

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JOSÉ ERNESTO TONON

**AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS CISALHANTES EM
PARAFUSOS FIXADORES DE VIGAS DE ESTRUTURA DE MADEIRA**

DISSERTAÇÃO

**Cornélio Procópio– PR
2014**

JOSÉ ERNESTO TONON

**AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS CISALHANTES EM
PARAFUSOS FIXADORES DE VIGAS DE ESTRUTURA DE MADEIRA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Ciências Mecânicas (Materiais)

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno

Cornélio Procópio - PR
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

T666 Tonon, José Ernesto
Avaliação dos esforços cisalhantes em parafusos fixadores de vigas de estrutura de madeira / José Ernesto Tonon. – 2014.
82 f. : il. ; 30 cm

Orientador: João Roberto Sartori Moreno.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Cornélio Procópio, 2014.
Referências: p. 81-82.

1. Ligações parafusadas. 2. Chapas de aço. 3. Cisalhamento. 4. Engenharia Mecânica – Dissertações. I. Moreno, João Roberto Sartori, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD (22.ed.) 620.1

Biblioteca da UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Cornélio Procópio
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



Título da Dissertação Nº 001

“Avaliação dos Esforços Cisalhantes em Parafusos Fixadores de Vigas em Estrutura de Madeira”.

por

José Ernesto Tonon

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: **CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS**, pelo Programa de Pós Graduação em **ENGENHARIA MECÂNICA** da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às **15h30** do dia **11 de dezembro de 2014**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno
(Orientador - UTFPR - CP)

Prof.^a Dr.^a Kátya Regina de Freitas
(UTFPR - CP)

Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes
(UNESP - Ilha Solteira)

Visto da coordenação:

“Prof. Dr. Edson Hideki Koroishi”
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

“A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso”

À minha esposa Ione, amiga e companheira, que com compreensão e carinho, muito contribuiu para este projeto.

À minha filha, Beatriz, arquiteta e urbanista, que com habilidade e capacidade de criação foi importante para minha realização.

Ao meu filho, Felipe, biomédico, que com paciência e dedicação não mediu forças, presente ou não, encorajando-me.

Aos meus amigos e familiares, que direta ou indiretamente estiveram presentes neste estudo.

A minha querida mãe.

À memória de meu pai que muito se orgulharia desta importante façanha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, supremo e autor da vida.

Ao orientador, Dr. João Roberto Sartori Moreno, professor e amigo, que não deteve com sua maneira pronta de fazer tornar realizável esta etapa tão importante na carreira de um profissional e educador.

À CAPES e Fundação Araucária do Brasil pela aprovação de recursos para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus professores, sábios naquilo que se comprometeram a ensinar contribuindo para a formação.

À minha família, que com paciência e compreensão, neste curto período, marcado nas nossas vidas, muito se dedicou para a minha realização.

À minha querida mãe que com sabedoria natural e suas orações muito se preocupou com minhas idas e vindas.

RESUMO

TONON, J. Ernesto, **Avaliação dos esforços cisalhantes em parafusos fixadores de vigas de estrutura de madeira**. 2014. 82f. Qualificação de (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ciências Mecânicas – Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, Cornélio Procópio, 2014.

Na maioria das construções utilizam-se estruturas de madeira para coberturas e muitas são executadas no sistema convencional, empregando treliças. Com o avanço da arquitetura, no que diz respeito a empregabilidade da madeira, outras formas vêm sendo utilizadas, tornando o ambiente mais livre e harmônico, e para isso, a necessidade de vigas maiores, para vencer maiores vãos. Desta forma, os materiais dos elementos estruturais têm importante papel, a fim de demandar continuidade das peças, dentro dos padrões de segurança. As Normas Brasileiras apresentam formas de ligações onde, o emprego da madeira e o aço, garantem a estabilidade para ambos os materiais, visto a utilização de parafusos e pinos como elemento de ligação, empregados nas construções. Neste trabalho, a proposta é avaliar os conjuntos dos materiais de ligações aparafusadas entre madeira/madeira e compará-la com a ligações madeira/chapa de aço/madeira; a chapa dobrada a frio e prensada entre as peças não está aparente. Portanto, a ligação ficará a cargo dos parafusos, mas, com a chapa a resistência será maior suportando aos esforços cortantes causados pela flexão dos parafusos e inserida diretamente na madeira, que tem grande importância quanto à direção das fibras e do esforço aplicado.

Palavras-chave: Ligações aparafusadas. Chapa fina de aço. Esforço cortante. Engenharia mecânica.

ABSTRACT

TONON, J. Ernesto, **Evaluation of shear effort on fixator screws of timber structure beams**. 2014. 82f. Qualification of (Master in Mechanical Engineering – Mechanical Science - Materials) – Federal Technology University of Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio, Cornélio Procópio, 2014.

In most constructions are used wooden structures for roofs and many are executed in the conventional system using trusses. With the advancement of architecture, with regard the employability of timber, other ways have been used making the free and harmonious environment, and for this, the need for larger beams, to win larger spans. Therefore, the materials of the structural elements have an important role in order to demand continuity of parts with in the safety standards. Brazilian Standards of forms of links where the use of timber and steel, ensure stability for both materials, as the use of bolts and pins as liaison, used in buildings. In this paper, the proposal is to assess the joint of bolted connections materials between timber / timber and compare it with the connections timber / steel plate / timber; the folded plate and cold pressed between the parts is not apparent. Therefore, the connection will fall on the bolts, but with the plate resistance will be higher by supporting the shearing caused by the bending of the bolts and inserted directly on timber, which is very important as to the direction of the fibers and of the applied load.

Keywords: Bolted connections. Fine steel plate. Shear strength. Mechanical engineering.

LISTA DE SIMBOLOS

d	diâmetro
f_{cd}	resistência de compressão de projeto
$f_{c90,d}$	resistência de compressão normal de projeto
$f_{co,k}$	resistência de compressão paralela às fibras, característico
$f_{c90,k}$	resistência de compressão normal às fibras, característico
f_{ed}	resistência de embutimento, de projeto
f_{end}	resistência de embutimento normal às fibras, de projeto
$f_{e\alpha,d}$	resistência de embutimento relação ângulo e fibras, de projeto
$f_{e0,k}$	resistência de embutimento paralelo às fibras, característico
$f_{e90,k}$	resistência de embutimento normal às fibras, característico
f_m	resistência média
f_k	resistência característica
f_t	coeficiente de redução
$f_{t0,k}$	resistência de tração paralela às fibras, característico
$f_{tM,k}$	resistência de tração média, característica
f_u	tensão do material
$f_{v0,k}$	tensão de cisalhamento normal às fibras, característico
f_{yk}	tensão de escoamento do aço
f_{yd}	tensão de escoamento do aço, de projeto
f_α	resistência das fibras da madeira na direção do ângulo incidente
g	espaçamento entre furos
n	número de amostras
s	largura da chapa
t	distância da penetração do pino na madeira
A_n	área líquida da seção transversal
C_t	redução da área líquida
E_0	módulo de elasticidade na direção paralela às fibras
E_{90}	módulo de elasticidade na direção normal às fibras
$E_{c0,ef}$	módulo de elasticidade paralelo às fibras, efetivo
$E_{c0,m}$	módulo de elasticidade paralelo às fibras, médio
E_M	módulo de elasticidade médio

G	módulo de elasticidade transversal
K_{mod}	coeficiente de modificação
M	momento
M_{pd}	momento de plastificação, de projeto
M_{p}	momento de plastificação
R_{d}	Resistência de projeto
R_{vd}	Resistência do pino correspondente ao plano de corte
T	temperatura
U	teor de umidade (dado em porcentagem)
X_{d}	valores característicos, de projeto
X_{m}	valor característico médio obtido por ensaio de amostras
X_{k}	valores característicos
Z	módulo de plastificação
W	módulo de resistência da seção transversal
α	ângulo de inclinação da força F em relação às fibras
α_{n}	coeficiente de segurança
α_{e}	coeficiente de segurança no embutimento
β	parâmetro espessura e diâmetro
β_{lim}	parâmetro limite resistência da madeira e do aço
γ_{s}	coeficiente de minoração do aço
$\rho_{\text{bas,m}}$	densidade básica média
ρ_{ap}	densidade aparente
σ_{cd}	tensão de compressão, de projeto
$\sigma_{\text{c90,d}}$	tensão de compressão normal às fibras, de projeto
τ_{d}	cisalhamento, de projeto

LISTA DE ACRÔNIMOS

PS	Ponto de Saturação
UE	Umidade de Equilíbrio
URA	Umidade Relativa do Ar

LISTADE FIGURAS

Figura 1 – Anisotropia da madeira.....	25
Figura 2 – Comportamento da madeira na compressão.....	31
Figura 3 – Solicitação normal.....	32
Figura 4 – Tipos de compressão na madeira.....	33
Figura 5 – Tipos de tração na madeira.....	34
Figura 6 – Tipos de cisalhamento na madeira.....	34
Figura 7 – Transmissão de esforços por ligação.....	36
Figura 8 – Exemplos de ligações.....	37
Figura 9 – Tipos de ligações.....	38
Figura 10 – Mecanismos de ruptura no corte simples.....	41
Figura 11 – Mecanismos de ruptura no corte duplo.....	42
Figura 12 – Resistência à flexão do pino.....	42
Figura 13 – Tensões na ligação.....	43
Figura 14 – Conjunto do parafuso.....	49
Figura 15 – Dimensões das chapas fina dobrada a frio.....	50
Figura 16 – Detalhe da furação na madeira.....	53
Figura 17 – Detalhe dos modelos A1, A2 e A3.....	52
Figura 18 – Detalhe dos modelos B1, B2 e B3.....	52
Figura 19 – Construção de cobertura em madeira.....	53
Figura 20 – Projeto de uma cobertura.....	54
Figura 21 – Modelos de 8,0 cm x 20,0 cm com dois parafusos.....	56
Figura 22 – Modelos de 10,0 cm x 30,0 cm com três parafusos.....	56
Figura 23 – Modelos de 10,0 cm x 40,0 cm com quatro parafusos.....	56
Figura 24 – Vista dos parafusos e das arruelas.....	57
Figura 25 – Posição da furação lateral e da chapa dobrada.....	57
Figura 26 – Posição da aplicação da carga.....	58
Figura 27 – Sequência da aplicação da carga e comportamento do modelo B1 (8,0 cm x 20,0 cm com Chapa).....	62
Figura 28 – Sequência da aplicação da carga e comportamento do modelo B2 (10,0 cm x 30,0 cm com Chapa).....	62
Figura 29 – Sequência da aplicação da carga e comportamento do modelo B3	

(10,0 cm x 40,0 cm com Chapa).....	63
Figura 30 – Deformação dos parafusos dos modelos A1, B1, A2 e B2.....	63
Figura 31 – Deformação dos parafusos dos modelos A3, B3.....	64
Figura 32 – Deformação das chapas.....	64
Figura 33 – Situação das chapas parafusos dos modelos A1 e B1.....	65
Figura 34 – Tensões na madeira nos modelos B1 e A1 (8,0 cm x 20 cm).....	70
Figura 35 – Tensões na madeira nos modelos B2 e A2 (10,0 cm x 30 cm).....	71
Figura 36 – Tensões na madeira nos modelos B3 e A3 (10,0 cm x 40 cm).....	71
Figura 37 – Tensões localizadas nos parafusos.....	73
Figura 38 – Tensões localizadas nas chapas.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de Retração.....	24
Tabela 2 – Relação entre Resistências: caracterização simplificada.....	26
Tabela 3 – Classes de Resistência das Coníferas.....	27
Tabela 4 – Classes de Resistência das Dicotiledôneas.....	27
Tabela 5 – Valores de $K_{mod, 1}$	29
Tabela 6 – Valores de $K_{mod, 2}$	29
Tabela 7 – Valores de $K_{mod, 3}$	29
Tabela 8 – Classes de Umidade.....	29
Tabela 9 – Coeficientes de Ponderação.....	30
Tabela 10 – Valores de α_n	33
Tabela 11 – Valores de α_e	33
Tabela 12 – Propriedades: Eucalipto Citriodora e Garapa Roraima.....	48
Tabela 13 – Dimensões dos Principais Produtos de Madeira Serrada.....	48
Tabela 14 – Classificação das Variáveis.....	53
Tabela 15 – Classificação das Cargas x Deslocamentos: ensaio físico.....	68
Tabela 16 – Comparativo de Resistências entre Modelos Simulados.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Força x Deslocamento - Modelos 8,0 cm x 20,0 cm, com dois Parafusos.....	66
Gráfico 2 – Força x Deslocamento - Modelos 10,0 cm x 30,0 cm, com três Parafusos.....	67
Gráfico 1 – Força x Deslocamento - Modelos 10,0 cm x 40,0 cm, com quatro Parafusos.....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	18
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS.....	20
1.3 OBJETIVO.....	20
1.3.1 Objetivo Geral.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 JUSTIFICATIVA.....	21
1.5 METODOLOGIA.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.....	22
2.1.1 Umidade.....	22
2.1.2 Densidade.....	22
2.1.3 Retratibilidade.....	23
2.1.4 Durabilidade.....	23
2.1.5 Resistência Química.....	24
2.2 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA.....	24
2.2.1 Módulos de Elasticidade.....	25
2.2.2 Módulos de Elasticidade Transversal.....	26
2.2.3 Característica Simplificada.....	26
2.2.4 Classes de Resistência.....	26
2.2.5 Valores Representativos.....	27
2.2.5.1 Valores de cálculo de projeto.....	27
2.2.5.2 Coeficientes de modificação.....	28

2.2.5.3 Classes de umidade.....	29
2.2.5.4 Coeficientes de ponderação.....	30
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	30
2.3.1 Compressão.....	30
2.3.2 Tração.....	33
2.3.3 Cisalhamento.....	34
2.4 LIGAÇÕES.....	35
2.4.1 Tipos de Ligações.....	35
2.4.2 Tipos Comuns de Ligações.....	37
2.4.2.1 Ligações por entalhes ou encaixes.....	37
2.4.2.2 Ligações com conectores.....	38
2.4.2.3 Ligações coladas.....	38
2.4.2.4 Ligações por tarugos.....	39
2.4.2.5 Ligações com pinos.....	39
2.4.2.6 Ligações parafusadas em chapas e perfis dobrados a frio.....	45
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1 MATERIAIS.....	47
3.1.1 Madeira.....	47
3.1.2 Aço – Parafuso, Arruela, Porca, e chapa Metálica.....	48
3.2 MÉTODOS.....	50
3.2.1 Cálculo das Cargas Atuantes.....	50
3.2.2 Geometria dos Modelos.....	51
3.2.3 Variáveis de Identificação.....	52
3.2.4 Experimentos.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59

4.1 CÁLCULO ANALÍTICO.....	59
4.2 ENSAIO MECÂNICO.....	61
4.2.1 Deformação da Madeira.....	62
4.2.2 Deformação do Parafuso.....	63
4.2.3 Deformação da Chapa Metálica.....	64
4.2.4 Critérios de Ruptura.....	65
4.3 ENSAIO SIMULADO.....	69
4.3.1 Simulação na Madeira.....	69
4.3.2 Simulação no Parafuso.....	72
4.3.3 Simulação na Chapa Metálica.....	75
5 CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	81

1 INTRODUÇÃO

A madeira, apesar da facilidade de extração, manuseio e da grande variedade das espécies comerciais, ainda tem restrita empregabilidade como principal elemento estrutural nas edificações; isto se dá pela dificuldade de obtenção de peças nas dimensões necessárias.

A necessidade das ligações das peças de madeira tem seu emprego não só para vencer grandes vãos, mas também para compor estruturas resistentes.

A junção da madeira e o aço, na forma de parafusos ou pinos, é uma das formas de compor ligações apropriadas, mas pelos diferentes comportamentos apresentados com relação à direção das fibras da madeira, fica sujeita muitas vezes a ligações com baixa resistência.

A composição com elementos metálicos, na forma de chapas de aço, tem sido empregada para o enrijecimento das ligações, porém ainda com o problema do esmagamento das fibras da madeira em função dos esforços cortantes.

Portanto, a inserção de uma chapa fina de aço dobrada a frio, prensada entre as peças da madeira irá resistir aos esforços cisalhantes nas fibras, causados pela flexão dos parafusos quando a ligação é submetida a uma carga.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A madeira, no Brasil, tem considerável relevância, na habitação, e como condição estrutural e funcional nas construções de edifícios, pontes, mezaninos, escadas, além de seu emprego em esquadrias, assoalhos e, na construção civil, como formas, escoras, cimbramentos e outras aplicações. No entanto, o uso da madeira tem restrições, devido às dimensões praticadas e à resistência, levando-se ainda em consideração as espécies, a extração de madeira, o reflorestamento e o comércio legalizado.

A utilização da madeira, na maioria das vezes, requer elementos de ligação, não somente pela continuidade das peças, como também para compor peças diferentes (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 52).

Segundo a revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...2012), as ligações são definidas genericamente por: penetração, pinos, conectores e por adesão. As ligações

por penetração necessitam de encaixe entre as peças. Por pinos, podem ser pregadas, cavilhadas ou parafusadas, com rosca soberba ou lisa, com porcas e arruelas. Por conectores, possuem tarugos ou anéis enxertados entre as peças. Por adesão, utilizam adesivos.

Para Escarpini Filho et al. (2007, p. 2) as ligações, no estudo do seu comportamento, suportam e transferem cargas oriundas das estruturas como um todo, no que diz respeito ao peso próprio e às ações internas e externas da estrutura.

A madeira tem sido utilizada na estrutura de cobertura, no sistema convencional treliçado; e as ligações, nesse sistema, possuem sua importância, pois os elementos da treliça têm comportamentos de tração e de compressão. Outros materiais em ligação são comumente usados nesse sistema de cobertura: um deles é o das chapas metálicas, pela facilidade de execução.

Segundo Calil Jr. e Molina (2010, p. 32) a função estrutural de apoio de uma cobertura em madeira é receber e transferir as cargas da trama para a edificação de modo eficiente e econômico; o que depende da escolha de um perfil adequado com as necessidades arquitetônicas e compatíveis com o carregamento.

No sistema estrutural convencional, as edificações construídas em madeira para a cobertura, são constituídas de estrutura principal, as tesouras e da secundária, que são terças, caibros, ripas e contraventamento.

Segundo Martins (2007), a característica principal da estrutura no sistema convencional, além dos elementos de ligação, são os montantes das diagonais e dos banzos estarem ligados em planos diferentes.

Para Calil Jr. e Molina (2010, p. 32), as terças são vigas de madeira, solicitadas à flexão oblíqua, apoiadas sobre paredes ou sobre a estrutura principal da cobertura, com a finalidade de apoiar os caibros, quando existirem; ou, caso contrário, para apoiar as telhas. Quando as terças apoiam o caibramento, as telhas que estão apoiadas sobre as ripas descansam nas terças. Certamente, numa treliça, o engenheiro vai encontrar casos nos quais o perfil arquitetônico necessário é conflitante com o perfil estrutural preferido, e, portanto, altas tensões podem aparecer nas barras internas e nas conexões. A economia pode então ser alcançada, criando balanço econômico entre o material e a mão de obra.

Outra maneira de vencer grandes vãos, sem o uso de tesouras, está na utilização de pranchas de madeira. São estruturas independentes, que podem ser

apoiadas diretamente nos demais elementos estruturais, como por exemplo, nas paredes, pilares e vigas de concreto, de aço ou de madeira. Nas ligações das vigas utilizam-se parafusos lisos, com porcas e chapas metálicas, ou somente chapas metálicas dentadas.

Conforme Martins (2007, p. 20), ligações estruturais treliçadas, ou em peças de madeira, são utilizados, para sua constituição, pinos metálicos, como pregos e parafusos, cavilhas de madeira e de aço, além de conectores metálicos, como chapas simples, anéis e chapas com dentes estampados.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

As ligações em pranchas de madeira, quando submetidas aos esforços cortantes, geralmente, são feitas com chapas metálicas parafusadas ou dentadas

Porém, quando são utilizados parafusos lisos com arruelas e porcas, embutidos diretamente na madeira, ou além dos parafusos é realizada a inclusão de uma chapa metálica fina dobrada a frio, prensada entre as pranchas. A carga da estrutura, quando solicitada, sobrecarregará os parafusos que flexionados ocasionam tensões na chapa de aço e nas fibras da madeira.

1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é comparar o comportamento da ligação de duas peças de madeira, parafusada à outra com uma chapa metálica prensada, quando submetidos a esforços cortantes em uma ligação.

1.3.1 Objetivo Geral

É conhecer a resistência de uma ligação composta de madeira e aço, existente na estrutura de cobertura das edificações, levando em consideração aspectos experimentais e comparativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

O objetivo específico é estudar o comportamento individual do material e do conjunto, quanto à resistência ao cisalhamento

1.4 JUSTIFICATIVA

Na execução de vários tipos de ligações, empregando peças de madeira, parafusos e chapas metálicas, essas últimas geralmente são mostradas, quer sejam nas laterais ou no topo da ligação, para suportar as tensões que podem ser de compressão, de tração, ou ao cisalhamento.

Neste estudo tanto os parafusos quanto a chapa foram embutidos na madeira em três modelos, divididos em duas situações.

Na Situação A, a ligação foi realizada com parafusos lisos, arruelas e porcas; na Situação B, além dos parafusos, foi adicionada uma chapa fina dobrada a frio, prensada entre as peças de madeira.

1.5 METODOLOGIA

O método empregado, neste trabalho experimental, é explicativo e descritivo e compara as duas formas das ligações, chamadas de Situação A e Situação B.

Na Situação A, as madeiras serão ligadas por parafusos lisos sextavados, com arruelas e porcas. Na Situação B, além dos parafusos, haverá uma chapa metálica dobrada a frio entre as peças, justificando a sua utilização como forma de absorver a tensão cisalhante, que transferida ao parafuso, tenderá flexionar e podendo, assim, evitar que seja diretamente aplicado nas fibras da madeira, no embutimento, estando diretamente normal às fibras da madeira.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para otimizar o uso da madeira em uma ligação, é necessário conhecer as propriedades que contribuem para a resistência do material. A seguir serão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas da madeira, que são: umidade, densidade, retratibilidade, durabilidade, resistência química, além da compressão e tração paralela e normal às fibras, cisalhamento, módulo de elasticidade e o embutimento (GESUALDO 2003, p. 6).

2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

As propriedades físicas da madeira têm importante relevância na elaboração do projeto, pelo fato de serem interferidas quando uma tensão for aplicada na direção das fibras, além do tempo de duração da carga, atrelada ainda à umidade, que é um inibidor de tensão quando as fibras estão saturadas (KUSADA 2011, p. 16).

2.1.1 Umidade

O teor de umidade da madeira (U), medido em porcentagem, é a razão entre a massa da água contida na madeira (m_i) e a massa da madeira seca (m_s). A umidade na madeira ainda pode implicar em vários fatores, dentre eles os correspondentes às propriedades de resistência e elasticidade. Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997), o Equilíbrio da Umidade, $EU=12\%$, condicionada quando atingida a Temperatura $T=20^\circ\text{C}$ e a Umidade Relativa do Ar, $URA=65\%$, é expressada pela equação (1) (CALIL JR et al., 2003, p. 22).

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} 100 \quad (1)$$

onde:

m_i é a massa inicial da amostra;

m_s é a massa da madeira seca.

O teor de água da madeira pode ser avaliado através de medidores elétricos de umidade, calibrados para duas faixas distintas de medições: uma correspondente a um intervalo de 5% e 25%, inferior ao Ponto de Saturação (PS); e a outra para valores superiores a 25%.

2.1.2 Densidade

A densidade é uma importante propriedade física na aplicação da madeira como estrutura, pois seu peso próprio conta como sua utilização em função da espécie utilizada. Dois tipos de densidades são expressos na Revisão NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO..., 2012, p. 11).

Densidade básica é definida convencionalmente pela razão entre a massa seca da amostra considerada e o volume completamente saturado, isto é, com todos os vazios internos repletos de água. A densidade aparente é definida convencionalmente pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova para certo valor obtido com $U=12\%$ (CALIL JR et al., 2003, p. 27).

2.1.3 Retratibilidade

A retratibilidade é a variação dimensional e anatômica da madeira; caracterizada pelas propriedades de retração e de inchamento. Pelas especificações anatômicas, o fenômeno de retração está presente nas três direções principais apresentadas nas composições das fibras da madeira, que são: axial, radial e tangencial (GESUALDO 2003, p. 7).

Segundo Andrade (2011), as diferenças entre as porcentagens de retração, no sentido radial e tangencial, são as principais responsáveis, quando na secagem, pelo aparecimento de trincas, rachaduras, empenamentos, encanoamentos e torcimentos. A unidade correspondente a cada direção, está expressa na Tabela 1.

Tabela 1 – Porcentagens de Retração

Direção	Retração total (%)
Longitudinal (L)	0,1 a 0,9
Radial (R)	2,4 a 11,0
Tangencial (T)	3,5 a 15,0
Volumétrica (V)	6,0 a 27,0

Fonte: Andrade (2011).

2.1.4 Durabilidade

Com relação à biodeteriorização da madeira, a durabilidade depende da espécie, da extração sazonal, das características atômicas, e dos ataques biológicos; este, exclusivamente relevante a algumas espécies. Os tratamentos disponíveis podem, além da preservação contra aos ataques biológicos, aumentar a resistência da madeira (CALIL JR et al., 2003, p. 43).

A durabilidade da madeira depende das condições de exposição à umidade, se não for tratada antes de sua aplicação.

Para Pizzo et al. (2012, p. 1), quando a madeira entra em contato com a umidade da alvenaria, se não existir ventilação suficiente, aumentará o risco de degradação pelo apodrecimento e pelos ataques biológicos, diminuindo assim a sua resistência.

2.1.5 Resistência Química

A madeira apresenta boa resistência aos ataques químicos, podendo, em alguns casos, ocorrer o aparecimento de manchas esbranquiçadas, devido à existência da lignina e da hemicelulose da madeira. Também aos ataques de ácidos ou de bases fortes podem danificar a superfície da madeira, como também causar redução do peso e interferir na sua resistência (CALIL JR et al., 1998, p. 19).

2.2 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA

A madeira, por se tratar de um material anisotrópico, tem comportamento diferente quanto à sua resistência e à sua rigidez, diferindo, segundo as direções, nos

três principais eixos: longitudinal, radial e tangencial, conforme mostra a Figura 1 (CALIL JR et al., 2003, p. 37).

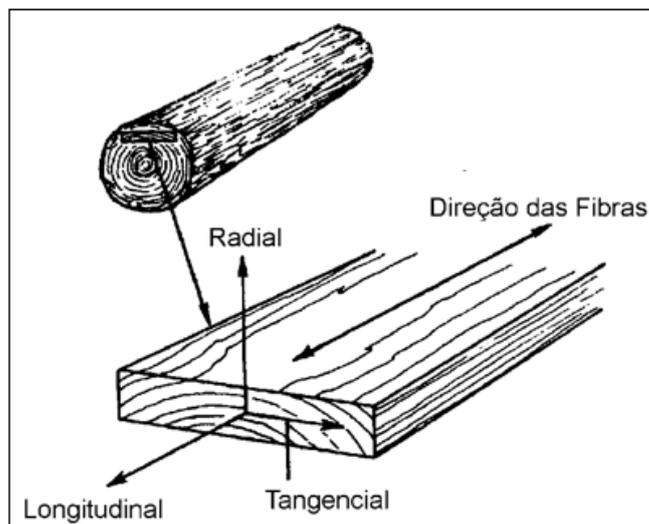


Figura 1 – Anisotropia da madeira.
Fonte: Ritter (1990).

2.2.1 Módulos de Elasticidade

Os módulos de elasticidade determinam o comportamento da madeira na fase elástico-linear, e são definidos nas direções paralela (E_0) e normal (E_{90}) às fibras e também na flexão (E_M). Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, na compressão e tração paralela às fibras (E_0), são necessários ensaios específicos, como descrito na NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p.90), e disponibiliza valores médios das propriedades de rigidez e resistência de algumas madeiras nativas e de florestamento.

Na determinação do módulo de elasticidade na direção normal às fibras (E_{90}), na falta de ensaios específicos, utiliza-se a equação (2):

$$E_{90} = \frac{1}{20} E_0 \quad (2)$$

Na determinação do módulo de elasticidade longitudinal na flexão (E_M), ele pode ser obtido através de ensaios específicos ou de parte do valor de E_0 , que são dados pela relação:

$E_M = 0,85E_0$ para as coníferas;

$E_M = 0,90E_0$ para as dicotiledôneas.

2.2.2 Módulos de Elasticidade Transversal

Para a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997) o módulo de elasticidade transversal está associado diretamente à direção perpendicular das fibras da madeira, e pode ser calculado a partir do valor do módulo de elasticidade (E_0) através da equação (3):

$$G = \frac{E_0}{20} \quad (3)$$

2.2.3 Característica Simplificada

A falta de experimentação simplificada para a obtenção dos valores de resistência mais precisos, induz ao uso da NBR 7190 (Associação...1997, p. 15) que disponibiliza relações entre as resistências das Coníferas e das Dicotiledôneas, que estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre Resistências: caracterização simplificada

Relação entre Resistências					Coníferas	Dicotiledôneas
$f_{c0,k}/f_{t0,k}$	$f_{tM,k}/f_{t0,k}$	$f_{c90,k}/f_{c0,k}$	$f_{e0,k}/f_{c0,k}$	$f_{e90,k}/f_{c0,k}$	$f_{v0,k}/f_{c0,k}$	$f_{v0,k}/f_{c0,k}$
0,77	1	0,25	1	0,25	0,15	0,12

Fonte: Gesualdo (2003).

2.2.4 Classes de Resistência

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p. 16) adota a classe de resistência nas quais padroniza as propriedades na utilização de várias espécies com propriedades similares. Nas Tabelas 3 e 4, são definidos dois grupos de espécies Coníferas e Dicotiledôneas.

Tabela 3 – Classes de Resistência das Coníferas

Valores de resistência na condição padrão de referência U=12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (Mpa)	$f_{v,k}$ (Mpa)	$f_{c0,m}$ (Mpa)	$\rho_{bas,m}$ (Kg/m ³)	$\rho_{parente}$ (Kg/m ³)
C 20	20	4	3500	400	500
C 25	25	5	8500	450	550
C 30	30	6	14500	500	600

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

Tabela 4 – Classes de Resistência das Dicotiledôneas

Valores de resistência na condição padrão de referência U=12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (Mpa)	$f_{v,k}$ (Mpa)	$f_{c0,m}$ (Mpa)	$\rho_{bas,m}$ (Kg/m ³)	$\rho_{parente}$ (Kg/m ³)
C 20	20	4	9500	500	650
C 30	30	5	14500	650	800
C 40	40	6	19500	750	950
C 60	60	8	24500	800	1000

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

2.2.5 Valores Representativos

Os valores representativos da resistência são necessários para o cálculo da resistência da madeira quando na sua utilização. Como a madeira é um material anisotrópico, é necessário obter o valor representativo da resistência em cada situação com relação à direção da tensão aplicada, e também ao tempo de exposição, que são apresentadas nas condições específicas (CALIL JR et al., 2003, p. 50).

2.2.5.1 Valores de cálculo de projeto

Os valores de cálculo de projeto são necessários para se obter a resistência da madeira para os cálculos a que serão considerados no projeto e inicia-se pelos valores característicos das propriedades da madeira.

Os valores característicos das propriedades da madeira se obtêm através do cálculo (X_d), que, empregando o coeficiente de modificação (K_{mod}) e o coeficiente de minoração (γ_w) que pode estar em função da compressão, da tração ou do cisalhamento, conforme a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997), se obtêm através da equação (4).

$$X_d = K_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad (4)$$

onde:

$$X_k = 0,7X_{m,12};$$

$X_{m,12}$ = média aritmética de ensaio de no mínimo 12 amostras.

2.2.5.2 Coeficientes de modificação

O coeficiente de modificação (K_{mod}) é o resultado do produto de três valores de ($K_{mod, i}$), que está em função do carregamento, relacionados à função da classe de carregamento, da classe de umidade e da qualidade da madeira utilizada. Preferencialmente aquela que passou por classificação visual (e garante a isenção de defeitos) e por classificação mecânica. No caso das coníferas, fica prejudicada a classificação visual, em função da presença de nós não detectáveis, na inspeção visual. Portanto, o coeficiente de modificação se subdivide em três coeficientes, pela equação (5) da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p. 7).

$$K_{mod} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3} \quad (5)$$

onde:

$K_{mod,1}$ = classe de carregamento e do tipo da madeira empregada;

$K_{mod,2}$ = classe de umidade e do tipo de madeira empregada;

$K_{mod,3}$ = categoria da madeira utilizada.

O cálculo do módulo de elasticidade efetivo ($E_{co, ef}$), correspondente à rigidez da madeira, é obtido através do produto do coeficiente de modificação (K_{mod}) e do módulo de elasticidade médio ($E_{co, m}$), expressa na equação (6), segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

$$E_{co,ef} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3} \cdot E_{co,m} \quad (6)$$

As Tabelas 5,6 e 7, fornecem os valores dos coeficientes de $K_{mod,1}$, $K_{mod,2}$, e $K_{mod,3}$, respectivamente.

Tabela 5 – Valores de $K_{mod,1}$

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Serrada Laminada colada Compensada	Recomposta
Permanente	0,6	0,3
Longa duração	0,7	0,45
Média duração	0,8	0,65
Curta duração	0,9	0,9
Instantânea	1,1	1,1

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

Tabela 6 – Valores de $K_{mod,2}$

Classes de umidade na madeira	Serrada Laminada colada Compensada	Recompensada	Serrada Submersa
	(1) e (2)	1,0	1,0
(3) e (4)	0,8	0,9	

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

Tabela 7 – Valores de $K_{mod,3}$

Coníferas		0,8
Dicotiledôneas de 1ª categoria		1
Peças de 2ª categoria		0,8
	Peças retas	1
Madeira laminada colada	Peças curvas	$1 - 2000 \left(\frac{t}{r}\right) (*)$

(*) t é a espessura das lâminas e r é o menor raio de curvatura das lâminas

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

2.2.5.3 Classes de umidade

A umidade presente na madeira pode alterar as propriedades da resistência e a estabilidade; pode ser ajustada com as condições ambientais cujas estruturas permanecerão. As adequações deverão ser segundo as classes de umidade da Tabela 8 (CALIL JR et al., 1998, p. 39).

Tabela 8 – Classes de Umidade

Classes de carregamento	Umidade relativa do ambiente	Umidade de equilíbrio da madeira
	U_{amb}	U_{eq}
1	$\leq 65\%$	0,12
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	0,15
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	0,18
4	$U_{amb} > 85\%$ Durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

2.2.5.4 Coeficientes de ponderação

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p. 18) especifica os valores dos coeficientes de ponderação para a verificação dos estados limites últimos e da relação entre as resistências característica e a média, apresentado na Tabela 9. Para verificação dos estados limites de utilização, adota-se $\gamma_w = 1,0$.

Tabela 9 – Coeficientes de Ponderação

Relação f_k / f_m entre as resistências características e média e o valor do coeficiente γ_w		
Esforço	f_k / f_m	γ_w
Compressão paralela às fibras	0,70	1,4
Tração paralela às fibras	0,70	1,8
Cisalhamento paralelo às fibras	0,54	1,8

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Nas propriedades mecânicas da madeira, quando são solicitadas, devem resistir ao estado último de tensão, quer seja na compressão, na tração, ao cisalhamento, na flexão ou na torção; obtém valores diferentes, segundo as direções dos três eixos principais. Nos eixos compreendidos pelas direções radial e tangencial, os valores obtidos são muito próximos. Dessa forma, essas propriedades são analisadas segundo o eixo da direção longitudinal, paralela às fibras (CALIL JR et al., (2003, p. 37).

2.3.1 Compressão

A madeira pode sofrer compressão em relação às fibras nas três direções de solicitação: normal, paralela ou inclinada. Na compressão paralela às fibras, conforme Figura 2, as tensões aplicadas agem na direção do comprimento das células. A resistência nesta direção é grande, o que não acontece na compressão normal às fibras, onde, pela tensão estar perpendicular ao comprimento das células, ocorre o esmagamento das fibras e apresenta redução da resistência da ordem de 75% em relação se comparada paralela às fibras (CALIL JR et al., 1998, p. 39).

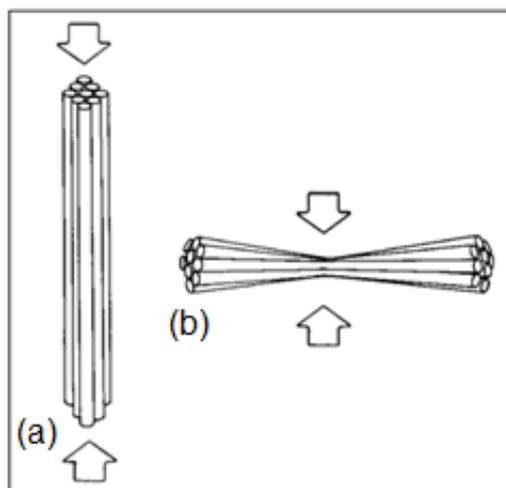


Figura 2 – Comportamento da madeira na compressão: (a) paralela; (b) normal. Fonte: Ritter(1990).

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997), a verificação da segurança da tensão solicitante ocorre quando a resistência à compressão for menor ou igual ao de cálculo, expressa pela equação (7).

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad (7)$$

Na verificação da segurança da solicitação perpendicular às fibras, a tensão solicitante de compressão normal, além da redução da ordem de 75%, deve ser majorada com o coeficiente α_n , indicado na Tabela 9, respeitando dois casos: no primeiro caso, α_n é igual a 1, quando a extensão da carga aplicada na direção das fibras for igual ou superior a 15,0 cm; no segundo caso, utilizar α_n , quando a extensão da carga for inferior a 15,0 cm. Para ambos os casos, quando a carga estiver afastada de pelo menos 7,5 cm da extremidade da peça, onde, pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997), é dado na equação (8) (CALIL JR et al., 1998, p. 55).

$$\sigma_{c90,d} \leq f_{c90,d} \quad (8)$$

onde:

$f_{c90,d}$ é dada pela expressão (9).

$$f_{c90,d} = 0,25 f_{c0,d} \cdot \alpha_n \quad (9)$$

Na compressão inclinada às fibras, os valores são decompostos entre a compressão paralela e normal às fibras, pelo ângulo em que a tensão é aplicada. As influências das tensões normais, em relação às fibras da madeira, começam a ser calculadas pela expressão de Hankinson, a partir do ângulo $\alpha = 6^\circ$; antes, porém, a tensão é considerada paralela às fibras, conforme a equação (10) (NBR 7190, ASSOCIAÇÃO...1997, p. 22).

$$f_\alpha = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{90} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad (10)$$

Na compressão normal às fibras, a dimensão da peça que incide a força na madeira, exerce uma extensão de carga (b), que deve ser majorada pelo coeficiente α_n e a distância a de pelo menos 7,5 cm, da borda da madeira, do local de aplicação da carga. A Figura 3 demonstra a extensão da carga para cálculos de α_n . Quando a compressão normal às fibras está no embutimento da madeira; o cálculo fica a cargo do coeficiente de majoração α_e .

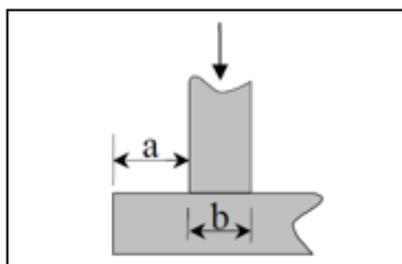


Figura 3 – Solicitação normal
Fonte: Gesualdo (2003).

A Tabela 10 identifica os valores de α_n em função da extensão (b) da carga; Tabela 11, os valores de α_e na compressão normal às fibras no embutimento.

Tabela 10 - Valores de α_n

Extensão da carga normal (b) às fibras, medida paralelamente a estas (cm)	α_n
1	2,00
2	1,70
3	1,55
4	1,4
5	1,30
7,5	1,15
10	1,1
15	1

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

Tabela 11 - Valores de α_e

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	1,10	1,07	1,00

Fonte: NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997).

A Figura 4 demonstra os três possíveis tipos de compressão na madeira com relação às fibras.

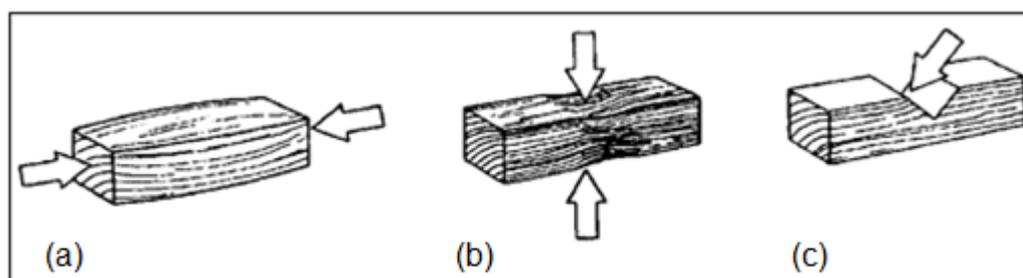


Figura 4 – Tipos de compressão na madeira: (a) paralela; (b) normal; (c) inclinada.
Fonte: Ritter (1990).

2.3.2 Tração

As peças de madeira podem ser submetidas à solicitação de tração paralela e perpendicular às fibras. Na tração paralela às fibras, a ruptura pode ocorrer por deslizamento entre as células ou por ruptura das suas paredes, embora apresentem elevados valores de resistência e baixa deformação (CALIL JR et al., 2003, p. 39).

A verificação da segurança nas peças tracionadas ocorre quando a tensão solicitante for menor ou igual ao de cálculo da resistência à tração, que é dado pela equação (11) da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p. 22).

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (11)$$

onde:

$f_{td} = f_{t0,d}$ – na tensão de tração paralela às fibras;

$f_{td} = f_{t,\delta}$ – na tensão de tração com $\alpha > 6^\circ$.

Na tração perpendicular às fibras, a madeira apresenta baixos valores de resistência e alta deformação (Figura 5). Na solicitação os esforços são atuados na direção perpendicular às fibras, podendo haver a separação entre elas. Esse tipo de solicitação deve ser evitado (CALIL JR et al., 2003, p. 40).

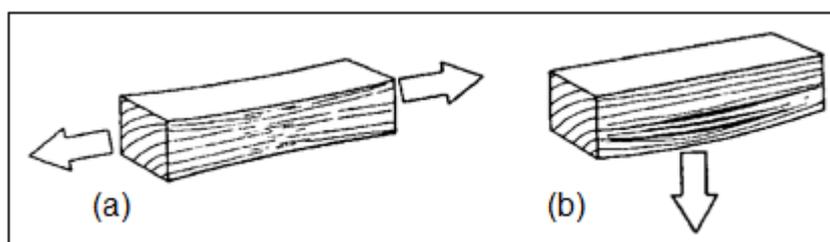


Figura 5 – Tipos de tração na madeira: (a) paralela; (b) normal.
Fonte: Ritter (1990).

2.3.3 Cisalhamento

Na madeira podem ocorrer três situações adversas de cisalhamento em relação às fibras: perpendicular, radial e longitudinal (Figura 6). O cisalhamento perpendicular não é crítico, podendo haver o esmagamento da madeira, enquanto que o radial e o longitudinal devem ser evitados, pois, além de ocorrer a ruptura com baixa tensão, pode ocorrer o deslizamento entre as fibras (CALIL JR et al., 2003, p. 40).

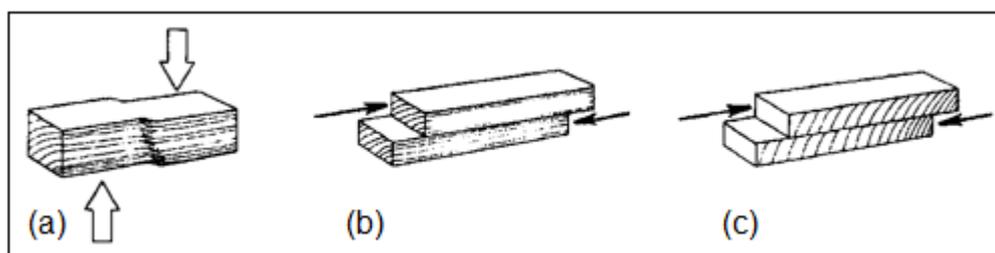


Figura 6 – Tipos de cisalhamento na madeira: (a) perpendicular; (b) longitudinal; (c) radial.
Fonte: Ritter(1990).

A verificação da segurança com a tensão máxima de cisalhamento atuante no ponto mais solicitado da peça é dado por τ_d , na equação (12) da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997, p. 23).

$$\tau_d \leq f_{v0,d} \quad (12)$$

O valor de $f_{v0,d}$ deve ser obtido experimentalmente; mas a NBR 7190 (Associação...1997) permite a expressão (13) para o cálculo das Coníferas e a expressão (14) para os cálculos das Dicotiledôneas, ambas em função do valor da resistência à compressão paralela às fibras (GESUALDO 2003, p. 28).

$$f_{v0,d} = 0,12 f_{c0,d} \quad (13)$$

$$f_{v0,d} = 0,10 f_{c0,d} \quad (14)$$

2.4 LIGAÇÕES

Os principais requisitos de uma ligação estão nos seus elementos que devem ser resistentes aos esforços entre as peças de madeira. Quando na utilização com pinos, o material do embutimento tem a função de resistir à flexão e ao cisalhamento, enquanto que a madeira deve resistir à compressão paralela e normal às fibras (SILVA e RADE, 2006, p. 3).

2.4.1 Tipos de Ligações

Os tipos e as formas empregadas numa ligação são elementos que muitas vezes necessitam de detalhamentos, entendendo-se por arranjos de ligações. Os comportamentos desses arranjos determinam a necessidade de utilizar diferentes materiais na sua composição; podem ser submetidos a vários tipos, que são: por encaixe ou entalhe, por adesão, por conetores ou por pinos, que podem ser metálicos ou de outro material. Em cada situação, acontece uma transmissão, que pode ser vista em três condições: direta, por justaposição ou indireta, conforme ilustrado na Figura 7 (VALLE, 1999, p. 14).

Na transmissão direta, no contato entre as peças da madeira, não existem dispositivos intermediários; podem ocorrer esforços normais ou cortantes. Por justaposição existe uma superfície de traspasse comum às peças, e podem ocorrer esforços normais, cortantes, e momentos fletores; na indireta, as tensões são transmitidas por elementos intermediários, que podem ser adesivos ou metálicos; é possível ainda ocorrer esforços normais, cortantes, ou momentos fletores VALLE (1999, p. 15).

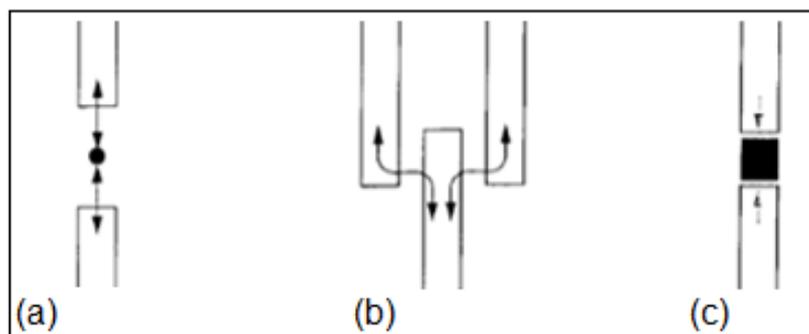


Figura 7 - Transmissão de esforços por ligações:(a) direta; (b) por justaposição; (c) indireta.
Fonte: Le Govic (1995) apud Valle (1999).

As ligações também são classificadas em articuladas, rígidas ou semirrígidas (Figura 8). Nas articuladas a rotação é permitida entre as peças conectadas, não apresentando, quando solicitadas, momentos fletores. Nas rígidas não ocorre movimentação no plano mas, quando solicitadas, ocorrem momentos fletores. Ao passo que, nas semirrígidas, apesar de apresentarem resistência à rotação entre as peças, ocorrem, quando solicitadas, momentos fletores (VALLE1999, p. 16).

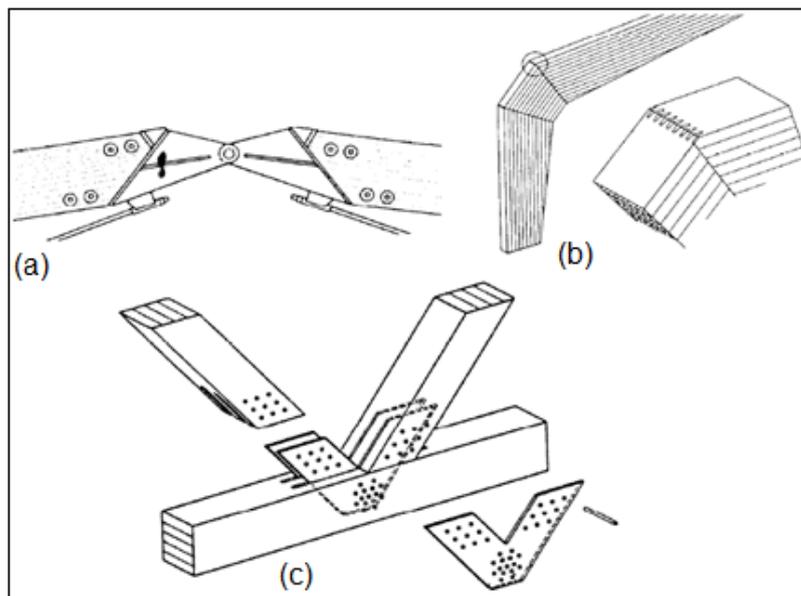


Figura 8 – Exemplos de ligações: (a) articuladas; (b) rígidas; (c) semirrígidas
Fonte: Le Govic (1995) apud Valle (1999).

2.4.2 Tipos Comuns de Ligações

Os tipos de ligação mais empregados são: por colagem; por pinos, que podem ser parafusos, pregos ou cavilhas; por conectores metálicos; tarugos; entalhes ou encaixes; e ainda por grampos e braçadeiras, que não são considerados elementos estruturais, apenas utilizados como elementos auxiliares (MARTINS, 2007, p. 20).

2.4.2.1 Ligações por entalhe ou encaixes

Dias A. (2013) considera tradicionais as ligações por entalhe ou encaixes. E como as faces das peças transmitem esforços, antes do carregamento devem estar perfeitamente encaixadas, sem folgas. Podem ser coladas ou pregadas para melhorar o contato, desconsiderando denominadas ligações coladas ou parafusadas.

As ligações com entalhes ou encaixes são geralmente empregadas na compressão, e a parte de contato com o entalhe pode ser suscetível ao corte; de forma, que havendo inversão de tensão, é necessário prever pino de travamento para suportar as tensões de tração, ilustrada na Figura 9 (CALIL JR et al., 2003, p. 116).

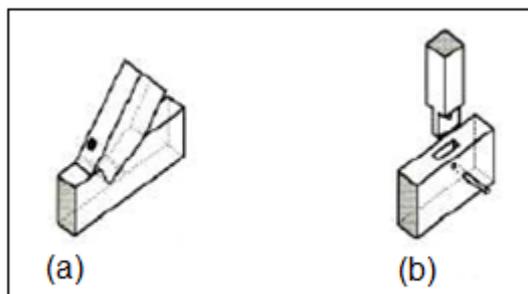


Figura 9 – Tipos de ligações: (a) entalhe; (b) encaixe
Fonte: Dias A. (2013).

2.4.2.2 Ligações com conectores

As ligações com conectores podem ocorrer de duas formas: em anéis, ou em chapas com dentes estampados. Os anéis são alocados em ranhuras entre as peças de madeira, a fim de proporcionar a ligação, que, mesmo assim, não dispensa pinos ou parafusos, para impedir a separação entre as peças. Na ligação com chapas estampadas com dentes, estes são cravados na madeira, impedindo o deslizamento entre as peças (GESUALDO, 2003, p. 23).

2.4.2.3 Ligações coladas

A utilização da madeira colada (tipo de ligação moderna), tem como fator grande empregabilidade nas indústrias de laminados e compensados, levando-se em consideração a alta tecnologia envolvida e o rigoroso controle no processo de fabricação, que só pode acontecer sob pressão e a temperatura ideal, devendo evitar a umidade (PFEIL e PFEIL 2003, p. 52).

Para Cunha et al. (2012, p. 2) as madeiras laminadas coladas formam um sistema de placas de madeira, que, coladas, estão sendo amplamente utilizadas em paredes estruturais, lajes de pisos apoiadas, além de seu uso em construção de vigas de madeira laminada colada.

As estruturas de madeiras laminadas coladas vêm crescendo a cada ano dentro dos mais variados ramos da construção civil.

2.4.2.4 Ligações por tarugos

As ligações por tarugos são elementos de madeira ou de metal colados numa cavidade entre as peças de madeira, que, ali alojados, na posição ideal através de fixadores, recebe esforços de compressão em função dos esforços de tração entre as peças (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 73).

O emprego do tarugamento permite reduzir a seção das peças, que por trabalhar em conjunto, não dispõem de cuidados, podendo até danificar as vigas, caso não esteja entreligado às peças (DIAS T., 2008, p. 64).

2.4.2.5 Ligações com pinos

As ligações realizadas com pinos podem ser pregadas, parafusadas ou cavilhadas; os pinos metálicos são geralmente utilizados, devido à facilidade de aplicação, e por não requerer mão de obra qualificada (LEUTNER, 2013, p. 22).

As ligações por pregos, utilizadas nas montagens de estruturas, denominadas definitivas, apresentam uso em grande escala, pelo fato de serem fáceis de aplicar e de baixo custo. Os pregos também são utilizados nas formas para a construção civil, que, apesar de não serem estruturas definitivas, são utilizados na forma de duas cabeças para serem facilmente extraídos da deforma (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 52).

Os parafusos, os pregos, os anéis e os adesivos, são elementos presentes em uma ligação com a função de transmitir esforços entre as peças; porém, esses elementos muitas vezes superam a resistência das peças ligadas (BREMER et al., 2013, p. 60).

As ligações com utilização de quatro pregos ou mais, são consideradas rígidas se os diâmetros de pré-furação (d_0) for menor que o diâmetro efetivo do prego (d_{ef}), além de respeitar as considerações para d_0 , de $0,85d_{ef}$ para as Coníferas e $0,98d_{ef}$ para as Dicotiledôneas. Nas estruturas provisórias empregando madeira mole de baixa densidade, $\rho_{ap} \leq 600 \text{ kg/m}^3$ e não ocorrer o fendilhamento na penetração, o diâmetro (d_{ef}) dos pregos não deve ser maior que $1/6$ da espessura da madeira mais delgada e o espaçamento mínimo de $10d$ (NBR 7190, ASSOCIAÇÃO...1997, p. 33).

As ligações parafusadas, para serem consideradas rígidas, com a utilização de quatro parafusos ou mais, o diâmetro (d_0) da pré-furação deve ser menor que o

diâmetro do parafuso (d), acrescido de 0,5 mm; caso contrário a ligação é considerada deformável. Os parafusos de aço estrutural, utilizados nas ligações, de preferência devem ter o diâmetro mínimo (d) de 10,0 mm (3/8”), e a espessura das peças de madeira, não deve ser inferior ou igual a duas vezes o diâmetro do parafuso, isto é, $d \leq t/2$ (NBR 7190, ASSOCIAÇÃO...1997, p. 33).

As ligações com parafusos podem ser de duas maneiras: parafusos auto atarraxantes e parafusos lisos, com porcas e arruelas. Os atarraxantes são parafusados diretamente na madeira, enquanto os lisos requerem pré-furação.

Na ligação, utilizando parafusos lisos, a distância entre os furos, numa mesma linha no sentido paralelo às fibras, não deve ser inferior a $4d$. Do centro do furo até a borda lateral da peça, medida no sentido perpendicular às fibras, com tensão de tração normal, não deve haver dimensão inferior a $1,5d$, e com tensão de compressão normal satisfazendo a perpendicularidade das fibras, e a distância até a borda não deve ser menor que $4d$ (NBR 7190, ASSOCIAÇÃO...1997, p. 36).

As ligações com parafusos auto atarraxantes não são utilizadas em estruturas de madeira que requeiram esforços, e se destacam no setor moveleiro.

Segundo a NBR 7190 (Associação...1997, p. 40), a espessura das arruelas não deve ser inferior a 6,0 mm (1/4”), exceto para pontes, as quais não devem ser inferiores a 9,0 mm (3/8”) e seu diâmetro não inferior a $3d$, sendo d o diâmetro do parafuso. Devem ter contato direto com a peça, e ser dimensionadas de forma a transferir força de aperto na madeira, não exercendo compressão normal às fibras.

Quanto ao escoamento e a resistência do aço, a NBR 7190 (Associação... 1997) especifica as características dos materiais e dos modos das aplicações nas peças, para as ligações com pinos.

Segundo Pfeil e Pfeil, (2003),

Após a colocação dos parafusos, as porcas são apertadas, comprimindo fortemente a madeira na direção transversal, sendo o esforço transferido à madeira com o auxílio de arruelas. O esforço transversal favorece a ligação, pois desenvolve atrito nas interfaces.

A tensão característica de escoamento do aço, f_{yk} , deve ser no mínimo igual a 240 Mpa. Parafusos de aço A307 (utilizados em estruturas de aço) podem ser usados em estruturas de madeira. Entretanto, a especificação ASTM A307 não indica tensão de escoamento para este aço, necessária ao cálculo de sua resistência em ligações de peças de madeira através das expressões oriundas de análise limite. O valor nominal de f_{yk} deste aço tomado igual a

310 Mpa (45 Ksi) é geralmente considerado conservador (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 65).

Nas ligações por cavilhas, os pinos são cilíndricos, de aço ou de madeira dura, e o diâmetro ligeiramente menor do que o furo onde será aplicado, proporcionando uma ligação rígida e sem deformação.

O requisito dos elementos de ligação na sua totalidade é a resistência. Além de ter o compromisso de transmitir tensões de uma peça à outra, fazendo com que exista rigidez, não deve haver deslizamento entre as peças, o que poderia comprometer a eficácia e o funcionamento da estrutura como um todo. "O projeto das ligações deve ainda obedecer às prescrições construtivas indicadas pelas normas de forma a garantir o seu bom desempenho." (PFEIL e PFEIL, 2003, p. 54).

Nas ligações onde o material do pino é metálico, podem ocorrer mecanismos de esmagamento das fibras da madeira ou a ruptura do pino. Na madeira o esmagamento das fibras ocorre na região onde o pino está localizado, causado pela compressão das peças, e no pino a plastificação por flexão, que pode ser em uma ou mais seções (SILVIA e RADE, 2006, p. 4).

Os mecanismos de ruptura são classificados em dois casos: no simples e no duplo, e por quatro tipos (I, II, III e IV). No corte simples, a ruptura ocorre quando há ligação de duas peças; e duplo, quando a ligação for com três peças. A Figura 10 ilustra os mecanismos de ruptura no corte simples, e a Figura 11, no corte duplo.

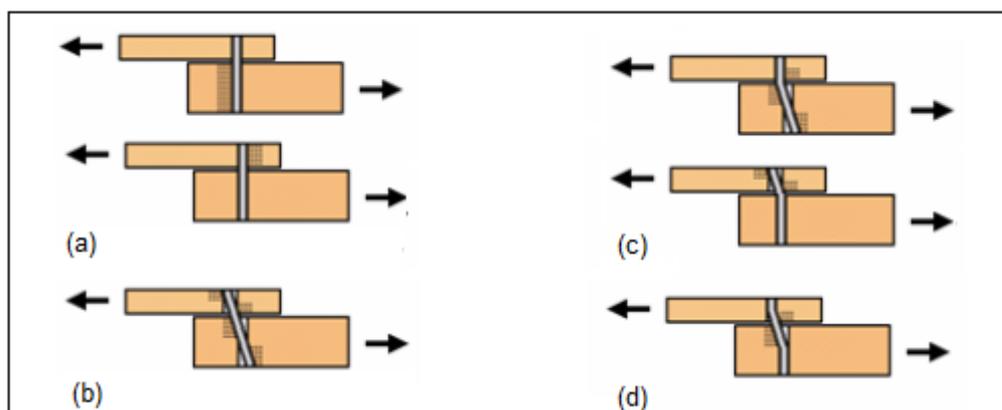


Figura 10 – Mecanismos de ruptura no corte simples: (a) Tipo I – esmagamento da madeira; (b) Tipo II – esmagamento da madeira e rotação do pino; (c) Tipo III – esmagamento da madeira e plastificação do pino com uma rótula plástica; (d) Tipo IV – esmagamento da madeira e plastificação do pino com duas rótulas plásticas.

Fonte: Silva e Rade (2006).

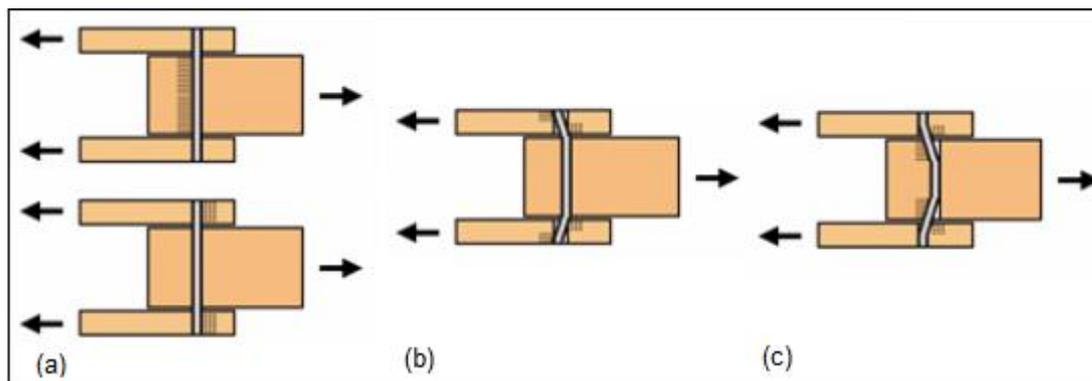


Figura 11 – Mecanismos de ruptura no corte duplo: (a) Tipo I – esmagamento da madeira; (b) Tipo III – esmagamento da madeira e plastificação do pino com uma rótula plástica; (c) Tipo IV – esmagamento da madeira e plastificação do pino com duas rótulas plásticas.

Fonte: Silva e Rade (2006).

Nas ligações com pinos metálicos, como pregos, parafusos ou cavilhas, o material embutido fica sujeito a uma carga distribuída transversal ao seu eixo (flexão simples) chegando até a plastificação total da seção, conforme ilustra a Figura 12.

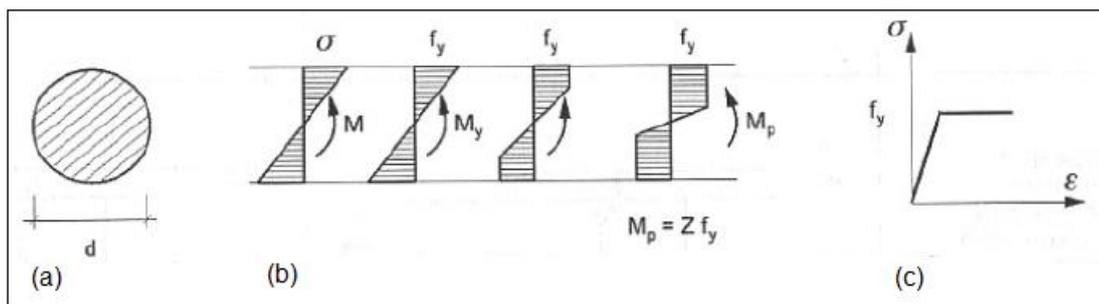


Figura 12 – Resistência à flexão do pino: (a) seção do pino; (b) evolução da tensão até a plastificação total do pino; (c) diagrama da tensão x deformação.

Fonte: Andrade (2011).

Segundo Andrade (2011), a tensão (σ) em regime elástico solicitada no pino, pode ser determinada pela equação (15); o momento de plastificação (M_p) no escoamento de toda a seção do pino, pela equação (16); o módulo de plastificação (Z) da seção (d), pela equação (17) e o módulo resistente de projeto (M_{pd}) do pino metálico pela equação (18).

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (15)$$

$$M_p = Z f_y \quad (16)$$

$$Z = \frac{d^3}{6} \quad (17)$$

$$M_{pd} = Z f_{yd} = \frac{Z f_y}{1,1} \quad (18)$$

Quando a ligação é solicitada na tensão de tração ou no cisalhamento, o pino causa compressão na madeira, ocorrendo o esmagamento das suas fibras, no local da compressão. A espessura das peças na ligação (t_1) e (t_2) e o diâmetro (d) do pino influenciam no esmagamento das fibras da madeira e na ruptura do pino, (Figura 13) (ANDRADE, 2011, p. 5).

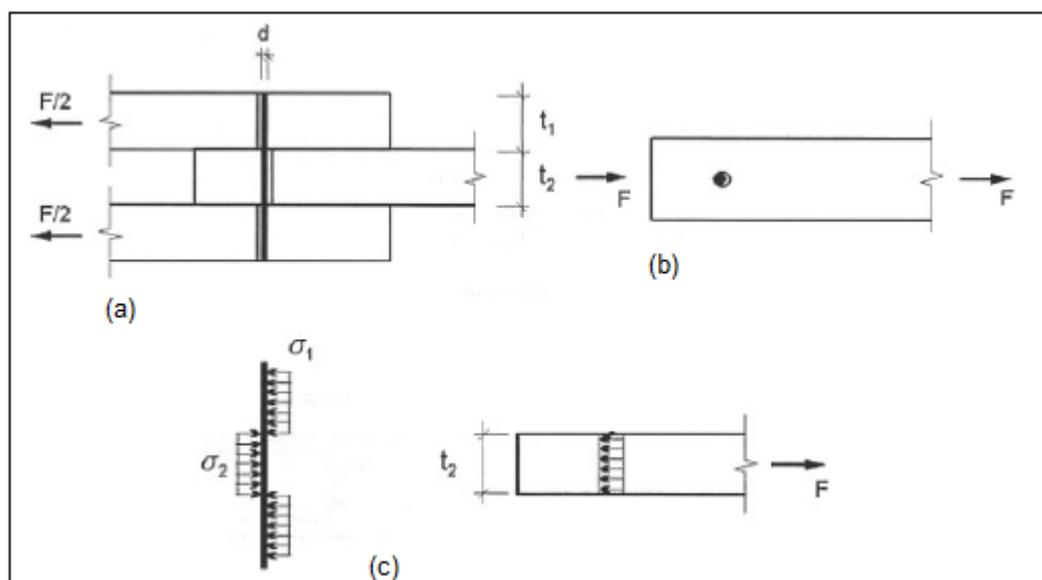


Figura 13 – Tensões na ligação: (a) solicitação da força F na ligação; (b) posição do pino na peça; (c) tensões σ_1 e σ_2 , distribuída, aplicada no pino (flexão simples). Fonte: Andrade (2011).

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO...1997), dado pela equação (19), define, a resistência total de um pino como sendo a soma das resistências correspondentes, caso haja diferentes seções de corte, e ao número de pinos utilizados numa ligação. Caso existam mais de oito pinos em linha e posicionados paralelo ao esforço de solicitação, os pinos suplementares não devem ultrapassar a 2/3 da resistência individual.

$$N_0 = 8 + \frac{2}{4}(n - 8) \quad (19)$$

Segundo Calil Jr. (2003), para o cálculo da resistência do pino, na seção de corte, devem ser consideradas as propriedades na madeira e no pino. Na madeira, a resistência ao embutimento das peças interligadas ($f_{ea,d}$) e a espessura (t), que é considerada como o menor valor entre as peças interligadas. No pino, a resistência ao escoamento do aço (f_{yd}) e ao diâmetro (d). O dimensionamento da ligação de uma estrutura de madeira por pinos, pode ocorrer o embutimento da madeira ou a flexão do pino. Portanto, a situação é delimitada pelo parâmetro (β_{lim}) que leva em conta as resistências da madeira e do pino e determinado pela equação (20).

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ea,d}}} \quad (20)$$

onde:

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

$f_{ea,d}$ é o valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira.

Para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento do pino em uma direção qualquer e inclinada com um ângulo (α) em relação às fibras, a NBR 7190 (Associação...1997), expressa a equação de Hankinson (21).

$$f_{ea,d} = \frac{f_{e0,d} \cdot f_{e90,d}}{f_{e0,d} \cdot \text{sen}^2\alpha + f_{e90,d} \cdot \text{cos}^2\alpha} \quad (21)$$

Na determinação de β_{lim} , obtém-se a relação entre a espessura (t) da madeira e o diâmetro (d) do pino. Segundo CALIL Jr (2003) é dado pela expressão (22).

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (22)$$

onde:

t é a espessura convencional da madeira;

d é o diâmetro do pino.

Calil Jr. (2003) compara os valores β e β_{lim} , que determina a resistência de um pino no seu plano de corte, ($R_{vd,1}$), referindo-se às equações (23) e (24), correspondente respectivamente ao embutimento da madeira ou à flexão do pino, respeitando a relação:

Se $\beta \leq \beta_{lim}$, ocorre o embutimento da madeira, a equação (23) é dada por:

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ead} \quad (23)$$

Se $\beta > \beta_{lim}$, ocorre a flexão do pino, a equação (24) é dada por:

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yd} \quad (24)$$

Diante da resistência de um pino de corte ($R_{vd,1}$), é avaliada a quantidade de planos de corte existentes para suprir o esforço; que, dividido pelo esforço calculado, obtém a quantidade de pinos necessários para o projeto (CALIL JR, 2003, p. 121).

2.4.2.6 Ligações parafusadas em chapas e perfis dobrados a frio

As ligações com perfis de chapas dobradas a frio, são elementos estruturais eficientes devido à rapidez e à economia praticadas na construção civil. A construção dos perfis com chapas de aço é leve, por isso, tem facilidade no manuseio e na fabricação (SILVA e SILVA, 2008, p. 10).

A chapa de aço dobrada a frio pode sofrer flambagem local, quando solicitadas à compressão axial, à compressão de flexão e ao cisalhamento. Porém após a flambagem local, sua resistência chegará ao limite quando ocorrer o escoamento do aço da parte mais comprimida (SILVA e SILVA, 2008, p. 25).

Nas ligações com chapas finas dobradas a frio, a NBR 14762 (ASSOCIAÇÃO...2001), no que diz respeito ao dimensionamento dos efeitos das tensões normais de tração localizadas, propõe um coeficiente de redução da área líquida, denominado de C_t , que abrange não só as ligações de perfis como também as de chapas finas dobradas a frio (MAIOLA e MALITE, 2007, p. 135).

Na determinação da força que resiste à tensão normal de tração de uma ligação parafusada com chapa fina dobrada a frio, a resistência do material (f_u), a área líquida da seção transversal (A_n) e a concentração de tensões junto aos furos, influenciam na ruptura da seção líquida, oriundas de forças localizadas, transmitidas às chapas pelos parafusos, quando solicitados ao cisalhamento (MAIOLA e MALITE, 2007, p. 136).

Segundo Maiola e Malite (2007, p. 136), o estudo das ligações em chapas finas dobradas a frio, iniciou-se por Winter (1956 apud MAIOLA e MALITE, 2007), que propôs, com base de ensaios realizados, uma expressão para o cálculo da tensão nominal associada à área líquida (σ_n), considerando a resistência do material na ruptura pelo coeficiente de modificação (d/g), relacionado à redução da área líquida, sendo: d o diâmetro dos parafusos e g o espaçamento entre os furos. Posteriormente, até 1982, novos estudos foram focados aos efeitos dessa relação (d/g), demonstrando que a concentração de tensão é dissipada, quando a ligação for construída em mais de uma seção de parafusos. Na edição do AISI (2001 apud MAIOLA e MALITE, 2007), o coeficiente de redução (d/g), passa a ser denominado de f_t , e é aplicado às ligações parafusadas com apenas uma seção de parafusos perpendicular à solicitação, com utilização de arruelas na cabeça do parafuso e na porca, dada pela equação.

$$f_t = \left(0,1 + 3\frac{d}{s}\right) f_u \leq f_u \quad (25)$$

onde:

$f_u = f_t$ em ligações de mais de uma seção de parafusos perpendicular à solicitação;
 s é tomada como a largura da chapa conectada, dividida pelo número de furos na seção transversal analisada.

Portanto, segundo Maiola e Malite (2007, p. 137), nas ligações com chapas finas com apenas um parafuso ou com uma única seção de parafusos, perpendicular à solicitação, ocorre: a rotação na ligação; deformação fora do plano e a concentração de tensões junto aos furos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O método utilizado foi experimental e comparativo.

O ensaio experimental mecânico na comparação entre os modelos, situação A1, A2 e A3, nas ligações madeira/madeira e situação B1, B2 e B3, nas ligações madeira/chapa de aço/madeira, foram executados no Laboratório de Materiais da UTFPR – CP, utilizando a máquina de tração e compressão MTC – China, acompanhado do software TRC61300-USB.

O ensaio simulado da comparação entre os modelos foi executado utilizando ferramenta de análise estrutural por elementos finitos.

Para o estudo composto nesse trabalho, será necessário conhecer o comportamento dos materiais quando as ligações são submetidas à força de cisalhamento na interface das peças de madeira e quanto o conjunto suporta.

A comparação entre as situações A e B com respeito a resistência na inclusão da chapa fina dobrada a frio, prensada entre as peças de madeira, é o fator predominante do estudo.

3.1 MATERIAL

Os materiais empregados na elaboração deste estudo experimental e comparativo será a madeira na forma de viga denominada de prancha; parafusos lisos sextavados com arruelas e porcas e chapa fina dobrada a frio. O conjunto desses materiais, serão denominados de elementos de ligação.

3.1.1 Madeira

A madeira utilizada foi o Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), madeira de reflorestamento, e a Garapa Roraima (*Apuleia leiocarpa*), madeira de reflorestamento, fácil de ser encontrada em todas as regiões do Brasil. As especificações das madeiras estão constantes na Tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades: Eucalipto Citriodora e Garapa Roraima

Nome Comum	Nome Científico	$\rho_{ap(12)}$ (Kg/m ³)	f_{c0} (Mpa)	f_{t0} (Mpa)	f_{t90} (Mpa)	f_v (Mpa)	E_{c0} (Mpa)	n
Eucalipto Citriodora	Eucalyptus Citriodora	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18421	68
Garapa Roraima	Apuleia leiocarpa	892	78,4	108,0	6,9	11,9	18359	12

Fonte: PFEIL e PFEIL (2003).

A variedade da madeira Eucalipto Citriodora e Garapa Roraima apresentam valores dos módulos de elasticidade muito próximos.

O desdobro da madeira é feito no sentido longitudinal às fibras; pranchas nas espessuras de 80,0 mm e 100,0 mm e alturas de 200,0 mm, 300,0 mm e 400,0 mm, conforme a Tabela 13 (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009, p. 25).

Tabela13 - Dimensões dos Principais Produtos de Madeira Serrada

Produtos	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (m)
Pranchão	Maior que 70	Maior que 200	Variável
Prancha	40 – 70	Maior que 200	Variável
Viga	Maior que 40	110 – 200	Variável
Vigota	40 – 80	80 – 110	Variável
Caibro	40 – 80	50 – 80	Variável
Tábua	10 – 40	Maior que 100	Variável
Sarrafo	20 – 40	20 – 100	Variável
Ripa	Maior que 20	Maior que 100	Variável
Dormente	160 – 170	220 – 240	2,00/2,80–5,60
Pontalete	75	75	Variável
Bloco	Variável	Variável	Variável

Fonte: NBR 7203 (ASSOCIAÇÃO...1982).

3.1.2 Aço – Parafuso, Arruela, Porca e Chapa Metálica.

O parafuso utilizado na ligação é de aço médio carbono de grau G5 EN, enegrecido de têmpera, da marca Belenus, liso no diâmetro 12,7 mm (1/2") e comprimento 228,6 mm (9"), com resistência a tração de 843,0 MPa e tensão de escoamento de 647,0 MPa, sextavado, com rosca parcial na dimensão 38,1 mm, rosca FPP – UNC – 13. A área de seção da rosca é 91,55 mm², com carga mínima de ruptura de 7.733,0 Kgf, e carga de prova de tração de 5.500,0 Kgf (BELENUS, 2014).

As arruelas são circulares no diâmetro externo de 43,65 mm (1.23/32”) e espessura de 3,17 mm (1/8”). Conforme a especificação da NBR 7190 (Associação...1997, p. 40), a espessura das arruelas não atingiu 6,0 mm, optando-se por duas, observando a espessura da especificada. As arruelas terão contato direto e pleno na madeira, que, quando apertadas, não exercerão tensão normal às suas fibras e não terão contato com a chapa metálica.

Para o aperto das porcas e dos parafusos, foi utilizada chave fixa 3/4” de número 13 e aferido com o torquímetro na tensão de 80 Nm. O desenho do conjunto, parafuso, arruelas e porca, está ilustrado na Figura 14.

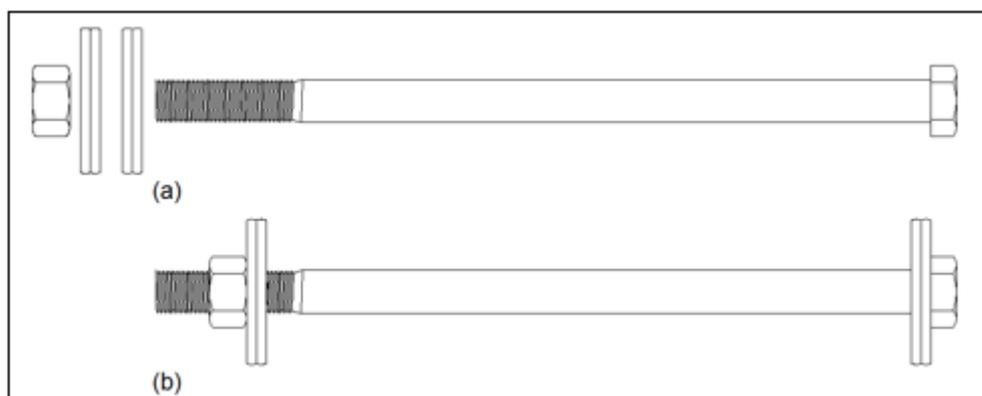


Figura 14 – Conjunto do parafuso: a) explodido; b) como ficará na ligação.
Fonte: Autoria própria.

A chapa a ser utilizada prensada entre as peças de madeira tem a espessura de 2,65 mm, denominada de chapa 12, e o peso aproximado de 21,20 kg/m². (COMERCIAL GERDAU, 2014).

As dimensões e os posicionamentos dos furos das chapas estão na Figura 15. A dobra, voltada para o lado da peça transversal, posiciona onde será aplicado a força. O diâmetro da furação tem folga de 0,5 mm, correspondente diretamente com as mesmas dimensões da furação da madeira, isso, além de garantir inexistência de folga, faz com que o fuste do parafuso não tenha contato com as chapas antes da aplicação das cargas, prensada e diretamente em contato com a madeira. Não havendo contato das arruelas com as chapas.

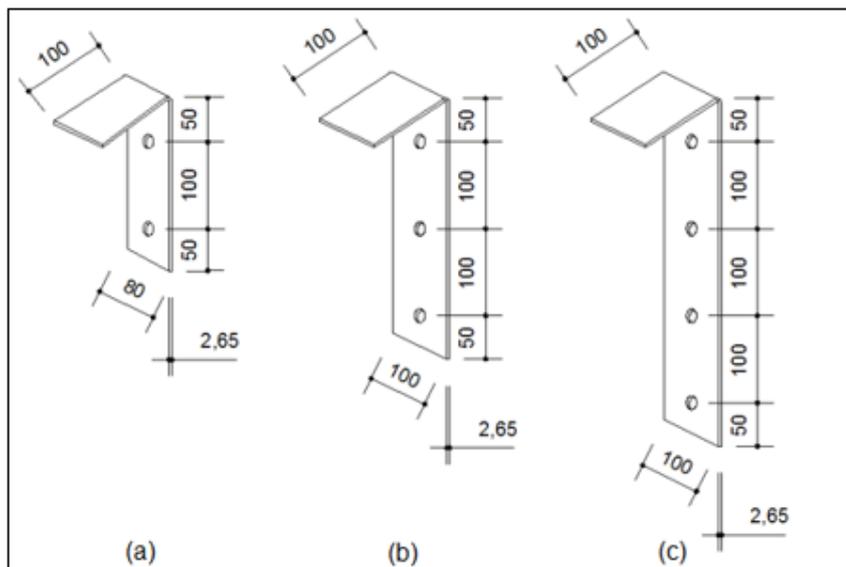


Figura 15 – Dimensões das chapas finas dobradas a frio (mm):
(a) chapa 8,0 cm x 30,0 cm - dois furos; (b) chapa 10,0 cm x 40,0 cm
- três furos; (c) chapa 10,0 cm x 50,0 cm - quatro furos.

Fonte – Autoria própria.

3.2 MÉTODO

Para a análise das tensões aplicadas no ensaio, deverá ser levada em conta a sobrecarga mínima de 211,0 kgf/m², tendo em consideração o peso próprio dos materiais de cobertura e da carga acidental, conforme especificação da NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO...1980).

3.2.1 Cálculo das Cargas Atuantes

Nos cálculos, a resistência do conjunto da ligação está em função da madeira e dos parafusos. A madeira, quanto à tensão de compressão paralela às fibras, ao carregamento, à classe de umidade e à categoria da madeira serrada; o parafuso, quanto ao diâmetro e à folga na pré-furação para o embutimento.

A ligação é formada pela resistência dos materiais, madeira, parafusos e chapa, até o limite de cada material.

No ensaio, as tensões aplicadas precisam ir além das sugeridas pelo projeto (f_{end}), devendo chegar até a ruptura de um dos materiais da ligação.

Para o cálculo das tensões de projeto foram consideradas:

- Classe da madeira: Dicotiledônea;
- Classe de carregamento: longa duração;

- Classe de umidade: 1 e 2;
- Categoria de madeira serrada: 2ª categoria;
- Espécie da madeira: Eucalipto Citriodora e Garapa Roraima;
- Tensão de compressão paralela e normal às fibras.

3.2.2 Geometria do Modelo

Na pré-furação a folga mínima é de 0,5 mm para que a ligação seja considerada rígida. A dimensão entre os eixos dos furos, numa mesma linha de parafusos, é de 10,0 cm; do eixo do furo até as bordas da peça, é de 5,0 cm.

As peças posicionadas perpendicularmente foram furadas lateralmente no sentido normal às fibras, no diâmetro de 4,5 cm, e profundidade aproximada de 7,2 cm para o posicionamento e a locação das arruelas e porcas, enquanto que, as peças posicionadas longitudinalmente foram furadas no sentido normal às fibras, com diâmetro de 4,5 cm, e profundidade aproximada de 2,2 cm para o posicionamento das arruelas.

As furações, nas vigas, necessitaram de acertos para o assentamento e contato direto das arruelas. A Figura 16, mostra como parafusos, porcas, arruelas e as chapas foram devidamente inseridas.

Como os parafusos, porcas e arruelas, a chapa também não aparece. Assim a furação na madeira e na chapa correspondem hermeticamente às mesmas distâncias entre os furos e as bordas executadas nas madeiras.

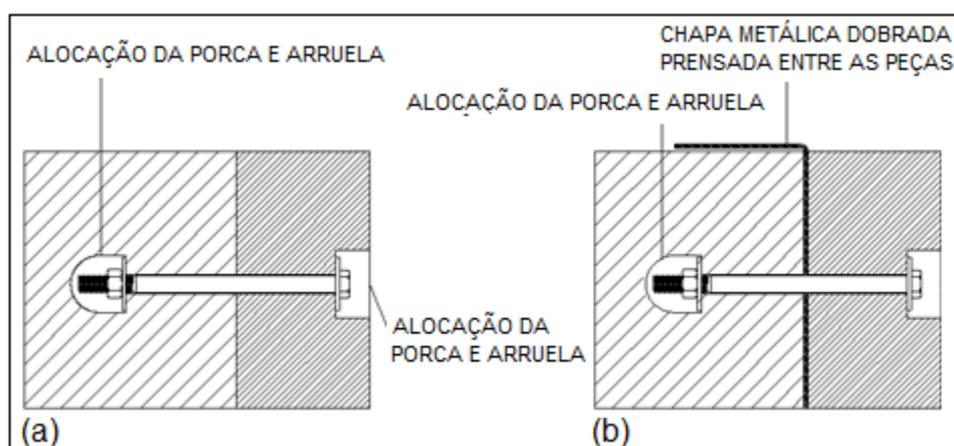


Figura 16 – Detalhe das furações na madeira (a) detalhe do conjunto sem chapa; (b) detalhe do conjunto com a chapa.

Fonte: Autoria própria.

A posição das peças de madeira, na situação A e classificação A1, A2 e A3, e as distâncias entre as furações, com uma única linha de parafusos, (Figura 17).

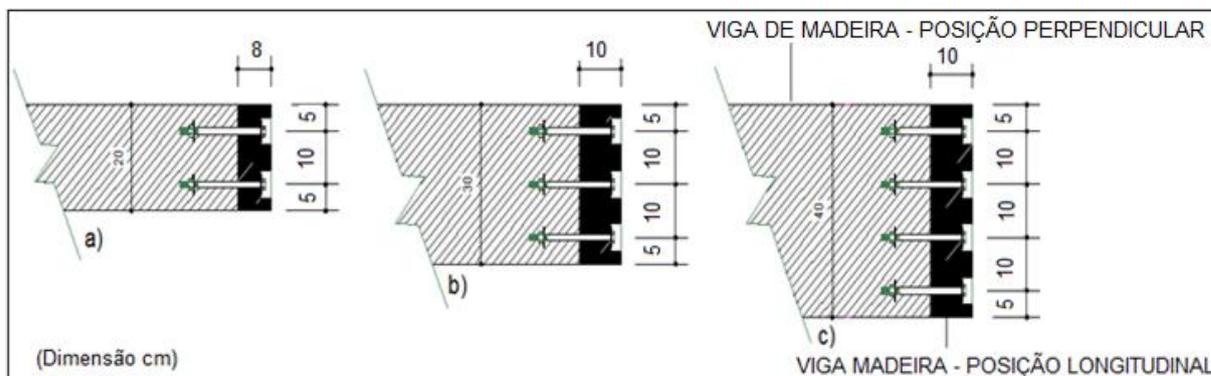


Figura 17 – Detalhe dos modelos A1, A2 e A3: (a) A1 - viga 8,0 cm x 20,0 cm com dois parafusos; (b) A2 - viga 10,0 cm x 30,0 cm com três parafusos; (c) A3 - viga 10,0 cm x 40,0 cm com quatro parafusos.

Fonte – Autoria própria.

A posição das peças de madeira, na situação B e classificação B1, B2 e B3, com a chapa fina dobrada a frio prensada entre as peças e as distâncias das furações com uma única linha de parafusos, pode ser observada na Figura 18.

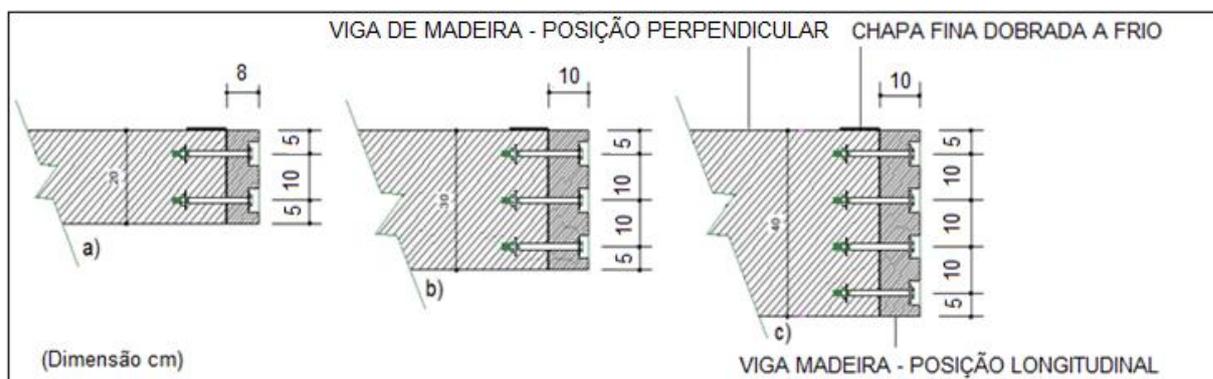


Figura 18 – Detalhe dos modelos B1, B2 e B3, com chapa prensada entre as peças: (a) B1 - viga 8,0 cm x 20,0 cm com dois parafusos; (b) B2 - viga 10,0 cm x 30,0 cm com três parafusos; (c) B3 - viga 10,0, x 40,0 cm com quatro parafusos.

Fonte – Autoria própria.

3.2.3 Variáveis de Identificação

As identificações das variáveis estão na Tabela 14 e se destacam nas situações A e B e suas classificações; quanto às dimensões das vigas, das chapas e das quantidades dos parafusos.

A situação A, classificada como A1, A2 e A3, tem como modelos as peças de madeira, variando das dimensões e das quantidades dos parafusos; situação B, classificada como B1, B2 e B3, além das quantidades dos parafusos variam nas dimensões das vigas e da chapa.

Tabela 14 - Classificação das Variáveis

Tipo de solicitação	Classificação	Dimensão das madeiras (cm)	Quantidade dos parafusos	Dimensão das chapas (cm)
Situação A	A1	8,0 x 20,0	2	
	A2	10,0 x 30,0	3	
	A3	10,0 x 40,0	4	
Situação B	B1	8,0 x 20,0	2	8,0 x 30,0
	B2	10,0 x 30,0	3	10,0 x 40,0
	B3	10,0 x 40,0	4	10,0 x 50,0

Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 ilustra um telhado em que as vigas, nas diagonais, estão apoiadas na longitudinal, enquanto a viga posicionada perpendicularmente à longitudinal está intimamente ligada por parafusos fixadores. Portanto, a ligação é exclusiva dos parafusos, que depois devem ser protegidos com cavilhas de madeira. Ao lado o detalhe da ligação estudada, ilustra os posicionamentos das vigas longitudinal e perpendicular.

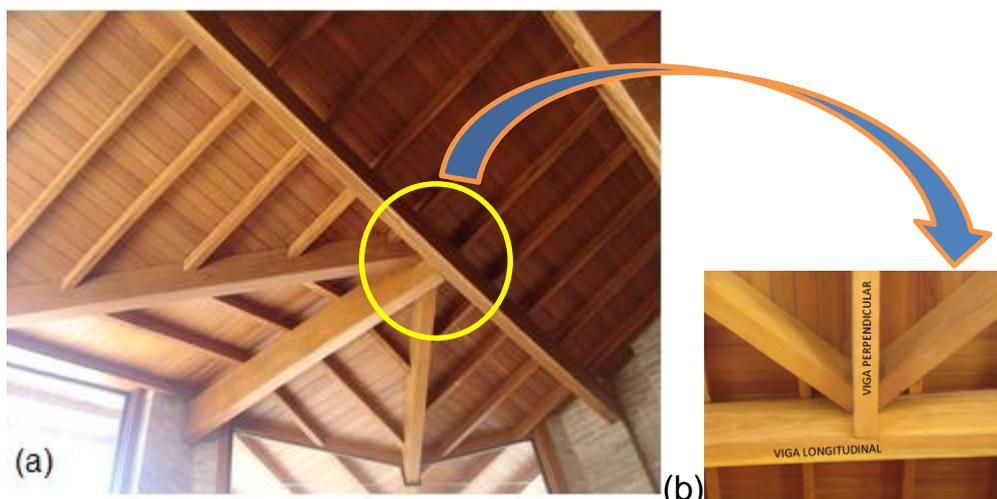


Figura 19 – Construção de cobertura em madeira: (a) ligação das pranchas; (b) Detalhe da ligação aparafusada.

Fonte: Arquivo do autor.

A Figura 20 ilustra o projeto de uma cobertura utilizando pranchas de madeira nas dimensões 10,0 cm e 40,0 cm, para vencer um vão de 8,0 m.

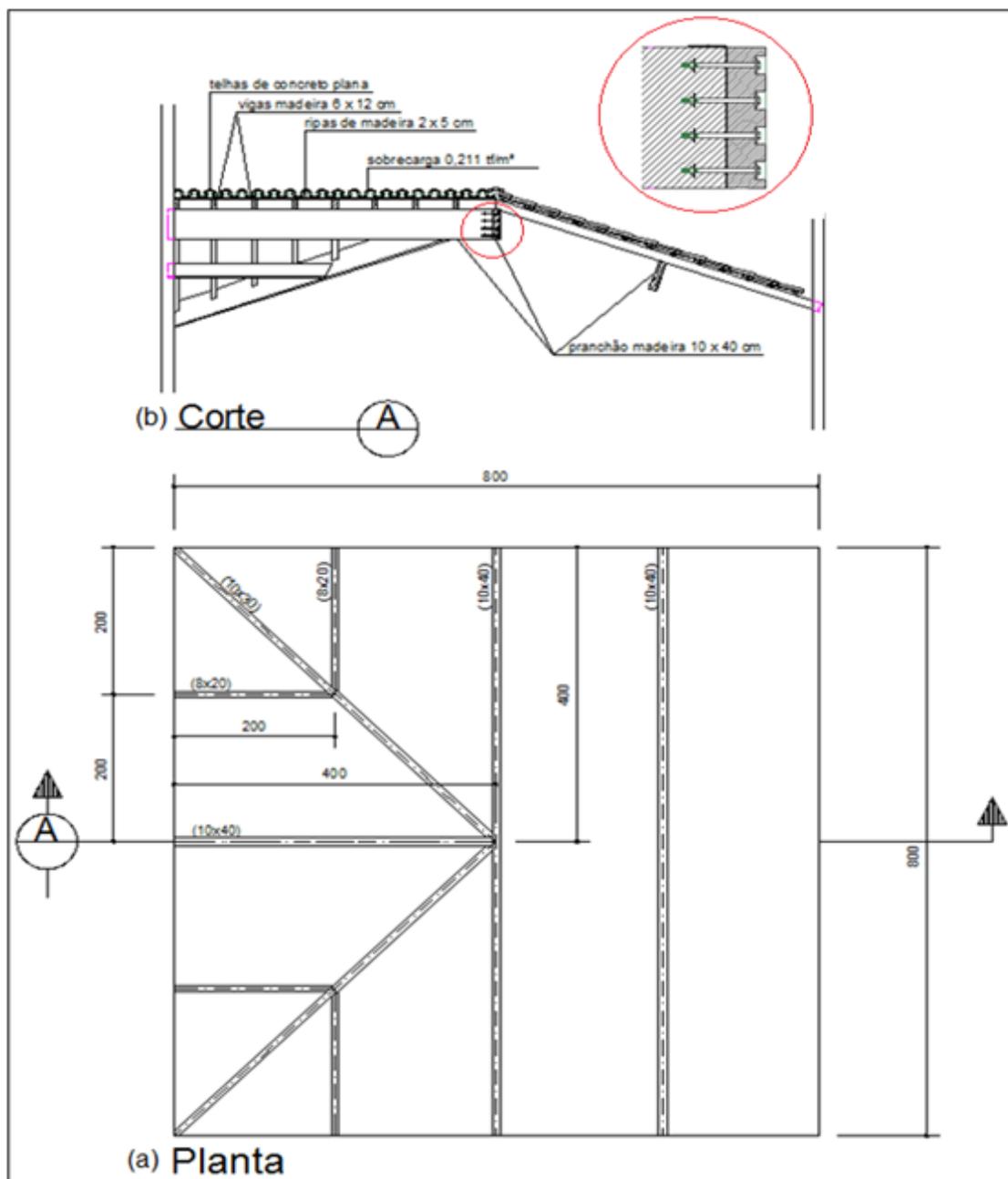


Figura 20 – Projeto de uma cobertura: (a) planta; (b) corte A.
Fonte: Autoria própria.

Em (a), Planta da cobertura, onde ocorre as ligações de encaixe e parafusadas; (b), Corte A, com parafusos fixadores embutidos na prancha de madeira, conforme detalhe.

O madeiramento nas diagonais, em 45°, além de receber o telhado, suporta a calha de água furtada, a prancha transversal, por sua vez, fica, de um lado, apoiada sobre a estrutura de concreto, e de outro na longitudinal, em uma ligação parafusada. Neste caso foi utilizado quatro parafusos e as pranchas com dimensão 10,0 cm x 40,0 cm, com chapa, conforme a situação B e classificação B3.

Os parafusos na peça transversal estão posicionados na direção paralela às fibras da madeira, enquanto, na longitudinal, eles estão no sentido normal às fibras.

A madeira e os parafusos são os responsáveis pela ligação: a madeira, por resistir às forças de compressão normais às fibras, realizada pelo embutimento, enquanto que os parafusos resistem à flexão.

A inclusão da chapa prensada entre as peças colabora com a madeira em suportar aos esforços de compressão normais às fibras, exercidos pelos parafusos, aliviando a tensão nas fibras; em contra partida, a tensão cisalhante da chapa incide diretamente na seção do parafuso levando-o à flexão simples.

3.2.4 Experimentos

O experimento consiste em avaliar a resistência dos parafusos de ligação na junção das peças, que estão relacionadas quanto a quantidade dos parafusos, as alturas e a espessura das peças de madeira, comparando seus comportamentos com modelos nas mesmas características, com a inclusão da uma chapa fina prensada entre as peças.

Os modelos foram preparados em uma marcenaria e depois das superfícies lixadas para garantir o manuseio, foram montados e ajustados no laboratório de materiais da UTFPr, câmpus Cornélio Procópio.

Na montagem dos modelos foi utilizado broca no diâmetro 13,5 mm para a pré-furação dos parafusos, e broca chata no diâmetro 44,0 mm, na furação para colocação das arruelas, que, por não ser comercializada, teve que ser adequada a partir de uma broca no diâmetro 1.1/2"

A Figura 21 ilustra os modelos classificação B1 e A1, nas dimensões 8,0cm x 20,0 cm, com dois parafusos; Figura 22, os classificados em B2 e A2 nas dimensões 10,0 cm x 30,0 cm, com três parafusos.



Figura 21 – Modelos 8,0 cm x 20,0 cm, com dois parafusos: a) B1, com chapa; b) A1 sem chapa.
 Fonte – Arquivo do autor.



Figura 22 – Modelos 10,0 cm x 30,0 cm, com três parafusos: a) A2, com chapa; b) B2, sem chapa.
 Fonte – Arquivo do autor.

A Figura 23 ilustra os modelos de classificação B3 e A3 nas dimensões 10,0 cm x 40,0 cm, com quatro parafusos, apresentados com e sem a chapa prensada.



Figura 23 – Modelos 10,0 cm x 40,0 cm, com quatro Parafusos: a) B3, com chapa; b) A3, sem chapa.
 Fonte – Arquivo do autor.

A Figura 24 ilustra as arruelas e os parafusos de uma peça longitudinal; Figura 25, ilustra as arruelas e as porcas de uma peça transversal, além do posicionamento da chapa fina dobrada a frio e prensada entre as peças.

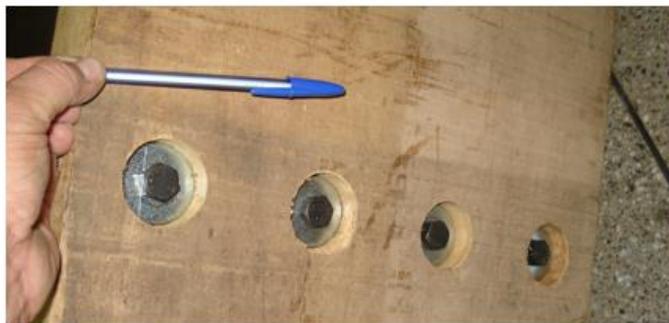


Figura 24 – Vista dos parafusos idas arruelas.
Fonte – Arquivo do autor.



Figura 25 – Posição da furação lateral e da chapa dobrada.
Fonte – Arquivo do autor.

Para o posicionamento ideal dos modelos, na máquina de compressão, foi utilizada uma chapa preta de base, na espessura de 6,0 mm, parafusada, respeitando a furação da máquina. Foram construídos dois suportes da mesma madeira das peças, e fixados à base com barras roscáveis horizontais e chapas em L (éle) soldada na base, para inibir a movimentação ou a giração, quando da aplicação da carga. A abertura do suporte foi regulada adequadamente utilizando-se um tarugo de madeira, que, parafusado junto das barras roscáveis e das peças horizontais, acomodou os modelos, de menor dimensão. O conjunto de fixação proporcionou a imobilidade das peças, sendo em alguns casos, calçados com finas chapas de ferro para garantir a confiabilidade dos resultados.

A Figura 26 ilustra o posicionamento da tensão de compressão aplicada nos modelos, sem e com a chapa dobrada e prensada entre as peças de madeira.

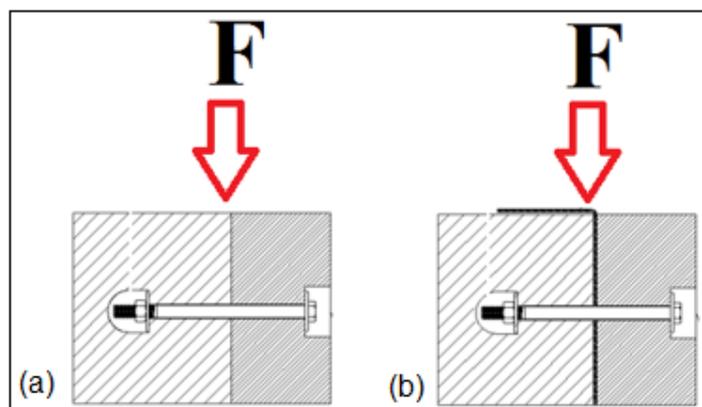


Figura 26 – Posição da aplicação da carga:
(a) modelo sem chapa; (b) modelo com chapa.
Fonte – Autoria própria.

A tensão aplicada está direta na peça perpendicular ou transversal, tangenciando a interface da ligação; para isso foi utilizado um cilindro de aço de diâmetro 50,0 mm e comprimento de 150,0 mm. Foi determinada a altura máxima do cilindro, para que o carro da máquina, no ato da compressão, não encostasse nos modelos e interferisse nos resultados.

Com a peça longitudinal, fixada ao suporte, a transversal está exclusivamente condicionada à ligação pelos parafusos fixadores, não havendo forças externas que possam interferir no ensaio.

A carga máxima da máquina de compressão foi de 10,0 tf e teve sua aplicação até que um dos elementos da ligação entrasse em colapso, ou que atingisse o limite da máquina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CÁLCULO ANALÍTICO

Determinação da resistência máxima de embutimento na ligação parafusada utilizando madeira Eucalipto Citriodora e parafusos lisos de diâmetro de 12,7 mm com arruelas e porcas. Considerar: longa duração, umidade classe 1 e 2, madeira serrada de 2ª categoria, conforme a classificação dos modelos sem chapa, conforme a situação A:

- A₁ - Modelo na dimensão 8,0 cm x 20 cm com dois parafusos;
- A₂ - Modelo na dimensão 10,0 cm x 30,0 cm com três parafusos;
- A₃ - Modelo na dimensão 10,0 cm x 40,0 cm com quatro parafusos.

- Determinação do K_{mod} .

Dados:

Carregamento de longa duração: $K_{mod,1} = 0,7$;

Classe de umidade 1 e 2: $K_{mod,2} = 1,0$;

Madeira serrada 2ª categoria: $K_{mod,3} = 0,8$

$$K_{mod} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3}$$

$$K_{mod} = 0,56$$

- Determinação da resistência de projeto ao embutimento:

$$f_{ed} = K_{mod} \cdot \frac{f_c}{\gamma_{wc}} \rightarrow f_{ed} = 0,56 \cdot \frac{62,0}{1,4} \rightarrow f_{ed} = 24,8 \text{ MPa}$$

- Determinação da resistência da madeira na compressão normal às fibras no embutimento.

$$f_{end} = 0,25 \cdot f_{ed} \cdot \alpha_e \rightarrow f_{end} = 0,25 \cdot 24,8 \cdot 1,68 \rightarrow f_{end} = 10,41 \text{ MPa}$$

- Cálculo do valor de β_{lim} .

$$\beta_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \rightarrow \beta_{lim} = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{588,18}{10,41}} \rightarrow \beta_{lim} = 9,39$$

onde:

$$f_{yd} = f_y / 1,1 \rightarrow f_{yd} = 647 / 1,1 \rightarrow f_{yd} = 588,18 \text{ MPa.}$$

A₁ - Determinação da resistência máxima ao embutimento na ligação: modelo 8,0 cm x 20,0 cm com dois parafusos, sem chapa.

- Cálculo de β .

Na ligação, t_1 e t_2 , é considerada a menor espessura das peças e d o diâmetro do parafuso.

$$\beta = \frac{t}{d} \rightarrow \beta = \frac{80}{12,7} \rightarrow \beta = 6,3$$

onde:

$$t \leq \begin{cases} 12 \varnothing \\ t_1 \\ t_2 \end{cases}$$

$$\text{Então: } t \leq \begin{cases} 12 \cdot 12,7 = 152,4 \\ t_1 = 80 \text{ mm} \\ t_2 = \text{indefinido} \end{cases} \rightarrow t = 80 \text{ mm}$$

Respeitando as condições:

$\beta < \beta_{lim}$, então ocorre o embutimento da madeira.

- Cálculo do embutimento da madeira.

$$R_{vd,1} = 0,4 \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{end} \rightarrow R_{vd,1} = 0,4 \cdot \frac{80^2}{6,3} \cdot 10,41 \rightarrow R_{vd,1} = 4,23 \text{ KN}$$

A resistência total (R_{vd}) é o resultado do produto da resistência ($R_{vd,1}$) pela quantidade dos parafusos da ligação, então:

$$R_{vd,a1} = 4,23 \cdot 2 \rightarrow R_{vd,a1} = 8,46 \text{ KN}$$

A2 - Determinação da resistência máxima ao embutimento na ligação: modelo 10,0 cm x 30,0 cm com dois parafusos, sem chapa.

- Cálculo de β .

$$\beta = \frac{t}{d} \rightarrow \beta = \frac{100}{12,7} \rightarrow \beta = 7,8$$

Respeitando as condições:

$\beta < \beta_{lim}$, então ocorre o embutimento da madeira.

$$R_{vd,1} = 0,4 \cdot \frac{t^2}{\beta} \cdot f_{end} \rightarrow R_{vd,1} = 0,4 \cdot \frac{100^2}{7,8} \cdot 10,41 \rightarrow R_{vd,1} = 5,34 \text{ KN}$$

A resistência de vários pinos correspondente ao plano de corte (R_{vd}) é o resultado do produto da resistência de um pino correspondente ao plano de corte ($R_{vd,1}$) pela quantidade dos parafusos da ligação, então:

$$R_{vd,a2} = 5,34 \cdot 3 \rightarrow R_{vd,a2} = 16,02 \text{ KN}$$

A3 - Determinação da resistência máxima ao embutimento na ligação: modelo 10,0 cm x 40,0 cm com dois parafusos, sem chapa.

$$R_{vd,a3} = 5,34 \cdot 4 \rightarrow R_{vd,a3} = 21,36 \text{ KN}$$

4.2 ENSAIO MECÂNICO

Os experimentos foram realizados em 11/09/2014, executados na seguinte sequência: modelos A1 e B1 com dois parafusos; A2 e B2, com três parafusos; A3 e B3, com quatro parafusos, na velocidade da força de compressão de 5,0 mm/min.

Os resultados foram conforme o esperado; os modelos sem chapa suportaram praticamente 50% da carga aplicada, comparando-se aos que tiveram a inclusão da chapa prensada entre as peças.

A Figura 27, 28 e 29 ilustram as sequências da aplicação da carga e o comportamento dos modelos B1, B2 e B3, mais precisamente das peças posicionadas transversalmente.



Figura 27 – Sequência da aplicação da carga e o comportamento do modelo B1 (8,0 cm x 20,0 cm, com Chapa).
Fonte – Autoria própria.

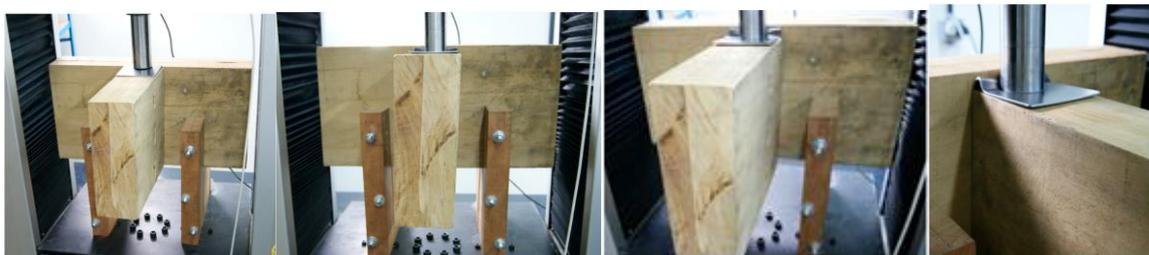


Figura 28 – Sequência da aplicação da carga e o comportamento do modelo B2 (10,0 cm x 30,0 cm, com Chapa).
Fonte – Autoria própria.



Figura 29 – Sequência da aplicação da carga e o comportamento do modelo B3 (10,0 cm x 40,0 cm, com Chapa).
Fonte – Autoria própria.

4.2.1 Deformação da Madeira

Os modelos classificados como A1 e B1, com dois parafusos, foram os que receberam carga de até 40,0 KN e 85,0 KN respectivamente até a destruição total das

peças de madeira. Isso fez com que conhecesse o comportamento da peça longitudinal, que apresentou fissura na direção paralela às fibras, na posição do parafuso mais distante da aplicação da carga, onde ocorreu a tração da madeira na parte inferior da peça até a borda, favorecida pela flexão do parafuso.

O modelo classificado como A2, com três parafusos sem chapa, apresentou pequena fissura na parte superior da peça transversal, no mesmo local da de dois parafusos, enquanto o B2, com chapa, não apresentou nenhuma fissura. Os modelos A3 e B3, com quatro parafusos, não apresentaram fissura em nenhuma das peças de madeira.

4.2.2 Deformação do Parafuso

A deformação presente nos parafusos dos modelos A1, B1, A2 e B2, estão na Figura 30. Nos modelos A1 e B1, os parafusos posicionados mais próximos da carga tiveram flexão acentuada na presença da força, enquanto os que estavam longe da carga deformaram com menor intensidade. Nos classificados em A2, sem chapa, a deformação ocorreu nos três parafusos. O mais próximo e o mais distante da aplicação da carga apresentaram deformações semelhantes: a flexão foi maior no primeiro parafuso, com intensidade menor no último e pequena para com o parafuso do meio. No modelo B2, com chapa, os parafusos não apresentaram deformações.



Figura 30 – Deformação dos parafusos dos A1, B1, A2 e B2: (a) B1, com chapa; (b) A1, sem chapa; (c) A2, sem chapa; (d) B2, com chapa.

Fonte – Autoria própria.

A deformação presente nos parafusos dos modelos A3 e B3, estão na Figura 31. Os do modelo A3, a flexão do parafuso que estava mais próximo da carga, foi pequena, comparando-se com os modelos com menos parafusos. Os

demais apresentaram deformações na flexão, com menor intensidade, conforme se distanciavam da aplicação da carga. Os parafusos da classificação do modelo B3, praticamente não apresentaram deformações.



Figura 31– Deformação dos parafusos dos modelos A3 e B3:
a) A3, sem chapa; b) B3, com chapa.
Fonte – Autoria própria.

As arruelas que estavam junto dos parafusos mais deformados também apresentaram deformações maiores.

4.2.3 Deformação da Chapa Metálica

A Figura 32 apresenta a deformação nas chapas dos modelos B1, B2 e B3.

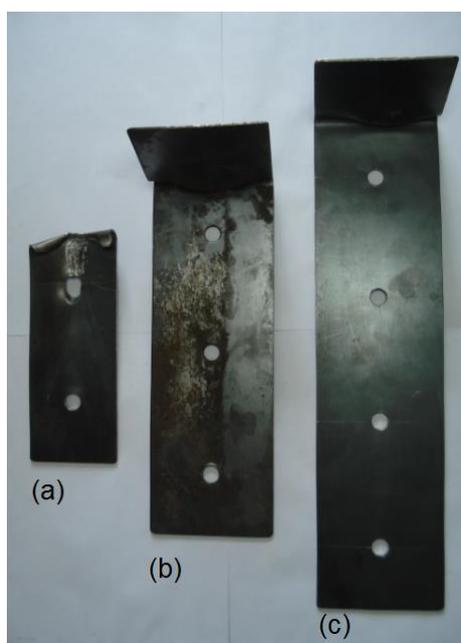
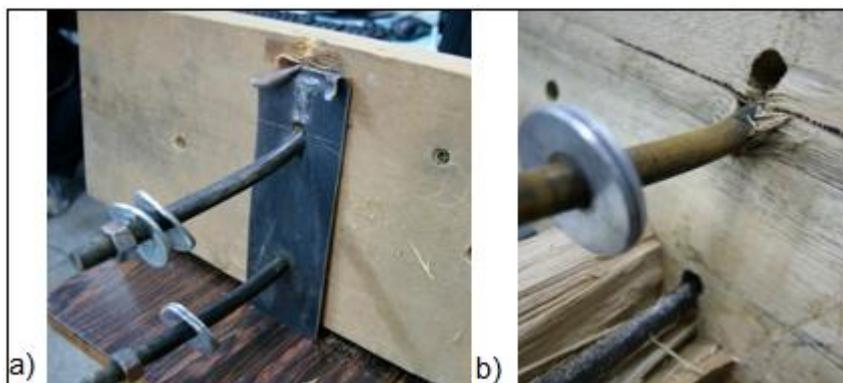


Figura 32 – Deformação das chapas:
a) B1; b) B2; c) B3.
Fonte – Autoria própria.

Na chapa de dois parafusos, do modelo B1 a deformação pela força cisalhante ocorrida pela flexão parafuso foi com maior intensidade no furo mais próximo da ação da carga, no entanto, no furo mais longe também aconteceu a deformação, porém com menor intensidade. As deformações nos furos acompanharam as intensidades ocorridas nos parafusos do mesmo modelo.

As chapas dos modelos B2 e B3, não apresentaram deformações nos furos, independente da ação a carga.

A parte superior da chapa do modelo B1, com dois parafusos, foi destruída, e rasgada na dobra. As dos modelos B2 e B3 com três e quatro parafusos respectivamente, ficaram parcialmente danificada, na dobra, mas não foi rasgada, ilustrada na Figura 33.



**Figura33 - Situação das chapas e parafusos nos modelosB1 e A1:
a) B1, com chapa; b) A1, sem chapa.
Fonte: Aatoria própria.**

4.2.4 Critérios de Ruptura

No modelo classificado como A1, no ensaio mecânico, a carga máxima aplicada foi da ordem de 40,0 KN, com um deslocamento da peça transversal de 34,0 mm; com 11,0 KN antes de ocorrer o início do esmagamento das fibras da madeira pelos parafusos, o deslocamento ficou abaixo de 2,0 mm, enquanto no cálculo analítico foi de 8,46 KN, sem considerar deslocamento. A relação entre as cargas, do ensaio mecânico e do cálculo analítico, ficou abaixo de 30%. Para o modelo B1, com chapa, a carga máxima aplicada foi de 80,0 KN, com um deslocamento de 25,0 mm da peça transversal. O Gráfico 1 expressa a carga x deslocamento dos modelos A1 e B1, com dois parafusos.

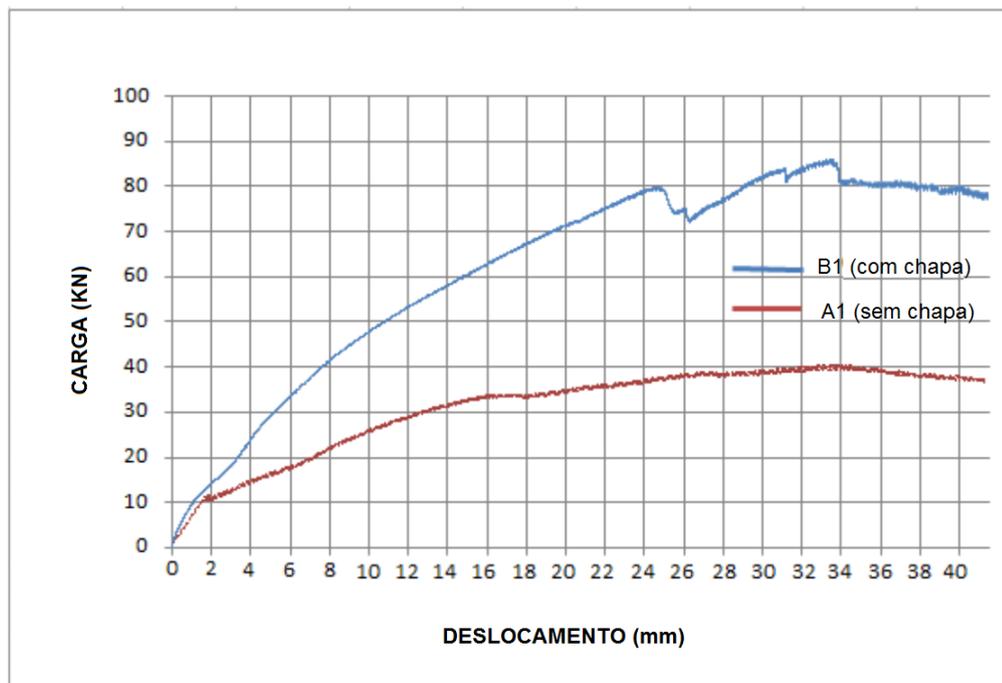


Gráfico1 – Carga x Deslocamento, modelo 8,0 cm x 20,0 cm com dois parafusos. Fonte – Autoria própria.

No modelo de classificação A2, com três parafusos, a carga máxima atingida no ensaio mecânico, foi da ordem de 90,0 KN, com um deslocamento de 38,0 mm da peça transversal. Porém, para a aplicação da carga de 74,0 KN, não apresentou fissura, e o deslocamento da peça foi da ordem de 19,0 mm; com 16,8 KN de carga antes de ocorrer o esmagamento das fibras da madeira, com um deslocamento menor que 2,0 mm, enquanto que no cálculo analítico, foi de 16,02 KN, sem considerar deslocamento. A relação entre as cargas, do ensaio mecânico e do cálculo analítico foi superior a 4,8 %. Para o modelo B2, com chapa, a carga atingiu o limite da máquina de 100,0 KN, com o deslocamento da peça transversal da ordem de 7,5 mm. O Gráfico 2, expressa a carga x deslocamento dos modelos A2 e B2, nas dimensões 10,0 cm x 30,0 cm, com três parafusos.

Como a empregabilidade dos modelos A2 e B2 foram satisfatórias e existe facilidade de aquisição nessas dimensões, principalmente no que diz respeito à parte aproveitada da madeira, que é o cerne, cuja resistência é maior, pode-se afirmar que o uso de ligações com modelos nessas dimensões e com a quantidade de parafusos empregados, é confiável.

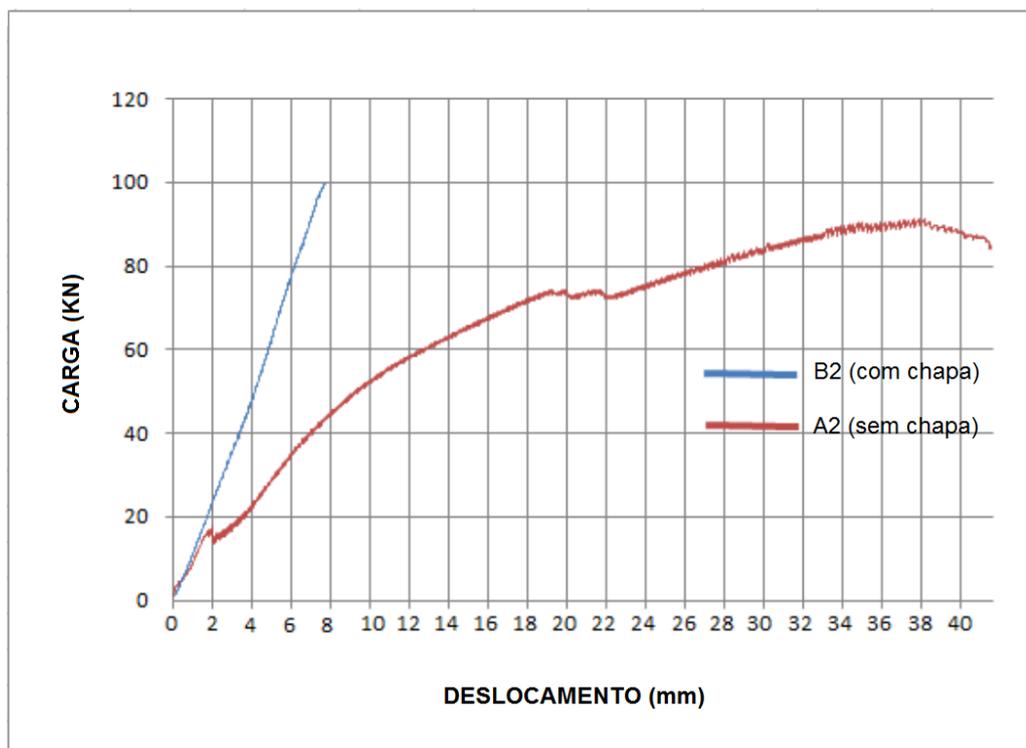


Gráfico 2 – Carga x deslocamento, modelo 10,0 cm x 30,0 cm com três parafusos.
Fonte – Autoria própria.

O modelo de classificação A3, no ensaio mecânico, o conjunto recebeu a carga máxima da máquina, de 100,0 KN, com um deslocamento da peça transversal de 36,0 mm; com 24,2 KN de carga, o deslocamento foi menor que 3,0 mm, antes de ocorrer o esmagamento das fibras da madeira, enquanto que no cálculo analítico foi de 21,36 KN, sem considerar deslocamento. A relação entre as cargas do ensaio mecânico e do cálculo foi na ordem de 11% para o primeiro. O modelo classificado como B3, também recebeu a carga de 100,0 KN, o limite da máquina, com um deslocamento de 19,0 mm. O Gráfico 3, expressa a carga x deslocamento dos modelos A3 e B3, nas dimensões 10,0 cm x 40,0 cm, com quatro parafusos.

O manuseio das madeiras nas dimensões A3 e B3, foi difícil pelo peso, e na prática existe a dificuldade de encontrar toras de madeiras de reflorestamento nessas dimensões.

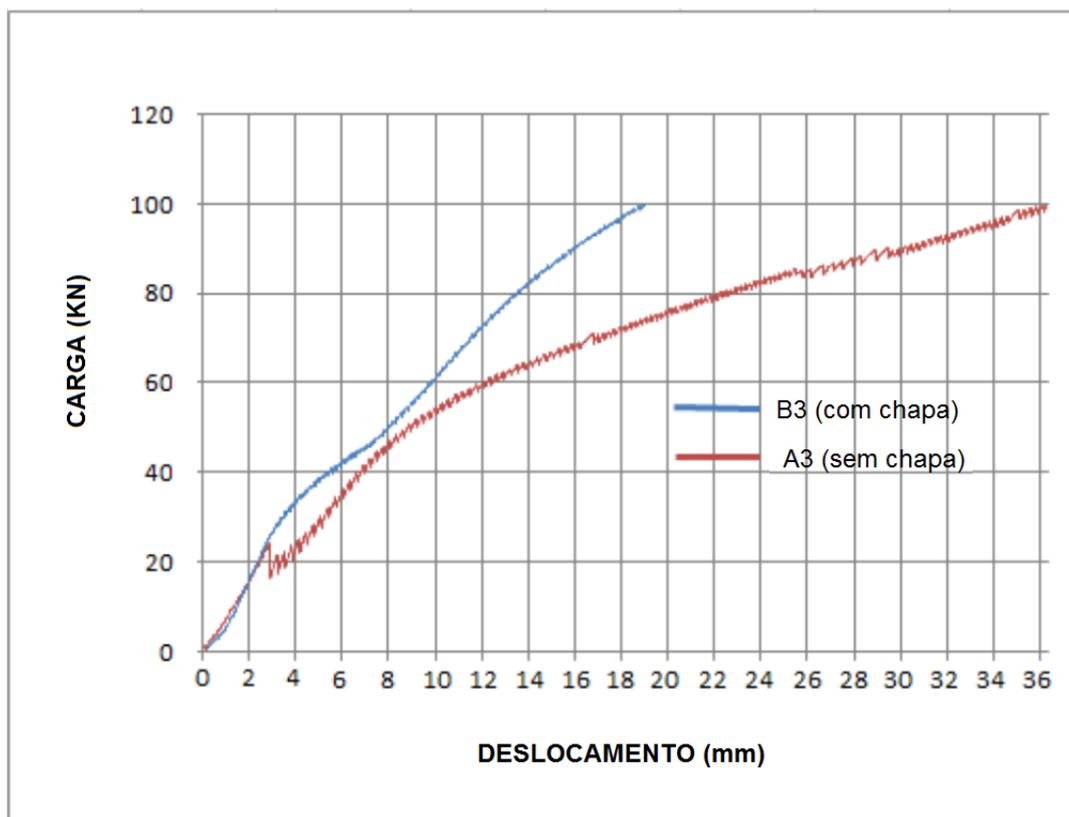


Gráfico3 – Carga x deslocamento, modelo 10,0 cm x 40,0 cm com quatro parafusos. Fonte – Autoria própria.

A Tabela 15, tem a completa demonstração das cargas x deslocamentos dos modelos ensaiados no Laboratório de Materiais do câmpus Cornélio Procópio, sub divididos pela classificação e dimensão dos modelos com a quantidade de parafusos.

Tabela 15 - Classificação das Cargas x Deslocamento: ensaio físico.

Classificação	Dimensão (cm)		Quantidade de Parafusos	Resistência Projeto (KN)	Carga x Deslocamento Ensaio Mecânico			
	Modelos	Chapas			Mínima		Máxima	
					Carga (KN)	Deslocamento (mm)	Carga (KN)	Deslocamento (mm)
A1	8,0 x 20,0	-	2	8,46	11,0	< 2,0	40,0	34,0
A2	10,0 x 30,0	-	3	16,02	16,8	< 2,0	90,0	38,0
A3	10,0 x 40,0	-	4	21,36	24,2	< 3,0	100,0	36,0
B1	8,0 x 20,0	8,0 x 30,0	2	-	-	-	80,0	25,0
B2	10,0 x 30,0	10,0 x 40,0	3	-	-	-	100,0	7,5
B3	10,0 x 40,0	10,0 x 50,0	4	-	-	-	100,0	19,0

Fonte: Autoria própria.

4.3 ENSAIO SIMULADO

Foi realizada a simulação do comportamento dos modelos utilizando ferramenta de análise estrutural por elementos finitos da UTFPR. Os dados da madeira utilizados nos modelos foi o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras $E_0 = 18421,0$ MPa e na direção normal $E_{90} = 921,0$ MPa, e os coeficientes de Poisson para Dicotiledôneas. Como a NBR 7190 (Associação...1997) não fornece o coeficiente de Poisson para os cálculos da resistência da madeira no embutimento, necessário para atender os requisitos exigidos pelo programa, utilizou-se a tabela BODIG e JAINE, (1993). As tensões de compressão na direção paralela às fibras, $(f_{c,0})$ e na direção normal às fibras, $(f_{c,90})$, não foram utilizados no simulador.

As escalas das tensões estão marcadas por cores: na madeira inferior a 12,0 kgf/mm², alternados de 1,2 Kgf/mm²; no parafuso inferior a 84,5 Kgf/mm², alternadas de 8,5 Kgf/mm² e na chapa inferior a 40,0 Kgf/mm², alternadas de 4,0 Kgf/mm².

4.3.1 Simulação na Madeira

A simulação permitiu visualizar o comportamento do conjunto de cada elemento da ligação coma resistência máxima aplicada de 100 KN.

A comparação das peças de madeira, observou-se que, aqueles que não possuíam a chapa foram os que apresentaram maior força esmagadora aplicada pelos parafusos nas fibras. Enquanto aqueles que continham a chapa, a transmissão da carga na chapa, oriundas dos parafusos, ocasionou alívio de tensão na madeira, notório na conservação da carga na peça longitudinal e o alívio das tensões na peça transversal, localizado na região do furo, como pode ser verificado no modelo A2, pela intensidade da área das cores na escala de tensões, (Figura 32) e ainda é possível notar que as peças de grandes dimensões tiveram a extensão da carga mais concentrada e próxima nas regiões dos parafusos.

Os resultados obtidos na simulação confirmaram que as tensões na madeira, dos modelos A1 e B1, na região do parafuso mais distante da carga, foram maiores que àqueles mais próximo da carga. Isso confirma a fissura ocorrida na peça longitudinal no ensaio mecânico, e na peça transversal onde as cargas foram concentradas especificamente nos furos, sendo maior no modelo A1, e menor no B1.

Porém, o B1 não apresentou fissura na parte superior do perfil da madeira, como no ensaio mecânico e estão apresentadas na Figura 34. Os pontos de maior tensão estão na cor vermelha e variam de 1,2 Kgf/mm² até a cor cinza no valor zero.

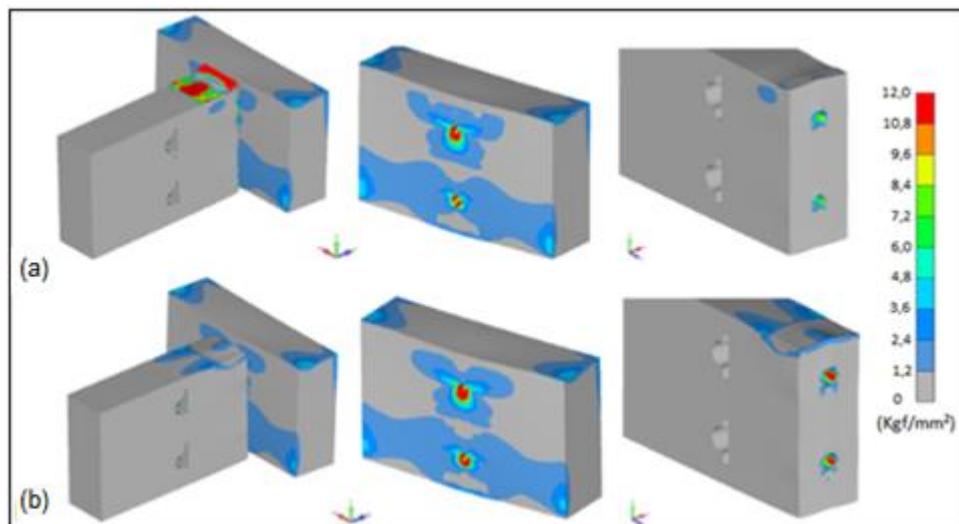


Figura 34 – Tensões na madeira nos modelos B1 e A1 (8,0 cm x 20,0 cm): (a) B1, com chapa; (b) A1, sem chapa. Fonte – Autoria própria.

Nos modelos A2 e B2, com três parafusos, a peça de madeira longitudinal do A2, obteve tensões localizadas nos furos e a progressão foi maior a partir do parafuso que estava mais perto da aplicação da carga. Comparando-se com o modelo B2, com chapa, a incidência das tensões teve o mesmo comportamento, porém, com menor intensidade. Na peça transversal, do modelo A2, a concentração de tensões nos furos foi maior, comparada com o modelo B2, com chapa, conforme a intensidade da área das cores na escala de tensões. A Figura 35, apresenta as imagens da simulação das tensões na madeira, nos modelos A2 e B2, com três parafusos. Os pontos de maior tensão estão na cor vermelha e varia de 1,2 Kgf/mm² até a cor cinza no valor zero.

Nos modelos A3 e B3, com quatro parafusos, a peça de madeira longitudinal do A3, obteve tensões localizadas nos furos e a progressão foi maior a partir do parafuso que estava mais perto da aplicação da carga. A Figura 36, apresenta as imagens da simulação das tensões na madeira, nos A3 e B3, com quatro parafusos. Os pontos de maior tensão estão na cor vermelha e varia de 1,2 Kgf/mm² até a cor cinza de valor zero.

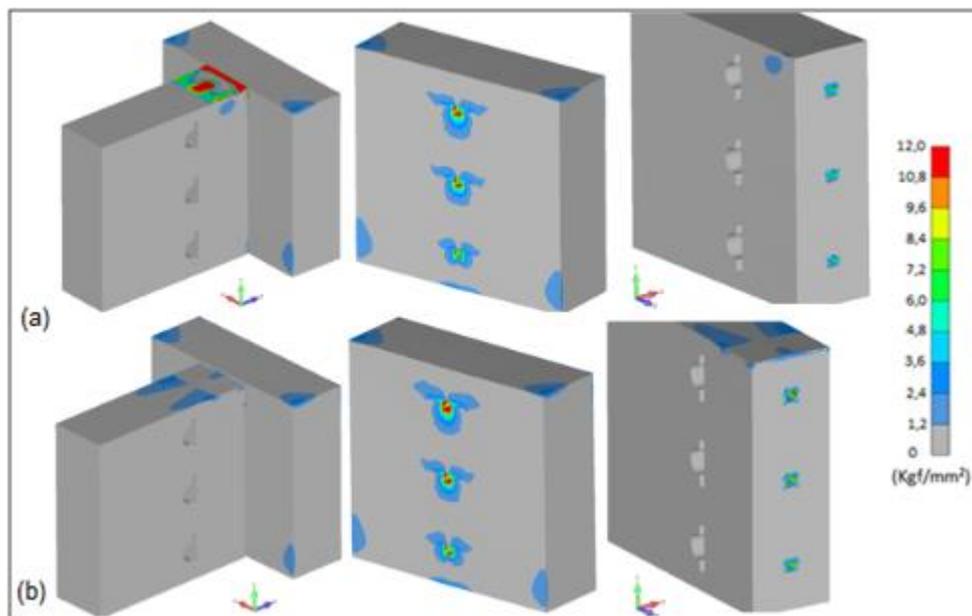


Figura 35 – Tensões na madeira nos modelos B2 e A2 (10,0 cm x 30,0 cm):
a) B2, com chapa; b) A2, sem chapa.
Fonte – Autoria própria.

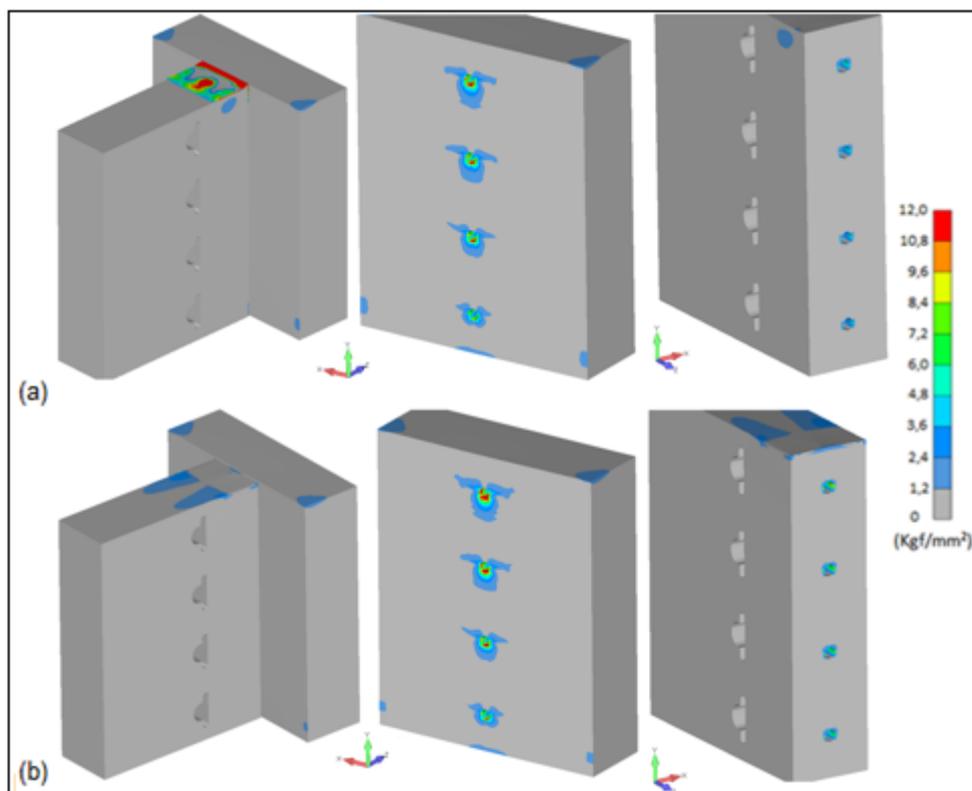


Figura 36 – Tensões na madeira nos modelos B3 e A3 (10,0 cm x 40,0 cm):
a) B3, com chapa; b) A3, sem chapa.
Fonte – Autoria própria.

A extensão da carga na peça longitudinal ficou concentrada na região dos parafusos, a intensidade se deu a partir do furo mais próximo da carga, diminuindo até o mais distante. Comparado com os modelos A2 e B2, a situação das tensões nas peças tiveram os mesmos comportamentos.

As imagens de simulação (Figuras 32, 33 e 34), demonstraram que os modelos que possuíam a chapa receberam maiores cargas, resultando numa deformação menor.

4.3.2 Simulação no Parafuso

A concentração das tensões ilustradas nos parafusos, ocasionadas pela flexão em função da carga aplicada, resulta na interpretação, que o diâmetro do parafuso empregado foi satisfatório, além do seu comprimento e do embutimento nas peças de madeira. Pelo fato, das fibras da madeira, nessa posição, estarem paralelas aos parafusos, as arruelas exerceram compressão na direção onde a madeira tem seu melhor aproveitamento na resistência. Nesse caso, além do parafuso ser submetido à flexão, ocorreu força de tração, e a rosca, apesar da solicitação, não apresentou deformação, resistindo a carga de até 5000, 0 kgf.

A comparação entre resultados experimentais e de simulação, demonstram que os parafusos tiveram os mesmos comportamentos quanto à flexão, e essa afirmação pode ser estendida na comparação entre modelos sem e com chapa.

Nos modelos A1 e B1, a deformação pela flexão, ficou explicitada nos dois parafusos na concentração da força aplicada. O parafuso mais próximo da aplicação da carga foi o mais solicitado, e as deformações seguiram o mesmo comportamento. Nos modelos A2 e B2, as deformações também tiveram características definidas, retratando a apresentação ocasionadas pela flexão. Nos três parafusos, a diferenciação ficou a partir daquele que esteve mais próximo da aplicação da carga, que foi maior, seguindo para o último e for fim ao do meio. Nos modelos A3 e B3, as deformações não foram relevantes. Verificam-se na Figura 37 os esforços localizados nos parafusos nas condições simuladas. Os pontos de maior tensão estão na cor vermelha de 85,0 Kgf/mm², e variam de 8,5 Kgf/mm² até a cor cinza no valor zero.

Apesar da apresentação das deformações, os parafusos não sofreram cortes, mesmo nos modelos mais solicitados

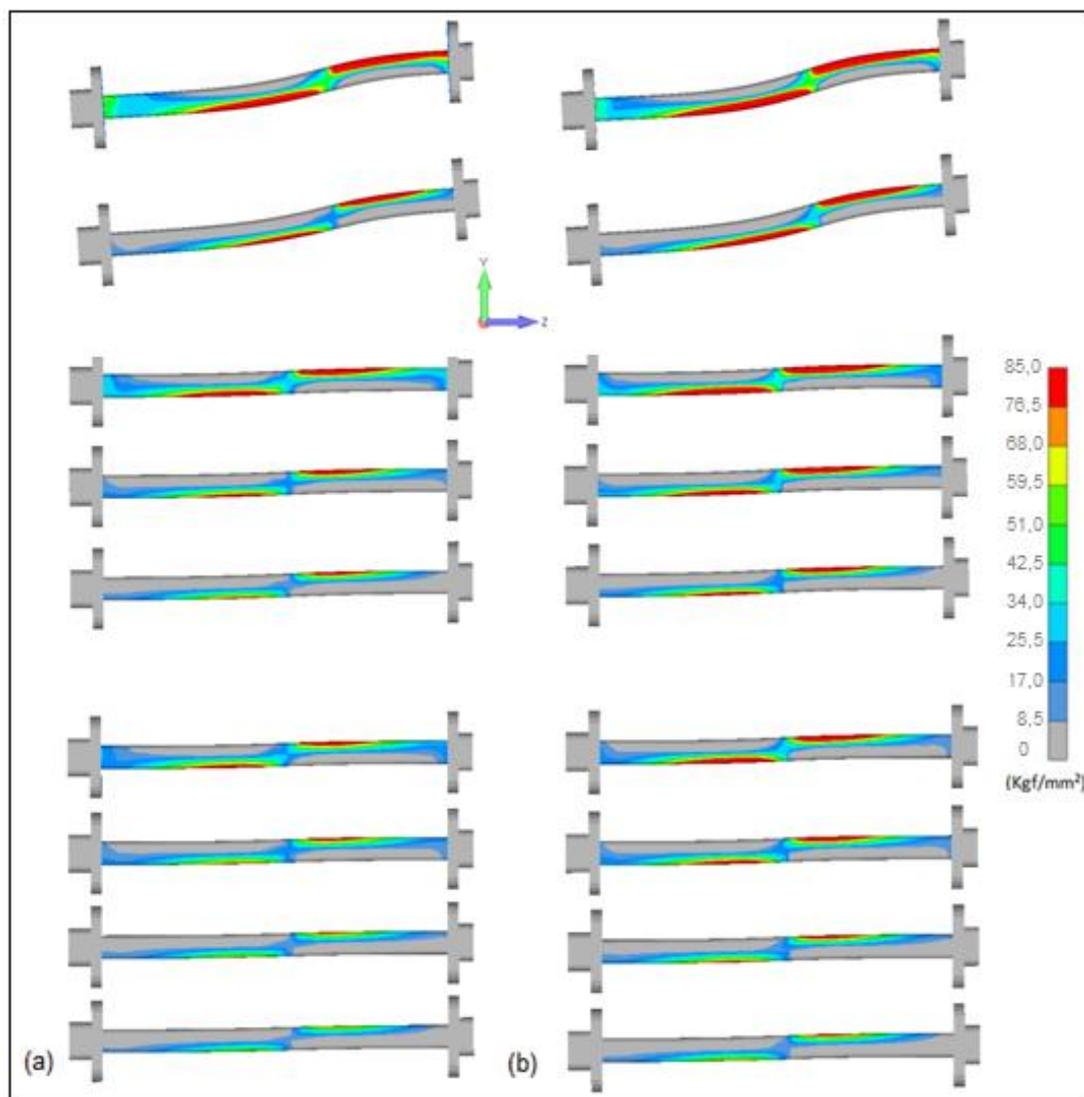


Figura 37 - Tensões localizadas nos parafusos: a) B1, B2 e B3, modelos com chapa; b) A1, A2 e A3, modelos sem chapa. Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Simulação na Chapa Metálica

As chapas utilizadas nos modelos B1, B2 e B3, foram as responsáveis por aumentar a resistência nas ligações parafusadas. Na ilustração, a concentração demarcada nas cores vermelho, máximo 40,0 Kgf/mm² e cinza, mínimo zero, da escala das tensões; na região dos furos, a força exercida pelos parafusos na chapa foi intensa, isso minimizou os esforços na madeira.

A distribuição de tensão ao longo da chapa seguiu as mesmas características dos incidentes nas peças de madeira, principalmente as apresentadas nas longitudinais. A comparação entre os ensaios experimental e simulado, demonstraram

que no mecânico, a chapa presente no modelo B1 ficou totalmente danificada pelo avanço das cargas aplicadas até a destruição total da peça, e nas chapas dos modelos B2 e B3, houve as mesmas proporções de deformações, tal qual as apresentadas na simulação.

A Figura 38 apresenta o comportamento das chapas e verifica-se a localização das tensões.

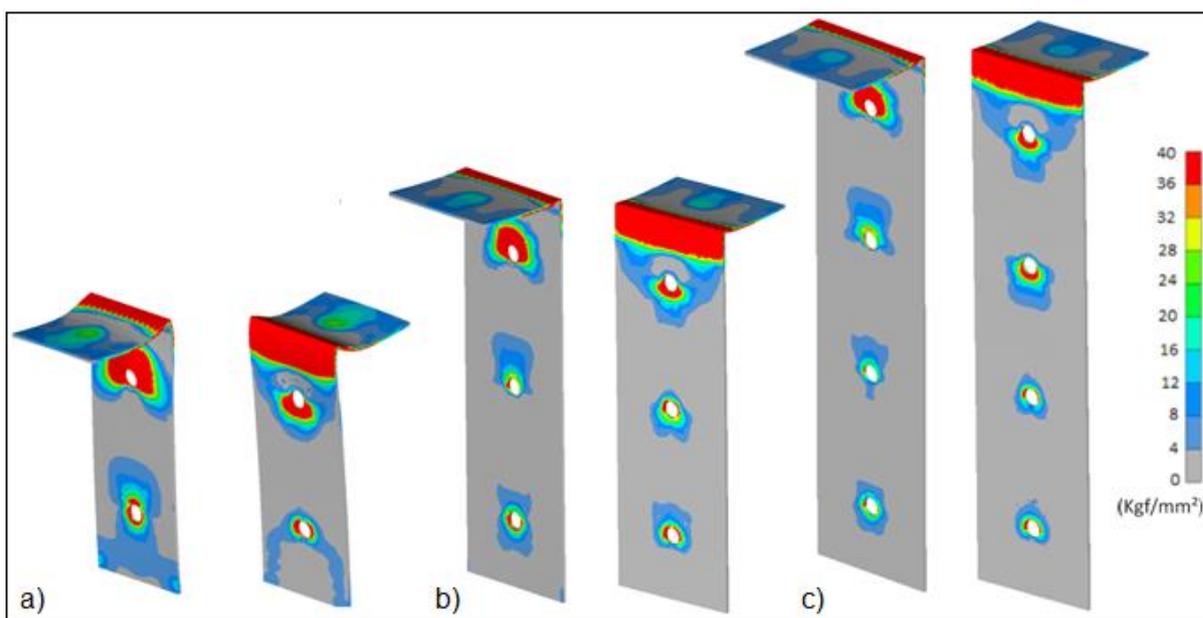


Figura 38 - Tensões localizadas nas chapas: (a) B1; (b) B2; (c) B3
Fonte: Autoria própria.

Os experimentos e a comparação entre os modelos com e sem chapa foi marcante. Os modelos sem apresentaram o parafuso mais próximo da carga, esmagando as fibras da madeira, enquanto que nos modelos com a chapa inserida e prensada entre as peças, o esmagamento das fibras, não foi considerado grande, a chapa resistiu ao cisalhamento, além dos furos mais distantes da carga apresentarem pequenas solicitações.

A simulação propiciou a geração de um parâmetro de tensões para cada elemento da ligação, que pode ser usado para mensurar a resistência das peças de madeira, dos parafusos e das chapas, a partir de uma carga estipulada. O modelo A1, com dois parafusos sem chapa, foi considerado base de referência para as peças de madeira transversal e longitudinal, e parafusos; o modelo B1, das chapas, conforme expressa a Tabela 16.

Os valores expressos são admissionais e representam a classificação dos elementos da ligação, diante dos parafusos, da madeira e das suas dimensões e da chapa.

Tabela 16 – Comparativo de Resistência entre Modelos Simulados

Classificação	Dimensão das Madeiras (cm)	Quantidade dos Parafusos	Elementos da Ligação			
			Peças de Madeira		Metais	
			Transversal	Longitudinal	Parafuso	Chapa
A1	8,0 x 20,0	2	1	1	1	-
A2	10,0 x 30,0	3	1,46	1,41	1,44	-
A3	10,0 x 40,0	4	1,86	1,81	1,81	-
B1	8,0 x 20,0	2	1,37	1,61	1,24	1
B2	10,0 x 30,0	3	2,08	2,25	1,80	1,39
B3	10,0 x 40,0	4	2,79	2,92	2,31	1,48

Fonte – Autoria própria.

Com os coeficientes expressos de cada material e de cada modelo, torna-se possível calcular a resistência nas mais situações adversas.

O modelo B2, com chapa e três parafusos, suporta maior resistência que o modelo A3, sem chapa e com quatro parafusos; os valores dos coeficientes desses modelos são próximo para as peças de madeira e os parafusos; a comparação entre os modelos quanto à resistência, têm valores próximos. Nas chapas a que teve seu melhor aproveitamento foi a do modelo classificado como B2, com três parafusos.

5 CONCLUSÃO

Observamos que, nos modelos estudados, B1, B2 e B3, a inserção da chapa metálica prensada entre as peças de madeira aumentou em aproximadamente 50% a resistência da ligação, comparados aos modelos A1, A2 e A3, sem a chapa. A resistência do A1, foi a mais precária, enquanto que os demais sem chapa, resistiram o suficiente para a carga aplicada. O modelo B2, com três parafusos e com a chapa prensada entre as peças, foi o que melhor se apresentou quanto a resistência da carga, tanto para o conjunto com ligações madeira/madeira, como para o conjunto madeira/chapa/madeira, visto que resistiu a uma carga superior ao modelo A3, com quatro parafusos, sem chapa.

Nas ligações madeira/madeira, os gráficos dos três modelos apresentaram linearidade até onde as fibras da madeira resistiram ao esmagamento pelo parafuso, com a tensão perpendicular aplicada às fibras, a partir desse ponto a curva apresentou o esmagamento ocorrido nas fibras, tornando o deslocamento entre as peças gradativamente maior até a sua ruptura.

Os parafusos, na flexão, tiveram deformações maiores, àqueles que estavam mais próximos da aplicação da carga e demonstraram mesmo comportamento em todos os modelos, enquanto que os que estavam mais distantes, foram menos deformados ou não apresentaram deformações.

As chapas não tiveram deformações fora do plano da direção da carga e os seus furos não apresentaram corte, exceção feita à do modelo B1, que além de acontecer o cisalhamento no furo, teve a dobra cortada. Talvez pela solicitação até a plastificação total da madeira. Diante da localização das solicitações apresentadas, notou-se que tiveram os mesmos comportamentos das peças de madeira.

Nos modelos com as chapas, as peças transversais da madeira, foram menos solicitadas nas regiões dos parafusos, supostamente pela chapa suportar grande parte da carga aplicada, o que faz crer sua importância.

De acordo das dimensões das peças de madeira, do diâmetro dos parafusos e da chapa metálica prensada entre as peças, sugere uma razoável diminuição das deformações dos elementos da ligação, chegando a ter ganho de 50% de resistência.

Pesquisas futuras, dentro desses parâmetros, podem ser elaboradas para essa certificação, objetivando a devida empregabilidade da madeira e ligações com

parafusos e outros elementos metálicos auxiliares, que não estejam expostos, e que poderão vir a exercer um importante papel de tecnologia e inovação para engenharia e arquitetura das construções.

A sugestão para trabalhos futuros, fica com a inserção de mais uma chapa, posicionada paralelamente à existente, com a dobra voltada para a peça longitudinal, ambas prensadas entre as peças da madeira.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). **NBR 6120** – Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações: procedimento. Rio de Janeiro.

----- (1997). **NBR 7190** - Projeto de estrutura de madeira. Rio de Janeiro.

-----REVISÃO (2012). **NBR 7190** - Projeto de estrutura de madeira. Rio de Janeiro.

----- (2001). **NBR 14762** - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro.

ANDRADE, Wellington, **Notas de Aula, Estruturas de Madeira, Ligações**, Curso de Engenharia Civil, UFG, Catalão, Goiás, 2011.

ARVORES DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.arvores.brasil.nom.br>>. Acesso em: 17 mai. 2014.

BELENUS. Disponível em: <<http://www.belenus.com.br>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

BESSA, William O.; GONÇALVES, Roberto M., **Análise Numérica, Teórica e Experimental de Ligações Viga Mista-Pilar**, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2006.

BODIG, J.; JAYNE, B. A., **Mechanics of wood and wood composites**, 2^a ed. Malabar, Flórida: Krieger, 1993. 712 p.

BREMER, Cynara Fieldler; CARRASCO, Edgar, **Parafusos ocos em ligações de peças de madeira laminada colada**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v.5, n.1, abril 2013.

CALIL JR, Carlito; LAHR, Francisco Antônio Rocco; DIAS, Antônio Alves, **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**, Manole, Barueri, 2003.

CALIL JR, Carlito; MOLINA, Júlio Cesar, **Cobertura em Estruturais de Madeira, Exemplos de Cálculos**, São Paulo, Pini, 2010.

CALIL JR, Carlito *et al.*, **Estruturas de Madeira – Notas de Aula**. EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

COMERCIAL GERDAU. Disponível em <<http://www.comercialgerdau.com.br>> Acesso em: 16 mai. 2014.

CUNHA, João; CARRASCO, Edgar V. M.; BRANCO, Jorge M.; LOURENÇO, Paulo B., **Ligações Estruturais de Madeira Laminada Colada (CLT) Utilizando Parafusos Autoperfurantes**, XXXV Jornada Sul Americana de Engenharia Estrutural, Infraestrutura e Desenvolvimento, Rio de Janeiro, 2012.

DIAS, Alan, **Ligações em Estruturas de Madeira**. Carpintaria: blog estruturas de madeira. Disponível em: http://estruturasdemadeira.blogspot.com.br/2013_02_01_archive.html> Acesso em 14 abr. 2014.

DIAS, Tiago I. de M. Pinto, **Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos; Diagnóstico e Interação Estrutural**, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2008.

ESCARPINI, FILHO R. S.; SANTOS dos, Luciano B.; LAGES, Eduardo N., **Análise de Ligações Parafusadas sob Cisalhamento Centrado em Estruturas de Aço via Elementos Finitos Tridimensionais**. Monografia de Graduação. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, 2007.

GALVÃO, A. P. M., JANKOWSKI, I. P., **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo, Nobel, 1985.

GESUALDO, Francisco A. Romero, **Estruturas de Madeira – Notas de Aula**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 2003.

GODOY de, João P. M., **Análise de Estruturas de Madeira, com e sem Impregnação de Resina Poliuretana Derivada do Óleo de Mamona, Aplicadas em Linhas de Transmissão de Energia**. Departamento de Engenharia Elétrica, EESC, Universidade de São Paulo, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, **Madeira: Uso Sustentável na Construção Civil**, SVMA, São Paulo, 2009.

KUSADA, Isabelle M., **Passarelas Estaiadas de Madeira**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

LEUTNER, Aline M., **Resistência de Ligação com Parafuso Passante com Porca e Arruela em Madeira**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Campo Mourão, 2013.

MAIOLA, Carlos H.; MALITE, Maximiliano, **Ligações Parafusadas em Chapas Finas e Perfis de Aço Formados a Frio**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.

MARTINS, Odilon, **Estudo das Ligações por conectores de Chapas com Dentes Estampados em Estruturas de Madeira**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Area de Conhecimento, Ilha Solteira, 2007.

PIZZO, Benedetto; GAVIOLI, Mariangela; LAURIOLA, Marco P., **Evaluation of a design approach to be on-site structural repair of deayed old timber end beams**. Journal Engineering Structures, 2012.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle, **Estruturas de Madeira**, LTC, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2003.

RITTER, M. A. Timber Bridgers. Madison, Forest Products Laboratory – Forest Service, 1990.

SILVA, Anderson; RADE, Domingos A., **Estudo de Ligação Pregada em Madeira no Sistema Leve plataforma**. FEMEC, 16ª POSMEC – Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.

SILVA, Edson L.; SILVA, Valdir P., **Dimensionamento de perfis formados a frio, conforme NBR 14762 e NBR 6355 – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO CIVIL**. Rio de Janeiro, 2008.

TÉGULA – Soluções para telhados. Disponível em: <<http://www.tegula.com.br>>. Acesso em: 08 jun. 2013.

VALLE, Ângela Do, **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 1999.

WELLINGTON, Andrade; Notas de aula, **Estrutura de Madeira, Propriedades Físicas da Madeira Relevantes para o Projeto de Estruturas**, Departamento de Engenharia, Universidade de Goiás, Campus de Catalão, Catalão, Goiás, 2011.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **NBR 8800** - Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios: procedimento. Rio de Janeiro.

----- (1988). **NBR 6123** - Forças Devidas ao Vento em Edificações: procedimento. Rio de Janeiro.

----- (2003). **NBR 8681** – Ações e Segurança nas estruturas. Rio de Janeiro.

BALLARIN, A. W.; **Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora***, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2003.

CARNEIRO, Francisco F. O. Dias, **Reforço de Vigas de Madeira com Elementos de Aço em Obras de Reabilitação**, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2012.

EUROCODE 5, **Design of timber structures**: Part 1.1 – General - Common rules and rules for buildings, 2004.

GATTESCO, N., TOFFOLO, I.; **Experimental Study on Multiple-bolt Steel-to-timber Tension Joints**, Materials and Structures, 2004.

ISODA, Hiroshi; TACHIBANA, Masahiko; KAWAI, Naohito; KOSHIHARA, Mikio, **Case Study of Combination Ways of Steel and Timber in Japanese Buildings**, China Steel Construction Society, China, 2000.

MAGGI, Yuri I.; GONÇALVES, Roberto M., **Análise do Comportamento de Ligações Metálicas Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Utilizando Elementos Finitos**, Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2005.

MARTINS, Tomás F. R. M., **Dimensionamento de Estruturas de Madeira, Coberturas e Pavimentos**, Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

PINHEIRO, Antônio Carlos da F. Bragança, **Estruturas Metálicas, Cálculos, Detalhes, Exercícios e Projetos**. Edgard Blücher. Ltda, 1ª Edição, São Paulo, 2001.

REZENDE, P. G.; NETO, J. M.; MALITE, M., **Análise Numérica de Ligações Parafusadas em Chapas Finas e em Perfis Formados a Frio**, Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2006.

SOMR, Michael, **Metal Work Used in Timber Engineering**. Department of Steel and Timber Structures, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2010.

VENDRAME, Adriano M.; GONÇALVES, Roberto M., **Análise Numérica e Experimental de Estruturas Espaciais Constituídas de Barras de Extremidades estampadas: Estudo dos Nós**, Caderno de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2002.

XAVIER, Carolina N., **Ligações Estruturais com Parafusos e Barra Rosqueada Utilizando Madeira de Eucalyptus e pellita e Corymbia citriodora**, Monografia para o grau de Engenheiro Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.