

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PROJETO DE ESTRUTURAS

CARLOS EDUARDO KOZERSKI

**ANÁLISE COMPARATIVA DE LIGAÇÃO COM PINOS METÁLICOS,
PREGOS E PARAFUSOS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**

MONOGRAFIA

TOLEDO
2012

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PROJETO DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE LIGAÇÃO COM PINOS METÁLICOS,
PREGOS E PARAFUSOS EM ESTRURAS DE MADEIRA**

Monografia do curso de Especialização em Projeto de Estruturas da Universidade Tecnologia Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim.

TOLEDO
2012



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

ANÁLISE COMPARATIVA DE LIGAÇÃO COM PINOS METÁLICOS, PREGOS E PARAFUSOS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

por

CARLOS EDUARDO KOZERSKI

Esta monografia foi apresentada às dezesseis horas do dia **dezenove de dezembro de 2012** como requisito parcial para a obtenção do título de ESPECIALISTA EM PROJETO DE ESTRUTURAS, Linha de Pesquisa Estruturas de Madeira, do Programa de Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof^a. Msc. Gladis Cristina Furlan
(UTFPR)

Prof^a. Msc. Lucia Bressiani
(UTFPR)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR)
Orientador

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador do Curso

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Câmpus Toledo

Rua: Cristo Rei, 19
85902-490 – Toledo – Paraná - Brasil
Fone: (45) 3379-6800 Fax: (45) 3379-6808
www.td.utfpr.edu.br

RESUMO

As estruturas de madeira requerem peças com dimensões e formas geométricas que dificilmente são encontradas ou convenientes aos usos estruturais esperados. Para viabilização dessas estruturas, é necessário realizar ligações e/ou emendas que garantam resistência, durabilidade e segurança, fazendo com que a ligação entre elementos seja um dos aspectos mais importantes para os projetistas e construtores. O presente trabalho tem como objetivo central analisar experimentalmente três configurações de ligação por pinos metálicos, sendo uma parafusada, outra pregada e também a associação de pregos e parafusos. As amostras foram submetidas à compressão com o esforço no sentido paralelo as fibras da madeira, sendo este, um modelo de ligação bastante utilizado em banzos de tesouras de cobertura. A classificação normativa trata como pinos metálicos os parafusos e pregos, utilizando a mesma metodologia de cálculo para dimensionamento. Contudo, os parafusos demonstraram resistência superior, e observações na ligação mista observaram-se maiores deformações no entorno do parafuso, indicando que este absorveu maior carregamento, demonstrando a importância de se realizar testes experimentais para ligações de estruturas de madeira.

Palavras chave: Ligação de madeira; pinos metálicos; parafuso; prego.

ABSTRACT

The wooden structures require parts with dimensions and geometric shapes that are hardly found convenient to use structural or expected. To viability of these structures, it is necessary to make connections and / or amendments to ensure strength, durability and safety. Making the connection between elements is one of the most important aspects for designers and builders. Thus, this study aims to examine experimentally central three configurations connecting metal pins, one screwed, nailed another and also the combination of nails and screws. The samples were subjected to compressive stress in the direction parallel to the wood fibers, this being a type commonly used in connection flanges of hedge shears. The classification rule comes as metal pins screws and nails, using the same calculation methodology for sizing. However, the screws have demonstrated superior strength, and observations mixed in binding were observed in larger deformations around the screw, indicating that higher loading absorbed, demonstrating the importance of conducting experimental tests for connections wooden structures.

Keywords: Call of wood; metallic pins, screw, nail.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 OBJETIVOS.....	8
2.1. OBJETIVOS GERAIS	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3 JUSTIFICATIVA.....	9
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
5 MATERIAIS E MÉTODOS	14
5.1 DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	14
5.2 MODELO DE LIGAÇÃO PARAFUSADA	15
5.3 MODELO DE LIGAÇÃO PREGADA	17
5.4 MODELO DE LIGAÇÃO MISTA	20
5.5 ENSAIOS	22
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
7. CONCLUSÃO	33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira como material de construção remonta dos primórdios da civilização humana e ainda hoje ocupa papel de destaque no processo construtivo por ser um material natural que permite construções leves, resistentes e de fácil trabalhabilidade.

Nos anos mais recentes, a madeira está sendo redescoberta como elemento estrutural pelos profissionais do meio produtivo e, conseqüentemente, tem requerido a investigação científica para o seu uso. A evolução de recursos, como os tratamentos preservativos, a industrialização de madeiras de baixa densidade, os processos construtivos, dentre outros fatores, tem transformado a madeira num produto para atender às mais diversas necessidades. (OLIVEIRA, 2005).

A execução de grandes estruturas de madeira requer peças maciças com dimensões e formas geométricas que dificilmente são encontradas e convenientes aos usos estruturais esperados. Para viabilização dessas estruturas, é necessário realizar ligações e/ou emendas compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança. Esses aspectos fazem com que a ligação entre elementos estruturais seja um dos aspectos mais importantes para os projetistas e construtores de estruturas de madeira.

Atualmente, a normatização brasileira referente à madeira aborda as ligações por meio de pinos metálicos, ligações coladas, cavilhas ou conectores. Os pinos metálicos são constituídos pelos pregos e parafusos, enquanto os conectores podem ser anéis metálicos ou chapas metálicas com dentes estampados. As ligações constituem-se no ponto crítico das estruturas de madeira e, por isso, demandam estudos experimentais que avaliem o seu real comportamento. (OLIVEIRA, 2005).

Existem dois tipos principais de ligações, por aderência através de adesivos e por penetração através de pinos que são o objeto desse estudo.

As ligações por penetração se caracterizam pela utilização de elementos de ligação onde as forças transmitidas de uma peça para outra convergem geralmente para uma pequena área (parafusos, pregos, cavilhas, etc).

Este trabalho busca avaliar o efeito da ligação com o emprego de pinos metálicos por parafusos e pregos, bem como a análise da eficiência da ligação quando aplicada em estruturas de madeira da espécie *Araucaria angustifolia*. Busca melhorar desta forma, a segurança das estruturas em madeira, tornando-as cada vez mais competitivas, divulgadas e aceitas entre os projetistas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar a eficiência de ligações de emendas longitudinais com cobrejuntas, localizadas comumente nos banzos de treliças em estruturas de madeira submetidas aos esforços no sentido das fibras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a forma de ruptura das amostras;
- Determinar qual dos três modelos é mais resistente;
- Estabelecer comparações.

3 JUSTIFICATIVA

O cálculo de dimensionamento de ligações com pinos metálicos segue uma rotina de cálculo idêntica para parafusos e pregos, no entanto, sabe-se que são muitas as diferenças, evidenciando que existe uma grande área de estudos que podem ajudar a entender melhor as suas particularidades, e dessa forma, ter um maior aproveitamento das potencialidades das estruturas de madeira.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo JOHANSEN (1949), a ligação por parafuso depende do efeito de pino e do atrito entre as superfícies, causado pelo tracionamento do parafuso. No entanto os resultados de seus ensaios mostraram que apenas o efeito de pino deve ser considerado, pois o tracionamento é desprezível.

No cálculo das ligações, a NBR 7190/ 97 não permite a consideração do atrito entre as superfícies de contato devido à retração e à deformação lenta da madeira. Também não são levados em conta os esforços transmitidos por estribos, braçadeiras ou grampos.

A resistência das ligações por pinos depende da resistência da madeira ao embutimento do parafuso (f_e) e da resistência ao escoamento do aço do pino, e, sendo estas de natureza plástica, a capacidade de força de um pino metálico pode ser formulada baseada nesse comportamento (OLIVEIRA, 2005).

O critério de dimensionamento de ligações por pinos da NBR 7190/97 baseia-se no conceito da relação entre a espessura da peça de madeira, o diâmetro do pino, a resistência ao embutimento e a tensão de escoamento do pino metálico determinam o comportamento da ligação, que pode deformar-se pelo embutimento na madeira ou pela flexão do pino. A resistência de um pino é obtida pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte.

Para a união entre madeira e aço. A norma brasileira indica que a segurança dos elementos de aço deve ser verificada segundo as prescrições da NBR 8800:1986 – *Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*.

Visando uma melhor distribuição dos esforços, a NBR 7190:1997 impede o emprego de apenas um pino metálico em uma ligação. As ligações com pinos metálicos são classificadas quanto à deformação em deformáveis e rígidas. As ligações com quatro ou mais pinos são consideradas rígidas quando atendidos os limites de pré-furação estabelecidos pela norma. Com 2 ou 3 pinos as ligações são consideradas deformáveis e só podem ser empregadas em estruturas isostáticas.

No caso de três peças, correspondente a corte duplo, será adotado o menor dos valores entre t_1 , $t_2/2$ e t_3 , conforme indica a Figura 1.

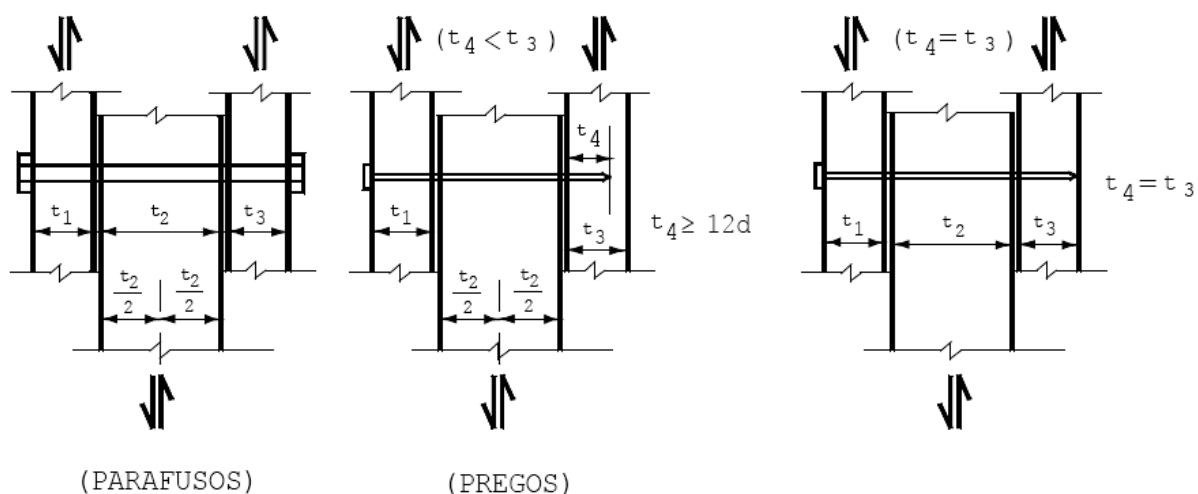


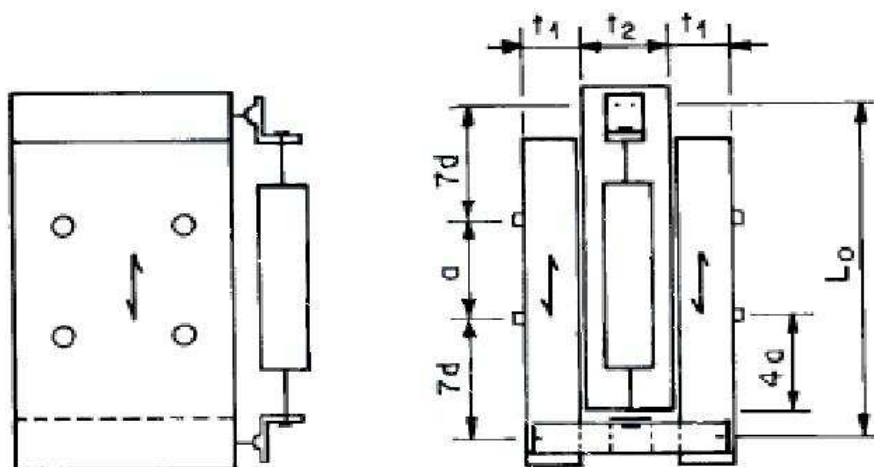
Figura 1 – Pinos em corte duplo.
Fonte: NBR 7190/1997.

A resistência de um pino é obtida pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte.

Os ensaios foram baseados na NBR 7190/97 pelo conteúdo do Anexo C - Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira. Especificamente no item C.5 Ligações com pinos e cavilhas. E para a caracterização mínima da resistência de uma ligação, cada amostra deve ter pelo menos seis corpos-de-prova.

A madeira para fabricação dos corpos-de-prova deve ser extraída aleatoriamente do lote a ser investigado, devendo ser representativa da totalidade do mesmo. Os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e fabricados com

madeira da mesma peça. E devem ser fabricados de preferência com madeiras com umidade entre 10% e 20%, obtidos em ensaio de umidade. Os pinos metálicos podem ser pregos ou parafusos. (NBR 7190/97).



a) Resistência na direção paralela às fibras

Figura 2 – Corpos-de-prova para ensaios de ligações mecânicas.
Fonte: NBR 7190/1997.

Segundo a NBR 7190/97 em ligações por pinos metálicos é exigida uma pré-furação, as parafusadas de 0,5 mm de folga em relação ao diâmetro do parafuso. Essa limitação tem o intuito de facilitar o posicionamento dos dispositivos de ligação, tornando-a menos deformável. Nessas ligações, o objetivo principal da pré-furação é diminuir o risco da ocorrência de fendilhamento. Os parafusos devem ser de aço estrutural, especificado pela NBR 8800, de preferência com diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm.

Ainda segundo prescrito da NBR 7190/97, Os pregos devem ser de aço 1011-B e as dimensões devem estar de acordo com a NBR 6627. Os pregos devem ser cravados na madeira com pré-furação feita por broca com diâmetro mínimo de acordo com as especificações desta Norma, sendo:

- coníferas: 0,85 **d**ef ;
- dicotiledôneas: 0,98 **d**ef.

onde:

def é o diâmetro efetivo medido nos pinos a serem utilizados, em milímetros.

A realização da pré-furação, em ligações pregadas, utilizando os diâmetros apresentados pela NBR 7190, são dificultadas em função dos diâmetros

de brocas e pregos não serem encontrados com esse nível de precisão na maioria dos casos.

Para ensaios em máquinas com leituras automáticas de deslocamentos o comprimento total do corpo-de-prova pode ser utilizado como base de medida para o cálculo da deformação específica da ligação. (NBR 7190/97).

A resistência R de uma ligação é determinada convencionalmente pela força aplicada a um corpo-de-prova padronizado que provoca na ligação uma deformação específica residual de 2‰, como mostrado na figura 3.

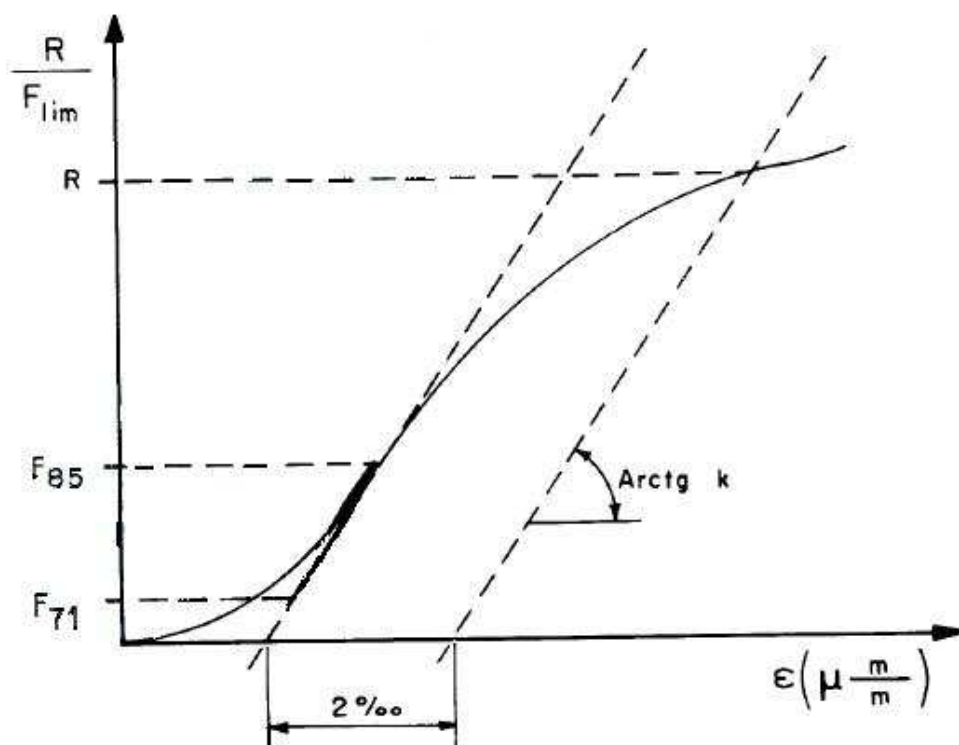


Figura 3 – Diagrama força x deformação específica da ligação
Fonte: NBR 7190/1997

A obtenção da resistência e da rigidez das ligações pela equipe do LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo) foi determinada pela força aplicada ao corpo-de-prova padronizado, que provoca na ligação uma deformação específica residual de 2‰. Para a sua obtenção, foi construído um diagrama força x deformação específica. Inicialmente, obtém-se uma reta secante à curva do diagrama, fornecida pelos pontos correspondentes a 10% e 50%, respectivamente, da força de ruptura dos corpos-de-prova ensaiados. No diagrama, foi construída uma reta paralela à

secante, passando pelo ponto (2‰) e prolongada até o ponto de interseção com a curva do diagrama força x deformação específica, que define o valor da resistência da ligação (R) (OLIVEIRA,2005).

O teor de umidade da madeira deve ser determinado pelo método especificado no anexo B da NBR 7190/97. O corpo-de-prova deve ter seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento, ao longo das fibras, de 5,0 cm. A umidade corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, dado pela equação 1:

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

onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

Para proceder ao ensaio segundo o mesmo documento normativo, primeiramente é necessário determinar a massa inicial (m_i) do corpo-de-prova com exatidão de 0,01. Após a determinação da massa inicial, colocar o corpo-de-prova na câmara de secagem, com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. g. Durante a secagem a massa do corpo-de-prova deve ser medida a cada 6 h, até que ocorra uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa será considerada como a massa seca (m_s). Conhecida a massa seca (m_s) do corpo-de-prova, determina-se a umidade à base seca pela expressão definida em B.5.2. (NBR-7190/97).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos-de-prova, para ensaio de ligação na direção paralela às fibras, foram montados obedecendo às dimensões e espaçamentos mínimos constantes na norma brasileira, duas seções de corte, utilizando-se quatro pinos para as ligações parafusadas, nove pinos para as ligações pregadas e seis pregos mais um parafuso para a ligação mista.

Para este trabalho foram confeccionados seis (6) corpos-de-prova para cada modelo de ligação, nos três (3) modelos de ligações propostos, totalizando dezoito (18) amostras.

A madeira utilizada foi uma conífera da espécie *Araucaria angustifolia*, conhecido popularmente por *Pinho do Paraná*, com densidade média de 580 kg/m³ segundo Tabela E.3 da NBR-7190/97, e densidade básica 0,55 g/cm³, com coeficiente de retratibilidade médio de 0,52% (MATTOS,2008).

As peças de madeira bruta foram adquiridas em um estabelecimento de comercio de madeiras, onde foram selecionados três vigas de 4,5 metros de comprimento de um mesmo lote, com seção transversal pouco maior que 5 x 10 cm, que fossem suficientes para permitir o seu beneficiamento.

Para os cortes na madeira, tomou-se o cuidado de procurar minimizar as falhas, eliminando os nós, as trincas e outros defeitos identificados visualmente ao longo das peças.

Os materiais foram adquiridos no comércio local na cidade de Marechal Cândido Rondon, estado do Paraná, no mês de setembro do ano de 2012. O custo de um conjunto com um (1) parafuso, duas (2) porcas e duas (2) arruelas foi de um real e cinqüenta centavos (R\$ 1,50). Enquanto que os pregos custaram seis reais e cinquenta centavos (R\$ 6,50) o pacote de um quilo (1 kg) que possuía setenta e sete (77) unidades de pregos.

5.1 DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

As dimensões das peças de madeira para modelar os corpos de prova foram baseadas na configuração mínima exigida para uma estrutura de madeira, conforme a NBR-7190/97 determina para projeto, na qual está especificado que

peças principais isoladas, como vigas e barras longitudinais de treliças, devem ter no mínimo 50 cm² e espessura mínima de 5 cm. Logo, foi adotado seção 5 x 10 cm para a peça principal.

As peças solidarizadas continuamente podem ser consideradas como se fossem maciças. Dessa forma, para as peças das cobrejuntas optou-se por manter a mesma área total de seção transversal de peça principal, como se ela fosse partida ao meio, e assim conseguir um conjunto simétrico. Com isso, adotou-se a seção transversal de 2,5 x 10 cm para cada uma das cobrejuntas.

5.2 MODELO DE LIGAÇÃO PARAFUSADA

Os pinos metálicos do tipo parafusos são de aço-carbono classe 5.8, fabricados pela indústria CIZER, com dimensão correspondente ao diâmetro de dez milímetros (\varnothing 10,0 mm) e comprimento de cento e vinte milímetros. A resistência característica ao escoamento $f_{y,k}$ é de 420 MPa. As arruelas são em formato circular e 30 mm de diâmetro externo, com furo central de 10,5 mm e espessura de 2 mm.

Os parafusos ficaram com espaçamento de 5 x 6 cm entre os eixos dos pinos, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5.

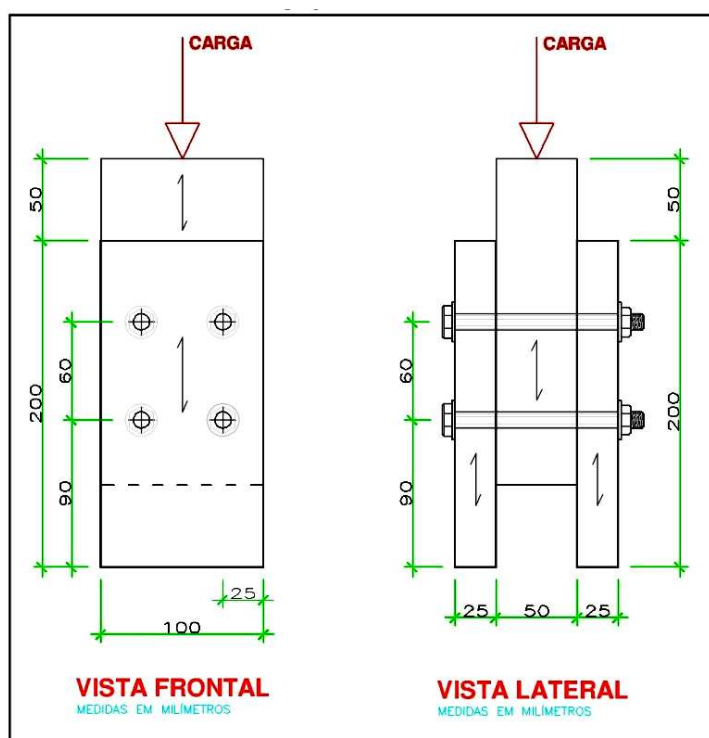


Figura 4 – Forma da Ligação Parafusada.



Figura 5 – Amostra pronta para o ensaio.

Para a pré-furação utilizou-se uma furadeira de bancada vertical que permite realizar a furação atravessando todo o conjunto em uma única etapa, com uma broca do tipo aço-rápido no diâmetro de 10,5 mm, seguindo determinação normativa para ligações consideradas rígidas.

Primeiramente foram posicionadas e unidas às peças de madeira com um dispositivo metálico conhecido como sargento, e após a realização de cada furo foi montado o conjunto parafuso, porca e arruelas mantendo o sargento solidarizando o conjunto. Dessa forma, evitando o deslizamento entre as peças para a furação seguinte e deixando-as melhor alinhadas. Conforme Figura 6 a seguir.



Figura 6 – Diferentes momentos da furação.

O aperto dos parafusos foi realizado com chave estrela para cabeças sextavadas 14 milímetros de forma manual, não havendo controle de torque do aperto dos parafusos. E para assegurar que não afrouxe os parafusos foi utilizado uma contra-porca de segurança, ou seja, uma segunda porca.

5.3 MODELO DE LIGAÇÃO PREGADA

Com o objetivo estético de não atravessar todo o conjunto, e dessa forma, não aparecer às pontas dos pregos no lado oposto, foi escolhida a dimensão do prego do modelo padrão comercial 20 x 42. Estes pinos metálicos no formato de pregos são constituídos de aço-carbono, de diâmetro de 4,4 milímetros (\varnothing 4,4 mm) e comprimento total de 97 mm. No entanto, sua resistência característica ao escoamento não é fornecida pelo fabricante.

Os pinos foram distribuídos em um espaço delimitado de 5 x 6 cm, que é semelhante à ligação parafusada, diferenciando nos pinos colocados nos espaços internos a região e na forma como foram introduzidos. Foram pregados 5 unidades de um lado e 4 unidades no lado oposto. Dessa forma, ficam melhor distribuídos os esforços nas duas linhas de corte. A Figura 7 está demonstrado o posicionamento dos pregos no corpo-de-prova.

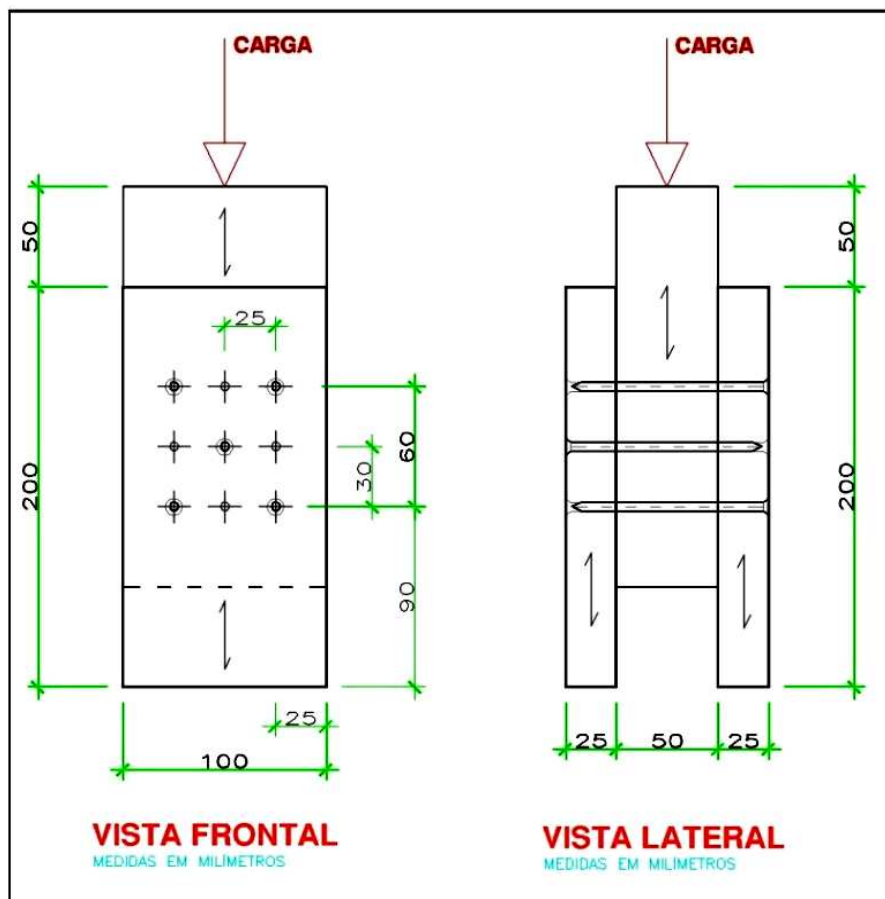


Figura 7 - Forma do modelo de ligação pregada.

A Figura 8 está mostrando dois corpos-de-prova iguais e acabados, posicionados mostrando as faces opostas do modelo de ligação, e a disposição dos pregos.



Figura 8 – Forma aparente de faces opostas na ligação pregada

Para a pré-furação foi utilizado o mesmo ferramental do modelo parafusado, diferenciando somente pela broca do tipo aço-rápido de diâmetro menor correspondente à 3,5 mm. Com isso, se obteve um fator correspondendo a 0,795 do diâmetro do prego, atendendo à exigência normativa para este tipo de madeira. A profundidade de furação ou alcance da broca foi de aproximadamente 92 milímetros, com margem de erro de 1,5 milímetros a mais ou a menos.

Na Figura 9 se pode observar alcance do prego e de pré-furação em relação ao conjunto modelo de ligação pregada proposto.



Figura 9 – Demonstração do alcance da pré-furação e do prego

Para a montagem dos corpos-de-prova foi usado o sargento para manter as peças em posição para executar a pré-furação. A cravação dos pinos deu-se com o uso de um martelo, observando-se o comportamento das peças quanto a possíveis fendilhamentos e outros defeitos que pudessem comprometer os resultados do ensaio. A Figura 10 demonstra o momento da cravação do prego.



Figura 10 – cravação do prego após pré-furação

5.4 MODELO DE LIGAÇÃO MISTA

Para a ligação mista foi especificada uma configuração com um parafuso central e seis pregos na linha superior e inferior, com os pinos metálicos iguais aos utilizados nos modelos de ligação parafusada e pregada, diferenciando somente a arruela que neste caso se utilizou de 40 mm de diâmetro para minimizar a concentração de esforços pelo parafuso na madeira. A configuração da ligação está ilustrada nas imagens das Figuras 11 e 12 a seguir.

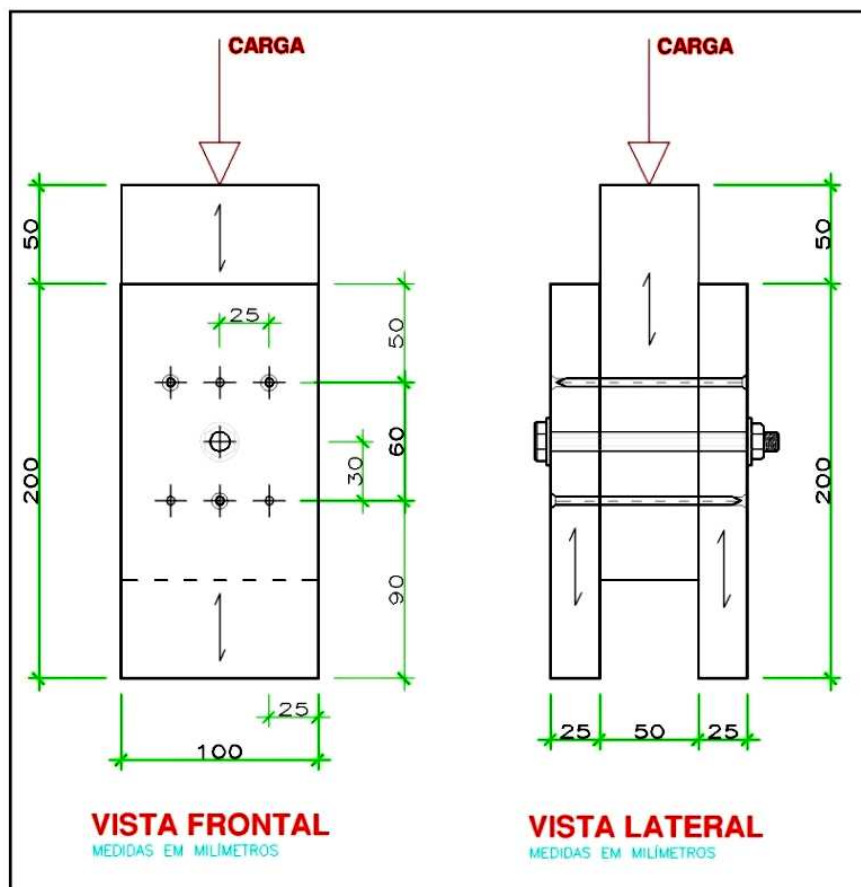


Figura 11 – Modelo de Ligação Mista



Figura 12 – Forma aparente de faces opostas na ligação Mista.

5.5 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, com a máquina universal de ensaios EMIC modelo DL-30000, com capacidade máxima de 300 kN, com leituras automáticas de deslocamentos, efetuando-se os carregamento monotônico crescente sem ciclos para a obtenção dos gráficos da força aplicada e correspondente deformação.

Para a caracterização da madeira utilizada foi realizado ensaio de umidade conforme determinação da NBR 7190/97. Para isso, foram extraídas seis amostras da madeira utilizadas na confecção dos corpos-de-prova em diferentes pontos das peças de maneira aleatoriamente. As amostras tem dimensão aproximada de 2 x 3 x 5 cm. Como é mostrado na Figura 12.

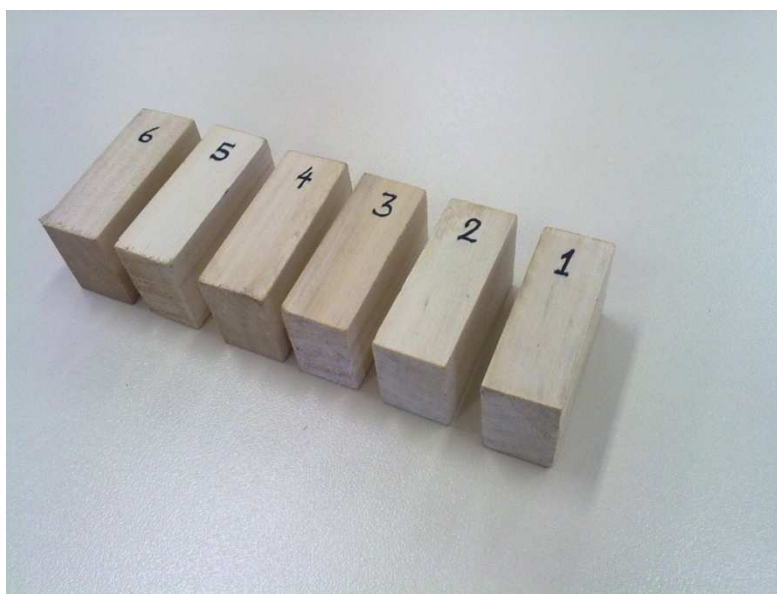


Figura 12 – Amostras de madeira para ensaio de umidade

As amostras do ensaio de umidade foram inicialmente pesadas em balança de precisão de 0,01 gramas do Laboratório de Solos da UTFPR, campus Toledo, e em seguida colocadas na estufa em temperatura constante de 103° Celsius por 24 horas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No texto da NBR 7190/97, não se apresentam indicativos referentes ao coeficiente de modificação e de minoração das resistências, para a determinação do valor de cálculo das ligações obtido com base nos resultados experimentais. Foi considerado que devem ser utilizadas as mesmas premissas do caso da compressão paralela às fibras. Assim, a comparação entre os valores experimentais e teóricos da resistência das ligações foi feita diretamente, sem a aplicação dos coeficientes de modificação e minoração.

A resistência total de cada pino metálico em uma determinada ligação é dada pela soma das resistências correspondentes às diferentes seções de corte, em cada elemento de ligação.

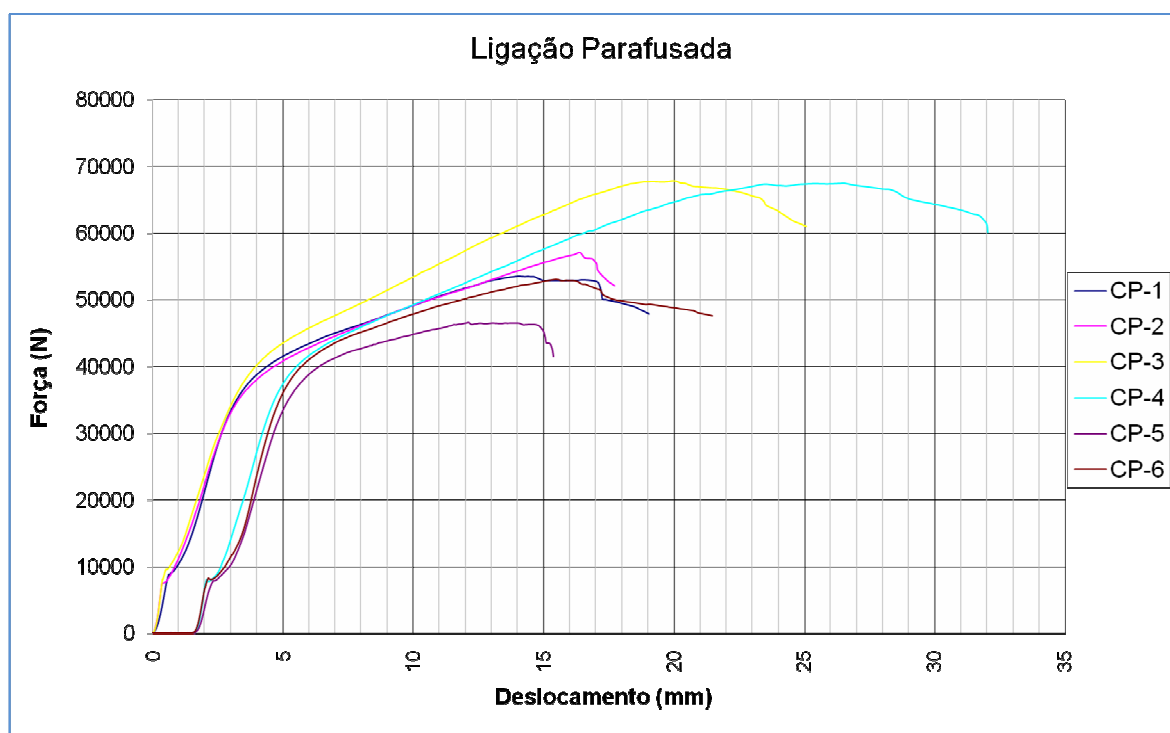


Gráfico 1 – Resultado do ensaio para a forma de Ligação Parafusada

No Gráfico 1 apresentado, observa-se que três amostras tiveram um deslocamento de aproximadamente dois milímetros (2 mm), que pode ser atribuído a metodologia de ensaio utilizada, especificamente ao posicionamento do prato superior da célula de carga da máquina de ensaio. No entanto, essa deformação inicial deve ser desconsiderada, pois não interfere na curva obtida da amostra.

Simplificando, o efeito descrito é devido a uma folga entre o corpo-de-prova e a máquina no início do ensaio e pela acomodação das peças do equipamento.

Para a ligação parafusada, conforme demonstrado no gráfico, observa-se semelhança das curvas para o trecho de deformação elástica, e após iniciar a deformação plástica começam a se dispersar. Duas amostras, CP-3 e CP-4 apresentam uma deformação e resistência superiores aos demais.

O Gráfico da ligação pregada é apresentado no Gráfico 2, nele nota-se que apenas duas amostras tiveram deformação inicial devido ao equipamento de ensaio. Observa-se também que as curvas possuem respostas semelhantes de resistência, demonstrando boa homogeneidade, agregando confiabilidade aos resultados obtidos.

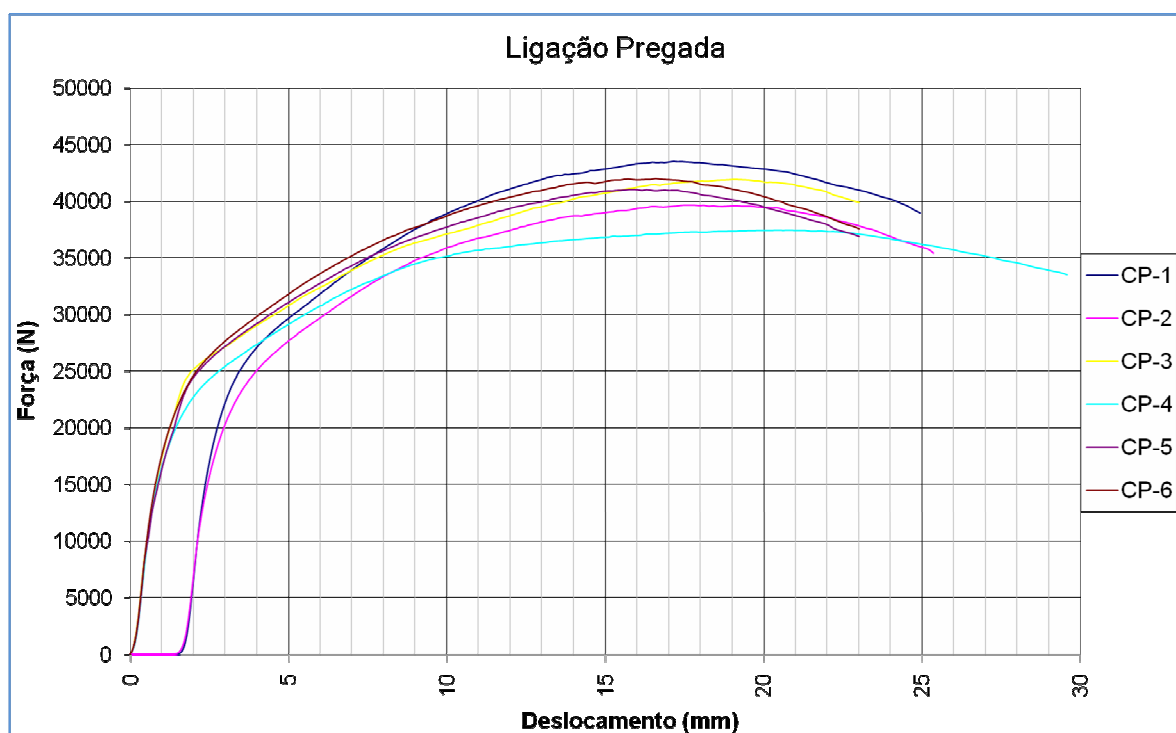


Gráfico 2 – Resultado do ensaio para a forma de Ligação Pregada

Os ensaios para o modelo de ligação mista gerou o Gráfico 3 apresentado abaixo, nele apenas uma amostra teve o problema de deslocamento inicial devido ao mal posicionamento da amostra com o equipamento. Nota-se que no início do carregamento o comportamento dos corpos-de-prova é semelhante, e com o início da deformação plástica pouco definida, ocorrendo uma discrepância das curvas das amostras nesse estágio, semelhante ao ocorrido para a ligação parafusada.

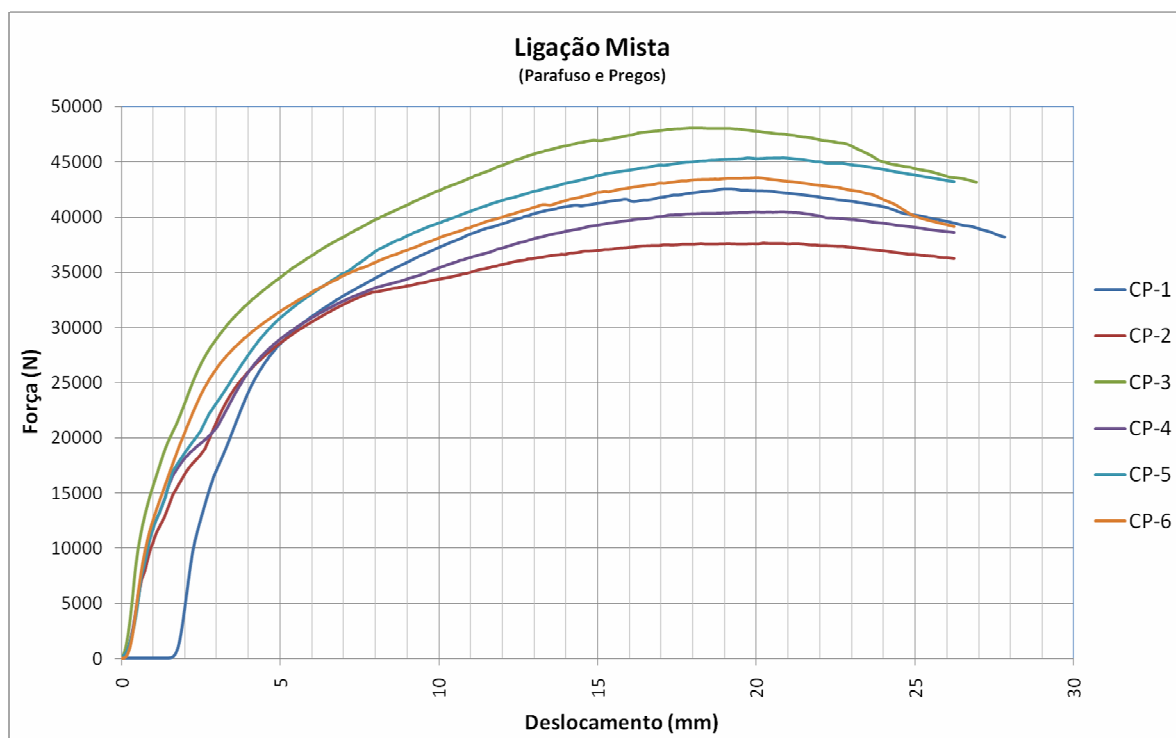


Gráfico 3 – Resultado do ensaio para a forma de Ligação Mista.

Na análise dos corpos-de-prova após os ensaios, foi observado quanto à forma de ruptura conforme demonstrados nos quadros a seguir. As colunas estão divididas pelos efeitos na madeira, nos pinos metálicos e como ficou a união entre as peças de madeira após a ruptura.

Formas de ruptura – Ligação Parafusada			
	<i>Efeitos nas peças de madeira</i>	<i>Efeitos no pino</i>	<i>União</i>
CP-1	Trinca na peça principal e uma das cobrejuntas	Empenamento baixo	Peças unidas
CP-2	Trinca na peça principal e fissura em uma das cobrejuntas	Empenamento acentuado	Peças unidas
CP-3	Rachadura na peça principal e trinca nas cobrejuntas	Empenamento acentuado	Peças unidas
CP-4	Rachadura nas cobrejuntas com embutimento acentuado	Empenamento acentuado	Peças unidas
CP-5	Rachadura na peça principal	Empenamento baixo	Peças unidas
CP-6	Rachadura na peça principal e uma das cobrejuntas	Empenamento intermediário	Peças unidas

Quadro 1 – Descrição simplificada das formas de ruptura para ligações parafusadas

Para a ligação parafusada, apresentada pelo Quadro 1, predominou a rachadura ou trinca nas peças de madeira, os parafusos entortou em apenas um

ponto, e as cobrejuntas se mantiveram bastante unidas em relação a peça central, ou seja, não ocorreu afastamento das peças de madeira, apenas o deslizamento no sentido do carregamento. Através de análise visual, notou-se influência das arruelas na rigidez do conjunto, pois, em todas as amostras ocorreu deformação desse elemento. A Figura 13 demonstra como ocorreu a deformação dos pinos.



Figura 13 – Estados dos parafusos após ensaio.

Formas de ruptura – Ligação Pregada			
	<i>Efeitos nas peças de madeira</i>	<i>Efeitos no pino</i>	<i>União</i>
CP-1	Rachadura em uma das cobrejuntas	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas
CP-2	Trinca em uma das cobrejuntas	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas
CP-3	Sem fissura aparente	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas
CP-4	Trinca na face interna em uma das cobrejuntas	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas
CP-5	Sem fissura aparente	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas
CP-6	Sem fissura aparente	Empeno com afundamento da cabeça do prego	Peças afastadas

Quadro 2 – Descrição simplificada das formas de ruptura para ligações pregadas

No modelo de ligação pregada, conforme apresenta o Quadro 2, o ponto em comum para todos os corpos-de-prova foi o afundamento da cabeça dos

pregos, demonstrando para este caso, que a rigidez do conjunto é menor do que os parafusos. Os pinos metálicos apresentaram entortaram em dois pontos ao longo dos pregos, na região onde ocorreu o esforço de cisalhamento entre as peças de madeira.

Formas de ruptura – Ligação Mista			
	<i>Efeitos nas peças de madeira</i>	<i>Efeitos nos pinos</i>	<i>União</i>
CP-1	Trinca nas cobrejuntas	Empeno acentuado do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais empenadas
CP-2	Trinca na face interna em uma das cobrejuntas	Empeno baixo do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais empenadas
CP-3	Trinca na peça principal e nas cobrejuntas	Empeno acentuado do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais empenadas
CP-4	Sem fissuração aparente	Empeno intermediário do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais empenadas
CP-5	Rachadura das peças na direção do parafuso	Empeno intermediária do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais nas empenadas
CP-6	Rachadura na peça principal e trinca na face interna das cobrejuntas	Empeno acentuado do parafuso com afundamento das cabeças dos pregos	Peças laterais nas empenadas

Quadro 3 – Descrição simplificada das formas de ruptura para ligação Mista

A forma de ruptura do modelo de ligação mista, descritos no Quadro 3, apresentou uma tendência de trinca na direção do parafuso e um empenamento das cobrejuntas, demonstrando que no parafuso pode ter ocorrido uma concentração dos esforços. No entanto, como existe um parafuso e dois pregos na mesma direção das fibras da madeira, não é possível afirmar que houve concentração de esforços no parafuso para essa geometria ou formato de ligação.

As Figuras 14 e 15 demonstram a forma de ruptura na peça de madeira principal.

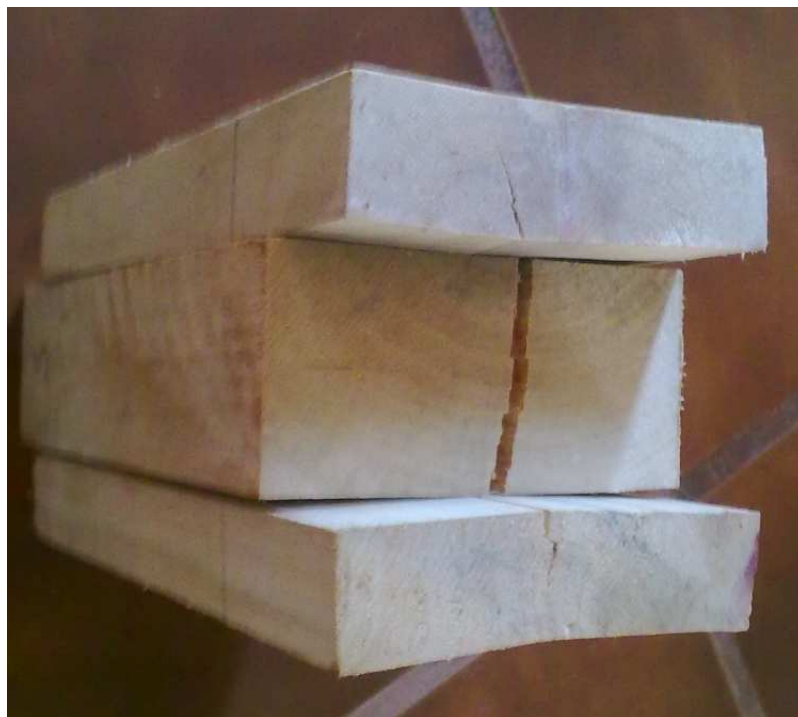


Figura 14 – Rachadura na direção de parafuso e empenamento nas cobrejuntas



Figura 15 – Amostras de ligação mista após ensaio.

O parafuso da ligação mista entortou semelhante ao resultante na ligação parafusada, com apenas um trecho de deformação ao longo de seu comprimento, enquanto que os pregos deformaram em dois pontos localizados no plano de cisalhamento entres as peças de madeira. A Figura 16 apresenta como ficaram os pinos metálicos após o ensaio.



Figura 16 – Pinos metálicos da ligação mista após ensaio.

Pelo ensaio de umidade foi obtida uma taxa de umidade média de aproximadamente 11%, ficando próximo da umidade ideal que é de 12%. Como a umidade está bastante próxima da ideal optou-se por deixar de realizar as correções de umidade devido a esta variação.

Pelo método de cálculo da NBR-7190/97, a resistência de cálculo esperada considerando carregamento instantâneo ($k_{mod,1} = 1,1$), classe de umidade 2 ($k_{mod,2} = 1,0$), madeira de segunda categoria ($k_{mod,3} = 0,8$), se obtêm o coeficiente de modificação $k_{mod} = 0,88$. Conforme equação 2:

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

Como o módulo de elasticidade do prego não é fornecido pelo fabricante, para a verificação do β_{lim} adotou-se o valor mínimo exigido que corresponde à 600 MPa.

Com valores médios de resistência a compressão paralela às fibras da madeira ($f_{c0,m}$) de 40,9 MPa ($f_{c0,k} = 0,7 \times f_{c0,m}$) conforme Tabela E.3 da NBR-7190/97. E assim, aplicando a equação 3 é obtido o valor de resistência de projeto ($f_{c0,d}$). No Quadro 4 está indicado as respectivas resistências e a forma de ruptura esperada para cada modelo de ligação.

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_w} \quad (3)$$

Os parâmetros geométricos utilizados no cálculo das ligações são: a espessura convencional (t), considerada a menor entre as espessuras das peças de madeira a serem ligadas e a relação β entre a espessura convencional e o diâmetro efetivo do pino metálico, conforme equação 4:

$$\beta = t / d_{\text{ef}} \quad (4)$$

O valor de cálculo da resistência de um pino para uma seção de corte ($R_{\text{vd},1}$) é dado pela expressão:

$$R_{\text{vd},1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{e,d} \quad (5)$$

Destaca-se que $f_{e,d}$ (resistência ao embutimento) deverá ser tomado em função da posição do esforço atuante em relação às fibras: paralelo, normal ou inclinado.

A resistência ao embutimento da madeira pode ser considerada como a resistência a compressão da madeira no sentido paralelo às fibras, a equação 6 está conforme prescrição da NBR-7190/97.

$$f_{e0,d} = f_{c0,d} \quad (6)$$

Tipo de Ligação	Resistência de cálculo ($f_{c0,d}$)	Forma de ruptura
Parafusada	14,40 kN	Embutimento da madeira
Pregada	14,25 kN	Embutimento da madeira
Mista	12,84 kN	Embutimento da madeira

Quadro 4 – Resistência e forma esperada de ruptura segundo método de cálculo da NBR 7190/97.

Utilizando a metodologia dos ensaios de resistência da NBR 7190/97, foi determinada a inclinação de reta secante à curva força x deslocamento, definidas pelos pontos ($F_{10\%}$, $\epsilon_{10\%}$) e ($F_{50\%}$, $\epsilon_{50\%}$) correspondentes a 10% e 50% da resistência convencional da ligação ($R_{2\%}$). Para uma deformação específica residual 2%.

Na coluna da resistência de cálculo experimental no Quadro 5 estão os valores para o dimensionamento baseado na média de $R_{2\%}$. Os valores foram obtidos pela análise experimental dos corpos-de-prova ensaiados, aplicando as mesmas considerações atribuídas para a resistência de cálculo ($f_{c0,d}$) do Quadro 4 anterior.

Ligação	Amostra	Força última Newton (N)	Resistência $R_{2\%}$	Média $R_{2\%}$ Newton (N)	Resistência cálculo experimental
Parafusada	CP-1	53006	34159	36110,2	22697,8
	CP-2	57179	32500		
	CP-3	67937	35519		
	CP-4	67577	36571		
	CP-5	46628	38260		
	CP-6	53068	39652		
Pregada	CP-1	43567	22361	21093,2	13258,6
	CP-2	39682	20588		
	CP-3	41949	21588		
	CP-4	37498	19372		
	CP-5	41074	21155		
	CP-6	42001	21495		
Mista	CP-1	42588	22340	22219,8	13976,8
	CP-2	37601	19537		
	CP-3	48101	25071		
	CP-4	40486	20568		
	CP-5	45412	23061		
	CP-6	43598	22742		

Quadro 5 – Resultados numéricos dos ensaios.

Quando comparados os valores de resistência experimental com a de cálculo, pode-se notar que a ligação pregada se apresentou um pouco inferior ao estimado com base na NBR-7190/97. Enquanto isso, a ligação parafusada demonstrou uma eficiência satisfatória, demonstrando com base neste experimento que as ligações parafusadas são penalizadas pela metodologia de cálculo normativo por atribuir uma resistência significativamente inferior a resistência encontrada através deste experimento.

A ligação mista segundo estimativa de cálculo inicial apresentava a menor resposta mecânica dentre as três opções. No entanto, ela superou a ligação pregada, demonstrando que a aplicação do parafuso gerou incremento de resistência. No Quadro 6 apresentado abaixo segue o comparativo direto entre a resistência esperada por cálculo normativo e a resistência obtida pelo experimento.

	Resistência de cálculo	Resistência experimental
Parafusada	14,40 kN	22,70 kN
Pregada	14,25 kN	13,26 kN
Mista	12,84 kN	13,98 kN

Quadro 6 – Comparativo entre resistência de cálculo e experimental.

7 CONCLUSÃO

As ligações de estruturas de madeira por pinos metálicos apresentam grande deformação antes da ruptura, dessa forma, permite observação do seu comportamento frente às solicitações de carregamento na estrutura. Simplificando, pode ser dito que avisam quando irão romper.

A ligação parafusada apresenta resistência, rigidez e segurança significativamente superior aos outros modelos. Embora a ligação mista apresente a menor resistência de cálculo dos três modelos de ligação, segundo metodologia normativa, obteve um acréscimo bastante significativo em relação a ligação pregada, deixando evidente que a metodologia de cálculo pode ser revisada e atribuir considerações diferenciadas entre pregos e parafusos.

O modelo de ligação pregada, considerando o custo dos pinos se torna bastante atrativa comercialmente, tendo em vista que o custo do modelo com pregos é aproximadamente apenas 15% do custo do modelo com parafusos. Contudo, é recomendado efetuar uma análise experimental para aferir o dimensionamento com a configuração ou formato de ligação desejado.

No formato de ligação mista, o experimento apontou uma tendência de concentração de tensões nos pinos mais resistentes e/ou de maior diâmetro, e que existe incremento de resistência em relação à ligação formada somente por pregos. No entanto, deve-se estudar melhor a distribuição das tensões do conjunto quando diferentes diâmetros de pinos são associados, pois existe uma distribuição diferenciada de tensões dentro da peça de madeira que demandam análises mais aprofundada sobre o fenômeno. Dessa forma, podemos melhorar a eficiência das ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6627 - *Prego comum e arestas de aço para madeiras*. Rio de Janeiro: ABNT. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190/97 - *Projeto de Estruturas de Madeira*. Rio de Janeiro: ABNT. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800:1986 – *Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*. Rio de Janeiro: ABNT. 1986.

JOHANSEN, K. W. Theory of timber connections. *International association for Bridge and Structural Engineering*. Zurich: 1949. v.9. p.249-262.

MATTOS, P.P.de. et. al. Caracterização Física, Química e Anatômica da Madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. *Comunicado técnico – Embrapa*. Colombo, PR. Dezembro, 2006.

MIOTTO, J.L. Estruturas de Madeira: *Conceitos e aplicações*, 3ª edição. Maringá. Fevereiro, 2011.

OLIVEIRA, M. A. M & DIAS, A. A. Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira: *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 7, n. 26, p. 33-64, 2005.

SZÜCS, C.A. et. al. Estruturas de Madeira: *apostila de aula*, versão 2. Florianópolis. Setembro, 2008