

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TAÍS OLIVEIRA GONÇALVES FREITAS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES
PREGADAS E PARAFUSADAS EM MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

TAÍS OLIVEIRA GONÇALVES FREITAS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES
PREGADAS E PARAFUSADAS EM MADEIRA**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito final para obtenção do título bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Goés

CAMPO MOURÃO
2017



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES PREGADAS E PARAFUSADAS EM MADEIRA

por

Taís Oliveira Gonçalves Freitas

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10h do dia 21 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de
Oliveira**
(UTFPR)

**Prof. Me. Adalberto Luiz Rodrigues de
Oliveira**
(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
(UTFPR)
Orientador

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

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

Aos meus pais, José Mauro e Adriana.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu gostaria de agradecer a Deus por tudo que ele proporciona em minha vida, pela minha saúde, por sempre me guiar da melhor forma, obrigada Senhor. Peço que a partir de agora eu seja instrumento da sua bondade em minha profissão também.

A minha família, em especial aos meus pais José Mauro e Adriana, que não mediram esforços para me proporcionar o melhor durante toda a minha vida, por serem meu apoio, por serem meus amigos, por acreditarem na minha capacidade, por me incentivarem. Todos os dias da minha vida eu agradeço a Deus pela vida de vocês. Agradeço também aos meus irmãos, Diego e Camila, que mesmo longe sempre estiveram por perto no coração. Agradeço aos meus avós já falecidos, Adalberto e Berenice, em especial ao meu avô Manoel que tanta falta me faz, por todos os ensinamentos, eu os levarei para sempre comigo. Agradeço a minha Avó Orolina por ser essa avó tão especial. Agradeço também aos meus sobrinhos, Miguel e Betina, por me ensinarem que não há limites para o Amor.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Jorge Góes, por ter me dado a oportunidade de trabalharmos juntos, por todos os ensinamentos, por toda a paciência que teve comigo, pela segurança que me passou em cada encontro para discussão do tema, sempre o admirei muito.

A Gabriella e Tayla, por sempre estarem ao meu lado, por serem minha família em Campo, por terem transformado um apartamento em um Lar, tão longe de nossos Lares. Obrigada por tudo meninas.

Aos amigos, Alexandre, Vanessa, José Filho e Léo, que desde o começo sempre estiveram ao meu lado independente das circunstâncias, em todos os momentos. Aos meus amigos do Grupo de Estudo, pela amizade, por confiarem no meu trabalho, por me ajudarem com as disciplinas, por tudo que fizeram por mim. Agradeço também aos meus amigos de Iturama, que mesmo longe me deram muita força para prosseguir. Aos meus amigos da Turma XI, e aos amigos que fiz durante o período de faculdade.

Ao Murilo, que sempre esteve ao meu lado, me ajudando em todos os momentos, bons ou ruins, sendo minha família em Campo.

A Pórticos Empresa Júnior e a todos os membros, por todos os ensinamentos.

RESUMO

FREITAS, Taís O. G. **Avaliação experimental da rigidez de ligações pregadas e parafusadas em madeira.** 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

As ligações têm a função de transmitir os esforços solicitantes entre os elementos unidos, tornando-se assim, relevantes para o projeto e dimensionamento de estruturas de madeira. A rigidez das ligações influencia diretamente no comportamento mecânico global das estruturas de madeira, incluindo-se os deslocamentos e os esforços internos. Existem vários fatores que influenciam na rigidez das ligações, como o tipo, o espaçamento, a quantidade dos elementos de ligação e as características físicas dos materiais utilizados. No Brasil as ligações mais utilizadas são as com pinos metálicos, como as ligações pregadas e parafusadas. A atual norma brasileira de estruturas de madeira ABNT-NBR 7190 não apresenta modelo para o cálculo da rigidez de ligações, entretanto, outros documentos normativos apresentam metodologias para sua determinação. Com o objetivo de avaliar a adequação dos modelos apresentados em normas como por exemplo CEN EUROCODE 5 (2004), foram realizados ensaios experimentais em corpos de prova de ligação em duas espécies nativas brasileiras, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), a primeira de média-alta densidade e a segunda de baixa densidade. Foram estudados dois tipos de conectores: parafusos passantes com porca e arruelas e pregos lisos com cabeça. Os resultados atingidos foram satisfatórios para as ligações do tipo pregadas. Já para as ligações parafusadas devem ser realizados mais estudos sobre a sua rigidez.

Palavras-chave: Rigidez; Ligações em madeira; Pinos metálicos; Normatização.

ABSTRACT

FREITAS, Taís O. G. **TIMBER SLIP MODULI EXPERIMENTAL EVALUATION OF NAILED AND BOLTED CONNECTIONS**. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

The connections are used to transfer all project loads between the elements, becoming relevant for timber structural design. The slip moduli connection has a direct influence in the mechanical behavior of timber structures as displacements and internal stress. There are several factors that make an influence on slip moduli connection such as type, spacing, number of connection and the physical characteristics of used materials. The most used connection in Brazil between wooden elements are the metallic dowel, bolted and nailed connections. The current Brazilian timber structures standard ABNT 7190 (1997) does not present a design model for the slip moduli connection, however, there are international standards that present a design methodology for slip moduli connections. This paper presents a methodology in order to evaluate the different models present through the CEN EUROCODE 5 (2004) standard, experimental analysis were realized in sample parts of Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) and Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), Brazilian native wooden. The first one is characterized for medium-high density and the second as low-density. Two types of connectors were studied: bolts with nut and washers, and straight nails with head. The results show that the tests were satisfactory for nailed connections. For bolted connections, more studies of stiffness should be made.

Keywords: Slip Modulus; Timber connections; Metallic bolts; Standard.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Formas de transmissão de esforços	18
Figura 2 Típica Curva força-deslocamento	19
Figura 3 Modos de falha assumidos pelo Yield Model no EUROCODE 5.....	20
Figura 4 Módulo de Deslizamento secante.	21
Figura 5(a) Convenção de eixos; Figura 5(b) Geometria deformada da ligação.....	26
Figura 6 Pregos lisos 20 x 30.....	31
Figura 7 Parafuso sextavado de rosca parcial com diâmetro de 12mm.....	31
Figura 8 Arruela lisa com diâmetro interno de 13,5mm e externo de 44,0mm.	32
Figura 9 Máquina Universal de Ensaios DL 30000	33
Figura 10 Dimensões do corpo de prova de embutimento.....	35
Figura 11 Dimensões do corpo de prova de embutimento.....	36
Figura 12 Procedimento de carga para o ensaio de embutimento.....	37
Figura 13 Corpos de prova após o ensaio de resistência ao embutimento para madeira Garapeira (Pregos).....	38
Figura 14 Pregos rompidos após o ensaio.....	39
Figura 15 Parafuso rompido após a realização do ensaio	39
Figura 16 Dimensões e distribuição dos pregos do corpo de prova de Garapeira e pregos lisos.	41
Figura 17 Dimensões e distribuição dos parafusos passantes com porcas e arruelas dos corpos de prova de Garapeira e Caixeta.....	42
Figura 18 Procedimento de carga	43
Figura 19 Procedimento de carga do ensaio de obtenção da rigidez de ligações	44
Figura 20 Diagrama idealizado força-deslocamento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Valores de Kser em (N/mm)	24
Tabela 2 -Dimensões mínimas dos corpos de prova de embutimento	36
Tabela 3 -Tipos de corpos de prova	40
Tabela 4 -Resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais - ligação pregada	46
Tabela 5 - Resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais - ligação parafusada	47
Tabela 6 - Resultados da rigidez de ligação de corpos de prova de Garapeira com ligação do tipo pregada	48
Tabela 7 - Resultados da rigidez de ligação de corpos de prova de Garapeira com ligação do tipo parafusada	49
Tabela 8 - Resultados da rigidez de ligação de corpos de prova de Caixeta com ligação do tipo parafusada	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Kser (Garapeira – Ligação pregada).....	48
Gráfico 2 - Kser (Garapeira – Ligação parafusada).....	49
Gráfico 3 - Kser (Caixeta – Ligação parafusada)	51
Gráfico 4 – Comparativo do Kser entre espécies e tipos de ligação	52
Gráfico 5 – Curva do corpo de prova 4 – Garapeira com ligação do tipo pregada....	52
Gráfico 6 - Curva do corpo de prova 3 – Garapeira com ligação do tipo parafusada	53
Gráfico 7 - Curva do corpo de prova 5 – Caixeta com ligação do tipo parafusada....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

f_e	Resistência da madeira ao embutimento do pino
f_y	Resistência do pino à flexão
K_u	Módulo de deslizamento para dimensionamento nos Estados Limites Últimos
K_{ser}	Módulo de deslizamento para dimensionamento nos Estados Limites de Utilização
R	Capacidade máxima da ligação
β	Relação entre a resistência ao embutimento das peças 1 e 2 ligadas
d	Diâmetro
M_y	Momento de escoamento
u_{inst}	Deslocamento instantâneo em aproximadamente 40% da carga máxima
$K_{ser,inst}$	Módulo de deslizamento instantâneo
ρ_k	Densidade
k	Módulo de deformação da fundação
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia
v	Deslocamento
Δ	Deslocamento
\sinh	Seno hiperbólico
\cosh	Cosseno hiperbólico
t	Largura
K	Módulo de deslizamento
z_f	Profundidade da fundação
$E_{w,\alpha}$	Módulo de elasticidade da madeira sob compressão
U	Teor de umidade
m_i	Massa inicial da madeira
m_s	Massa seca da madeira
ρ_{ap}	Densidade aparente
A	Dimensão da largura do corpo de prova
B	Dimensão da altura do corpo de prova

C	Dimensão do comprimento do corpo de prova em relação às fibras da madeira
F_{est}	Força estimada
$F_{e,max}$	Força máxima de ensaio
$f_{u,m}$	Resistência última à tração do aço
$v_{i,mod}$	Deslizamento inicial modificado
v_{04}	Deslizamento inicial em 40% da força estimada
v_{01}	Deslizamento inicial em 10% da força estimada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVAS.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO	16
4.1	LIGAÇÕES EM MADEIRA	16
4.1.1	Ligações parafusadas.....	16
4.1.2	Ligações pregadas.....	17
4.2	TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS ENTRE ELEMENTOS UNIDOS	17
4.3	RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES	18
4.3.1	Modelo de escoamento - Yield Model.....	19
4.3.2	Comportamento não linear da ligação	25
4.3.3	Modelo de viga sob fundação elástica – Teoria de Kuenzi	25
5	METODOLOGIA.....	30
5.1	MATERIAIS	30
5.1.1	Ligações pregadas	30
5.1.2	Ligações parafusadas.....	31
5.1.3	Ensaio de caracterização.....	32
5.2	PROCEDIMENTOS.....	33
5.2.1	Ensaio de caracterização dos materiais.....	33
5.2.2	Preparação dos corpos de prova do ensaio de obtenção da rigidez das ligações.....	40
5.2.3	Ensaio de rigidez das ligações	42
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	46
6.2	ENSAIOS DE RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES	47
7	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

As ligações são fundamentais para a viabilização da madeira como elemento estrutural, elas permitem por exemplo a confecção de treliças, elemento estrutural muito comum em madeira. As peças para confecção desses elementos estruturais possuem comprimento limitado devido ao seu transporte e ao tamanho das árvores. Além de unir peças, elas possuem a função de transmitir os esforços solicitantes entre os elementos unidos.

Essas conexões podem ser executadas com encaixes, sambladuras, pinos metálicos, cavilhas, conectores ou até podem ser coladas. No entanto, as ligações mais utilizadas no Brasil são as executadas com pinos metálicos, sendo esses, pregos ou parafusos. Isso ocorre devido a facilidade de execução e o baixo custo desse tipo de ligação.

O dimensionamento correto das ligações é importante para o projeto e dimensionamento das estruturas de madeira. Se este é feito com imperícia, o comportamento mecânico global da estrutura é comprometido. Segundo Branco (2011), torna-se necessário determinar a rigidez, pois o conhecimento desta permite ao projetista um ajuste mais adequado do sistema estrutural utilizado na construção.

A norma brasileira de estruturas de madeira, ABNT NBR 7190 (1997), não apresenta um método para determinação da rigidez das ligações. Em contrapartida outros documentos normativos, como por exemplo a norma Europeia, CEN EUROCODE 5 (2004), apresentam por meio de equação empírica a determinação da rigidez da ligação.

Atualmente a norma brasileira se encontra em processo de revisão e considerando a importância do tema para a área, faz-se necessário um estudo experimental da rigidez de ligações pregadas e parafusadas, executadas em ligações de elementos confeccionados com madeira nativa brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente a rigidez de ligações pregadas e parafusadas para estruturas de madeira, submetidas a esforços normais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente a rigidez de ligações pregadas em madeiras nativas de alta densidade;
- Determinar experimentalmente a rigidez de ligações parafusadas em madeiras nativas de baixa e alta densidade;
- Realizar os ensaios padronizados para a caracterização das duas espécies estudadas;
- Comparar os resultados experimentais com os de modelos teóricos obtidos da bibliografia nacional e internacional.

3 JUSTIFICATIVAS

As ligações têm a função de transmitir os esforços solicitantes entre os elementos unidos, tornando-se assim, relevantes para o projeto e dimensionamento de estruturas de madeira. De acordo com Goés (2015), na maioria das vezes os casos de colapso em estruturas de madeira iniciam-se nas ligações, por consequência de problemas de projeto, execução e patologias, comprometendo assim a segurança e a durabilidade da construção. Com isso, Branco (2011), afirma que todo o trabalho dedicado ao dimensionamento dos elementos estruturais pode revelar-se inconsequente caso as ligações estejam mal dimensionadas.

Para o correto dimensionamento torna-se necessário a determinação da rigidez dessas ligações. O conhecimento desta permite ao projetista um ajuste mais adequado do sistema estrutural utilizado na construção (Branco, 2011).

A atual norma brasileira de estruturas de madeira ABNT NBR 7190 (1997) não apresenta um modelo para o cálculo da rigidez de ligações, ao contrário de outros documentos normativos, como o CEN EUROCODE 5 (2004), que já apresenta metodologia para sua determinação.

Diante do exposto, fica evidente a necessidade de se realizar mais estudos sobre o assunto, para assim determinar uma metodologia adequada aos parâmetros brasileiros.

Desta forma, o presente trabalho visa a comparação da rigidez das ligações obtidas experimentalmente, em corpos de prova de duas espécies de madeira nativa brasileira, com os valores encontrados pela metodologia indicada pelo CEN EUROCODE 5 (2004).

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 LIGAÇÕES EM MADEIRA

Ligações em estruturas de madeira são necessárias devido ao tamanho limitado das peças. Peças de madeira bruta têm seu comprimento limitado pelo tamanho das árvores e pela forma com que a peça será transportada, já as peças de madeira serrada possuem tamanho ainda mais limitado, geralmente entre 4 e 5 metros (PFEIL; PFEIL, 2003).

Para viabilizar o uso da madeira em estruturas, torna-se necessário efetuar ligações compatíveis as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança. As ligações são feitas por dispositivos que permitem uma transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura (GÓES, 2015).

Ainda segundo Góes (2015), as dimensões das peças de uma estrutura de madeira são geralmente determinadas pela quantidade e características físicas do conector.

De acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997) Projeto de estruturas de madeira, as ligações mecânicas das peças de madeira podem ser feitas por pinos metálicos (pregos e parafusos), cavilhas (pinos de madeira torneados), conectores (anéis metálicos e chapas metálicas com dentes estampados) ou outros tipos que comprovadamente devem ser testados em laboratórios idôneos.

Neste trabalho o estudo ficará restrito às ligações feitas por pinos metálicos, dos tipos pregos lisos redondos com cabeça e os parafusos sextavados passantes.

4.1.1 Ligações parafusadas

De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), existem os parafusos rosqueados auto-atarraxantes e os parafusos passantes com porcas e arruelas. Os parafusos rosqueados auto-atarraxantes normalmente são empregados na marcenaria. Já os parafusos passantes com porcas e arruelas são utilizados nas ligações estruturais.

Estes são cilíndricos e lisos, tendo em uma extremidade uma cabeça e na outra uma rosca e porca. Eles são instalados em furos com folga máxima de 1 a 2 milímetros, depois apertados com a porca.

4.1.2 Ligações pregadas

São aquelas que utilizam os pregos como conector. Essas ligações são feitas com peças metálicas cravadas na madeira por meio de impacto. Para que sejam executadas ligações pregadas deve-se obrigatoriamente realizar a pré-furação da madeira. Só podem ser executadas ligações sem pré-furação em estruturas provisórias (GÓES, 2015).

4.2 TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS ENTRE ELEMENTOS UNIDOS

A transmissão dos esforços em ligações unidas por pinos metálicos é classificada como transmissão por justaposição.

Segundo Le Govic¹ (1995 apud SZÜCS et al, 2015), os esforços podem ser transmitidos de três maneiras:

Transmissão direta ou por contato direto (Fig. 1 (a)): São os entalhos ou sambladuras. Não possuem conectores intermediários entre os elementos unidos. Transmitem esforços normais ou cortantes.

Transmissão por justaposição (Fig. 1 (b)): Ligações feitas com o uso de conectores ou adesivos. Podendo transmitir esforços normais, cortante ou momentos.

Transmissão indireta (Fig. 1 (c)): Ligações feitas com elementos metálicos ou adesivos. Não há transpasse da superfície pelo conector. Os esforços são

¹ LE GOVIC, C. Les assemblages dans la construction en bois. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 1995.

transmitidos com o auxílio de elementos intermediários. Podem transmitir esforços normais, cortantes ou momentos.

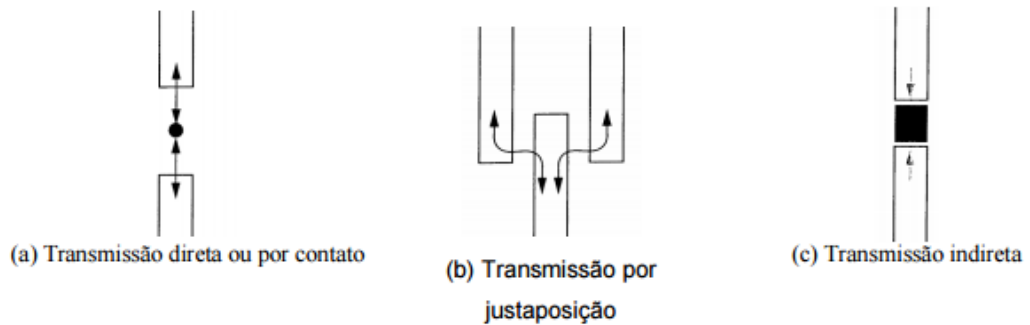


Figura 1 Formas de transmissão de esforços
Fonte: Le Govic² (1995) apud SZÜCS et al (2015)

4.3 RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

De acordo com Kreuzinger³ (1995 apud Stamato, 2002), nas peças compostas de madeira ligadas por conectores metálicos, cada conector é solicitado por forças de cisalhamento, causando assim um deslocamento entre as peças. A relação entre o carregamento aplicado e o deslocamento entre os elementos da peça é chamada de módulo de deslizamento, ou rigidez das ligações.

A curva típica que determina o comportamento dessa relação apresenta-se na figura 2.

² LE GOVIC, C. Les assemblages dans la construction en bois. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 1995.

³ KREUNZINGER, H. Mechanically jointed beams and columns. Timber Engineering. Step 1, 1995.

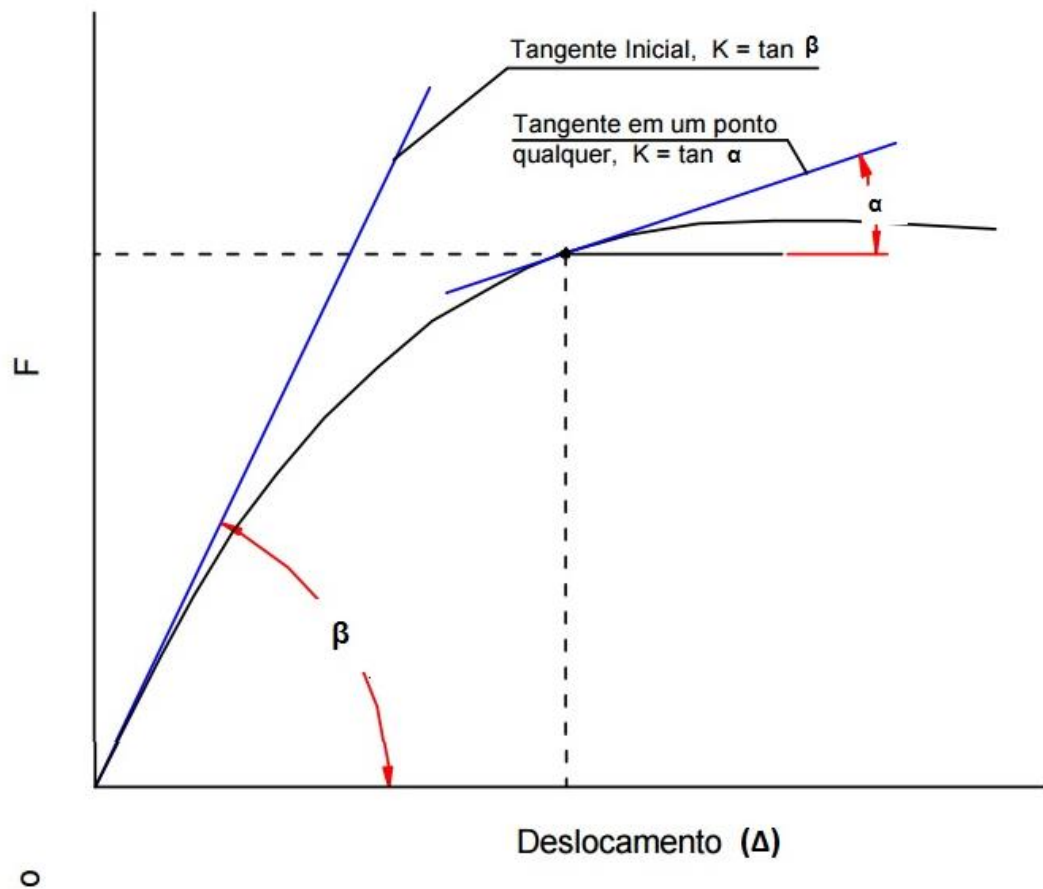


Figura 2 Típica Curva força-deslocamento
 Fonte: Adaptado de VAN DYER (1992)

4.3.1 Modelo de escoamento - Yield Model

O documento normativo CEN EUROCODE 5 (2004), é baseado na teoria de escoamento. De acordo com Johansen (1949), que iniciou os estudos sobre este modelo no início dos anos 40, este é baseado na suposição do comportamento plástico da madeira e dos conectores metálicos. Segundo Góes (2002) a resistência das ligações por pinos, depende da resistência da madeira ao embutimento do pino (f_e) e da resistência do pino à flexão (f_y). Esses fenômenos apresentam comportamento plástico perto da ruptura e, portanto, a capacidade de carga de um pino metálico pode ser formulada com base neste comportamento plástico.

Utilizando o princípio de equilíbrio Johansen (1949) desenvolveu formulações para uma série de modos de ruptura para ligação de duas ou três partes.

Larsen⁴ (1973, apud PATTON-MALLORY et al,1997) descreveu a capacidade de carga quando as partes de madeira possuem diferentes propriedades. Determinando assim uma carga de escoamento para cada possível modo de ruptura.

Na figura 3 visualiza-se os modos de ruptura assumidos no Yield Model, este é baseado nos modos de ruptura com a menor capacidade de carga, sendo o limite de carga da ligação. Este modelo possui razoável precisão na determinação da capacidade de carga das ligações. No entanto ele não prescreve a rigidez da ligação e nem o deslocamento na ruptura.

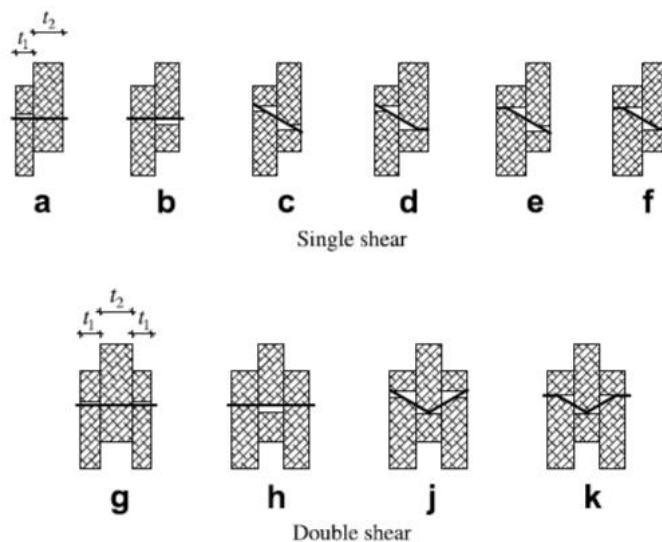


Figura 3 Modos de falha assumidos pelo Yield Model no EUROCODE 5
Fonte: BRANCO et al (2009)

O CEN EUROCODE 5 (2004) apresenta equações empíricas para determinação tanto da rigidez da ligação, quanto do deslocamento. Nele são indicados dois valores de Módulo de Deslizamento, um para dimensionamento nos Estados Limites Últimos (K_u) e outro para os Estados Limites de Utilização (K_{ser}). Os conceitos

⁴ LARSEN, H. J. The Yield load of bolted and nailed joints. Proc., IUFRO-5 Conf., p. 646-654. 1973.

adotados pelo CEN EUROCODE 5 (2004), sobre os valores de Módulo de Deslizamento, foram abordados por Ehlbeck e Larsen (1991).

Os valores dos Módulos de Deslizamento são obtidos a partir da curva carga-deslocamento, apresentada na Figura 4. O Módulo de Deslizamento instantâneo para os Estados Limites de Utilização (K_{ser}), é obtido quando o carregamento atinge aproximadamente 40% da carga máxima da ligação, assim o K_{ser} é assumido como o módulo secante da curva carga-deslocamento. De 0 até 40% da carga máxima da ligação, pode-se assumir para o propósito de dimensionamento um comportamento linear entre a relação carga e deslocamento. Já o Módulo de Deslizamento instantâneo para os Estados Limites Últimos (K_u), é obtido a um nível de carga de aproximadamente 60 a 70% da carga máxima da ligação. Como forma de simplificação o CEN EUROCODE 5 (2004) adota a equação (1) para K_u .

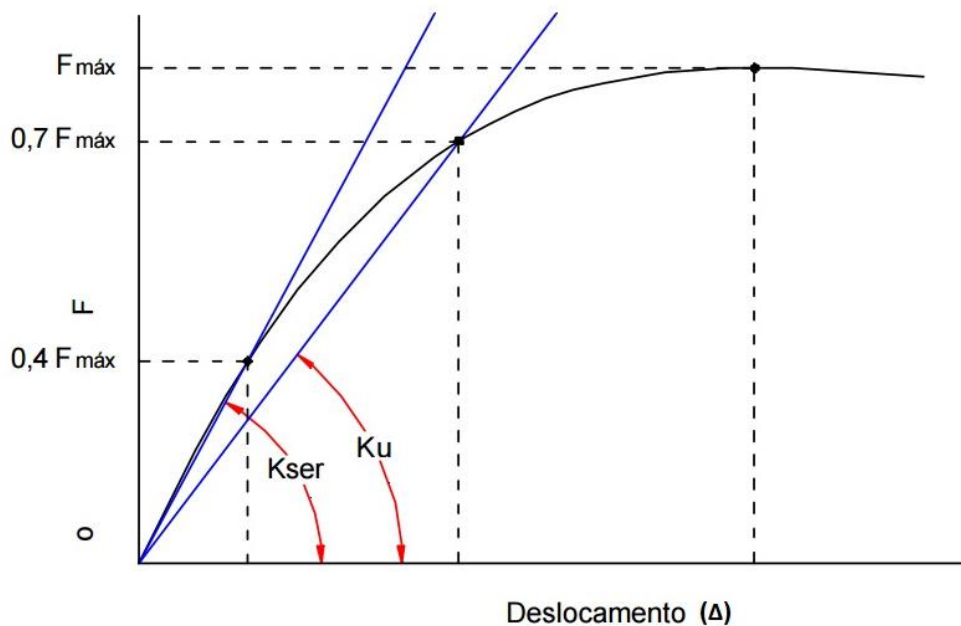


Figura 4 Módulo de Deslizamento secante.
Fonte: Adaptado Goês (2002)

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (1)$$

Ehlbeck e Larsen (1991) indicam como chegaram na formulação para estimar o Módulo de Deslizamento (K_{ser}) adotado no CEN EUROCODE 5 (2004). Essa

formulação é obtida a partir da equação da capacidade de carga de ligações pregadas, como apresentado na equação (2).

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_{e,1} \cdot d} \quad (2)$$

Onde:

R: capacidade máxima da ligação (N);

β : relação entre a resistência ao embutimento das peças 1 e 2 ligadas ($\beta = f_{e,1}/f_{e,2}$);

d: diâmetro do pino (mm);

M_y : momento de escoamento do pino ($M_y = f_y \cdot \frac{d^3}{6}$) (N.mm)

Considerando peças com características físicas iguais ($\beta = 1$) e valores de tensão de embutimento, para ligações com pinos metálicos (pregos e parafusos) com pré-furação, é dada a equação (3).

$$f_{e,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (3)$$

Já para ligações com pregos sem pré-furação, equação (4).

$$f_{e,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \quad (4)$$

Têm-se a capacidade de carga para ligação pregada por pinos com pré-furação, como apresentado na equação (5).

$$R = \sqrt{0,3 \cdot (100 - d) \cdot d^{3,6} \cdot \rho_k} \quad (5)$$

Já para ligações sem pré-furação, têm-se a carga como na equação (6).

$$R = \sqrt{30 \cdot d^{3,3} \cdot \rho_k} \quad (6)$$

A partir de vários testes em vários laboratórios Ehlbeck e Larsen (1991), indicam que o deslocamento instantâneo em aproximadamente 40% da carga máxima, para ligações pregadas com pré-furação, é dado pela equação (7):

$$u_{inst} = \frac{40 \cdot d^{0,8}}{\rho_k} \quad (7)$$

E sem pré-furação, como apresentado na equação (8).

$$u_{inst} = \frac{60 \cdot d^{0,8}}{\rho_k} \quad (8)$$

Para os Estados Limites de Utilização o Módulo de Deslizamento instantâneo pode ser calculado pela equação (9).

$$K_{ser,inst} = \frac{0,4 \cdot R}{u_{inst}} \quad (9)$$

Para ligações pregadas com pré-furação, o $K_{ser,inst}$ é dado pela equação (10).

$$K_{ser,inst} = \frac{0,55}{100} \cdot \sqrt{100 - d} \cdot \rho_k^{1,5} \cdot d \quad (10)$$

Com o diâmetro do prego variando entre 2 e 8 mm, o $K_{ser,inst}$ pode ser simplificado pela equação (11).

$$K_{ser,inst} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d}{20} \quad (11)$$

Já para ligações pregadas sem pré-furação, equação (12).

$$K_{ser,inst} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d^{0,8}}{27,4} \approx \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d^{0,8}}{25} \quad (12)$$

A formulação para obtenção do K_{ser} foi atualizada no CEN EUROCODE 5 (2004) e os valores são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Valores de K_{ser} em (N/mm).

Tipo de conector	K_{ser} (N/mm)
Cavilha	
Parafuso passante ou pino ajustado	
Parafusos auto atarraxantes	$(\rho_m^{1,5} \cdot d)/23$
Pregos (com pré-furação)	
Pregos (sem pré-furação)	$(\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8})/30$

Fonte: Adaptado do CEN EUROCODE 5 (2004)

No caso de elementos com diferentes densidades, deve-se adotar a equação (13), para o cálculo da densidade equivalente.

$$\rho_k = \sqrt{\rho_{k1} \cdot \rho_{k2}} \quad (13)$$

Onde:

ρ_{k1} : Densidade do elemento 1;

ρ_{k2} : Densidade do elemento 2.

4.3.2 Comportamento não linear da ligação

O modelo utilizado pelo CEN EUROCODE 5 (2004) para determinação do módulo de deslizamento, não descreve o comportamento da ligação ao longo do carregamento, pelo fato de assumir um comportamento perfeitamente plástico tanto para a madeira quanto para o aço. Ao longo do carregamento a relação carga deslocamento pode apresentar um comportamento ora linear, ora não linear. Na faixa elástica linear, a relação é constante e denominada módulo de deslizamento. No entanto se a ligação atinge um comportamento não linear, esse determina o comportamento de toda a estrutura (MASCIA et al., 2008).

Apesar dos avanços nas análises do comportamento não linear das ligações, os documentos normativos adotam o comportamento linear como parâmetro, por simplificação.

4.3.3 Modelo de viga sob fundação elástica – Teoria de Kuenzi

Baseado em estudos anteriores de Winkler (1867), que desenvolveu as primeiras soluções para feixes sobre fundações elásticas e nas teorias de Hetényi (1946), sobre feixes de comprimento finito, Kuenzi (1955) desenvolveu uma teoria inovadora sobre ligações de madeira carregadas lateralmente, determinando o módulo de deslizamento e também a distribuição dos esforços internos. Essa teoria faz uma analogia do pino metálico na ligação com uma viga em fundação elástica.

A teoria foi esquematizada como mostrado na figura 5(a). E a forma do elemento considerando após a deformação do conector é apresentada na figura 5(b).

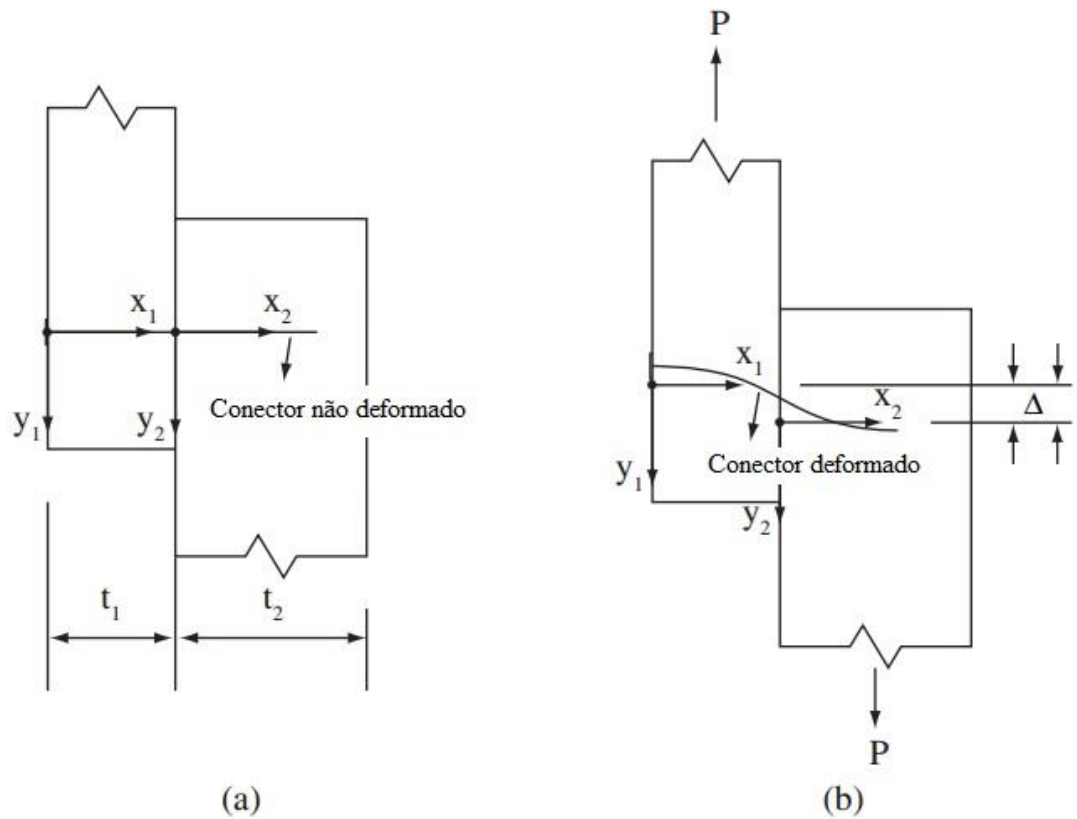


Figura 5(a) Convenção de eixos; Figura 5(b) Geometria deformada da ligação
 Fonte: Adaptado Mascia et al., 2008.

Kuenzi (1955) desenvolveu uma teoria para peças compostas de madeira carregadas lateralmente, que relaciona carga e o deslizamento do conjunto de peças. A teoria assume que os materiais são elásticos e obedecem a Lei de Hooke. A equação diferencial básica para a curva de deflexão de uma viga suportada numa base elástica é apresentada na equação (14).

$$EI \frac{dv^4}{dx^4}(x) + kv(x) = 0 \quad (14)$$

Onde:

k : Módulo de deformação da fundação;

E : Módulo de elasticidade do pino;

I : Momento de inércia do pino;

v : Deslocamento.

Após a obtenção da solução, é possível encontrar a relação entre carga e deslizamento, equação (15).

$$\Delta = P \left[2(L_1 + L_2) - \frac{(J_1 - J_2)^2}{K_1 + K_2} \right] \quad (15)$$

Com L_1, L_2, J_1, J_2, K_1 e K_2 são definidos pelas equações (16), (17), (18), (19), (20) e (21), respectivamente.

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{k_1} \left[\frac{\sinh \lambda_1 t_1 \cosh \lambda_1 t_1 - \sin \lambda_1 t_1 \cos \lambda_1 t_1}{\sinh^2 \lambda_1 t_1 - \sin^2 \lambda_1 t_1} \right] \quad (16)$$

$$L_2 = \frac{\lambda_2}{k_2} \left[\frac{\sinh \lambda_2 t_2 \cosh \lambda_2 t_2 - \sin \lambda_2 t_2 \cos \lambda_2 t_2}{\sinh^2 \lambda_2 t_2 - \sin^2 \lambda_2 t_2} \right] \quad (17)$$

$$J_1 = \frac{\lambda_1^2}{k_1} \left[\frac{\sinh^2 \lambda_1 t_1 + \sin^2 \lambda_1 t_1}{\sinh^2 \lambda_1 t_1 - \sin^2 \lambda_1 t_1} \right] \quad (18)$$

$$J_2 = \frac{\lambda_2^2}{k_2} \left[\frac{\sinh^2 \lambda_2 t_2 + \sin^2 \lambda_2 t_2}{\sinh^2 \lambda_2 t_2 - \sin^2 \lambda_2 t_2} \right] \quad (19)$$

$$K_1 = \frac{\lambda_1^3}{k_1} \left[\frac{\sinh \lambda_1 t_1 \cosh \lambda_1 t_1 + \sin \lambda_1 t_1 \cos \lambda_1 t_1}{\sinh^2 \lambda_1 t_1 - \sin^2 \lambda_1 t_1} \right] \quad (20)$$

$$K_2 = \frac{\lambda_2^3}{k_2} \left[\frac{\sinh \lambda_2 t_2 \cosh \lambda_2 t_2 + \sin \lambda_2 t_2 \cos \lambda_2 t_2}{\sinh^2 \lambda_2 t_2 - \sin^2 \lambda_2 t_2} \right] \quad (21)$$

Onde:

sinh : Seno hiperbólico;

cosh : Cosseno hiperbólico;

t_1 : Largura do elemento 1;

t_2 : Penetração do pino no elemento 2;

K_1 : Módulo de fundação do elemento 1;

K_2 : Módulo de fundação do elemento 2;

E com λ_1 e λ_2 definidos pelas equações (22) e (23), respectivamente.

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{k_1}{4EI}} \quad (22)$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{k_2}{4EI}} \quad (23)$$

Reorganizando a definição do módulo de deslizamento, têm-se a equação (24).

$$K = \left[2(L_1 + L_2) - \frac{(J_1 - J_2)^2}{K_1 + K_2} \right]^{-1} \quad (24)$$

Pode-se observar que o módulo de deslizamento é uma equação em função das propriedades geométricas das peças de madeira e do prego e também das propriedades dos materiais. O módulo de elasticidade do aço é um valor conhecido e

não possui muita variação. Por outro lado K_1 e K_2 são propriedades da madeira e possuem grande variabilidade de acordo com a espécie e a direção das fibras.

Kuenzi (1955), propôs a equação (25) para o módulo de deslizamento.

$$K = E_{w,\alpha} \frac{d}{z_f} \quad (25)$$

Onde:

d : Diâmetro do pino;

z_f : Profundidade da fundação;

$E_{w,\alpha}$: Módulo de elasticidade da madeira sob compressão.

Em seus estudos Kuenzi (1955), assumiu a profundidade da fundação sendo 2,54 cm nos exemplos de cálculo. Mascia et al (2008), sugere que a profundidade da fundação seja teoricamente limitada, também ao mesmo valor proposto por Kuenzi (1955).

5 METODOLOGIA

Todo o programa experimental de pesquisa, incluindo os ensaios de caracterização dos materiais, bem como os ensaios em ligação, propriamente ditos, foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão. Os materiais e os procedimentos são apresentados a seguir.

5.1 MATERIAIS

Para a confecção dos corpos de prova, para os testes de caracterização e para os ensaios de ligação, foram utilizados dois lotes de madeira de espécies diferentes, a Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). Estas foram escolhidas pela sua diferente classe de resistência e densidades.

De acordo com a norma ABNT NBR 7190 (1997) “ Projeto de Estruturas de Madeira – Anexo C: Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira”, a madeira para fabricação dos corpos de prova deve ser extraída aleatoriamente do lote, a partir de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão de sua seção transversal, mas nunca menos de 30 cm. Ainda de acordo com a Norma, deve ser confeccionados seis ou mais corpos de prova para cada uma das espécies de madeira e para cada tipo de conector.

5.1.1 Ligações pregadas

Para este ensaio, foram utilizados pregos lisos do modelo padrão comercial 20 x 30 (diâmetro de 4,4 mm e comprimento de 96,6 mm), como mostrado na figura 7, essas dimensões atenderam aos valor mínimos de penetração segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

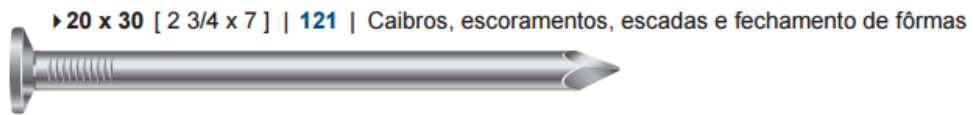


Figura 6 Prego liso 20 x 30
Fonte: Catálogo de pregos Gerdau.

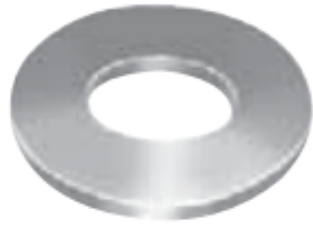
A pré-furação da madeira foi realizada em furadeira de bancada com broca de aço rápido com diâmetro de 4 mm, atendendo as exigências de pré-furação da norma brasileira.

5.1.2 Ligações parafusadas

Para as ligações parafusadas, foram utilizados parafusos sextavados de rosca parcial com diâmetro de 12 mm (M12) fabricados em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8 especificado segundo a norma ISO 4016 (2000) “Hexagon head bolts – Product grade C”, como mostrado na Figura 8. Já as arruelas utilizadas possuíam diâmetro interno (d1) igual a 13,5 mm e diâmetro externo (d2) igual a 44,0 mm, especificadas segundo a norma DIN 440R (2001) “Washers – With square hole, especially for timber construction”), de acordo com a Figura 9.



Figura 7 Parafuso sextavado de rosca parcial com diâmetro de 12mm.
Fonte: Vonder.



**Figura 8 Arruela lisa com diâmetro interno de 13,5mm e externo de 44,0mm.
Fonte: Catálogo de arruela lisa pesada da Ciser.**

5.1.3 Ensaio de caracterização

5.1.3.1 Pinos metálicos

Para determinar a resistência última à tração dos pinos metálicos foi realizado o ensaio de tração segundo a NBR ISO 6892-1 (2013).

5.1.3.2 Máquina Universal de Ensaio modelo DL 30000

Os ensaios foram realizados com corpos de prova retirados aleatoriamente dos lotes, a fim de determinar a sua umidade e densidade, resistência à compressão e ao embutimento, ambos realizados na direção paralela às fibras, na Máquina Universal de Ensaio modelo DL 30000, figura 10, esta possui capacidade máxima de carga de 300 KN, e fica localizada no laboratório de Sistemas Estruturais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Campo Mourão. Os ensaios foram realizados de acordo com o anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), e com o EN 383.



Figura 9 Máquina Universal de Ensaio DL 30000
Fonte: Site Soluções Industriais

Para a realização dos ensaios de caracterização e dos ensaios de ligação utilizou-se a máquina Universal de Ensaio modelo DL 30000, já citada no item 5.1.3.2 deste trabalho. Foram utilizados para medição dos deslocamentos relativos, relógios transdutores de deslocamentos com sensibilidade de 0,01 mm, montados em dispositivos, constituídos de cantoneira metálica, colocados nas duas faces laterais dos corpos de provas.

5.2 PROCEDIMENTOS

5.2.1 Ensaio de caracterização dos materiais

5.2.1.1 Determinação da densidade e umidade

Para cada espécie de madeira foram extraídos aleatoriamente seis corpos de provas, com seção transversal de 3,0 cm x 2,0 cm de comprimento ao longo das fibras, de acordo com o determinado no anexo B da ABNT NBR 7190 (1997).

O teor de umidade foi calculado de acordo com a equação (26).

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (26)$$

Onde:

U: Teor de umidade, em porcentagem;

m_i : massa inicial da madeira, em gramas;

m_s : massa seca da madeira, em gramas.

A massa inicial da madeira foi obtida pesando-se as amostras em balanças de precisão. Já para obter a massa seca da madeira as amostras ficaram em estufa com a temperatura aproximada de 100 °C, estas foram pesadas a cada 6 horas, até atingirem variações menores que 0,5% da última pesagem.

A densidade aparente foi obtida a partir da equação (27).

$$\rho_{ap} = \frac{m_i}{A \cdot B \cdot C} \quad (27)$$

Onde:

ρ_{ap} : densidade aparente, em g/cm³;

m_i : massa inicial da madeira, em gramas;

A: dimensão da largura do corpo de prova, em centímetros;

B: dimensão da altura do corpo de prova, em centímetros;

C: dimensão do comprimento do corpo de prova em relação às fibras da madeira, em centímetros.

5.2.1.1 Determinação da resistência a compressão paralela às fibras

Para cada espécie de madeira foram extraídos aleatoriamente seis corpos de provas, com seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm por 15 cm de comprimento, de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira – Anexo B: Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”. Esses

corpos de prova foram submetidos a um carregamento monotônico crescente de 10 MPa/min e os resultados de resistência à compressão foram obtidos pela máquina Universal de Ensaios, DL 30000.

5.2.1.2 Ensaio de resistência ao embutimento

O procedimento de carga deste ensaio foi realizado paralelamente às fibras e de acordo com a norma de ensaios EN 383 (2007) “Timber Structures. Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners”. Adotamos dimensões de modo a atender tanto a norma brasileira quanto a norma europeia.

Na figura 10 são apresentadas as dimensões mínimas determinadas pela norma europeia e na tabela 2. A espessura do corpo de prova deve ser maior que $1,5d$ e menor que $4d$, sendo d o diâmetro do prego.

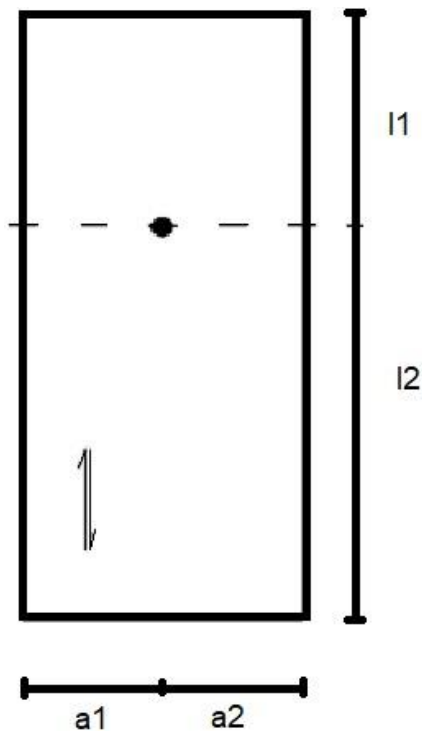


Figura 10 Dimensões do corpo de prova de embutimento
Fonte: Adaptado da norma de ensaios EN 383 (2007)

Tabela 2: Dimensões mínimas do corpo de prova de embutimento

Dimensões ^a	Pregos sem pré-furação	Pregos com pré-furação	Parafusos e pino	Direção das fibras
a_1	5d	5d	3d	Paralelo às fibras
l_1	20d	12d	7d	
l_2	20d	12d	7d	
l_3	20d	12d	7d	
l_4	40d	40d	30d	
a_1	5d	5d	5d	Perpendicular às fibras
a_2	5d	5d	5d	
l_5	20d	20d	20d	

^aDimensão dadas na figura 11.

Fonte: Adaptado da norma de ensaios EN 383 (2007)

Já as dimensões mínimas determinadas no anexo B da ABNT NBR 7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira – Anexo B: Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, são dadas pela figura 11.

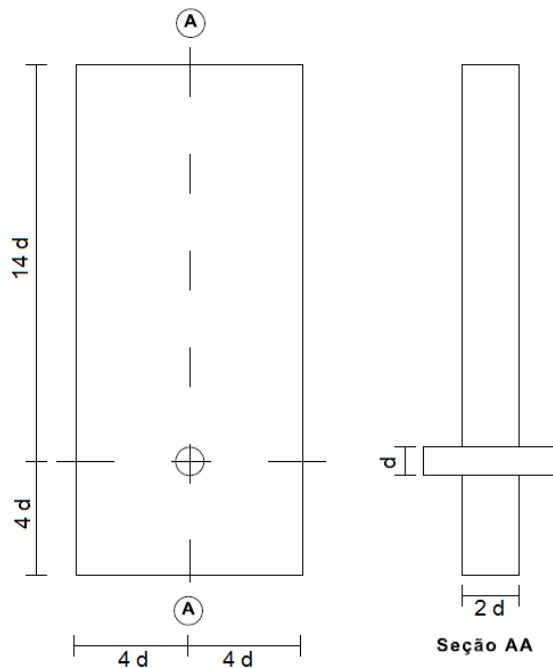


Figura 11 Dimensões do corpo de prova de embutimento
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997)

Para este ensaio foram confeccionados dezoito corpos de prova, sendo: Seis corpos de prova confeccionados de madeira da espécie Garapeira para ligação do tipo pregada, com seção transversal de 10 mm x 60 mm e 124 mm de comprimento. Seis corpos de prova confeccionados de madeira da espécie Garapeira para ligação do tipo parafusada, com seção transversal de 25 mm x 80 mm e 170 mm de comprimento e também seis corpos de prova confeccionados de madeira da espécie Caixeta para ligação do tipo parafusada, com seção transversal de 25 mm x 80 mm e 170 mm de comprimento.

A figura 12 apresenta o diagrama de carregamentos adotados para o ensaio de embutimento. Foi estimada uma força (F_{est}) e esta serviu como base para todo o ensaio. O procedimento de carga consistiu em um incremento de carga de $0,4F_{est}$ por minuto, até atingir 40% da F_{est} , quando esta foi atingida, manteve-se a carga por 30 segundos. Em seguida, procedeu-se a descarga, mantendo o valor do incremento de carga anterior, até 10% da F_{est} , os quais foram mantidos por mais 30 segundos. Após isso, seguiu-se o carregamento até a carga máxima ser atingida, ou até que a deformação atingisse 5mm.

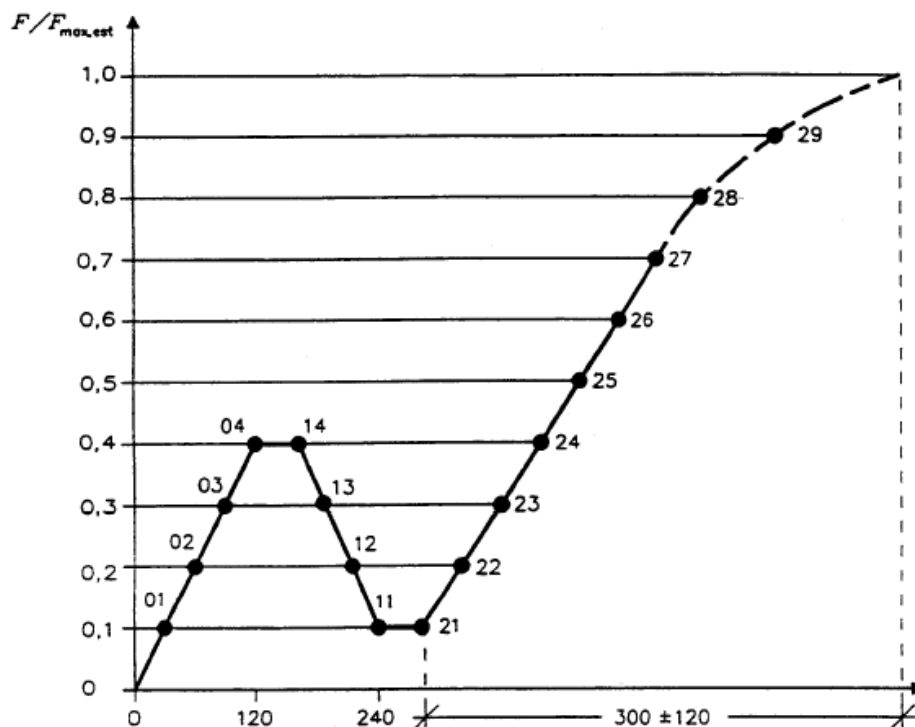


Figura 12 Procedimento de carga para o ensaio de embutimento
Fonte: EN 383 (2007)

Na equação 28, temos a definição da resistência ao embutimento.

$$f_{e0} = \frac{F_{e,max}}{t \cdot d} \quad (28)$$

Onde:

f_{e0} : Resistência ao embutimento;

$F_{e,max}$: Força máxima de ensaio, em Newtons;

t: Espessura do corpo de prova, em milímetros;

d: Diâmetro do pino, em milímetros.

Os modos de falha dos corpos de prova podem ser observados na figura 13.



Figura 13 Corpos de prova após o ensaio de resistência ao embutimento para madeira Garapeira (Pregos)
 Fonte: Maia (2016)

5.2.1.3 Resistência última à tração do aço ($f_{u,m}$)

Esses ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR ISO 6892 (2013) “Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente”. Foi realizada a

aplicação de uma carga axial crescente e contínua até a ruptura dos corpos de prova. Nas fotos 14 e 15 têm-se os pregos rompidos após a realização do ensaio.



Figura 14 Pregos rompidos após o ensaio
Fonte: Maia (2016)



Figura 15 Parafuso rompido após a realização do ensaio
Fonte: Silva e Góes (2015)

5.2.2 Preparação dos corpos de prova do ensaio de obtenção da rigidez das ligações

Foram confeccionados três tipos de corpos de provas, a espécie de madeira utilizada e o tipo de pino metálico, pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3: Tipos de corpos de prova

Espécie da madeira	Tipo de ligação	Quantidade de corpos de prova
Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	Pregos lisos	6
Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	Parafusos passantes com porca e arruela	6
Caixeta (<i>Tabebuia cassinoides</i>)	Parafusos passantes com porca e arruela	6

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo as exigências do Anexo C da ABNT NBR 7190 (1997) “ Projeto de Estruturas de Madeira – Anexo C: Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira”. E suas dimensões podem ser observadas nas figuras a seguir. Na figura 16, temos as dimensões dos corpos de prova e a distribuição dos pregos, respectivamente, dos corpos de prova confeccionados com Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e pregos lisos. Foi utilizado um total de oito pregos em cada corpo de prova, contendo cada um apenas uma seção de corte.

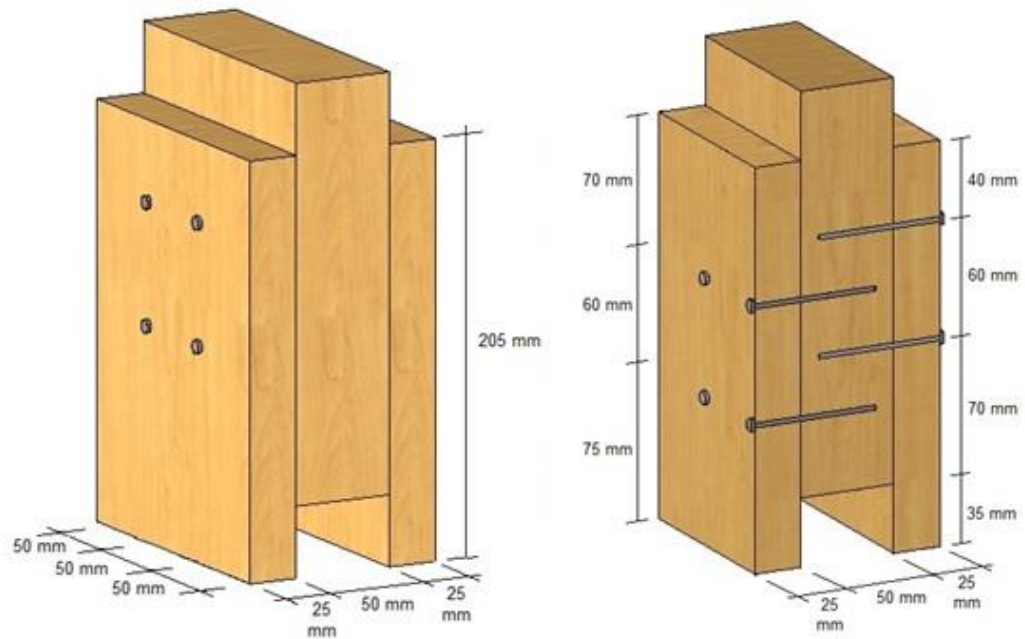


Figura 16 Dimensões e distribuição dos pregos do corpo de prova de Garapeira e pregos lisos.

Fonte: Maia (2016)

Já nos corpos de prova confeccionados de Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), com parafusos passantes com porcas e arruelas, foram utilizados um total de quatro parafusos, oito arruelas e quatro porcas em cada corpo de prova, contendo cada um duas seções de corte. As dimensões adotadas para a confecção dos corpos de prova estão apresentadas na figura 17, algumas dessas dimensões foram adotadas acima do mínimo especificado na norma.

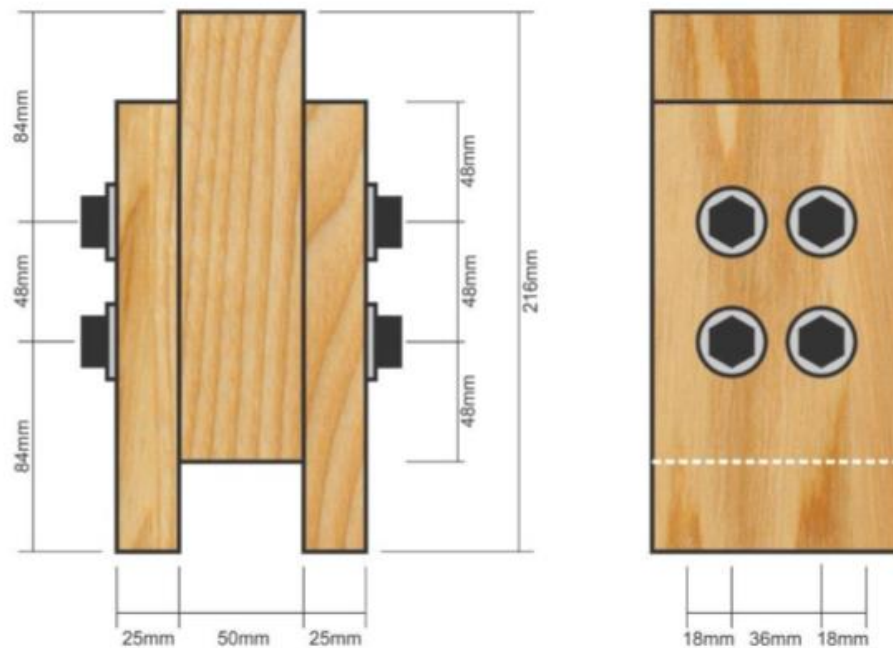


Figura 17 Dimensões e distribuição dos parafusos passantes com porcas e arruelas dos corpos de prova de Garapeira e Caixeta
 Fonte: Silva e Góes (2015)

As espessuras “t” das peças foram estabelecidas conforme item 8.3.4 da NBR 7190 (1997) “Projeto de Estruturas de Madeira” sendo utilizada a espessura padrão de 25 mm para as cobrejuntas. As peças centrais foram construídas com o dobro da espessura das respectivas cobrejuntas.

5.2.3 Ensaio de rigidez das ligações

Para obtenção da rigidez experimental, utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC DL30000 para o procedimento de carga do ensaio. Estimou-se uma força (F_{est}) de ruptura, sua determinação foi baseada em experiências anteriores. Esta foi utilizada como base para realização de todo o ensaio.

Realizou-se um incremento de carga de $0,2 F_{est}$ por minuto, ao atingir $0,4 F_{est}$ manteve-se o carregamento por 30 segundos e em seguida foi realizada uma

descarga até que foi atingido $0,1 F_{est}$, ao atingir este valor de carga, o mesmo foi mantido por mais 30 segundos. Em seguida realizou-se o mesmo incremento de $0,2F_{est}$ até que foi atingido $0,7 F_{est}$. Acima desse valor o incremento foi tal que a ruptura foi alcançada ao fim de 3 a 5 minutos ou no momento em que o deslizamento de 15 mm foi atingido. Os ensaios duraram em torno de 10 a 15 minutos. O procedimento de carga realizado pode ser visto nas figuras 18 e 19. E a figura 20 apresenta o diagrama idealizado de força-deslocamento obtido com o ensaio.

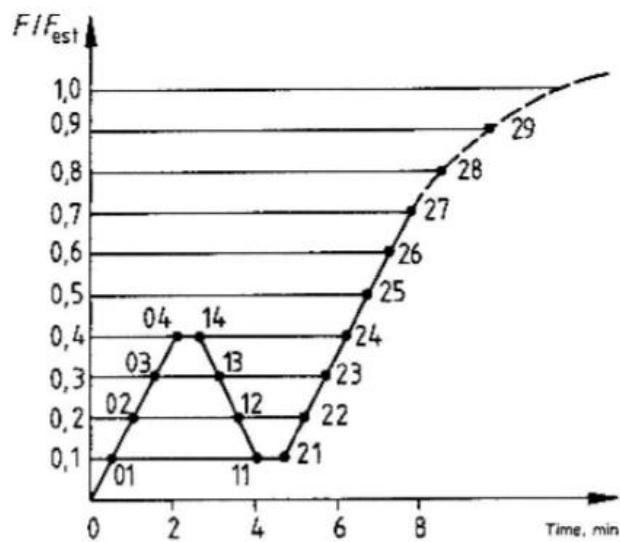


Figura 18 Procedimento de carga
Fonte: Adaptado EN 26891:1991



Figura 19 Procedimento de carga do ensaio de obtenção da rigidez de ligações
Fonte: Maia (2016)

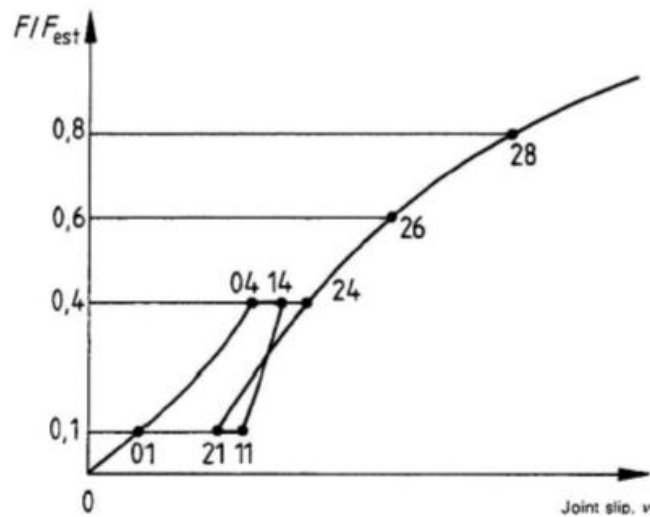


Figura 20 Diagrama idealizado força-deslocamento
Fonte: Adaptado EN 26891

A partir das medições registradas, obteve-se os seguintes valores para as equações 29 e 30.

$$v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01}) \quad (29)$$

$$K_{ser} = \frac{(0,4F_{est})}{v_{i,mod}} \quad (30)$$

Onde:

$v_{i,mod}$: Deslizamento inicial modificado, em milímetros;

F_{est} : Força estimada, em Newtons;

v_{04} : Deslizamento inicial em $0,4F_{est}$, em milímetros;

v_{01} : Deslizamento inicial em $0,1F_{est}$, em milímetros

K_{ser} : Módulo de deslizamento, em Newtons por milímetros.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A tabela 4 apresenta um resumo das propriedades da madeira e dos pregos, com seus respectivos valores médios, seguido do número de corpos de prova e do coeficiente de variação (CV), dos materiais utilizados nos ensaios de rigidez das ligações, do tipo de ligação pregada.

Tabela 4: Resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais – Ligação pregada

Propriedade	Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	Prego
U (Teor de umidade aparente)	13,52% (6CP) CV=1,01%	-
ρ (Densidade aparente)	861,59 kg/m ³ (6CP) CV=1,13%	-
$f_{c0,m}$ (Resistência à compressão paralela às fibras)	63,12 MPa (6CP) CV=3,81%	-
$f_{e0,m}$ (Resistência ao embutimento paralelo às fibras)	74,22 MPa (6CP) CV=5,78%	-
$f_{u,m}$ (Resistência última de tração no prego)	-	719,57 MPa (6CP) CV=3,68%

Já a tabela 5 apresenta um resumo das propriedades da madeira e dos parafusos, com seus respectivos valores médios, seguido do número de corpos de prova e do coeficiente de variação (CV), dos materiais utilizados nos ensaios de rigidez das ligações, do tipo de ligação pregada.

Tabela 5: Resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais – Ligação parafusada

Propriedade	Garapeira (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	Caixeta (<i>Tabebuia cassinoides</i>)	Parafuso
U (Teor de umidade aparente)	12,36% (8CP) CV=1,82%	13,51% (8CP) CV=2,47%	-
ρ (Densidade aparente)	740 kg/m ³ (8CP) CV=1,39%	410 kg/m ³ (8CP) CV=2,57%	-
$f_{c0,m}$ (Resistência à compressão paralela às fibras)	57,8 MPa (6CP) CV=12,7%	29,1 MPa (6CP) CV=3,9%	-
$f_{e0,m}$ (Resistência ao embutimento paralelo às fibras)	90,6 MPa (7CP) CV=9,8%	28,4 MPa (8CP) CV=6,6%	-
$f_{u,m}$ (Resistência última de tração no parafuso)	-	-	872,5 MPa (3CP) CV=1,2%

6.2 ENSAIOS DE RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

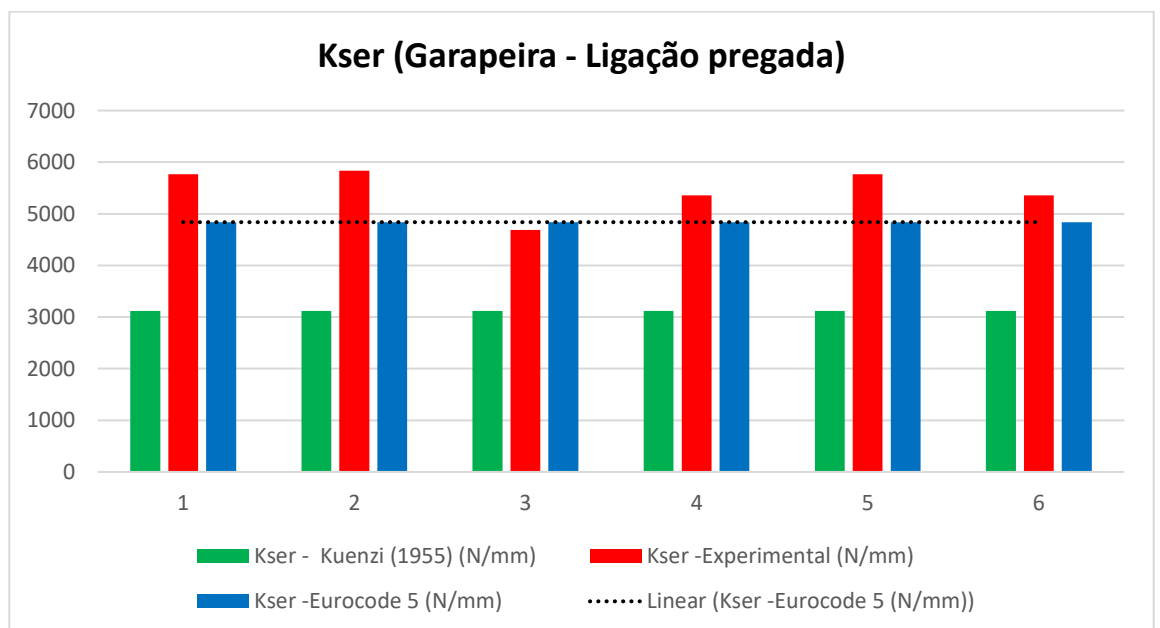
O valor encontrado para a rigidez das ligações pela metodologia do CEN EUROCODE 5 (2004), tem seu valor fixo pois é calculado em função do diâmetro dos pinos e pela densidade da madeira. Já o valor encontrado para o K_{ser} experimental foi obtido de acordo com a norma de ensaio EN 26891 (1991).

A tabela 6 apresenta os resultados da rigidez das ligações (K_{ser}) dos corpos de prova confeccionados com a espécie de madeira Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), com ligação do tipo pregada. O coeficiente de variação foi de 7,30%, valor relativamente baixo o que garante uma confiabilidade ao ensaio. No gráfico 1 pode-se observar a comparação entre os valores encontrados. Observa-se também que somente o corpo de prova 3 apresentou um valor experimental da rigidez da ligação aproximadamente 3,11% menor que o valor encontrado por meio da metodologia do CEN EUROCODE 5 (2004), pode-se observar também que todos os valores foram

acima do valor encontrado para a rigidez de ligação, de acordo com a Teoria de Kuenzi (1955), equação 25 da página 29.

Tabela 6: Resultados da Rigidez de Ligação dos corpos de prova de Garapeira com ligação do tipo pregada

Corpo de Prova	Kser (Teoria de Kuenzi (1955))	Kser (CEN EUROCODE 5)	Kser (Experimental)
1	3120,71	4838,11	5769,23
2	3120,71	4838,11	5833,33
3	3120,71	4838,11	4687,50
4	3120,71	4838,11	5357,14
5	3120,71	4838,11	5769,23
6	3120,71	4838,11	5357,14
Valor Médio (N/mm)	3120,71	4838,11	5462,26
Desvio Padrão		-	397,60
Coefficiente de Variação (%)		-	7,30



A tabela 7 apresenta os resultados da rigidez das ligações (K_{ser}) dos corpos de prova confeccionados com a espécie de madeira Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), com ligação do tipo parafusada. O coeficiente de variação foi de 43,12%, valor relativamente alto. A grande diferença entre os valores dos ensaios, têm justificativa no fato dos corpos de prova de ligações parafusadas serem confeccionados com diâmetro de pré-furação 1mm superior ao diâmetro do parafuso, fazendo com que haja um deslocamento inicial significativo, em alguns casos. Como a metodologia de cálculo do valor de rigidez experimental, equação 30 da página 42, utiliza o primeiro ciclo de carregamento, os deslizamentos iniciais causados pela folga da ligação, influenciam diretamente no valor da rigidez experimental. No caso das ligações pregadas esse fenômeno não se manifestou, pois, a pré-furação é realizada com diâmetro menor ao do elemento de ligação, ou seja, não há folga na ligação. Portanto, os valores de rigidez experimentais para ligações pregadas tiveram coeficiente de variação bem menores que os das ligações parafusadas.

No gráfico 2 pode-se observar a comparação dos valores encontrados. Os corpos de prova 1 e 4 apresentaram seus valores de K_{ser} Experimental menores que o valor indicado pela metodologia do CEN EUROCODE 5 (2004). Sendo esses respectivamente 16,62% e 9,57% menor, pode-se observar também que todos os valores foram acima do valor encontrado para a rigidez de ligação, de acordo com a Teoria de Kuenzi (1955), equação 25 da página 29.

Tabela 7: Resultados da Rigidez de Ligação dos corpos de prova de Garapeira com ligação do tipo parafusada

Corpo de Prova	K_{ser} (Teoria de Kuenzi (1955))	K_{ser} (CEN EUROCODE 5)	K_{ser} (Experimental)
1	8511,02	10502,70	8757,29
2	8511,02	10502,70	10629,43
3	8511,02	10502,70	24355,30
4	8511,02	10502,70	9497,21
5	8511,02	10502,70	24926,68
6	8511,02	10502,70	15586,79
Valor Médio (N/mm)	8511,02	10502,70	15625,45
Desvio Padrão		-	6738,09

Corpo de Prova	Kser (Teoria de Kuenzi (1955))	Kser (CEN EUROCODE 5)	Kser (Experimental)
Coefficiente de Variação (%)		-	43,12

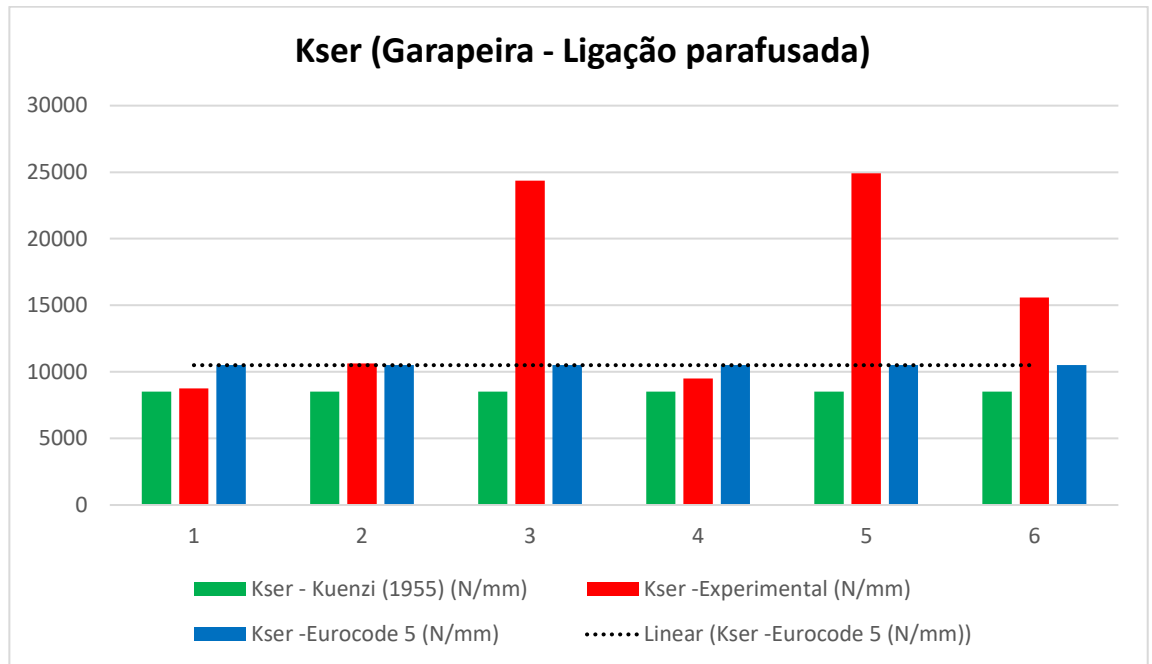


Gráfico 2 Kser (Garapeira – Ligação parafusada)

A tabela 8 apresenta os resultados da rigidez das ligações (Kser) dos corpos de prova confeccionados com a espécie de madeira Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), com ligação do tipo parafusada. O coeficiente de variação foi de 29,79%, valor relativamente alto, como ocorreu nos ensaios da espécie de madeira Garapeira (*Apuleia leiocarpa*), com o tipo de ligação parafusada. Este valor foi devido a folga existente entre o corpo de prova e o parafuso, pois como é realizada a pré-furação dos corpos de prova, esses valores podem ser divergentes entre corpos de prova, mesmo com todo o cuidado durante a confecção destes. No gráfico 3 pode-se observar a comparação dos valores encontrados. Os valores do Kser (Experimental) foram todos maiores que o encontrado pela metodologia do CEN EUROCODE 5 (2004). Já para a comparação com o valor encontrado pela equação 25 da página 29, da Teoria de Kuenzi (1955), os corpos de prova 1 e 2, apresentaram resultado experimental menor do que o indicado pela teoria, sendo 2,19% e 19,31% menores, respectivamente.

Tabela 8: Resultados da Rigidez de Ligação dos corpos de prova de Caixeta com ligação do tipo parafusada

Corpo de Prova	Kser (Teoria de Kuenzi (1955))	Kser (CEN EUROCODE 5)	Kser (Experimental)
1	6639,21	4331,41	6496,60
2	6639,21	4331,41	5564,70
3	6639,21	4331,41	9183,70
4	6639,21	4331,41	13183,60
5	6639,21	4331,41	7105,30
6	6639,21	4331,41	10089,70
Valor Médio (N/mm)	6639,21	4331,41	8603,93
Desvio Padrão		-	2563,87
Coefficiente de Variação (%)		-	29,79

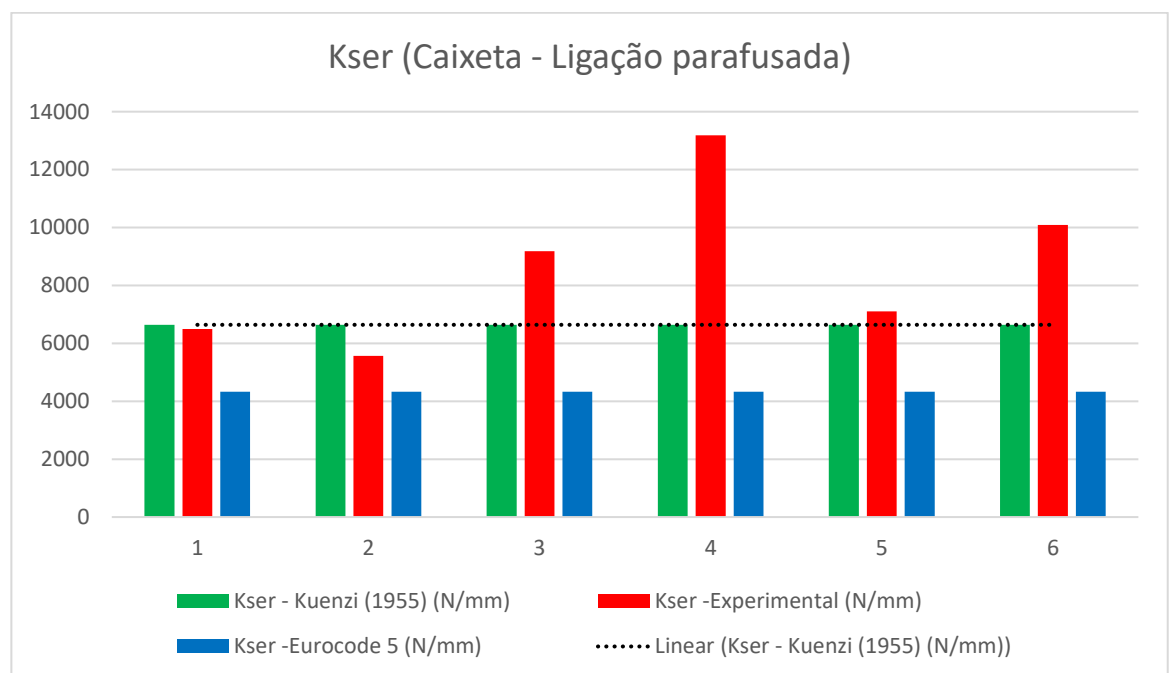


Gráfico 3 Kser (Caixeta - Ligação parafusada)

Comparando os diferentes tipos de corpos de prova que foram confeccionados, o tipo de corpo de prova que apresentou uma maior média da rigidez das ligações foi o de Garapeira com ligação do tipo parafusada, um valor em torno de 65,04% a mais que a rigidez média encontrada nos corpos de prova confeccionados com a mesma espécie de madeira, só que com o tipo de ligação pregada. Essa

comparação pode ser observada no gráfico 4. Esse comportamento mais rígido das ligações confeccionadas com a ligação do tipo parafusada pode ser observado nos gráficos 5, 6, e 7, corpo de prova de Garapeira com ligação pregada, corpo de prova de Garapeira com ligação parafusada e corpo de prova de Caixeta com ligação parafusada, respectivamente.

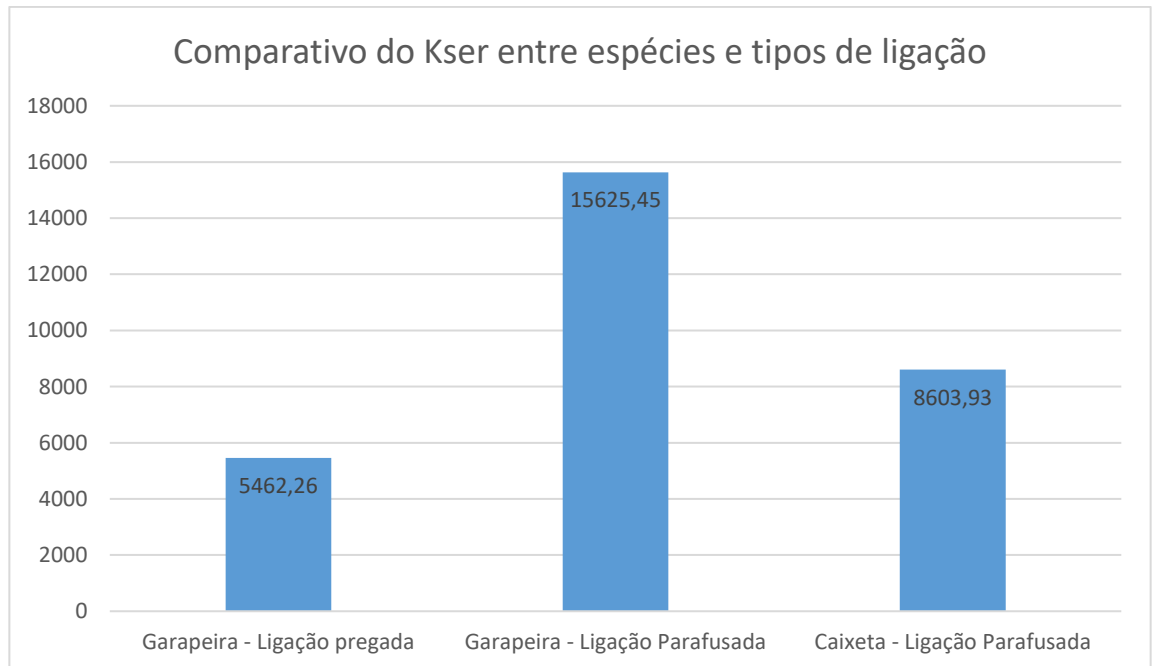


Gráfico 4 Comparativo do Kser entre espécies e tipos de ligação.

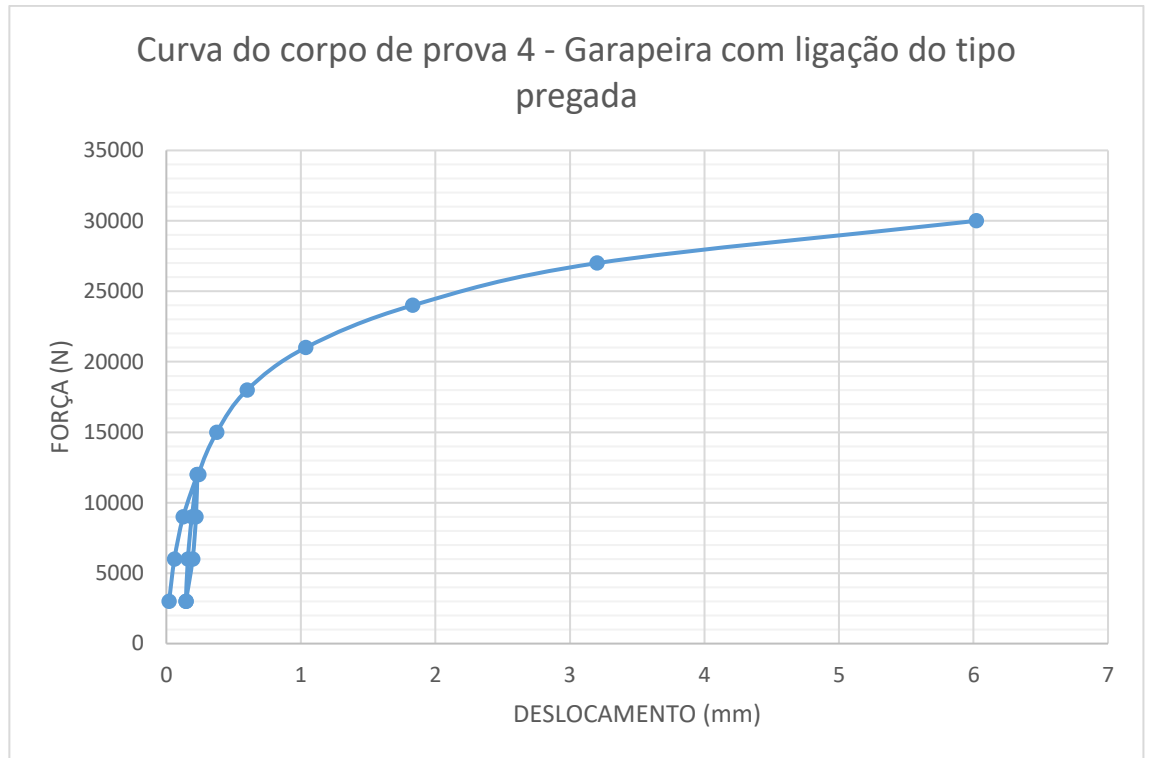


Gráfico 5 Curva do corpo de prova 4 – Garapeira com ligação do tipo pregada

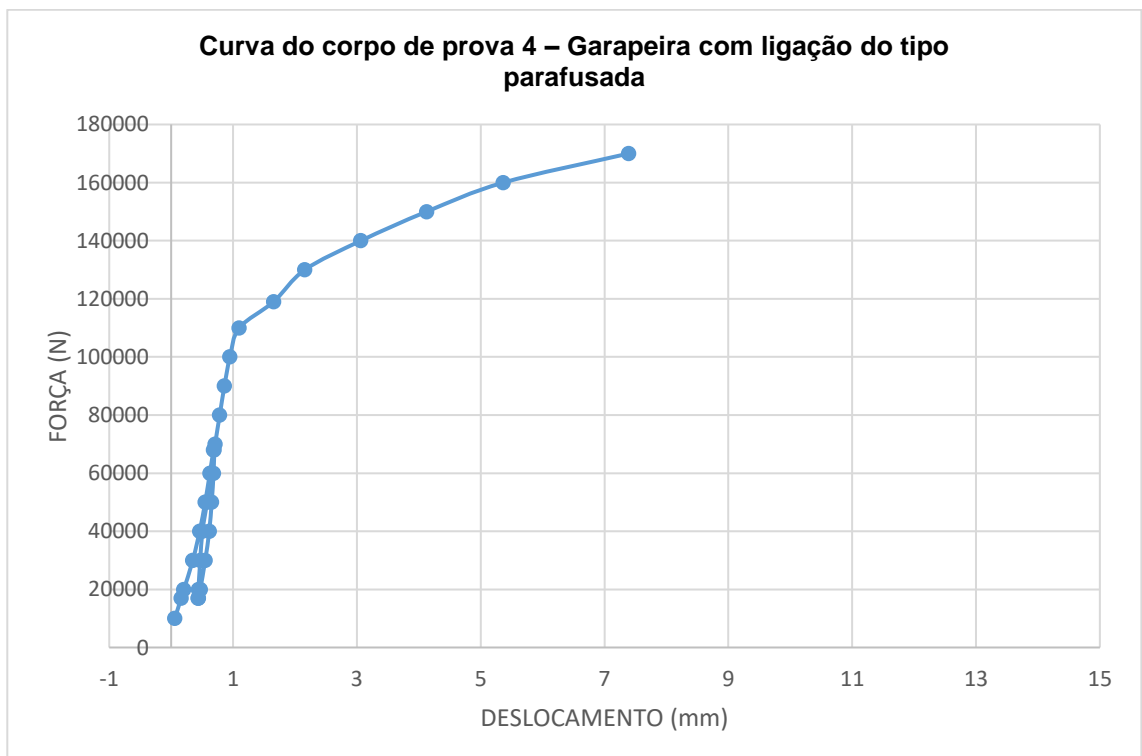


Gráfico 6 Curva do corpo de prova 3 – Garapeira com ligação do tipo parafusada

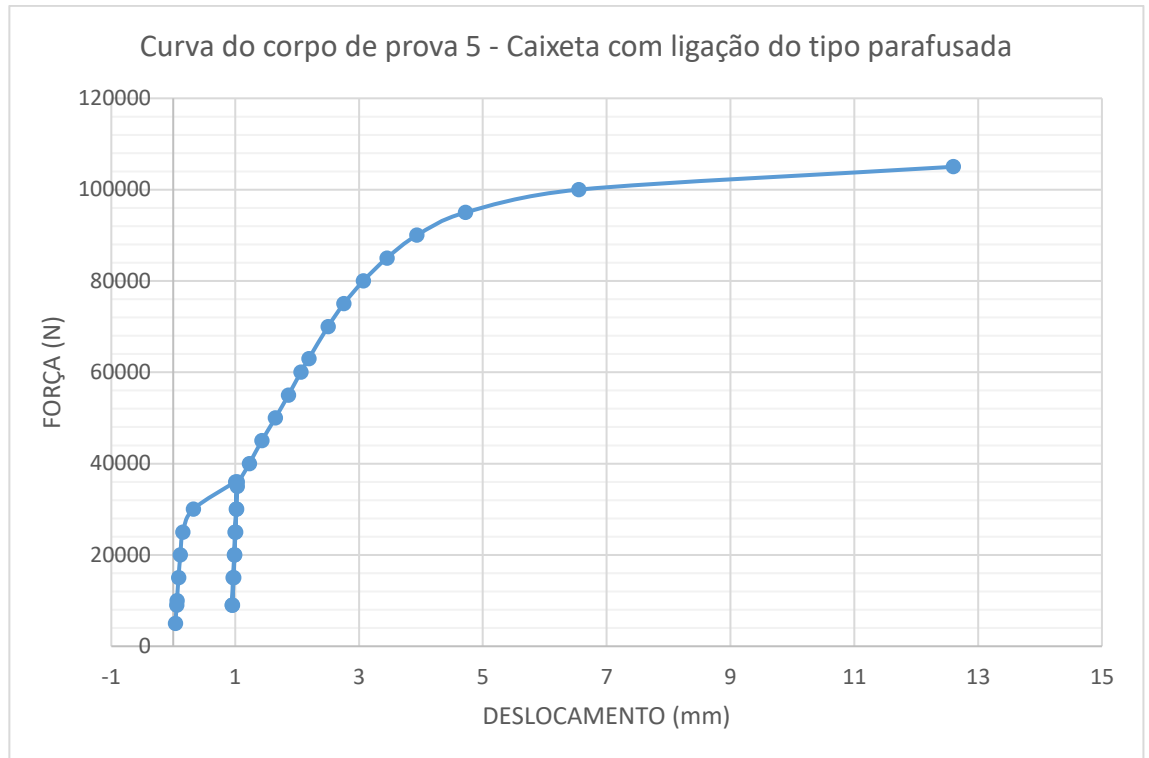


Gráfico 7 Curva do corpo de prova 5 – Caixaeta com ligação do tipo parafusada

Mesmo apresentando valores mais elevados da rigidez das ligações nos corpos de prova confeccionados com ligação do tipo parafusada, o coeficiente de variação entre as amostras foi relativamente alto, devido as condições de confecção dos corpos de prova, variação da folga e pré-furação. Diante disso os resultados apresentados nos corpos de prova de Garapeira com ligação do tipo pregada são satisfatórios e apresentam comportamento similar ao indicado na norma de ensaios EN 26891 (1991). Já para os corpos de prova de ligações parafusadas, nota-se um alto coeficiente de variação nos resultados experimentais, devido principalmente a folga entre o diâmetro do parafuso e o seu respectivo diâmetro de pré-furação.

Como sugestão, pode-se realizar ensaios em ligações parafusadas com pré-furação igual ao diâmetro do parafuso, de forma a reduzir o coeficiente de variação dos resultados experimentais e comprovar a concordância dos resultados com o modelo empírico proposto pelo CEN EUROCODE 5 (2004).

7 CONCLUSÕES

Com o objetivo de verificar se a metodologia utilizada no CEN EUROCODE 5 (2004), para obtenção da rigidez das ligações, se aplica aos parâmetros das madeiras nativas brasileiras, analisou-se os resultados obtidos e conclui-se que:

- As ligações confeccionadas com parafusos são mais rígidas que as ligações confeccionadas com pregos. Em corpos de prova confeccionados com a mesma espécie de madeira a Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e os dois tipos de ligações aqui citados, os corpos de prova de ligação do tipo parafusada apresentaram um resultado de rigidez das ligações média, em torno de 65,04% maior que os corpos de prova de ligação do tipo pregada.

- Os ensaios realizados nos corpos de prova de ligação do tipo pregada, apresentaram um coeficiente de variação relativamente baixo, em torno de 7,30%, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

- A equação empírica para cálculo da rigidez de ligação proposta pelo CEN EUROCODE 5 (2004), se mostrou adequada para ligações pregadas.

- O estudo da rigidez de ligações parafusadas não foi conclusivo devido a grande variabilidade dos resultados experimentais, causada possivelmente pela folga da ligação.

- Mais estudos devem ser realizados sobre rigidez de ligações parafusadas.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR ISO 6892 – Materiais Metálicos- Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2013.

BRANCO, Jorge M. G. **Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira – betão**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Especialização em Estruturas Geotecnia e Fundações– Universidade de Minho, Escola de Engenharia, Braga, Portugal, 2003.

BRANCO, Jorge M. ; CRUZ, Paulo J.S.; PIAZZA, Maurizio. **Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections**. Construction and Building Materials, Vol 23, p. 400-410. 2009.

CISER. **Arruelas:** catálogo de vendas. Disponível em: <
<http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/tabela-de-precos/br/linhas/aplicacoes-diversas/806.pdf>> . Acesso em: 05 Mai. 2017.

DA SILVA, Josué J.; GÓES, Jorge L. N. de. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES EM MADEIRA COM PARAFUSOS PASSANTES**. XV EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, Paraná. 9-11 Mai. 2015.

DEUSTCHES INSTITUT FÜR NURMING. **DIN 440 – Washers – With square hole, especially for timber construction**. Berlin, 2001.

EHLBECK, J.; LARSEN, H. J. **Eurocode 5 – Design of Timber Structures: Joints**. P.9-23, 1991.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN383: Timber Structures. Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners**. European Standard, Brussels, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN26891: Timber Structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for determination of strength and deformation.** Brussels, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures.** Brussels, 2008.

GERDAU. **Pregos:** catálogo de vendas. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-pregos-gerdau.pdf>>. Acesso em: 15 Jan. 2017.

GÓES, Jorge L. N. de. **Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I** 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia, São Carlos-SP, 2002.

GÓES, Jorge L. N. de. **Construções em Madeira.** 2015. 180 f. Notas de aula. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão-PR.

HETENYI, M. **Beams on elastic foundations.** University Press, Ann Arbor, Mich. 1946.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4016 – Product grade C.** Brussels, 2000.

JOHANSEN, K. W. **Theory of timber connections.** International association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 9. Zurich. 1949.

KREUNZINGER, H. **Mechanically jointed beams and columns.** Timber Engineering. Step 1, 1995.

KUENZI, E. W. **Theoretical design of a nailed or bolted joint under lateral load.** Report No. D1951, U.S. Forest Products Laboratory, Madison, Wis. 1955.

LARSEN, H. J. **The Yield load of bolted and nailed joints.** Proc., IUFRO-5 Conf., p. 646-654. 1973.

LE GOVIC, C. **Les assemblages dans la construction en bois.** Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, 1995.

MAIA, Bruna B. **Resistência de ligações pregadas em madeira**. 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

MASCIA, Nilson T.; SANTANA, Claudia L. de O.; CRAMER, Steven M. **Evaluation of Equivalent Slip Modulus of Nailed Connections for Application in Linear Analysis of Plywood Timber Beams**. *Materials Research*, Vol. 11, No. 2, 151-157, 2008.

PATTON-MALLORY, Marcia; PELLICANE, Patrick J.; SMITH, Frederick W. **Modeling bolted connections in wood: Review**. *Journal of Structural Engineering*.v.123, n.8,p. 1054-1062. Aug.,1997.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira**: Dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-americana NDS e Européia EUROCODE. 6. ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

STAMATO, Guilherme C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada**. 2002. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2002.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Máquina universal de ensaios**: site de vendas. Disponível em: < <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/emic-equipamentos-e-sistemas-de-ensaios-ltda/produtos/maquinas-ferramenta/maquina-universal-de-ensaio>>. Acesso em: 05 Mai. 2017.

SZÜCS, Carlos A.; TEREZO, Rodrigo F.; VALLE, Ângela do; MORAES, Poliana D. de. **Estruturas de Madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015. (Apostila).

VAN DYER, D. B. **Slip Modulus in Bolted Timber Joints**. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 19, No. 6, p. 960-964. 1992.

VONDER. **Parafuso sextavado 8.8, 12 mm x 120 mm, MA, rosca parcial, DIN 931, Vonder**. Site de vendas. Disponível em: <http://www.vonder.com.br/produto/parafuso_sextavado_88_12_mm_x_120_mm_m_a_rosca_parcial_din_931_vonder/2025>. Acesso em: 05 Mai. 2017.