

Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes

Experimental evaluation of strength in bolted timber joints

Jorge Luís Nunes de Góes
Josué da Silva Júnior

Resumo

As estruturas em madeira são uma alternativa importante à crescente demanda por sustentabilidade e diminuição do impacto ambiental por parte da indústria da construção civil. A capacidade de carga dessas estruturas é normalmente determinada pelas resistências das ligações entre os elementos que as compõem, sendo assim necessário o estudo profundo acerca do comportamento estrutural dessas ligações. Este trabalho tem por objetivo estudar diferentes modelos teóricos de cálculo para resistência de ligações por parafuso passante com porca e arruela em madeira, a citar, NBR 7190 e Eurocódigo 5. Além disso, foram conduzidos ensaios de resistência de ligação em corpos de prova normatizados, utilizando duas espécies diferentes de madeira, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). Os resultados experimentais obtidos mostram que o modelo da norma europeia é mais adequado que o modelo da norma brasileira, para o cálculo de resistência das ligações parafusadas.

Abstract

Wooden structures are an important alternative to growing demand for sustainability and reduced environmental impact from the construction industry. The carrying capacity of these structures is usually determined by the resistances of the connections between the elements that compose them, necessary to the deep study on the structural behavior of these connections. This paper presents to study different theoretical models of calculating resistance connections through bolt with nut and washer in timber, quote, NBR 7190 and Eurocode 5. Also it was conducted bond strength tests on standardized test specimens using two different species of wood, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) and Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). The experimental results show that the model of the European standard is more appropriate than the Brazilian standard model for calculating the resistance of bolted connections..

Palavras-chave: Ligações em madeira / Pinos metálicos / Estruturas de madeira / Parafuso passante

Keywords: Timber connections / Metallic pins / Timber structures / Bolt

Jorge Luís Nunes de Góes

Professor Doutor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Brasil
jgoes@utfpr.edu.br
jorgegoes01@gmail.com

Josué da Silva Júnior

Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal
do Paraná
Campo Mourão, Brasil
josue.juniorr@gmail.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

GOÉS, J. L. N. [et al.] – Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 7. ISSN 2183-8488. (julho 2018) 65-72.

1 Introdução

O uso da madeira em estruturas representa uma das mais promissoras soluções à urgente necessidade por sustentabilidade e diminuição da degradação ambiental pela indústria da construção civil, no entanto, a execução de grandes estruturas de madeira requer peças maciças com dimensões dificilmente encontradas. Para viabilização dessas estruturas, é necessário efetuar uniões compatíveis com as solicitações mecânicas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança.

A resistência da estrutura é normalmente determinada pela resistência das ligações, além disso, as dimensões dos elementos estruturais são muitas vezes determinadas pelo número e as características físicas do tipo de conector a ser usado.

As ligações com pinos metálicos são das mais utilizadas no Brasil, principalmente devido ao baixo custo e facilidade de execução. As ligações pregadas e parafusadas são exemplos de ligações por pinos metálicos.

O trabalho de maior destaque na área de ligações com pinos metálicos (pregos, parafusos passantes ou parafusos auto-atarraxantes) foi desenvolvido por Johansen [1]. O modelo proposto por Johansen deu origem ao que hoje é conhecido por EYM (European Yield Model), presente em várias normas, entre as quais, a norma europeia Eurocode 5 [2] e a brasileira NBR 7190 [3].

A metodologia especificada pela norma nacional para cálculo de resistência de ligações, apesar de ser baseada na teoria de Johansen, é simplificada e restrita a algumas configurações específicas de peças. Além disso, a norma não contempla alguns efeitos não lineares que possuem influência significativa na resistência final da ligação.

Assim, torna-se providencial um estudo comparativo entre os modelos analíticos de documentos normativos, nacionais e internacionais, bem como de resultados de ensaios experimentais, a fim de avaliar a adequação desses modelos para o dimensionamento de ligações parafusadas. Somando-se a isso, ressalta-se que atualmente a norma brasileira NBR 7190 [3] "Projeto de Estruturas de Madeira" está em fase de revisão e diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no país para subsidiar possíveis revisões no texto.

De acordo com *Timber Engineering. Step 1* [4], para as conexões comumente utilizadas, é feita uma distinção entre ligações de carpintaria (entalhes ou encaixes) e ligações mecânicas, que podem ser feitas a partir de diversos tipos de conectores. Ainda segundo *Step 1*, as ligações mecânicas tradicionais são divididas em dois grupos dependendo de como as forças são transmitidas entre os membros da ligação, são eles:

- *Metal dowel type fasteners*, onde o carregamento é transferido pela ação do elemento metálico de ligação. Neste tipo de ligação, o comportamento é regido pelos modos de falha propostos por Johansen, com pequenas adaptações para os diferentes tipos de conectores. Pregos, parafusos, pinos metálicos e grampos pertencem a esse grupo;
- *Bearing-type connectors*, onde o carregamento é transferido principalmente pela superfície próxima ao conector. Nestes casos a teoria de Johansen não se aplica. Os cálculos são geralmente determinados por tensões de cisalhamento e de

compressão na madeira. Chapas de dentes estampados (CDE) e anéis metálicos pertencem a esse grupo.

O modelo teórico desenvolvido por Johansen [1], que atualmente serve de base para a maioria dos documentos normativos nacionais e internacionais, foi desenvolvido apenas para ligações com pinos metálicos. Os pinos metálicos podem ser classificados em *nails*, que são os pregos, *dowels*, que são barras de aço lisas do diâmetro do furo ajustados, *bolts*, que são os parafusos sextavados com porcas e arruelas ou do tipo francês, e *screws*, que são os parafusos autoatarraxantes.

Os parafusos passantes, *bolts*, atravessam as peças a serem unidas passando livremente nos furos. Possuem cabeça hexagonal ou semiesférica e diâmetros variados de até 30 mm. De acordo com a necessidade do projeto, além das porcas, podem utilizar arruelas e contraporcas como acessórios. Os parafusos são especificados segundo a norma ISO 4016 [5], que define a geometria dos parafusos, e a norma ISO 898-1 [6] define as características do aço empregado no parafuso.

Os parafusos especificados segundo as normas ASTM A325a, ASTM A307 e ASTM A490 são, de um modo geral curtos, utilizados em estruturas metálicas, onde os elementos conectados possuem seções transversais esbeltas, quando comparadas com as ligações de madeira. Os valores mínimos de resistência ao escoamento e da resistência a ruptura, de acordo com as normas, estão indicados na Tabela I.

Os parafusos especificados pela norma ISO 4016 [5], bem como as porcas especificadas pela norma ISO 4034 [7] estão indicados na Tabela II. Apesar de existirem no mercado parafusos com diâmetro inferior a 10 mm, a norma NBR 7190 [3] não permite o uso dos mesmos.

As arruelas para parafusos em estruturas de madeira são especificadas segundo a norma DIN 440 [8], sendo DIN 440R para arruelas redondas com furo central redondo e DIN 440V para arruelas redondas com furo central quadrado. As arruelas quadradas são especificadas pela norma DIN 436 [9].

Tabela I Materiais usados em parafusos

Especificação	f_y MPa	f_u MPa
ASTM A307	–	415
ISO 4016 Classe 4.6	235	400
ASTM A325 ^a	635	825
	560	725
ISO 4016 Classe 8.8	640	800
ASTM A490	895	1035
ISO 4016 Classe 10.9	900	1000

^a Disponíveis também com resistência à corrosão atmosférica comparável à dos aços AR 350 COR ou à dos aços ASTM A588.
 Fonte: Adaptado de NBR 8800 [10].

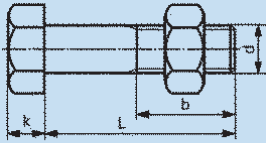
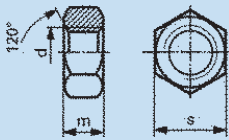
1.1 Modelo analítico do Eurocode 5 [2]

O modelo analítico para o dimensionamento de ligações parafusadas da norma europeia advém do modelo proposto por Johansen, com acréscimo de fatores que levam em consideração fenômenos como o atrito entre as peças de madeira e também o efeito de corda. O valor da capacidade da ligação deve ser o menor dentre as equações que regem os diferentes modos de falha.

A Tabela III apresenta os possíveis modos de falha para ligações com apenas um plano de corte e as suas respectivas equações. A Tabela IV mostra as equações e respectivos modos de falha para ligações em corte duplo. Para mais de duas seções de corte o EC5 [2] recomenda que sejam utilizadas as equações da Tabela IV, e o valor da força característica (F_v, R_k) seja multiplicado pelo número de seções de corte da ligação.

O modo de falha Ia e Ib é caracterizado pelo embutimento do pino metálico na madeira, sem a ocorrência de giro ou deformação do

Tabela II Dimensões dos parafusos segundo ISO 4016 e porcas segundo ISO 4034

	d	M10	M12	M16	M20	M24
	s	17	19	24	30	36
	k	6.4	7.5	10	12.5	15
	b (L = 125)	26	30	38	46	54
	b (L > 125)	32	36	44	52	60
	b (L > 200)	45	49	57	65	73
	m_{min}	8	10.4	14.1	16.9	20.2
	m_{max}	9.5	12.2	15.9	19	22.3
	s	16	18	24	30	36

Valores indicados em mm.
 Fonte: Adaptado de ISO 4016 [5] e ISO 4034 [7].

Tabela III Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações com uma seção de corte

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado
(Ia)	$F_{v,k1} = f_{ek1} t_1 d$ (1)
(Ib)	$F_{v,k2} = f_{ek1} t_2 d \beta$ (2)
(Ic)	$F_{v,k3} = \frac{f_{ek1} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (3)
(IIa)	$F_{v,k4} = 1,05 \frac{f_{ek1} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,k}}{f_{ek1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (4)
(IIb)	$F_{v,k5} = 1,05 \frac{f_{ek1} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,k}}{f_{ek1} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (5)
(III)	$F_{v,k6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{ek1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (6)

$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos seis modos de falha

Tabela IV Modos de falha e equações para o dimensionamento de ligações com duas seções de corte

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por parafuso utilizado
(Ia)	$F_{v,k1} = f_{ek1} t_1 d$ (7)
(Ib)	$F_{v,k2} = 0,5 f_{ek1} t_2 d \beta$ (8)
(II)	$F_{v,k3} = 1,05 \frac{f_{ek1} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,k}}{f_{ek1} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (9)
(III)	$F_{v,k4} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{ek1} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$ (10)

$F_{v,Rk}$ é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha

pino, já no modo de falha Ic o embutimento do pino na madeira ocorre devido ao giro do parafuso, ainda sem deformação do mesmo. No modo de falha IIa e IIb há ocorrência de embutimento da madeira e também deformação do parafuso com a ocorrência de uma rótula plástica. O modo de falha III é caracterizado pela deformação do parafuso com a ocorrência de duas rótulas plásticas.

Nas Tabelas III e IV, $F_{v,Rk}$ é a força característica da ligação por plano de corte para cada parafuso; t_1 e t_2 são as espessuras dos elementos de madeira; d é o diâmetro do parafuso; $f_{e,k1}$ e $f_{e,k2}$ são as resistências ao embutimento das madeiras dos elementos 1 e 2 respectivamente; β é a relação entre as resistências ao embutimento dos elementos 1 e 2, segundo a Equação (11); e $M_{y,k}$ é o momento plástico característico do parafuso definido empiricamente pela Equação (12).

$$\beta = \frac{f_{e,k2}}{f_{e,k1}} \quad (11)$$

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (12)$$

O valor $F_{ax,Rk}$ é a contribuição do efeito de corda, calculado pelo menor valor dentre a resistência de tração do pino e a resistência ao embutimento da arruela na madeira, respectivamente. Além disso, a norma limita o valor do efeito de corda a 25% da parcela de Johansen, para parafusos passantes com porcas e arruelas.

A norma europeia também leva em consideração o acréscimo de resistência nos modos de falha II e III, devido ao atrito entre as peças, induzido pelos coeficientes 1,05 e 1,15, no início das equações.

1.2 Modelo analítico da NBR 7190 [3]

O modelo analítico da norma brasileira advém do modelo formulado por Johansen, admitindo certas simplificações, como por exemplo, apenas um valor de resistência de embutimento, espessura simétrica dos elementos de madeira e dois modos de falha distintos caracterizados como modo de falha por embutimento do pino na ligação e modo de falha por flexão do parafuso.

De acordo com a NBR 7190 [3], a resistência total de um pino de ligação é dada pela soma das resistências correspondentes às suas diferentes seções de corte. As equações servem tanto para o caso de corte simples como para os casos de corte duplo ou múltiplas seções de corte. Para uma seção de corte é levada em consideração a resistência ao embutimento de cálculo do parafuso na madeira (f_{ed}), a resistência ao escoamento de cálculo do aço do parafuso (f_{yd}), o diâmetro do parafuso (d) e a espessura convencional (t), sendo considerado o menor valor entre t_1 e t_2 , conforme exposto na Figura 1.

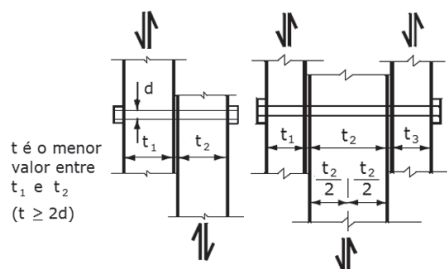


Figura 1 Ligações parafusadas em corte simples e corte duplo

Para a determinação da resistência máxima de cálculo da ligação (R_d) é necessário determinar os parâmetros β e β_{lim} , conforme Equações (13) e (14).

$$\beta = t \cdot d \quad (13)$$

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{y,d}}{f_{e,d}}} \quad (14)$$

Quando $\beta \leq \beta_{lim}$ a norma brasileira indica que o modo de falha é caracterizado por embutimento do parafuso na madeira e a força resistente de cálculo deve ser calculada segundo a Equação (15).

$$R_d = 0,40 \cdot t \cdot d \cdot f_{e,d} \quad (15)$$

Para os casos em que $\beta > \beta_{lim}$ o modo de falha é caracterizado por flexão do parafuso e a força resistente de cálculo da ligação deve ser calculada pela Equação (16).

$$R_d = 0,625 \cdot \frac{d^2}{\beta_{lim}} \cdot f_{y,d} \quad (16)$$

A resistência total da ligação é determinada multiplicando o valor R_d pelo número de parafusos da ligação e pelo número de seções de corte de cada parafuso.

2 Metodologia

Para a investigação experimental foram confeccionados corpos de prova de ligação normatizados segundo NBR 7190 [3] – Projeto de Estruturas de Madeira (Anexo C: Determinação de resistências das ligações mecânicas das estruturas de madeira), que define o comprimento da base de medida mínimo de acordo com a Equação (17). Os espaçamentos entre pinos foram determinados atendendo as exigências mínimas presentes na norma, representadas na Figura 2.

$$L_o = 2 \cdot (7 \cdot d) + n \cdot (a) \quad (17)$$

onde:

L_o é o comprimento da base de medida, em milímetros;

d é o diâmetro do pino, em milímetros;

n é o número de espaçamentos entre os pinos segundo a direção paralela ao esforço;

a é o espaçamento entre pinos, medido de eixo a eixo na direção paralela ao esforço, em milímetros.

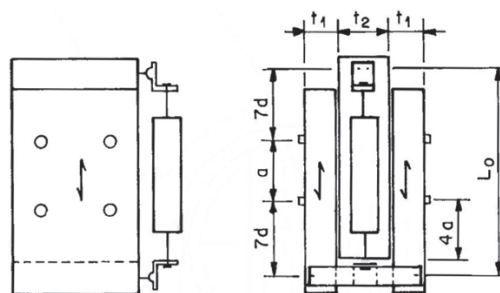


Figura 2 Corpo de prova para ensaio de ligações mecânicas
 Fonte: Adaptado NBR 7190 [3]

Os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão (UTFPR) a partir de dois lotes de madeira de espécies diferentes, a citar, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), escolhidas por representarem classes de resistência e densidade distintas. A madeira para fabricação dos corpos de prova foi extraída aleatoriamente do lote a ser investigado, 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 de acordo com as exigências da norma NBR 7190 [3] – Anexo C.

Os pinos utilizados foram parafusos sextavados de rosca parcial com diâmetro de 12 mm (M12) produzidos em aço estrutural ISO 4016 Classe 8.8 especificado segundo a norma ISO 4016 [5]. As arruelas utilizadas possuíam diâmetro interno (d_1) igual a 13,5 mm e diâmetro externo (d_2) igual a 44,0 mm, especificadas segundo a norma DIN 440R [8].

Foram confeccionados seis corpos de prova de cada espécie, de acordo com a exigência mínima para caracterização da resistência de uma ligação segundo a NBR 7190 [3] – Anexo C. As dimensões adotadas para a confecção estão representadas na Figura 3. Algumas medidas foram padronizadas acima do mínimo especificado em norma.

As espessuras “t” das peças foram estabelecidas conforme item 8.3.4 da NBR 7190[3] sendo utilizada a espessura padrão de 25 mm para as cobrejuntas. As peças centrais foram construídas com o dobro da espessura das respectivas cobrejuntas.

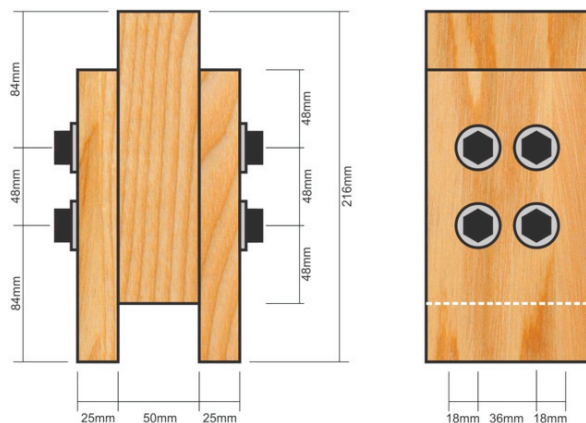


Figura 3 Dimensões dos corpos de prova deste trabalho

Para a caracterização das peças de madeira utilizadas, foram realizados ensaios a fim de determinar a sua resistência à compressão e ao embutimento, ambos na direção paralela às fibras. Os ensaios de compressão paralela foram feitos segundo a metodologia da norma NBR 7190 [3] – Projeto de Estruturas de Madeira (Anexo B: Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas). Para a determinação da força de embutimento foram realizados ensaios de acordo com a metodologia da norma europeia EN 383 [11].

A caracterização da resistência da madeira à compressão paralela às fibras foi realizada seguindo o procedimento descrito em NBR 7190

[3] – Anexo B, sendo determinada neste ensaio apenas a resistência à compressão da madeira. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC DL30000, do Laboratório de Sistemas Estruturais, aplicando-se carregamento monotônico e crescente, com uma taxa de 10 MPa/min, até atingir a força máxima de ruptura do corpo de prova.

2.1 Procedimentos gerais dos ensaios de ligações

A numeração dos corpos de prova, nas duas séries de ensaios, foi feita utilizando um primeiro número, com um ou dois algarismos, para indicar a numeração sequencial das amostras de corpos de prova e, em seguida e entre parênteses, uma letra que indica a espécie de madeira. Os primeiros corpos de prova, para cada tipo de pino, foram utilizados para a determinação da força limite e, portanto, não aparecem nas tabelas de resultados. As letras G e C correspondem, respectivamente, às espécies Garapeira e Caixeta.

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, utilizando-se quatro pinos e duas seções de corte.

Para as leituras das medidas de deslocamentos relativos, foram utilizados relógios comparadores com sensibilidade de 0,01 mm, montados em dispositivos de cantoneira metálica, colocados nas duas faces laterais dos corpos de prova, conforme Figura 4. Os deslocamentos foram medidos em relação a uma base de medida com comprimento L_0 definido pela Equação (17).



Figura 4 Corpo de prova com relógios comparadores

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC DL30000 de acordo com a norma EN 26891 [12]. Segundo a norma, atingindo-se os 40% da força estimada (F_{est}), com um incremento de carga de $0,2 F_{est}$ por minuto, esta carga deve ser mantida por 30 segundos. Após este período, deve-se proceder à descarga, mantendo o valor do incremento de carga anterior, agora negativo, até aos 10% de F_{est} , os quais devem ser mantidos por mais 30 segundos. Sucede então outro carregamento, ainda com o mesmo incremento, até aos 70% de F_{est} . Acima deste valor, o incremento deve ser tal que a ruptura seja alcançada ao fim de 3 a 5 minutos. Assim, o período de tempo destes ensaios deve situar-se nos 10 a 15 minutos. O diagrama de carregamentos adotados está representado na Figura 5.

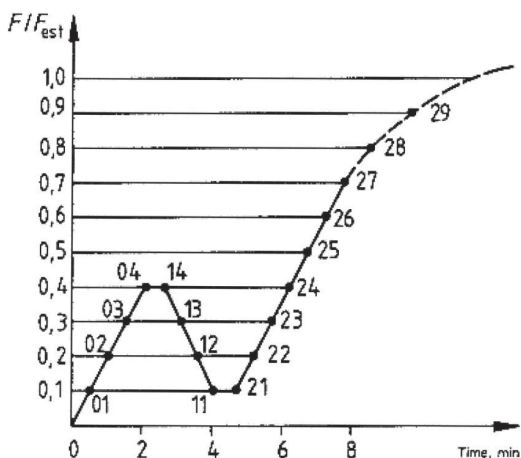


Figura 5 Procedimento de carga Fonte: Adaptado EN 26891 [12]

3 Resultados e discussões

A Tabela V apresenta os resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais empregados na pesquisa, com os respectivos valores médios, número de corpos de prova e coeficiente de variação. Esses ensaios de caracterização foram realizados nas mesmas condições de umidade dos ensaios de ligações.

Tabela V Resultados dos ensaios preliminares de caracterização dos materiais

Propriedade	Garapeira	Caixeta	Parafuso
U	13,51% (8CP) CV = 1,82%	13,51% (8CP) CV = 2,47%	-
$\rho_{12\%}$	740 kg/cm ³ (8CP) CV = 1,39%	410 kg/cm ³ (8CP) CV = 2,57%	-
$f_{c,m}$	57,8 MPa (6CP) CV = 12,7%	29,2 MPa (6CP) CV = 3,9%	-
$f_{e,m}$	90,6 MPa (7CP) CV = 9,8%	28,4 MPa (8CP) CV = 6,6%	-
$f_{u,m}$	-	-	872,5 MPa (3CP) CV = 1,2%

Os resultados dos ensaios preliminares foram utilizados para alimentar os modelos analíticos da norma brasileira e europeia e obter os valores de resistência máxima teórica da ligação, por esse motivo não foram corrigidos para valores padrão de umidade de 12%. A Tabela VI e o Gráfico 1 apresentam os resultados das simulações teóricas, bem como os resultados dos ensaios de ligação conduzidos conforme descritos anteriormente.

Ressalta-se que para efeito de comparação entre os resultados experimentais da capacidade das ligações as simulações dos modelos analíticos foram realizadas também com valores médios. Não foram utilizados quaisquer coeficientes de modificação e coeficientes de minoração das resistências tanto para o modelo da NBR como para o modelo do EC5.

Tabela VI Comparação de resistência da ligação teórica e experimental

	NBR	EC5 (sem efeito de corda)	EC5 (com efeito de corda)	Exp.
Resistência média Ligação Garapeira	86,96 kN	124,08 kN	153,53 kN	177,76 kN (6CP) CV = 5,2%
Resistência média Ligação Caixeta	27,24 kN	63,18 kN	78,22 kN	108,5 kN (6CP) CV = 2,7%

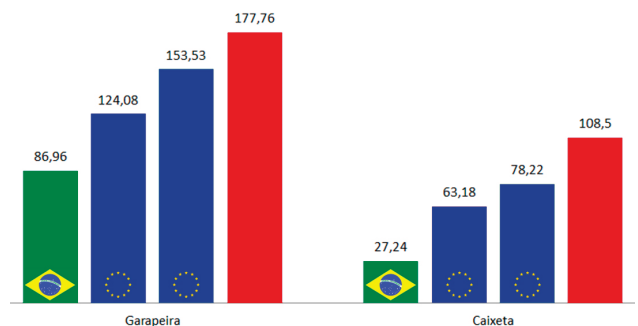


Gráfico 1 Comparação de resistência da ligação teórica e experimental

Observando os valores apresentados a Tabela VI é possível destacar a grande diferença entre os resultados do modelo analítico da norma brasileira, para o resultado experimental, sendo 51,08% para a espécie Garapeira e 74,89% para a espécie Caixeta.

Os resultados das simulações utilizando o modelo analítico da norma europeia são mais coerentes com os resultados experimentais atingindo, para a madeira Garapeira, diferenças da ordem de 30,19% a 13,63%, sem o uso da parcela do efeito de corda e considerando a parcela, respectivamente.

4 Conclusões

O claro entendimento do comportamento das ligações é essencial para a implantação de métodos eficientes de cálculos estruturais, além disso, os recentes estudos acerca de outros fatores que influenciam o comportamento das ligações são de grande valia

para as futuras revisões de documentos normativos. Com base nos resultados obtidos na pesquisa, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- O modelo simplificado na norma brasileira produz resultados de força máxima da ligação consideravelmente inferiores aos experimentais para ambas as espécies estudadas.
- O modelo analítico da norma europeia promove valores superiores de força máxima da ligação, se aproximando dos resultados experimentais, principalmente quando considerado o efeito de corda.
- Os resultados dos ensaios de embutimento demonstraram a necessidade de mais investigações sobre o assunto, pois para a espécie de baixa densidade Caixeta a resistência ao embutimento foi similar à resistência a compressão paralela, como recomenda a norma brasileira, mas no caso da espécie Garapeira houve uma grande discrepância entre os resultados.

Mais trabalhos devem ser realizados com o intuito de investigar a adequação do modelo analítico proposto pela norma europeia, para diferentes geometrias de ligação, diâmetros de parafusos, bem como diferentes espécies de madeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) através do Programa de Educação Tutorial (PET) desenvolvido pelo Ministério da Educação (MEC) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Campo Mourão pela disponibilização de equipamentos e infraestrutura necessários para a realização desse trabalho.

Referências

- [1] Johansen, K. W. – *Theory of timber connections*. International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich. Vol. 9, 1949.
- [2] European Committee for Standardization – EUROCODE 5: Design of Timber Structures. Brussels, 2008.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 107 p., 1997.
- [4] *Timber Engineering – Step 1. Basis of design, material properties, structural components and joints*. Holanda: Centrum Hout, 1995.
- [5] International Organization for Standardization – ISO 4016 – Product grade C. Brussels, 2000.
- [6] European Committee for Standardization – EN ISO 898-1 – Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs. Brussels, 1999.
- [7] International Organization for Standardization – ISO 4034 – Hexagon Regular Nuts. Brussels, 2012.
- [8] Deustches Institut für Nurning – DIN 440 – Washers – With square hole, especially for timber construction. Berlin, 2001.
- [9] Deustches Institut für Nurning – DIN 436 – Square washers for use in timber constructions. Berlin, 1990.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 8800: Projeto estruturas de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] European Committee for Standardization – EN383: Timber Structures. Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners. European Standard, Brussels, 1993.
- [12] European Committee for Standardization – EN26891: Timber Structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for determination of strength and deformation. European Standard, Brussels, 1991.