cdot \omega \cdot f_{c0,k} \cdot \eta \quad (74)$$

3.2.3 Ajustes para a Norma EUROCODE 5:2004

A resistência ao embutimento é calculada pelo EUROCODE 5: 2004 por meio das equações 21 e 22 para a direção paralela e normal às fibras, respectivamente. Observou-se que a utilização dessas equações levariam a valores muito superiores para a resistência ao embutimento (item 3.1. tabelas 7, 8, 9 e 10) quando comparadas com a ABNT NBR7190: 1997 e que não poderiam ser aplicáveis às madeiras brasileiras. Portanto, para efeito de comparação os valores da resistência ao embutimento foram considerados conforme as equações 17 e 18, extraídas da ABNT NBR7190: 1997.

3.2.3.1 Ligação Paralela às Fibras

A norma europeia define a resistência por plano de corte como o menor valor encontrado nas relações da Equação 41. Simplificando essas equações com as considerações adotadas na seção 3 e desprezando a parcela corresponde à força de arrancamento ($F_{ax,Rk}$) temos as relações da Equação 75.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{c0,k} \cdot t_1 \cdot d \text{ (g)} \\ 0,5 \cdot f_{c0,k} \cdot t_2 \cdot d \text{ (h)} \\ 0,35 f_{c0,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{4 + \frac{12M_{y,Rk}}{f_{c0,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \text{ (i)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{c0,k} \cdot d} \text{ (j)} \end{array} \right. \quad (75)$$

Para efeito de comparação com a norma brasileira multiplica-se os valores encontrados da resistência de um pino metálico por plano de corte ($F_{v,Rk}$) pelo K_{mod} e divide-se pelo coeficiente de ponderação γ_m .

O valor da tensão resistente de cálculo é obtido dividindo o valor da resistência por plano de corte pelo diâmetro do parafuso e pela metade da espessura da peça central de madeira, analogamente como mostrado na equação 67.

3.2.3.2 Ligação Normal às Fibras

A norma europeia define a resistência de um pino metálico por plano de corte como o menor valor encontrado nas relações da Equação 41. Simplificando essas equações com as considerações adotadas na seção 3 e desprezando a força de arrancamento ($F_{ax,Rk}$) temos as relações da Equação 76.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,25 f_{c0,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \alpha_e \text{ (g)} \\ 0,125 \cdot f_{c0,k} \cdot t_2 \cdot d \cdot \alpha_e \text{ (h)} \\ 0,0875 f_{c0,k} \cdot \alpha_e t_2 d \cdot \left[\sqrt{4 + \frac{12M_{y,Rk}}{0,25f_{c0,k} \cdot \alpha_e \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \text{ (i)} \\ 1,15 \cdot \sqrt{0,5 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{c0,k} \cdot \alpha_e \cdot d} \text{ (j)} \end{array} \right. \quad (76)$$

Após o cálculo da resistência de um pino metálico por plano de corte ($F_{v,Rk}$) são realizados os procedimentos de forma análoga à da ligação paralela às fibras.

3.2.4 Ajustes para a Norma LRFD: 1996

A resistência ao embutimento é calculada pelo LRFD: 1996 por meio das equações 25 e 26 para a direção paralela e normal às fibras, respectivamente. Observou-se que a utilização dessas equações levariam a valores muito superiores para a resistência ao embutimento (item 3.1.) quando comparadas com a ABNT NBR7190: 1997 e que não poderiam ser aplicáveis às madeiras brasileiras. Portanto, para efeito de comparação os valores da resistência ao embutimento foram considerados conforme as equações da ABNT NBR7190: 1997.

3.2.4.1 Ligação Paralela às Fibras

A norma americana define a resistência paralela às fibras de um pino metálico como o menor valor encontrado nas equações da Tabela 4. Simplificando essas equações com as considerações adotadas na seção 3 a resistência da ligação é o menor valor encontrado entre as Equações 77 e 80 (Tabela 11).

Tabela 11: Resistência da ligação paralela às fibras para duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Simplificado.

Modos de Ruptura	Equações	
I _m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot f_{c0,k}}{K_0}$	Equação 77
I _s	$Z = \frac{1,66 \cdot d \cdot t_s \cdot f_{c0,k}}{K_0}$	Equação 78
III _s	$Z = \frac{2,08 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot f_{c0,k}}{3 \cdot K_0}$	Equação 79
IV	$Z = \left(\frac{2,08 \cdot d^2}{K_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k} \cdot F_{yb}}{3}}$	Equação 80

Para efeito de comparação com a norma brasileira multiplica-se os valores encontrados da resistência de um pino metálico (Z) pelo K_{mod} e divide-se pelo coeficiente de ponderação γ_m .

O valor da tensão resistente de cálculo é obtido dividindo o valor da resistência de um pino metálico (Z) pelo diâmetro do parafuso e pela espessura da peça central de madeira.

3.2.4.2 Ligação Normal às Fibras

Simplificando as equações da Tabela 4 através das hipóteses adotadas a resistência da ligação é o menor valor encontrado entre as Equações 81 e 83 (Tabela 12).

Tabela 12: Resistência da ligação normal às fibras para duas seções de corte de acordo com quatro modos de ruptura. Simplificado.

Modos de Ruptura	Equações	
I _m	$Z = \frac{0,83 \cdot d \cdot t_m \cdot f_{c90,k} \cdot \alpha_e}{K_{90}}$	Equação 81
I _s	$Z = \frac{1,66 \cdot d \cdot t_s \cdot f_{c90,k} \cdot \alpha_e}{K_{90}}$	Equação 82
III _s	$Z = \frac{2,08 \cdot k_3 \cdot d \cdot t_s \cdot f_{c90,k} \cdot \alpha_e}{3 \cdot K_{90}}$	Equação 83
IV	$Z = \left(\frac{2,08 \cdot d^2}{K_{90}} \right) \cdot \sqrt{\frac{f_{c90,k} \cdot \alpha_e \cdot F_{yb}}{3}}$	Equação 82

Após o cálculo da resistência de um pino metálico (Z) foram realizadas os procedimentos de forma análoga à da ligação paralela às fibras.

3.2.5 Ajustes para a Norma AS: 1994

A norma australiana define a capacidade de carga do parafuso por meio da equação 66. Essa equação fornece a resistência do parafuso em função do valor característico para cada tipo de ligação. As Tabelas 5 e 6 fornecem o valor da resistência característica considerando o grupo de ligação em que se enquadra a espécie. A Tabela 13 foi retirada da norma australiana AS: 1994 e fornece a classificação das espécies de madeira em função do grupo de ligação e da densidade.

Além do grupo de ligação (Tabela 13), os dados das Tabelas 5 e 6 são fornecidos em função do diâmetro do parafuso e da espessura da peça de madeira. Com o intuito de proceder a comparação com os resultados da norma brasileira, a Tabela 14 fornece os valores de $\beta = t/d$ (conforme equação 28, extraído da ABNT NBR7190: 1997) em função da espessura efetiva da peça central da madeira e do diâmetro do parafuso, para os quais a norma australiana fornece a resistência do parafuso. Salienta-se que, neste trabalho, não serão utilizados os valores de β inferiores a 2 (conforme recomendação da ABNT NBR7190: 1997) ou superiores a 6.

Tabela 13: Espécies de Madeira classificadas por grupo e densidade. Fonte: AS: 1994 (Adaptada).

Grupo	Espécies de Madeira	Densidade (kg/m ³)
JD1	box, grey, coast	1100
	gum, spotted	1100
	hardwood, Johnstone river	950
	ironbark, grey	1100
	ironbark, red, narrow-leaved	1050
	mahogany, red	950
	wandoo	1100
JD2	ash, silvertop	850
	balau	900
	blackbutt	900
	box, brush	900
	chengal	950
	gum, blue, southern	1100
	gum, blue, sydney	850
	gum, red, river	900
	gum, rose	750
	jarrah	800
	kapur	750
	karri	900
	kempas	900
	kwila (merbau)	850
	marri	850
	oak, tulip brown	900
	stringybark brown	850
	stringybark yellow	900
	tallowwood	1000
	turpentine	950
JD3	ash, alpine	650
	ash, mountain	650
	brown, barrel	750
	lumbayu, chengkulang	750
	mersawa	700
	messmate	750
	pine, cypress, white	700
	pine, slash	650
JD4	fir, Douglas, North America	550
	hemlock, western	500
	pine, hoop	550
	pine, radiata	550
JD5	fir, Douglas, elsewhere	550

Tabela 14: Valores de $\beta=t/d$ (equação 28, extraído da norma ABNT NBR7190: 1997) considerados pela norma AS:1994.

Espessura da peça (mm)	Diâmetro do parafuso (mm)				
	8	10	12	16	20
40	2,50	2,00	1,67	1,25	1
50	3,13	2,50	2,08	1,56	1,25
70	4,38	3,50	2,92	2,19	1,75
85	5,31	4,25	3,54	2,66	2,13
100	6,25	5,00	4,17	3,13	2,50

O valor da tensão resistente de cálculo é obtido multiplicando-se os valores da resistência característica do parafuso pelo k_{mod} e dividindo-o pelo coeficiente de ponderação γ_m para ambas as direções das fibras.

3.3 Método utilizado para a Comparação entre as Normas

No caso da comparação entre a norma ABNT NBR7190: 1997 e as normas ABNT NBR7190: 1982, EUROCODE 5:2004 e LRFD: 1996 a comparação foi feita pelo valor da tensão resistente de cálculo. Esses valores foram obtidos por meio de planilhas do Excel e estão apresentados graficamente em função do parâmetro β , dado pela Equação 28, para as situações estudadas.

Para a norma australiana AS: 1994 são apresentados os valores obtidos da tensão resistente de cálculo em função da Tabela 14. Esses valores foram obtidos por meio de planilhas do Excel e estão apresentados graficamente. Por meio desses valores foi possível comparar os resultados com os da norma brasileira ABNT NBR7190 :1997.

O EUROCODE 5:2004 apresenta em sua formulação equações para a utilização de cobrejuntas metálicas. Foram comparadas as equações de cobrejuntas de madeira com as de cobrejuntas metálicas. O resultado dessa comparação será apresentado a seguir.

3.4 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos usando os critérios das normas ABNT NBR7190: 1997, ABNT NBR7190: 1982, EUROCODE 5:2004 e LRFD: 1996 são apresentados graficamente para os casos de solicitação na direção paralela e na direção normal às fibras.

Como a resistência ao embutimento foi calculada por meio das equações propostas pela ABNT NBR7190: 1997, os valores obtidos para coníferas e dicotiledôneas são iguais, não sendo feita distinção entre eles.

Os resultados obtidos para a norma AS:1994 são apresentadas graficamente para os casos estudados na solicitação na direção paralela e na direção normal às fibras.

As Figuras 16 a 20 apresentam os resultados obtidos para as classes de resistência C-20, C-25, C-30, C-40 e C-60 para a direção paralela às fibras.

As Figuras 21 a 25 apresentam os resultados obtidos para as classes de resistência C-20, C-25, C-30, C-40 e C-60 para a direção normal às fibras.

As Figuras 26 a 27 apresentam os resultados obtidos para a norma australiana na direção paralela e normal às fibras, respectivamente.

Comparando as equações 41 para cobrejuntas de madeira e 45 para cobrejuntas metálicas com espessura fina (extraídas do EUROCODE 5:2004), os resultados obtidos por essas equações tanto para o caso em que ocorre embutimento da peça central ou flexão do pino metálico são iguais. O mesmo não ocorre com a utilização de uma cobrejunta metálica com espessura grossa (equação 46), para o qual a diferença de valores foi de 40% maior do que as de cobrejuntas de madeira, para o caso em que a flexão do pino metálico é crítico.

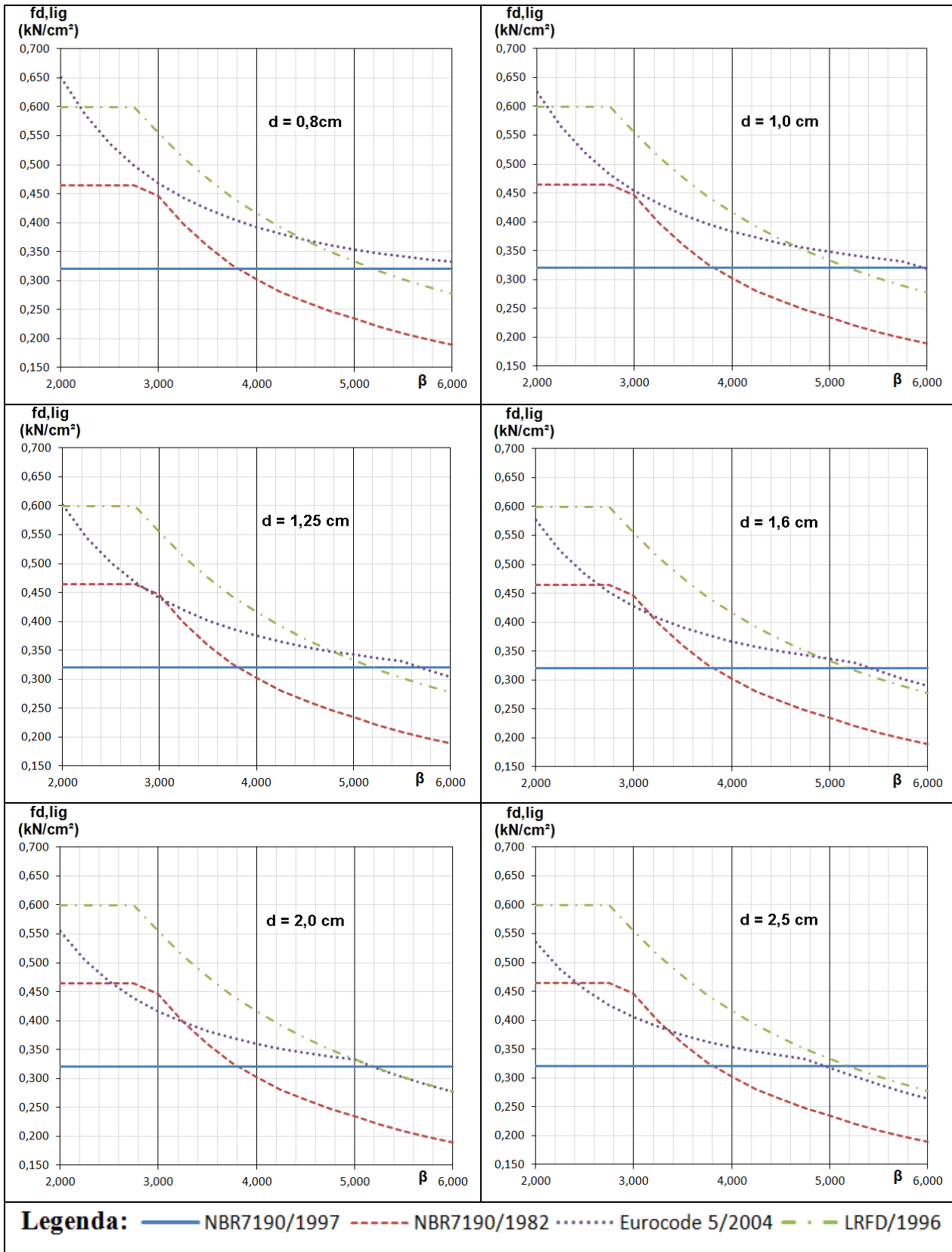


Figura 16. Classe C-20; direção paralela às fibras.

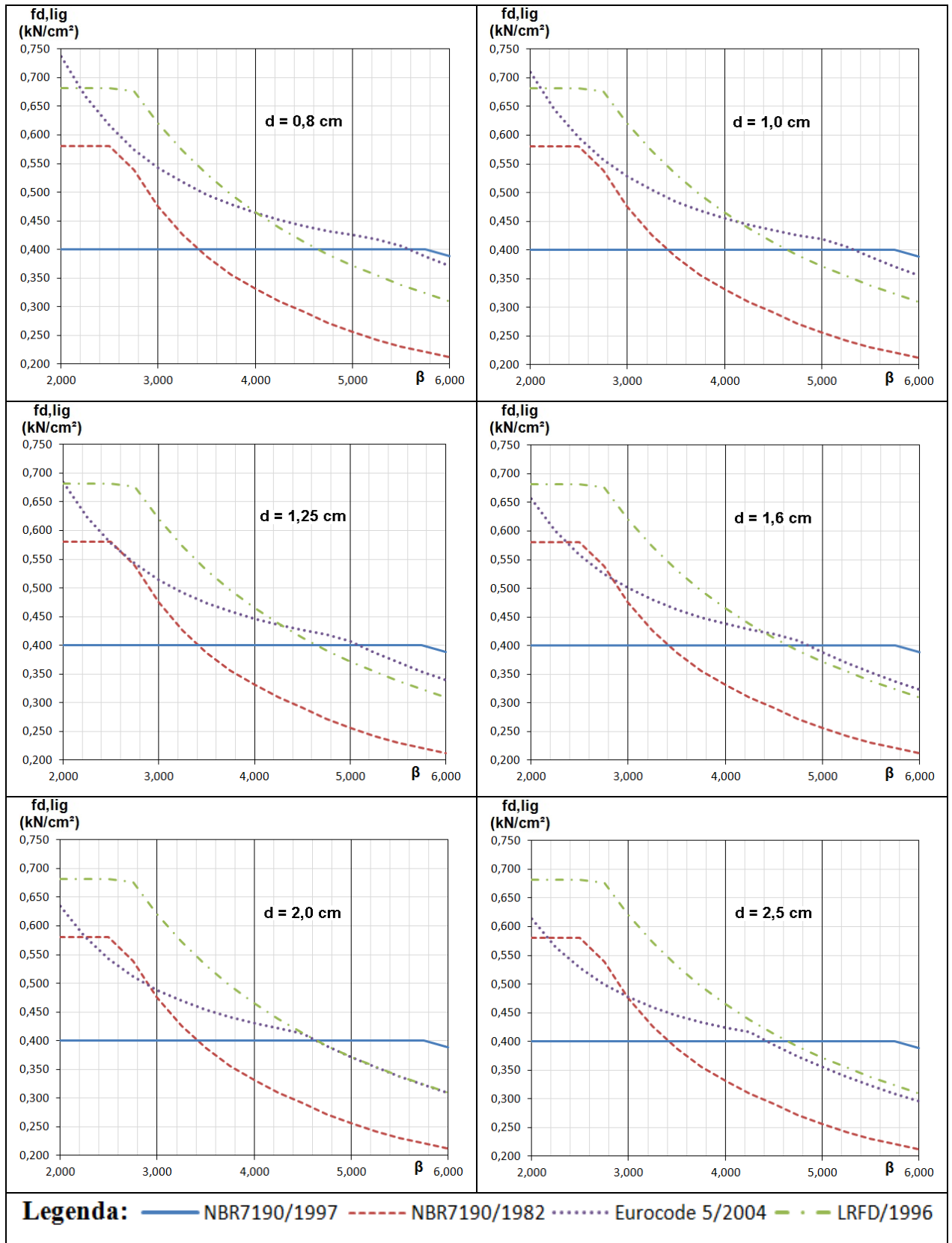


Figura 17. Classe C-25; direção paralela às fibras.

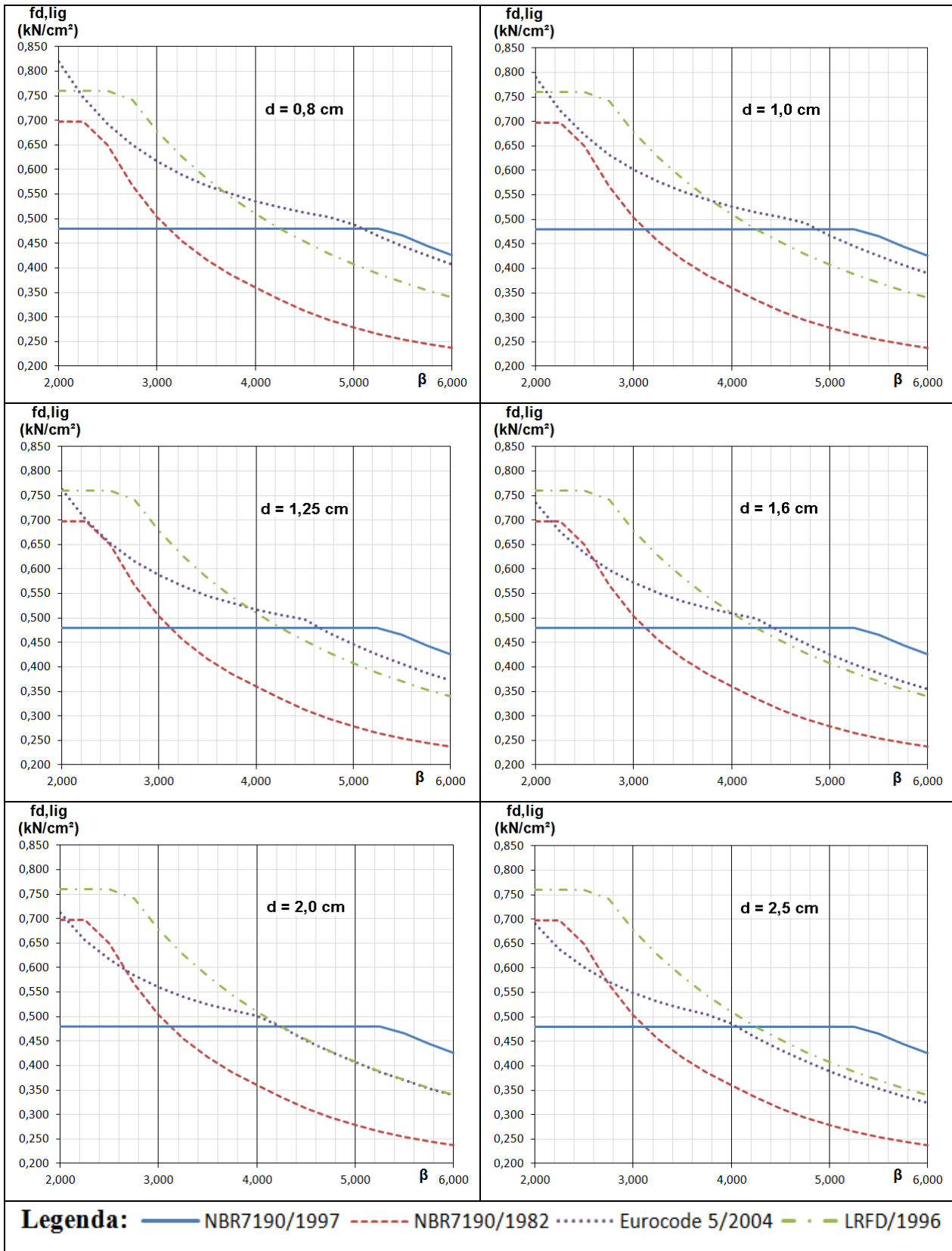


Figura 18. Classe C-30; direção paralela às fibras.

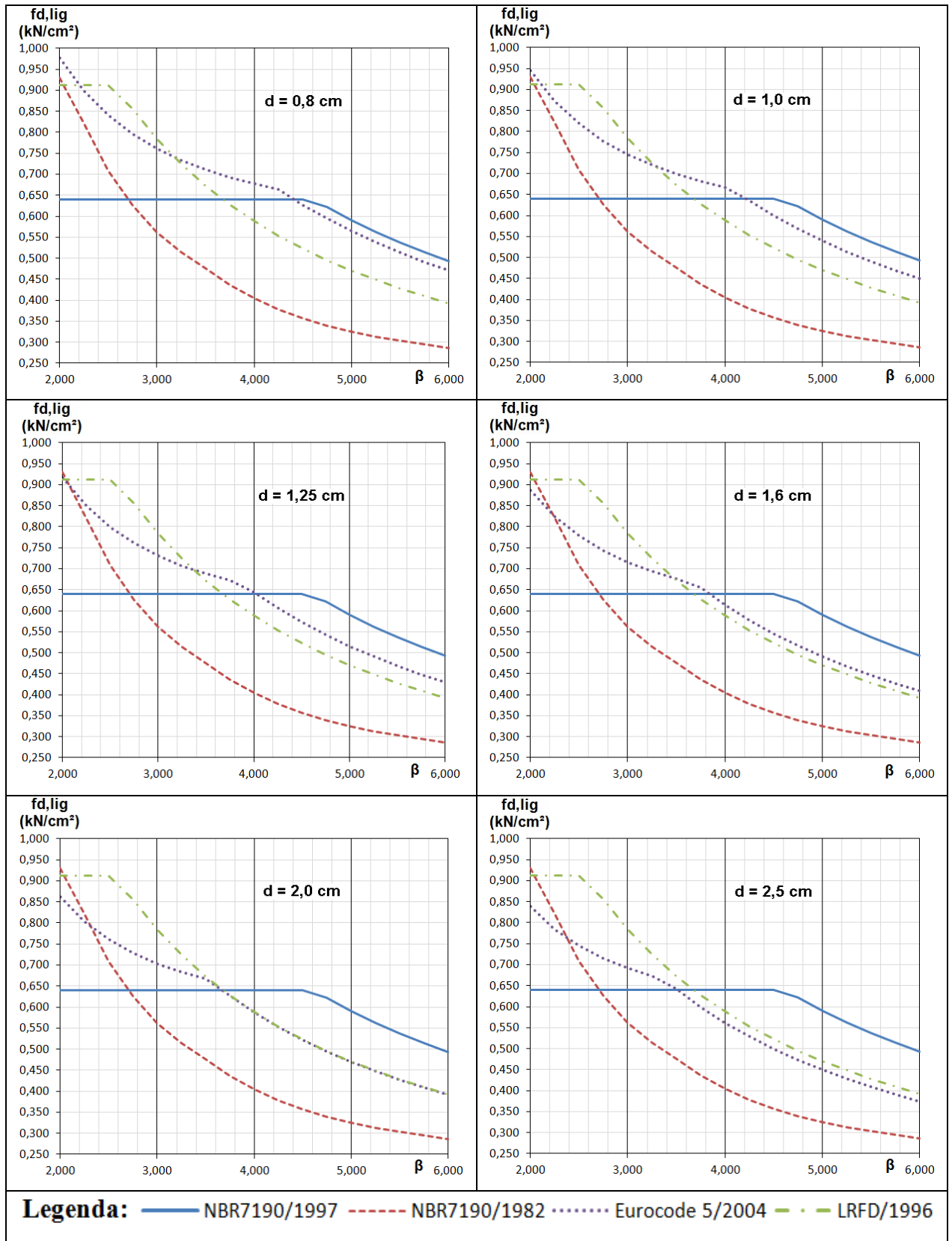


Figura 19. Classe C-40; direção paralela às fibras.

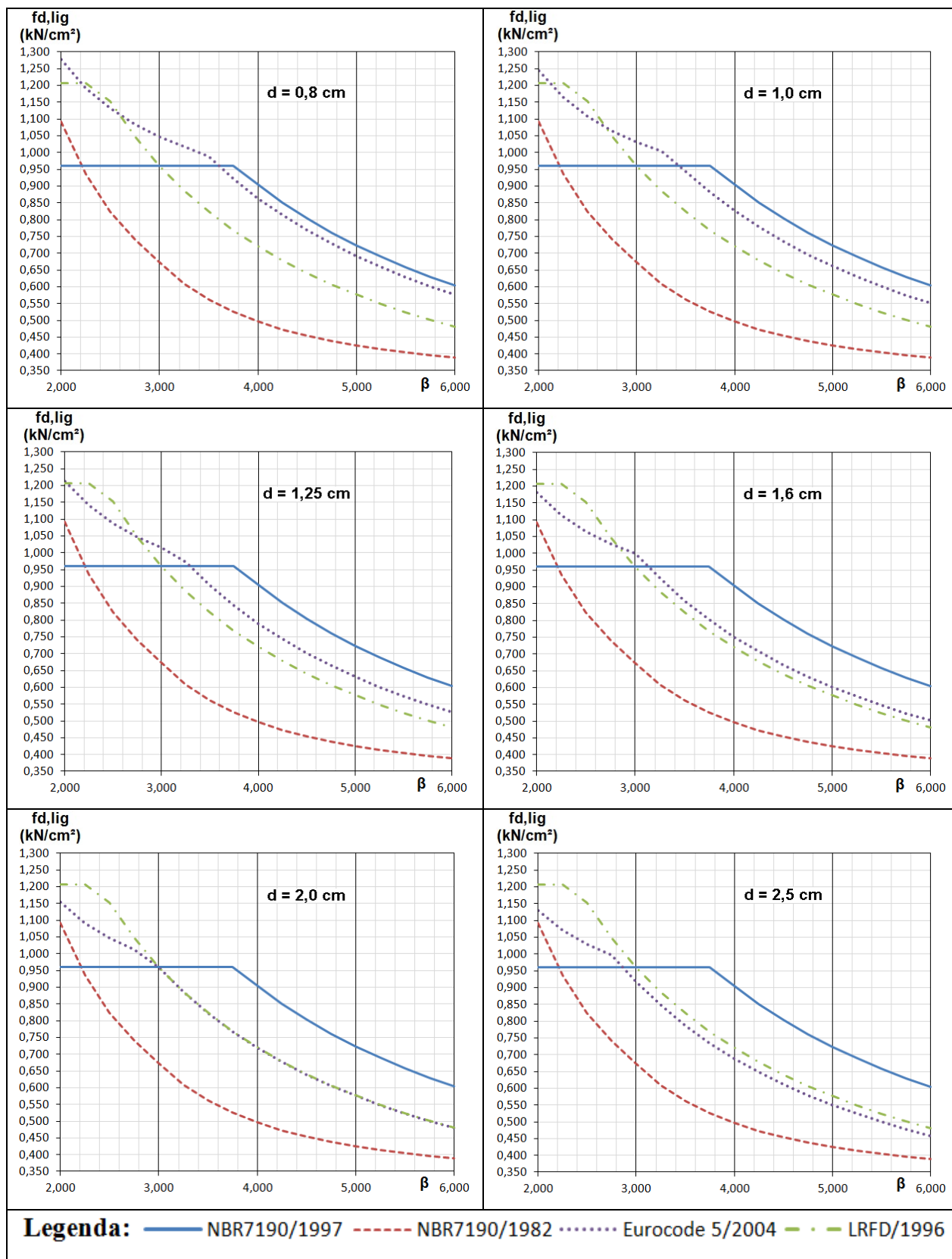


Figura 20. Classe C-60; direção paralela às fibras.

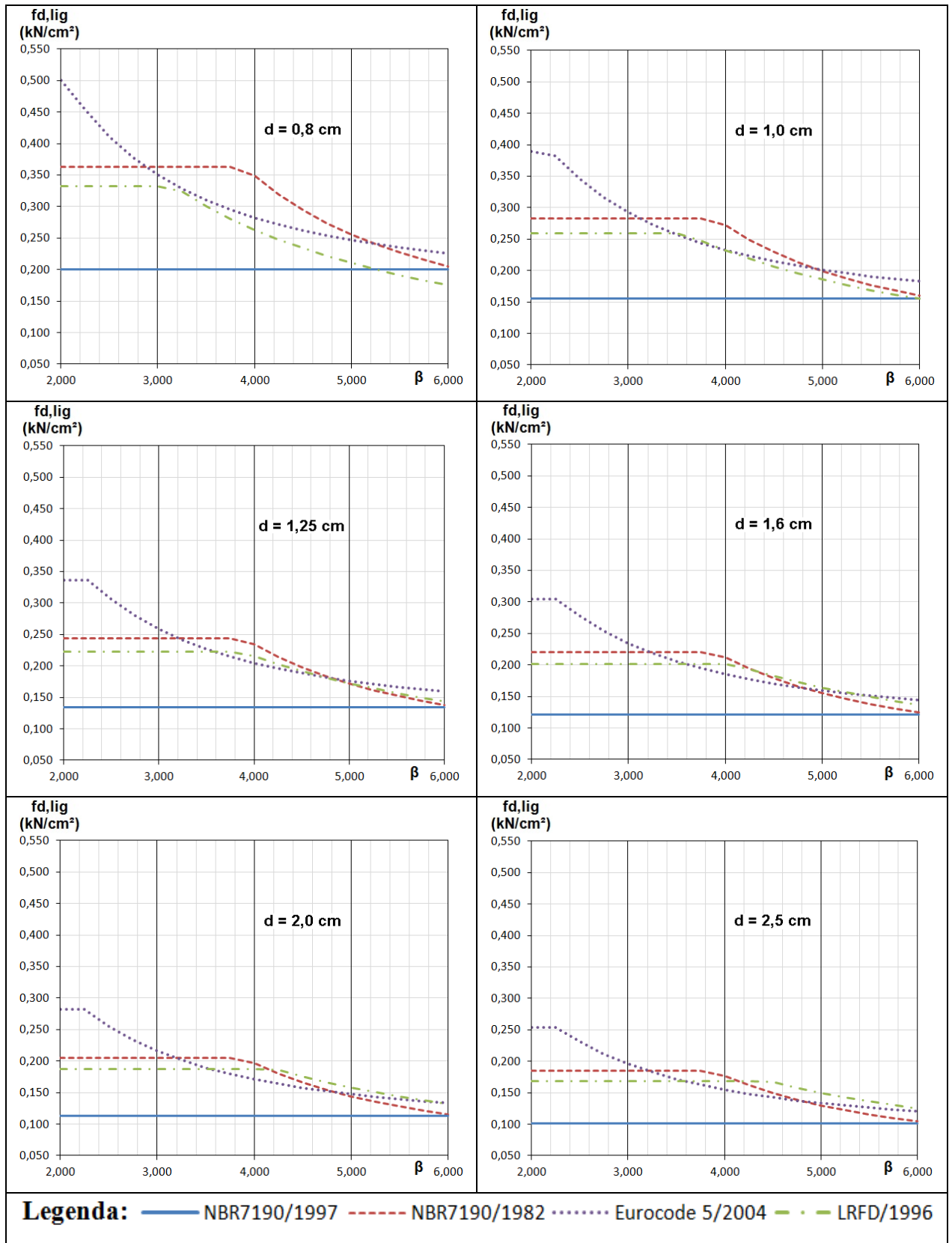


Figura 21. Classe C-20; direção normal às fibras.

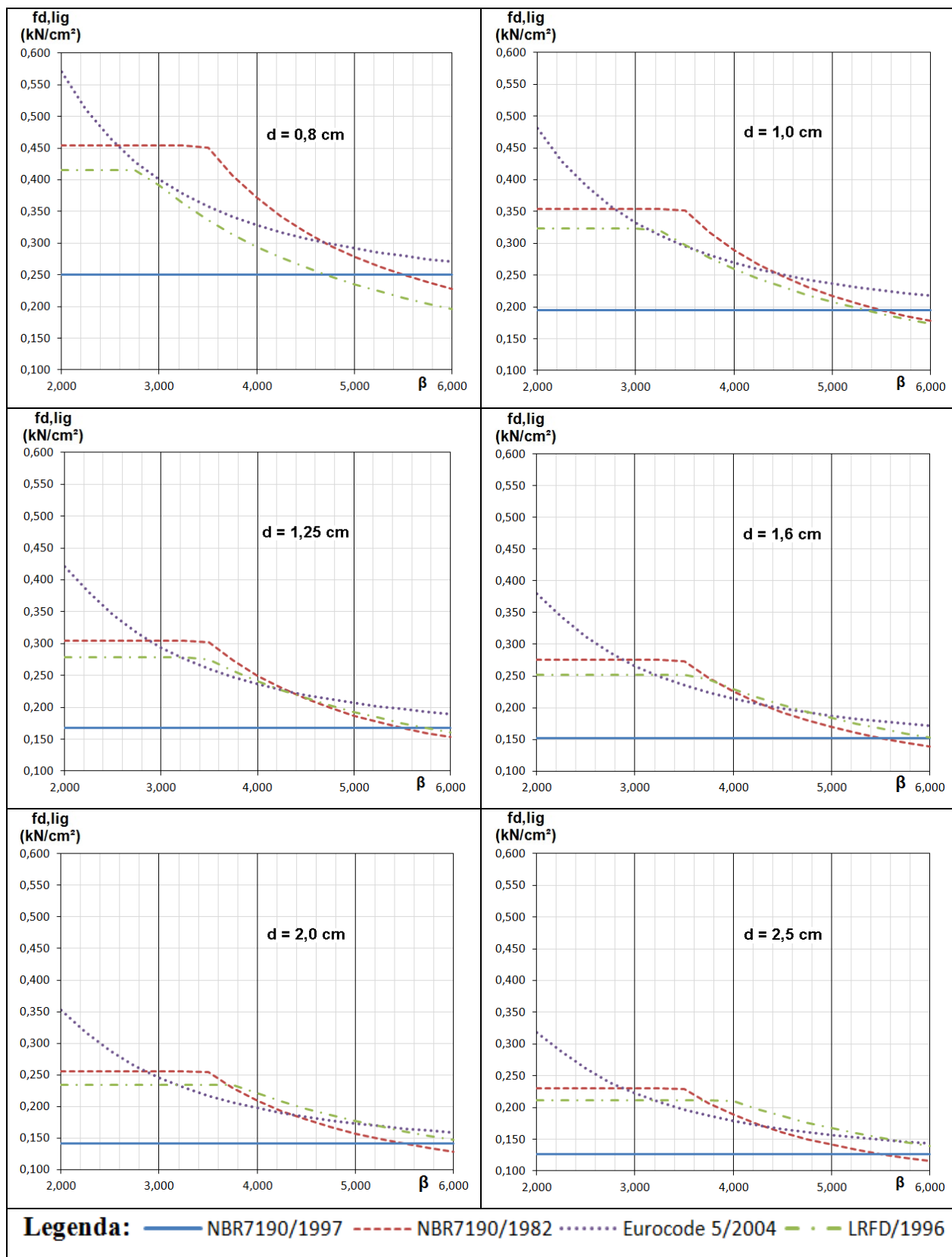


Figura 22. Classe C-25; direção normal às fibras.

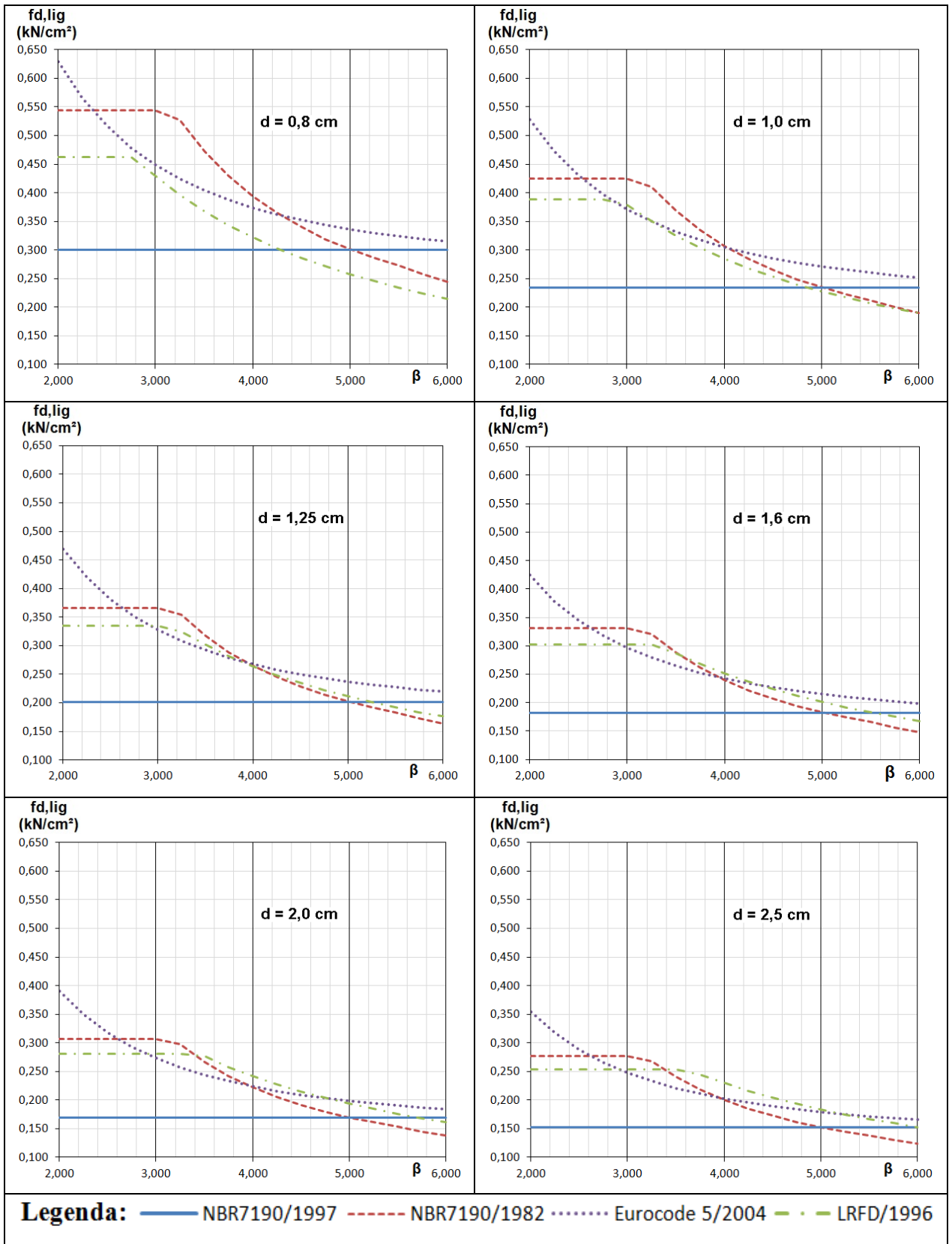


Figura 23. Classe C-30; direção normal às fibras.

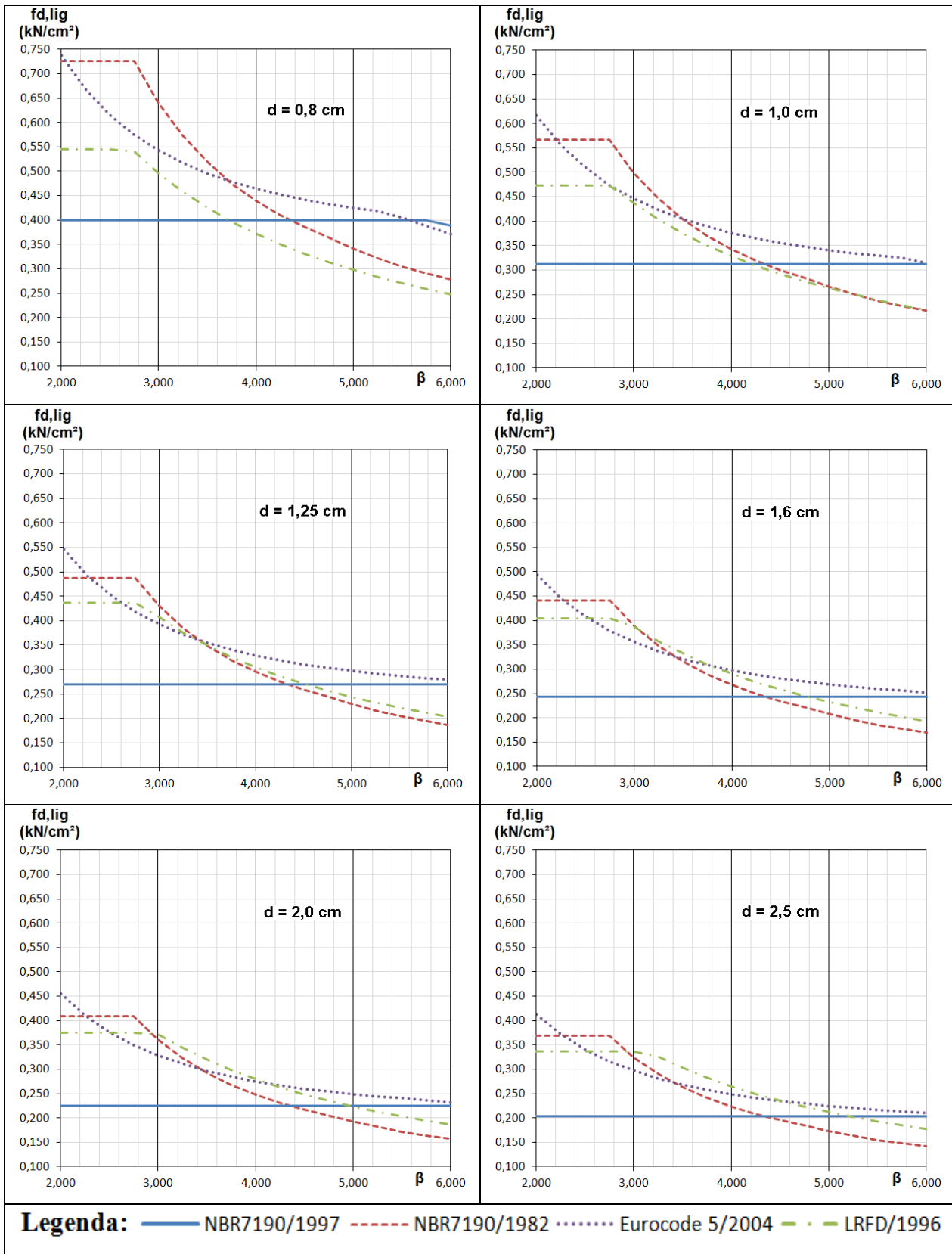


Figura 24. Classe C-40; direção normal às fibras.

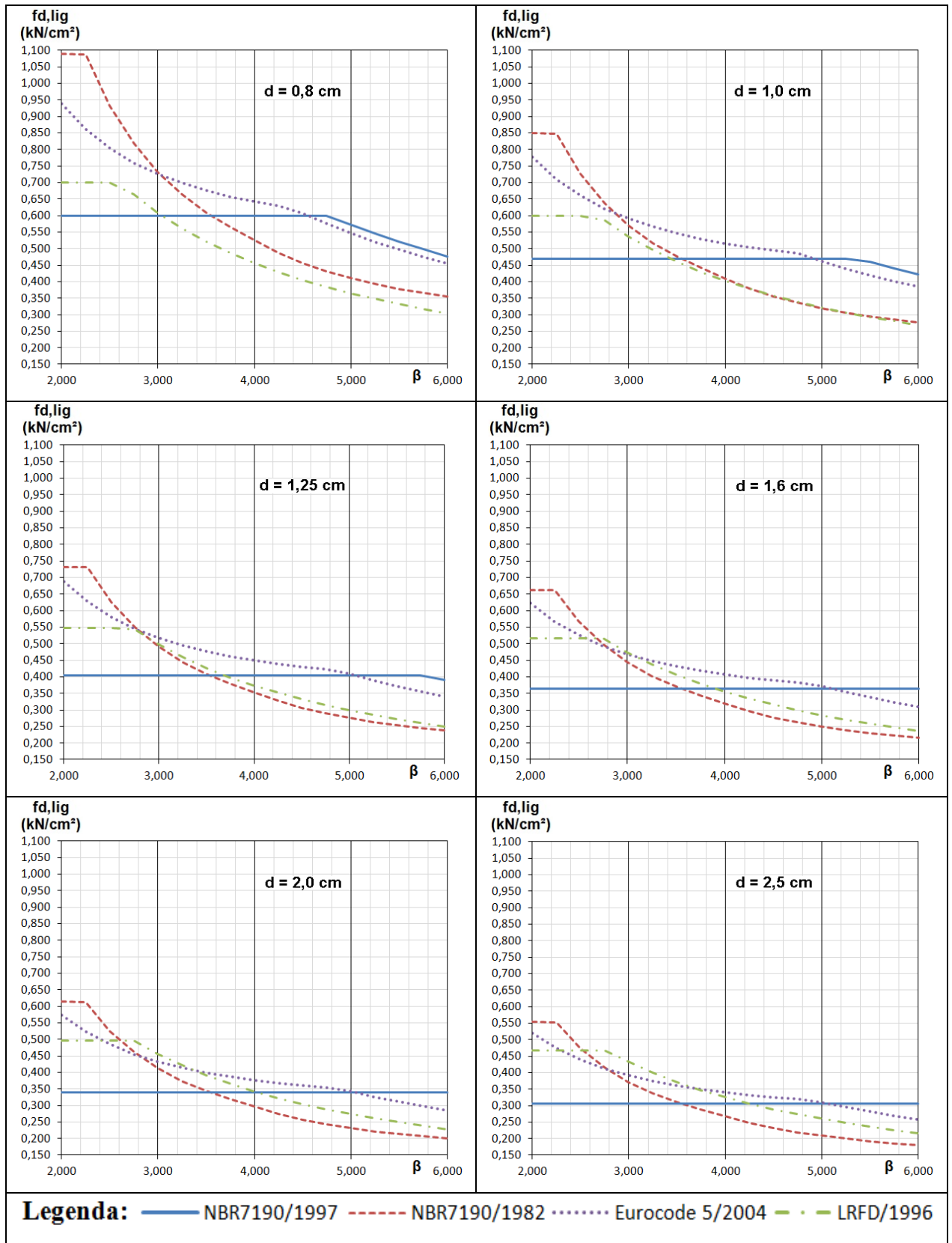


Figura 25. Classe C-60; direção normal às fibras.

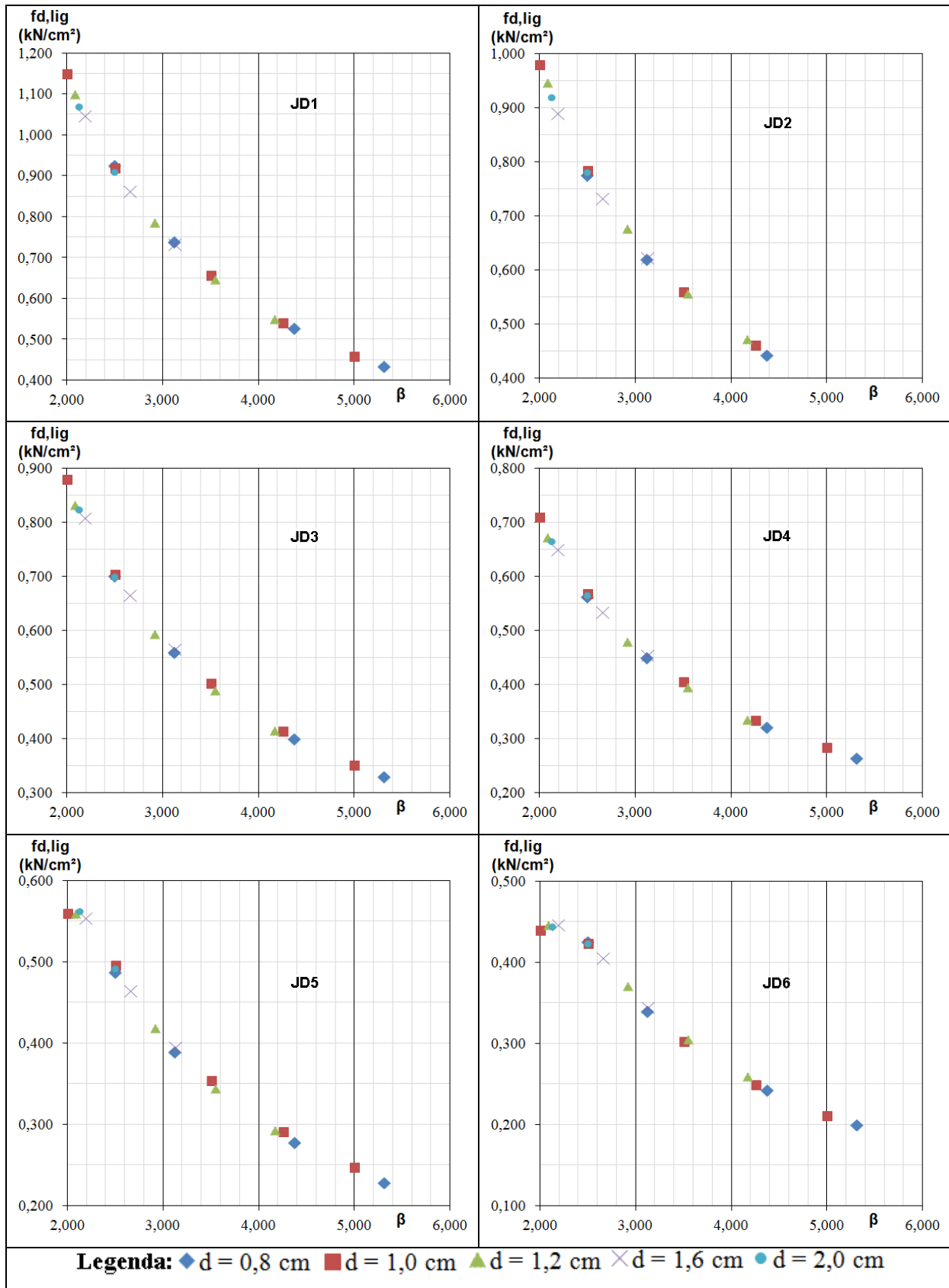


Figura 26. AS:1994 ; direção paralela às fibras.

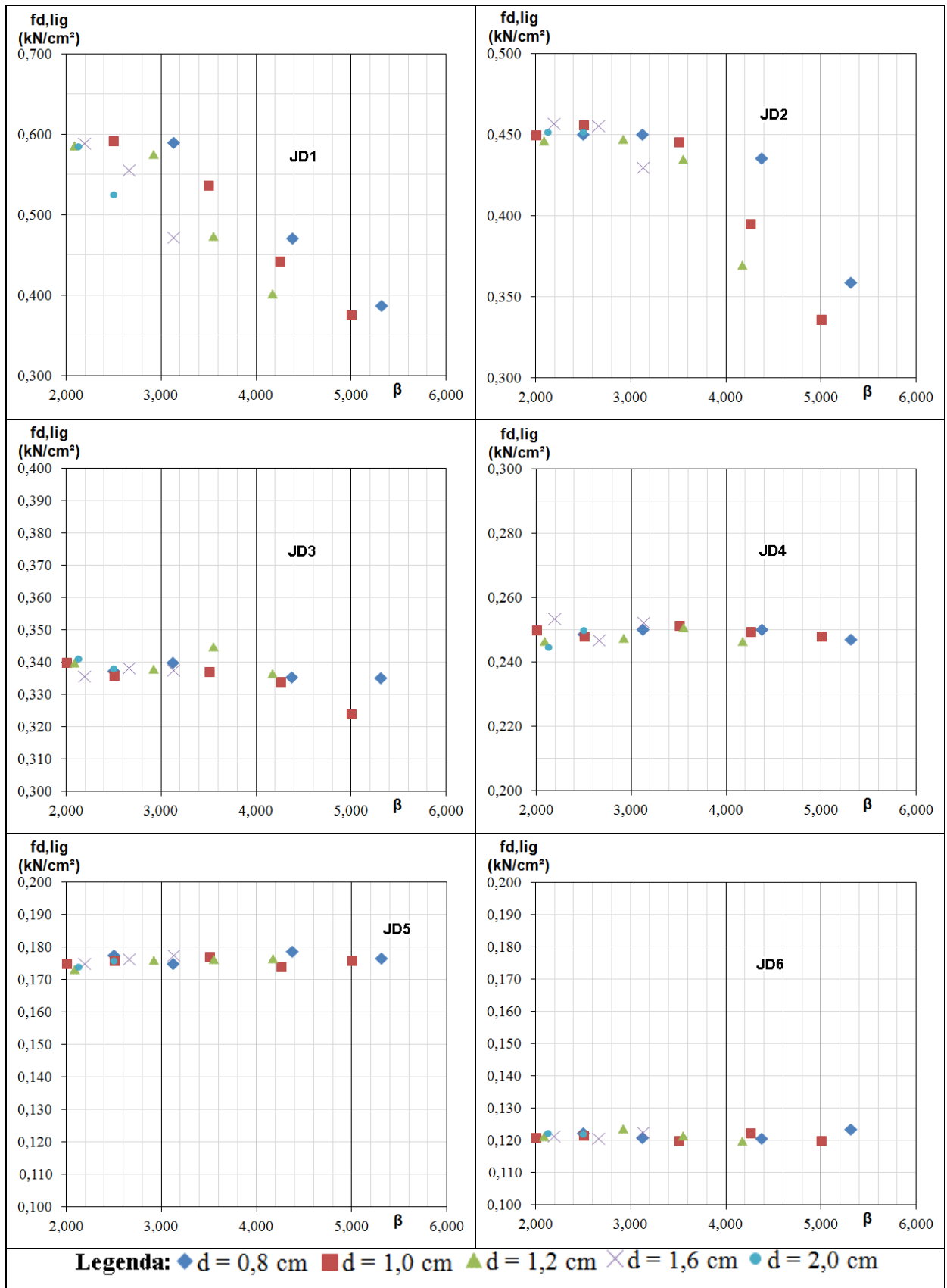


Figura 27. AS:1994 ; direção normal às fibras.

3.5 Análise dos Resultados

A seguir serão apresentados a análise de resultados para a solicitação na direção paralela e normal às fibras.

3.5.1 Solicitação Paralela às Fibras

Para valores iniciais de β a ABNT NBR7190:1997 fornece valores inferiores da tensão resistente de cálculo. Esses valores se invertem em alguns casos conforme ocorre o aumento do parâmetro β , fazendo com que a tensão resistente de cálculo da ABNT NBR7190:1997 se tornem maiores.

Quando o embutimento é crítico na ligação (ocorrendo em valores iniciais de β e resistências de madeira mais baixas), nota-se que, há uma grande diferença entre os valores calculados pela ABNT NBR7190: 1997 e os outros documentos normativos. Isso se deve pelo fato da norma brasileira utilizar o fator minorador de 0,4 (Equação 30) no cálculo da resistência ao embutimento, mostrando que esse valor deve ser modificado.

Os casos de flexão do pino metálico na ABNT NBR7190: 1997 começam a ocorrer somente para valores elevados de β . Esses valores se acentuam-se nas classes C-40 e C-60, representando a parte decrescente do gráfico (Figura 19 e 20). Isso indica que a relação entre β e o β_{lim} deve ser ajustada.

Para valores iniciais de β a norma americana LRFD:1996 mostra casos de embutimento, seguindo de casos de flexão de pino metálico. Os valores iniciais são superiores aos valores encontrados pela ABNT NBR7190: 1997.

Quando a flexão do pino metálico é crítica na ligação (ocorrendo para valores intermediários de β e resistências de madeira mais altas), nota-se que, os valores da tensão resistente de cálculo da ABNT NBR7190:1997 são superiores em relação aos outros documentos normativos (Figura 19 e 20).

Em relação a norma ABNT NBR7190:1982, para valores iniciais de β os valores da tensão resistente de calculo são maiores do que os calculados pela atual norma, sendo essa tendência invertida conforme aumenta-se o valor de β .

Os valores obtidos para a tensão resistente de cálculo da AS:1994 foram próximos dos valores obtidos pelo Eurocode. Para madeiras com resistência elevada (JD1), diâmetro do pino metálico igual a 1,0 (cm) e $\beta = 2$ o maior valor obtido pela norma australiana para a tensão

resistente de cálculo é de 1,15 kN/cm² enquanto que o EUROCODE 5: 2004 e a ABNT NBR7190:1997 apresentam, respectivamente, um valor de 1,25 kN/cm² e 0,95 kN/cm².

A figura 26 mostra que ocorrem casos iniciais de embutimento seguidos pela flexão do pino metálico.

Para valores de $\beta = 2$ e resistência da madeira alta, a norma brasileira ABNT NBR7190:1997 possui valores inferiores aos calculados pela AS:1994, conforme aumenta-se o valor de β a norma brasileira passa a possuir maiores valores da tensão resistente de cálculo em alguns pontos.

De maneira geral, os valores encontrados para tensão resistente de cálculo da norma ABNT NBR7190: 1997 foram inferiores aos obtidos pelos outros documentos normativos. Isso sugere que a norma brasileira deve ser ajustada.

3.5.2 Solicitação Normal às Fibras

Nas Figuras 21 a 25, de maneira geral, o embutimento é crítico na ABNT NBR7190:1997, ocorrendo flexão do pino metálico somente em alguns pontos. Isso sugere que a transição dos casos críticos de embutimento para flexão do pino metálico ocorrem apenas para valores mais elevados de β na ABNT NBR7190: 1997, indicando que o β_{lim} da equação 29 não está corretamente especificado para o caso de ligações por parafusos.

Para a ABNT NBR7190: 1982 nota-se que, para valores iniciais de β , a norma fornece valores maiores que os apresentados pela ABNT NBR7190: 1997, sendo essa tendência invertida quando o valor de β aumenta.

Para o grupo JD6 (valores próximos da classe C-20) os valores obtidos pela AS:1994 são inferiores aos da ABNT NBR7190:1997, exceto pelo diâmetro de 0,8 (cm) no qual a australiana é maior.

Quando a resistência da madeira é alta, os valores da norma AS: 1994 são superiores aos da ABNT NBR7190: 1997.

4 Avaliação experimental

Os resultados teóricos da comparação entre os documentos normativos mostraram uma grande discrepância de valores em relação a atual norma brasileira. Com o intuito de completar o trabalho, alguns ensaios experimentais foram realizados.

Os ensaios experimentais foram realizados para um $\beta = 2$, para o qual ocorre a maior discrepância de valores na tensão resistente de cálculo. O diâmetro utilizado nos ensaios foi de 12,5 mm.

4.1 Materiais e Métodos

Nesta seção são fornecidas as informações referentes aos materiais e métodos utilizados nesse trabalho.

4.1.1 Materiais

Para a realização do ensaio experimental foram utilizadas 2 espécies de madeira: *Pinus Sp* e a *Cupiúba (Goupia glabra)*. Essas espécies foram escolhidas com finalidade de mostrar a diferença dos resultados para madeira mole e dura.

Para cada espécie, procurou-se realizar uma classificação visual da madeira com a finalidade de evitar defeitos que pudessem diminuir a resistência da madeira. Todos os corpos de prova foram confeccionados com as peças de madeira com teor de umidade da ordem de 12%.

Foram utilizados pinos metálicos com aço trefilado com o diâmetro de 12,5 mm e comprimento de 100 mm e 120mm.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM - USP, São Carlos.

4.1.2 Métodos

Os ensaios foram divididos em complementares e ensaios da ligação. Os ensaios complementares tiveram a finalidade de fornecer as propriedades mecânicas das madeiras

utilizadas. Os ensaios das ligações tiveram a finalidade de estimar a capacidade de resistência das mesmas, afim de comparar com os valores de cálculo.

4.1.2.1 Ensaios Complementares

Os ensaios complementares estudados nesse trabalho foram os seguintes:

- Ensaio de Tração das barras de aço;
- Ensaio de Umidade;
- Ensaio de Densidade;
- Ensaio de Compressão Paralela às fibras;
- Ensaio de Embutimento de acordo com EN 383: 2007.

Todos os ensaios foram realizados de acordo com o especificado no anexo B da ABNT NBR7190:1997, com exceção do ensaio de embutimento, no qual os corpos de prova foram confeccionados de acordo com o EN 383: 2007. Essa medida foi adotada em virtude da dificuldade de se confeccionar o corpo de prova para a direção normal às fibras sugerido pela ABNT NBR7190:1997. A Figura 28 mostra as dimensões dos corpos de prova de embutimento na direção paralela e normal às fibras, respectivamente.

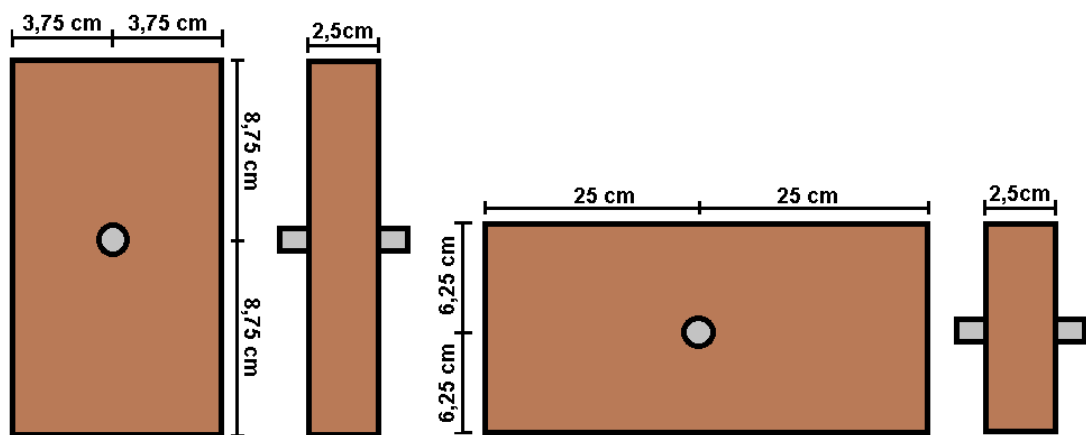


Figura 28. Dimensões dos corpos de prova embutimento na direção paralela e normal às fibras, respectivamente.

Os ensaios foram realizados com a caracterização simplificada, tendo seis corpos de prova para cada combinação da madeira - direção das fibras e espécie de madeira. Ao todo

foram confeccionados 80 corpos de prova, desconsiderando os utilizados apenas para estimar a força máxima.

O ensaio de tração das barras de aço foi realizado na máquina de aquisição de dados INSTRON, que possui capacidade de carga de 1500 kN. Para o ensaio foram utilizadas quatro barras de aço com comprimento de 60 cm cada. O ensaio obteve um valor médio da tensão de escoamento do aço de 550MPa.

Os ensaios para a determinação da resistência a compressão paralela às fibras e os ensaios ligação foram realizados na máquina universal de ensaio mecânico AMSLER, que possui capacidade de 250 kN (Figura 29). Os ensaios para a determinação da resistência ao embutimento foram realizados na máquina de aquisição de dados EMIC, que possui capacidade de 100 kN (Figura 29).



Figura 29. Máquina universal AMSLER e EMIC.

Como ilustração, as Figuras 30 e 31 mostram os corpos de prova durante o ensaio para determinação da resistência ao embutimento, nas direções paralela e normal às fibras.



Figura 30. Ensaio embutimento paralelo às fibras.



Figura 31. Ensaio de embutimento normal às fibras.

4.1.2.2 Ensaios da Ligação

O ensaio da ligação foi realizado de acordo com o especificado no anexo C da ABNT NBR7190: 1997.

Os corpos de prova da ligação foram confeccionados com duas seções de corte com sobrejuntas de madeira. Foram utilizadas as madeiras *Pinus sp* e *Cupiúba* para a confecção dos corpos de prova.

Foi utilizado pino metálico com diâmetro igual a 12,5 mm e comprimento 120 mm. Em cada ligação foram utilizados 4 pinos.

As Figuras 32 e 33 mostram as dimensões dos corpos de prova da ligação para a direção paralela e normal às fibras.

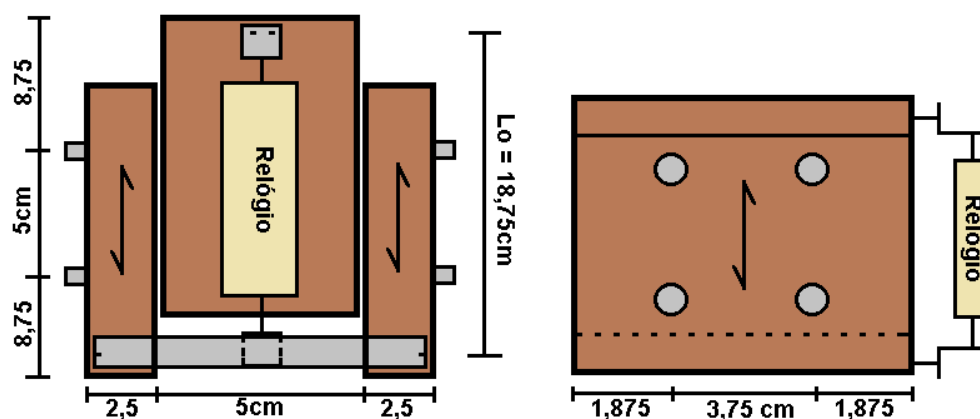


Figura 32. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção paralela às fibras.

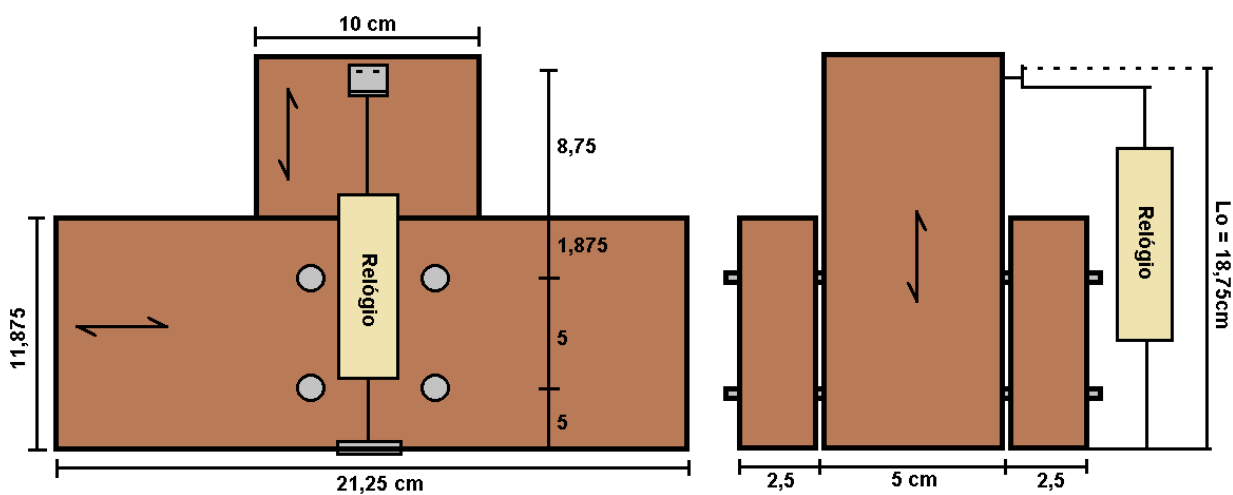


Figura 33. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção normal às fibras.

Como ilustração, as Figuras 34 e 35 mostram a realização do ensaio nas direções paralela e normal às fibras, respectivamente.



Figura 34. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção paralela às fibras.



Figura 35. Ensaio da Ligação - corpo de prova na direção normal às fibras.

4.2 Resultados Obtidos

Os ensaios complementares apresentam os resultados da densidade, umidade, resistência a compressão paralela às fibras e resistência da madeira ao embutimento. Esses resultados estão apresentadas por meio de tabelas.

Os resultados obtidos para o ensaio da ligação são apresentadas graficamente para os casos de solicitação na direção paralela e normal às fibras.

Para efeito de comparação com os resultados teóricos, serão apresentadas tabelas com o valor da resistência de cálculo por plano de corte para a direção paralela e normal às fibras, para ambas espécies de madeira.

4.2.1 Ensaio Complementares

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados da tensão de embutimento na direção paralela e normal às fibras, resistência a compressão paralela às fibras, densidade aparente da madeira (12%) e taxa de umidade para *Pinus* e *Cupiúba*, respectivamente.

Tabela 15: Resultados dos ensaios complementares para a espécie *Pinus*.

Pinus					
Ref.	f_{e0} (MPa)	f_{e90} (MPa)	f_{c0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)	U (%)
1	23,25	21,36	36,20	460	12,9
2	22,65	16,52	36,61	460	13,0
3	21,12	14,55	40,53	470	13,2
4	22,10	21,04	34,31	470	13,6
5	18,85	17,93	39,90	450	13,6
6	21,34	16,82	37,42	450	13,5
Média	21,55	18,03	37,54	460	13,3
CV (%)	7	15	6	2	2

Tabela 16: Resultados dos ensaios complementares para a espécie *Cupiúba*.

Cupiúba					
Ref.	f_{e0} (MPa)	f_{e90} (MPa)	f_{c0} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)	U (%)
1	35,85	19,37	60,6	940	11,1
2	42,47	27,00	62,4	930	11,1
3	45,23	21,42	45,6	930	11,4
4	43,43	26,85	59,8	930	11,1
5	39,82	20,96	49,2	930	10,9
6	39,74	22,14	60,2	940	11,2
Média	41,09	22,96	56,3	933	11,1
CV (%)	8	14	13	1	1

Para comparação com os valores teóricos foi calculado o valor característico da resistência ao embutimento, conforme estipulado no anexo B da ABNT NBR7190:1997.

A Tabela 17 mostra os valores característicos da resistência a compressão paralela às fibras e da resistência ao embutimento para as direções paralela e normal às fibras.

Tabela 17: Valores característicos da resistência a compressão e ao embutimento, em MPa.

Espécie	$f_{e0,k}$	$f_{e90,k}$	$f_{c0,k}$
Pinus	18,85(*)	14,55(*)	37,31(*)
Cupiúba	35,85(*)	19,37(*)	45,60(*)

(*) devido à pequena variação nos resultados obtidos, não foi considerado o fator 1,1 estipulado pelo anexo B da ABNT NBR7190:1997, no cálculo do valor característico.

4.2.2 Ensaios da Ligação

As Figuras 36 e 37 mostram os gráficos obtidos para a obtenção da força resistente da ligação conforme o critério da ABNT NBR7190: 1997 para a direção paralela e normal às fibras, respectivamente, para a espécie Pinus.

As Figuras 38 e 39 mostram os gráficos obtidos para a obtenção da força resistente da ligação conforme o critério da ABNT NBR7190: 1997 para a direção paralela e normal às fibras, respectivamente, para espécie Cupiúba.

As Figuras 40 e 41 mostram os corpos de prova após a ruptura. É importante salientar que, após o embutimento do pino, a ruptura ocorreu fendilhamento, em todos os casos.

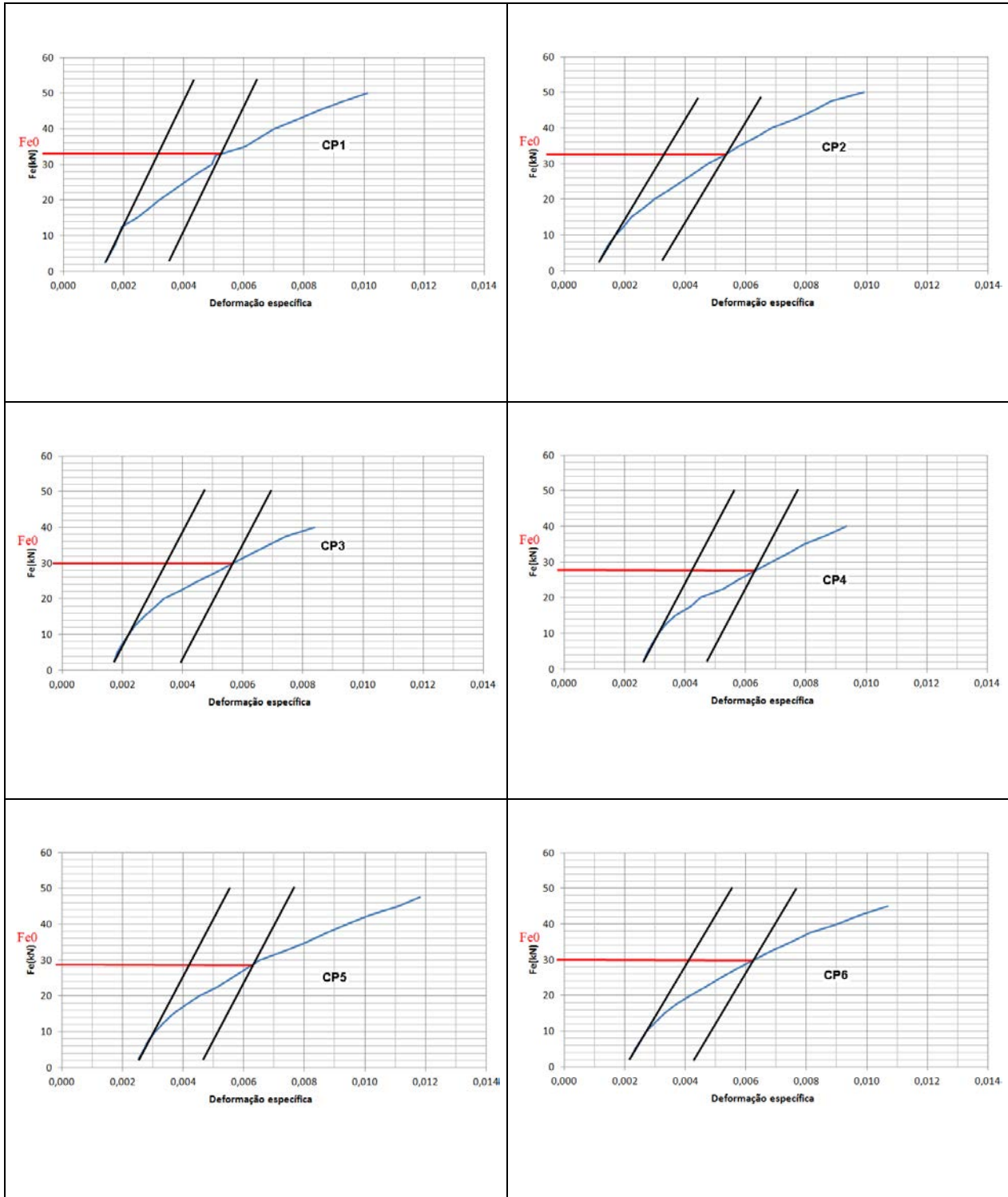


Figura 36. Força embutimento na direção paralela às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Pinus.

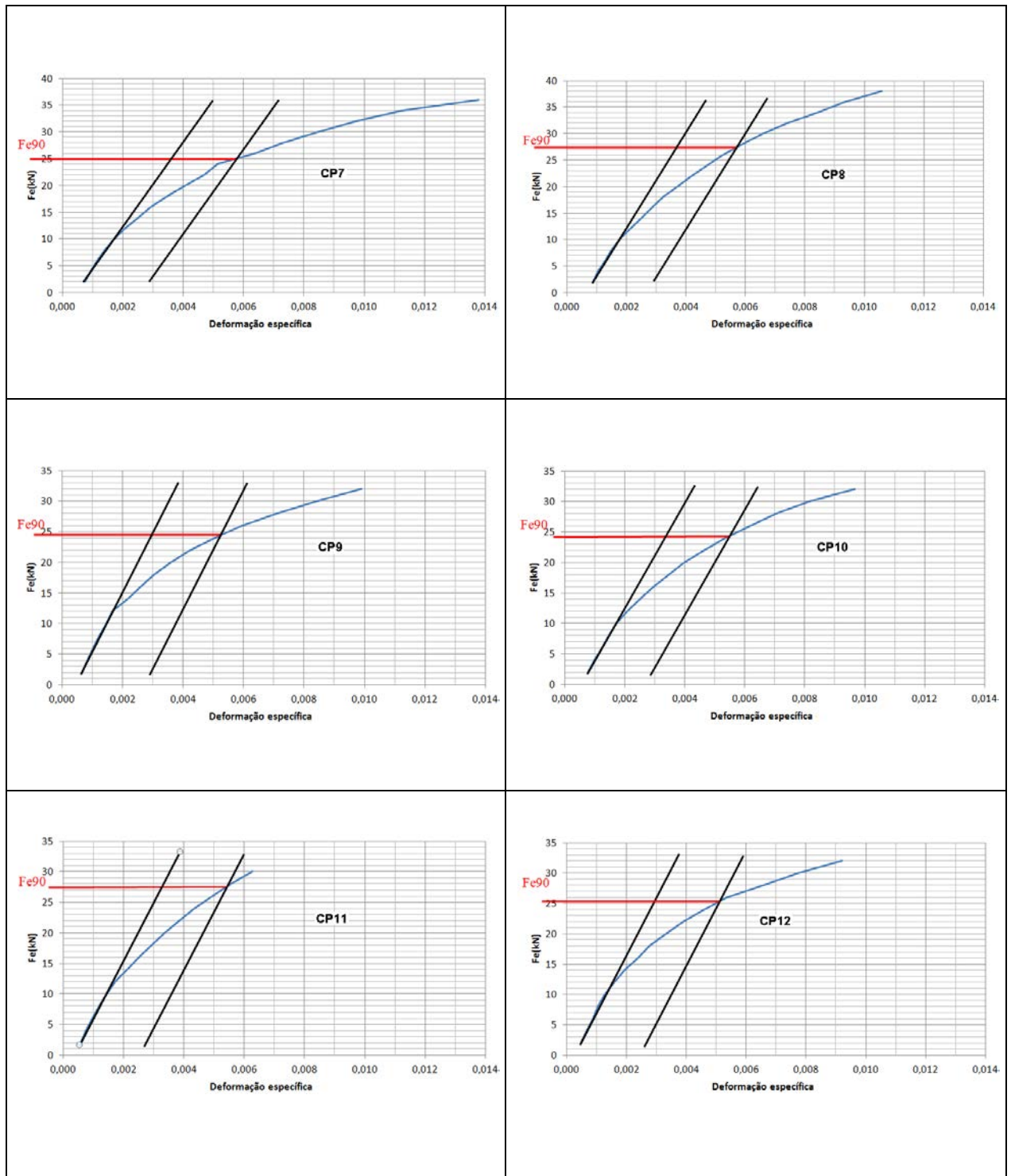


Figura 37. Força de embutimento na direção normal às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Pinus.

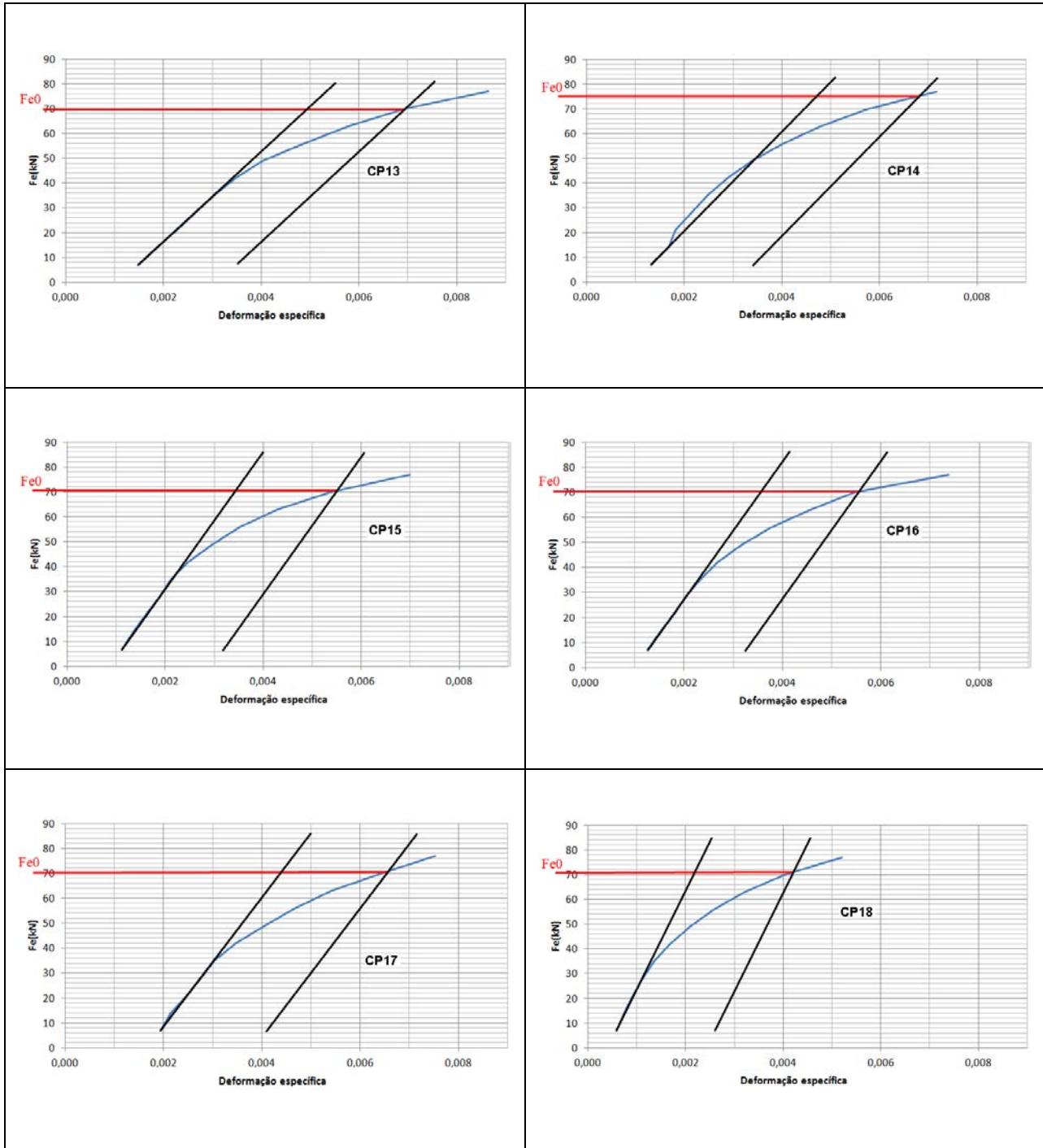


Figura 38. Força de embutimento na direção paralela às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Cupiúba.

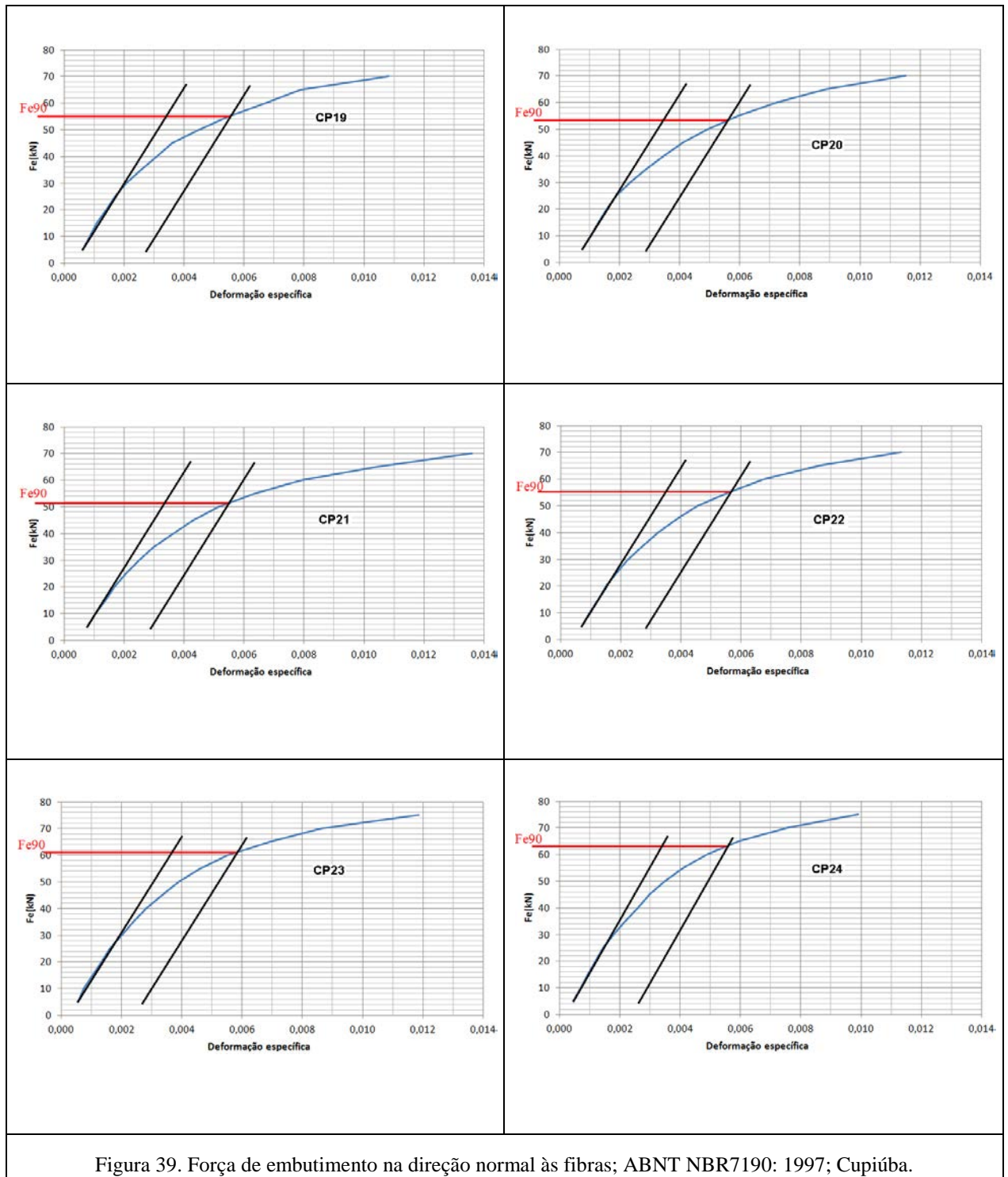


Figura 39. Força de embutimento na direção normal às fibras; ABNT NBR7190: 1997; Cupiúba.



Figura 40. Corpo de prova na ruptura, direção paralela às fibras.



Figura 41. Corpo de prova na ruptura, direção normal às fibras.

As tabelas 18 e 19 mostram os valores obtidos experimentalmente nos ensaios das ligações. São apresentados os valores de força correspondentes à deformação específica

residual igual a 2%_o (F_{e0} e F_{e90}), que é definido como a resistência da ligação pela ABNT NBR7190: 1997, à força última (F_{u0} e F_{u90}) e o deslocamento relativo (Δ_{u0} e Δ_{u90}) correspondente a essa força.

Tabela 18: Resistência da ligação, força última e deslocamento relativo para Pinus.

CP	F_{e0} (kN)	F_{u0} (kN)	Δ_{u0} (mm)	CP	F_{e90} (kN)	F_{u90} (kN)	Δ_{u90} (mm)
1	33	53	1	7	25	46	5
2	32	62	2	8	27	46	2
3	30	54	1	9	24	48	3
4	29	48	1	10	24	39	3
5	29	63	2	11	28	36	2
6	30	51	1	12	25	42	4
Média	30	55	1	Média	26	43	3
CV(%)	5	11	22	CV(%)	6	11	33

Tabela 19: Resistência da ligação, força última e deslocamento relativo para Cupiúba.

CP	F_{e0} (kN)	F_{u0} (kN)	Δ_{u0} (mm)	CP	F_{e90} (kN)	F_{u90} (kN)	Δ_{u90} (mm)
13	71	88	3	19	55	85	7
14	75	94	2	20	53	85	5
15	70	91	3	21	52	84	5
16	70	90	3	22	55	100	9
17	70	94	4	23	61	89	7
18	71	95	4	24	62	91	6
Média	71	92	3	Média	56	89	6
CV(%)	3	3	25	CV(%)	7	7	26

Após os ensaios da ligação, para efeito de comparação com os resultados teóricos, foram determinados os valores característicos da ligação conforme o critério do anexo C da ABNTNBR7190: 1997.

A Tabela 20 mostra os valores característicos para o embutimento e para a força última nas direções paralela e normal às fibras.

Tabela 20: Valores característicos da resistência da ligação.

Espécie	$F_{e0,k}$ (kN)	$F_{e90,k}$ (kN)	$F_{u0,k}$ (kN)	$F_{u90,k}$ (kN)
Pinus	29(*)	24(*)	48(*)	36(*)
Cupiúba	70(*)	52(*)	88(*)	84(*)

(*) devido à pequena variação nos resultados obtidos, não foi considerado o fator 1,1 estipulado pelo anexo B da ABNT NBR7190:1997, no cálculo do valor característico.

Para efeito de comparação com os valores teóricos, foram calculados os valores de cálculo por plano de corte (são oito planos de corte), utilizando coeficiente de modificação ($k_{mod} = 0,56$) e coeficiente de ponderação da resistência ($\gamma_m = 1,4$).

As Tabelas 21 e 22 mostram a comparação entre os valores experimentais e os valores teóricos, para os casos de direção paralela e normal às fibras, para a espécie Pinus e Cupiúba, sendo os valores teóricos obtidos em função da compressão paralela as fibras e da resistência ao embutimento da madeira, a partir dos valores característicos dados na Tabela 17, utilizando os critérios de dimensionamento das normas.

Tabela 21: Comparação dos valores experimentais e teóricos para a espécie Pinus.

Resistência de cálculo por plano de corte			
Forma de Obtenção		Direção Paralela às fibras	Direção Normal às fibras
Valores Experimentais	2% _o	1,45	1,20
	Força última	2,40	1,80
ABNT NBR7190: 1997	f_{c0}	1,86	0,78
	f_{e0}	0,94	0,31
ABNTNBR7190: 1982	f_{c0}	2,71	1,42
EUROCODE 5: 2004	f_{c0}	3,22	1,96
	f_{e0}	2,21	0,76
LRFD: 1996	f_{c0}	3,86	1,30
	f_{e0}	1,96	0,51

Tabela 22: Comparação dos valores experimentais e teóricos para a espécie Cupiúba.

Resistência de cálculo por plano de corte			
Forma de Obtenção		Direção Paralela às fibras	Direção Normal às fibras
Valores Experimentais	2% _o	3,50	2,60
	Força última	4,40	4,20
ABNTNBR7190: 1997	f_{c0}	2,28	0,96
	f_{e0}	1,79	0,41
ABNTNBR7190: 1982	f_{c0}	3,31	1,74
EUROCODE 5: 2004	f_{c0}	3,63	2,23
	f_{e0}	3,14	1,02
LRFD: 1996	f_{c0}	4,28	1,59
	f_{e0}	3,72	0,68

4.3 Análise dos Resultados

Os resultados experimentais mostraram uma resistência ao embutimento da madeira na direção paralela inferior à resistência na compressão paralela às fibras, sendo essa diferença maior no caso da espécie Pinus. O procedimento da norma ABNT NBR7190: 1997 determina que, na falta de resultados experimentais, a resistência ao embutimento seja tomada como o valor da resistência a compressão paralela às fibras.

Assim, os valores teóricos da resistência na ligação calculados a partir da resistência a compressão paralela às fibras são superiores aos valores obtidos com a resistência ao embutimento, tanto para Pinus como para Cupiúba. Isso indica que a definição da resistência ao embutimento em função da deformação específica residual 2‰ pela norma ABNT NBR7190: 1997 deve ser revista.

Com relação aos ensaios das ligações, em termos dos valores médios, a resistência considerando o valor último foi superior à obtida a partir da deformação específica residual de 2‰: no caso do Pinus, 66% na direção paralela e 50% na direção normal; no caso da Cupiúba, 26% na direção paralela e 62% na direção normal.

Para a direção paralela às fibras no caso da espécie Pinus, o valor experimental da resistência da ligação obtido a partir da deformação específica residual de 2‰ foi inferior aos valores teóricos calculados pelas normas, exceto para o caso da resistência calculada a partir da resistência a compressão paralela às fibras, para a norma ANBT NBR7190: 1997. O mesmo não ocorre para a espécie Cupiúba: os valores teóricos foram inferiores aos obtidos para a força última e a força de 2‰, em todos os casos.

A forma de ruptura observada nos ensaios, em que os corpos de prova foram feitos usando os espaçamentos mínimos entre os pinos, sugere que alguns resultados podem ter sido influenciados pelo fendilhamento da madeira, principalmente para o caso do Pinus.

5 CONCLUSÕES

No decorrer do trabalho foram apresentados várias conclusões, sendo as principais destacadas a seguir.

Os modelos teóricos estudados apresentam formulações diferentes para a resistência de ligações em corte simples e em corte duplo, enquanto a ABNT NBR7190: 1997 não faz distinção entre esses casos.

Com relação à resistência ao embutimento, a norma brasileira permite considerá-la com base na resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), enquanto que a americana LRFD: 1996 e o EUROCODE 5:2004 utilizam a densidade aparente da madeira (ρ_k) e o diâmetro do pino metálico (d) como parâmetros. Observou-se que a definição em função da resistência à compressão paralela às fibras pela ABNT NBR7190: 1997 leva a valores mais baixos em relação aos outros documentos normativos.

Desta forma, na comparação teórica entre os critérios para determinar a resistência dos parafusos nas ligações, foi utilizado o valor de resistência ao embutimento como definido pela ABNT NBR7190: 1997. A comparação teórica feita permitiu concluir que:

- Nos casos em que o embutimento é crítico, os valores calculados pela ABNT NBR7190: 1997 mostram-se inferiores aos de outros documentos normativos. Isso se deve, principalmente pelo fato da norma brasileira utilizar o fator 0,4 no cálculo da resistência ao embutimento (Equação 30), mostrando que esse valor deve ser modificado. Sugere-se que este valor seja alterado para 1; entretanto, deve ser destacado que essa alteração deve ser acompanhada por outras mudanças que melhor definam o ponto de transição de situações críticas de embutimento na madeira ou de flexão no pino, conforme comentado a seguir.

- De acordo com os critérios da ABNT NBR7190: 1997, a transição entre os casos críticos de embutimento na madeira e de flexão do pino metálico ocorrem apenas para valores mais elevados da relação espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino, ao contrário do que ocorre para as outras normas estudadas; isso indica que o β_{lim} da equação 29 não está corretamente especificado para o caso de ligações por parafusos.

De maneira geral, os valores encontrados para tensão resistente de cálculo da norma ABNT NBR7190: 1997 são inferiores aos obtidos pelos outros documentos normativos que apresentam resistências mais elevadas, no caso de pequenas relações entre a espessura da peça de madeira e o diâmetro do pino. Para classes de madeira com menor resistência, essa situação

se verifica para valores maiores dessa relação, em que a situação crítica pela ABNTNBR7190:1997 é o embutimento na madeira.

A experimentação realizada permitiu obter as seguintes conclusões:

- Os valores teóricos da resistência na ligação calculados a partir da resistência a compressão paralela às fibras foram superiores aos valores obtidos com a resistência ao embutimento, tanto para Pinus como para Cupiúba. Isso indica que a definição da resistência ao embutimento em função da deformação específica residual 2‰ pela norma ABNT NBR7190: 1997 conduz a valores menores de resistência.
- Os valores experimentais para a força última por plano de corte foram superiores aos valores teóricos encontrados pela ABNT NBR7190: 1997. Esses valores se aproximam dos valores obtidos pelo EUROCODE 5: 2004, o que indica que o critério da norma brasileira considera uma deformação muito pequena.
- A forma de ruptura observada nos ensaios, em que os corpos de prova foram feitos usando os espaçamentos mínimos entre os pinos, sugere que alguns resultados podem ter sido influenciados pelo fendilhamento da madeira, principalmente para o caso do Pinus.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a importância de realizar ensaios para determinação da resistência de outras configurações de ligações, variando o número de pinos e o seu espaçamento, a fim de viabilizar a utilização dos critérios de dimensionamento do Eurocode 5: 2004 na atual norma brasileira, fazendo os respectivos ajustes para as espécies de madeiras brasileira e para o caso das ligações parafusadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. A. O. **Uniões pregadas de madeira**. 1987. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2014.

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS/ AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. **LRFD**: Load and resistance factor design. Washington: ANSI/AF&PA, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: Cálculo e execução de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

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

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

DIAS, A. A.; ASSUNÇÃO, C. H. S.; ALMEIDA, D. H. **Comparação de critérios de dimensionamento de ligações por pinos em estruturas de madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 16., 2014, Natal, Rio Grande do Norte. **Anais...** São Carlos, IBRAMEM, CD-ROM.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.**EUROCODE 5**: Design of timber structures – Parte 1 - 1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections**. International association for bridge and structural engineering, Zurich, v.9, p.249-262, 1949.

JUNIOR, G. B. **Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de pinus aplicada na construção civil**. 1993. 119 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 1993.

NOGUEIRA, M. C. **Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção civil**. 1991. 131 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 1991.

MOREIRA, M. S. **Ligações estruturais de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pinos**. 2004. 462 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

OLIVEIRA, E. S. **Comparação entre três referências normativas para o dimensionamento de ligações parafusadas em madeira.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.

OLIVEIRA, M. A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira.** 2001. 137f f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PITER, J. C.; GUILLAUMET, A.; SOSA, ZITTO, A.; RAMOS, R. **Capacidad portante de uniones con clavos de pequeño diámetro. Análises comparativo de los resultados de ensayos con los calculados según la reglas de diseño del EUROCÓDIGO 5, DEL REGLAMENTO CIRSOC 601 Y DE LA NORMA NBR 7190.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 16., 2014, Natal, Rio Grande do Norte. **Anais...** São Carlos, IBRAMEM, CD-ROM.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **TIMBER STRUCTURES:** Part 1 – Design methods. Sidney: SAA, 1994.

VELOSO, L. A. C. M.; ALVIM, R. C.; ALMEIDA, P. A. O. **Avaliação numérica do modelo de cálculo das ligações mecânicas da NBR-7190/97.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 7., 2000, São Carlos, São Paulo. **Anais...** São Carlos, IBRAMEM, CD-ROM.

VELOSO, L. A. C. M.; MARTINEZ, M. A. B.; ALVIM, R. C.; ALMEIDA, P. A. O. **Estudo comparativo das expressões da NBR 7190 e do EUROCODE 5 para o cálculo de ligações pregadas de madeira.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM, 8., 2002, Uberlândia, Minas Gerais. **Anais...** Uberlândia, UFU, CD-ROM.