

## CRITÉRIOS NORMATIVOS PARA DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES POR PARAFUSOS PASSANTES: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROTÓTIPOS

**Antônio Alves Dias<sup>1</sup>** (dias@sc.usp.br); **João Vitor Kochinski Trevisan<sup>(2)</sup>**  
(joao.trevisan@usp.br); **Felipe Penazzo Johanns<sup>3</sup>** (felipepj@usp.br)

<sup>1,2,3</sup> Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo

### Resumo

A revisão da norma brasileira ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) se encontra em fase final, tendo sido feitas alterações significativas nos critérios de dimensionamento de ligações. No caso de parafusos passantes submetidos a corte duplo para forças aplicadas na direção paralela às fibras, nota-se um aumento da resistência obtida a partir dos critérios de dimensionamento propostos, baseados na norma europeia EUROCODE 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004), em comparação aos da norma vigente. O objetivo deste trabalho foi comparar os resultados obtidos experimentalmente comparando-os com os calculados a partir dos critérios das duas versões da norma. Nos testes foram utilizadas duas espécies: Roxinho (*Peltogyne* spp.), de alta densidade, e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), de baixa densidade. Os parafusos foram confeccionados a partir de barras de aço SAE 1020, com diâmetros iguais a 10 mm e 16 mm. Os testes, realizados de acordo com o projeto de norma ABNT PN02:126.10-001-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), denominada “Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos em estruturas de madeira”, foram feitos em corpos de prova com 4 parafusos em corte duplo. As espessuras nominais das peças de madeira foram 50 mm (peça central) e 25 mm (peças laterais), e a força foi aplicada na direção paralela às fibras da madeira. Para cada espécie de madeira e diâmetro de parafuso foram feitos 12 ensaios, sendo metade sem o uso de porcas e arruelas, totalizando 48 corpos de prova. Os valores calculados com os critérios propostos na proposta de revisão da norma tiveram melhor concordância com os resultados experimentais do que os critérios da norma vigente.

Palavras-chave: Parafusos passantes. Ligações em madeira. Critérios de dimensionamento de ligações.

### Abstract

The revision of the Brazilian standard ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) is finishing, and significant changes have been made in the design criteria of joints. In the case of bolts subjected to double shear for forces applied in the direction parallel to the grain, there is a large increase in load carrying capacity obtained from the proposed design criteria, which are based on EUROCODE 5 EUROCODE 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004), compared to the current standard. The objective of this work was to compare the results



Encontro Brasileiro  
em Madeiras e em  
Estruturas de Madeira

8 A 10 DE MARÇO DE 2021 | FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA

obtained experimentally with those calculated from the criteria of the two versions of the Brazilian standards. In the tests, two species were used: Roxinho (*Peltogyne* spp.), with high density, and Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), with low density. The bolts were made from SAE 1020 steel bars, with diameters of 10 mm and 16 mm. The tests, carried out according to the standard project ABNT PN02:126.10-001-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), named “Test Method for the determination of strength and stiffness of joints with mechanical fasteners in timber structures”, were made in specimens with 4 bolts in double shear. The nominal thicknesses of the wood pieces were 50 mm (center piece) and 25 mm (side pieces), and the force was applied in the direction parallel to the grain. For each species and for each screw diameter, 12 tests were made, half without the use of nuts and washers, totaling 48 specimens. Values calculated with the criteria of the proposed revision of the standard had better agreement with the experimental results than the criteria of the current standard.

Keywords: Bolts. Timber connections. Design criteria of connections.

## 1 Introdução

Com a implementação do texto da norma ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) baseada nos conceitos do Método dos Estados Limites, observou-se um aumento do número de parafusos nas ligações, em relação à versão anterior, de 1982. Ao se estabelecer a Comissão de Estudos para o processo de revisão do texto da norma vigente, um dos aspectos analisados foi a alteração dos critérios de dimensionamento das ligações. A opção escolhida foi basear os critérios de dimensionamento de ligações no texto da norma europeias EUROCODE 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004), por se tratar de um documento normativo cuja utilização está bem sedimentada.

A proposta deste trabalho foi avaliar os critérios propostos no texto da revisão de norma, em comparação aos da norma vigente, por meio de avaliação experimental de protótipos de ligações com parafusos passantes, em corte duplo, para duas situações: com porcas e arruelas e sem. Foram escolhidas duas espécies provenientes da floresta tropical (folhosas), uma delas com alta densidade e a outra com baixa densidade: Roxinho (*Peltogyne* spp) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), respectivamente.

## 2 Revisão de literatura

O critério da norma vigente ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) especifica que a resistência da ligação por pinos metálicos, nos quais se enquadra o parafuso passante, deve ser calculada em função dos parâmetros  $\beta$  e  $\beta_{lim}$ , mostrados na Equação 1 e na Equação 2, respectivamente. Nessas equações,  $t$  é o menor valor entre a metade da espessura da peça central e a espessura da peça lateral,  $d$  é o diâmetro do parafuso,  $f_{yd}$  é o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço e  $f_{cd}$  é o valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira.

$$\beta = \frac{t}{d} \quad (1)$$

$$\beta_{\text{lim}} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ed}}} \quad (2)$$

Quando  $\beta \leq \beta_{\text{lim}}$ , o modo de ruptura da ligação é o embutimento, e o valor de cálculo da resistência de uma seção de corte é determinado pela Equação 3. Para o caso em que  $\beta > \beta_{\text{lim}}$ , o modo de ruptura da ligação é a flexão do pino metálico e a resistência de uma seção de corte pode ser determinada pela Equação 4. O valor de cálculo da resistência da madeira ao embutimento pode ser obtido experimentalmente ou estimado em função do valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,d}$ ).

$$R_{vd,1} = 0,40 \frac{t^2}{\beta} f_{ed} \quad (3)$$

$$R_{vd,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{\text{lim}}} f_{yd} \quad (4)$$

Esses critérios da norma vigente, no caso de parafusos passantes, foram alvo de críticas por alguns autores. Oliveira (2001) concluiu que, quando o modo de ruptura é o embutimento na madeira, os resultados experimentais da resistência da ligação são superiores aos calculados segundo o critério da norma brasileira vigente, sendo os dois valores da resistência calculados com base na deformação residual de 2%. Também salientou que a norma brasileira é a única a considerar uma deformação residual de 2% para calcular tanto a resistência ao embutimento como a resistência da ligação, fazendo com que os valores da resistência da ligação sejam menores do que calculados em outros documentos normativos.

Dias *et al.* (2014) indicaram que, quando o modo de ruptura é por embutimento e para valores menores do parâmetro “ $\beta$ ” da ligação, existe uma grande diferença entre os valores calculados por outros documentos normativos e os valores experimentais.

O projeto de revisão PN02:126-10 REVISÃO ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), em fase de conclusão, baseou seus critérios de dimensionamento de ligações por parafusos passantes na norma europeia EUROCODE 5 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). O modelo de cálculo utilizado pela norma europeia para estimar a capacidade de carga da ligação de parafusos passantes é fundamentado na teoria desenvolvida inicialmente por Johansen (1949), definindo quatro possíveis modos de ruptura associados à situação de corte duplo. Assim, a capacidade de carga da ligação por plano de corte ( $F_{v,Rk}$ ) pode ser obtida por meio da Equação 5, em que os casos (a) e (b) representam o esgotamento da capacidade resistente da ligação ocasionado pelo embutimento do parafuso nas peças de madeira, e os casos (c) e (d) são associados à flexão do parafuso metálico.

$$F_{v,Rk} = \text{mín} \begin{cases} f_{e,1,k} t_1 d & \text{(a)} \\ 0,5 f_{e,2,k} t_2 d & \text{(b)} \\ 1,05 \frac{f_{e,1,k} d t_1}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2 \beta (1 + \beta) + \frac{4 \beta (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{e,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(c)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2 \beta}{(1 + \beta)}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{e,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(d)} \end{cases} \quad (5)$$

Em que:

- $f_{e,1,k}$ : resistência ao embutimento das peças externas;
- $f_{e,2,k}$ : resistência ao embutimento da peça interna;
- $t_1$ : espessura das peças externas;
- $t_2$ : espessura da peça interna;
- $d$ : diâmetro do parafuso passante;
- $\beta$ : parâmetro adimensional dado pela razão entre as resistências ao embutimento das peças de madeira interna e externas;
- $M_{y,Rk}$ : momento resistente do parafuso passante.

De acordo com Porteous e Kermani (2007), nos casos (c) e (d) da Equação 5, o primeiro termo da equação representa a capacidade de carga da ligação estimada pela teoria de Johansen (1949), com acréscimos de 5% e 15% relativos ao atrito gerado após a rotação do parafuso. O segundo termo, por sua vez, representa um efeito de segunda ordem denominado efeito de corda, e a resistência ao arrancamento do pino metálico ( $F_{ax,Rk}$ ) pode ser obtida por meio da Equação 6. Destaca-se, ainda, que a norma europeia estabelece limites para a representatividade do efeito de corda sobre a capacidade de carga da ligação que, no caso de parafusos passantes, não deve ser superior a 25% do valor obtido na primeira parcela.

$$F_{ax,Rk} = \text{mín} \begin{cases} f_{u,k} A_p \\ 3 f_{c,90,k} A_c \end{cases} \quad (6)$$

Em que:

- $f_{u,k}$ : resistência à tração última do parafuso;
- $f_{c,90,k}$ : resistência à compressão da madeira na direção perpendicular às fibras;
- $A_p$ : área da seção transversal do parafuso;
- $A_c$ : área de contato entre a arruela e a peça de madeira.

O valor do momento resistente do parafuso é dado pela Equação 7:

$$M_{yR,k} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} \quad (\text{unidades em N e mm}) \quad (7)$$

No que diz respeito ao efeito de corda, Silva Jr. e Góes (2016) ensaiaram protótipos de ligações entre peças de madeira realizadas por meio de parafusos passantes com 12 mm de diâmetro observando que o processo de cálculo proposto pela norma europeia foi o que melhor estimou a capacidade de carga da ligação.

### 3 Materiais e métodos

As espécies escolhidas foram Roxinho (*Peltogyne spp.*) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), por se tratarem de duas espécies com grande diferença de densidade. Para cada espécie foram utilizadas seis peças de madeira, numeradas de 1 a 6 em cada espécie. Cada peça de madeira foi caracterizada quanto à resistência à compressão paralela às fibras, à densidade e ao teor de umidade, de acordo com os procedimentos do Anexo B da ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), utilizando três corpos de prova para cada peça e tipo de ensaio.

Para cada peça de madeira, três corpos de prova foram ensaiados ao embutimento na direção paralela às fibras. Esses testes foram realizados de acordo com as prescrições da EN 383:2007, para os diâmetros de parafuso utilizados, 10 mm e 16 mm, e a espessura nominal foi tomada igual a 2d. Na Figura 1 está ilustrado um ensaio de embutimento, para a espécie Marupá. O deslocamento relativo foi obtido com relógio comparador com resolução de 0,01 mm. A força máxima ( $F_{max}$ ) é definida como o menor valor entre a força que provoca embutimento igual a 5 mm ou a força última. A resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) é a razão entre  $F_{max}$  e a área de embutimento ( $t \times d$ ).

Os parafusos utilizados nos ensaios de embutimento e para a confecção dos protótipos das ligações foram obtidos a partir de barras de aço SAE 1020 (resistência ao escoamento  $f_y = 470$  MPa; resistência última  $f_u = 564$  MPa), com diâmetros ( $d$ ) iguais a 10 mm e 16 mm. Os diâmetros externo e interno das arruelas utilizadas foram iguais a 25 mm e 10,5 mm (para  $d=10$ mm), e 38 mm e 17 mm (para  $d = 16$  mm).

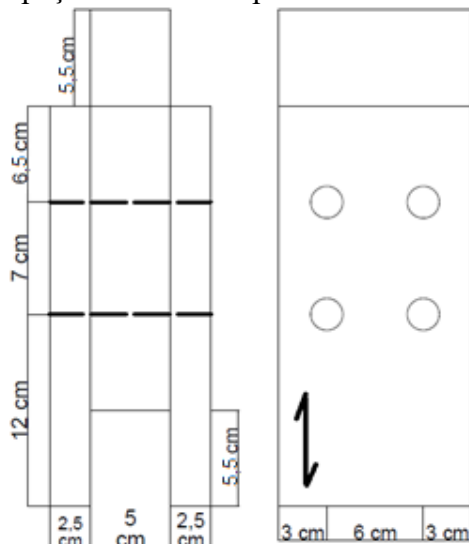
Figura 1 – Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras



Fonte: autores.

Na Figura 2 estão mostradas as dimensões dos protótipos e os espaçamentos entre os parafusos e as bordas, que foram iguais para todos os tipos de protótipos, obedecendo aos espaçamentos mínimos da ABNT NBR7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). As dimensões nominais das peças são 50 mm x 120 mm x 255 mm (central) e 25 mm x 120 mm x 255 mm (laterais).

Figura 2 – Espaçaamentos entre parafusos e as bordas das peças



Fonte: autores.

Foram montados e testados 48 protótipos de ligações, todos ensaiados com força aplicada na direção paralela às fibras. De cada peça de madeira foram feitos quatro protótipos, com as seguintes denominações e características:

- d = 10 mm-SEM: quatro parafusos (d = 10 mm); sem porcas e arruelas;
- d = 10 mm-COM: quatro parafusos (d = 10 mm); com porcas e arruelas;
- d = 16 mm-SEM: quatro parafusos (d = 16 mm); sem porcas e arruelas;
- d = 16 mm-COM: quatro parafusos (d = 16 mm); com porcas e arruelas.

Um protótipo de ligação, confeccionado a partir da espécie de madeira Roxinho e parafusos com 16 mm de diâmetro com porcas e arruelas, pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Protótipo da ligação de Roxinho - parafusos de 16 mm com porcas e arruelas



Fonte: autores.

Na Figura 4 está mostrado o aparato utilizado em dois testes de protótipo (com porcas e arruelas e sem). Os testes foram realizados de acordo com o projeto de norma ABNT PN02:126.10-001-4 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018) denominado “Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações

com conectores mecânicos em estruturas de madeira”, que é baseado na norma ISO 6891 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1983) denominada “Timber structures-Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics”. O deslocamento relativo entre as peças de madeira central e laterais foi medido na linha referente ao centro da ligação, utilizando dois relógios comparadores com resolução de 0,01 mm, em duas faces opostas. De acordo com essas normas, a força máxima ( $F_{max}$ ) é definida como a força que provoca deslizamento relativo entre a peça central e a lateral igual a 15 mm ou a maior força suportada, caso seja atingida antes.

Deve ser observado que se trata de um plano experimental com duas espécies, com 6 réplicas; de cada peça de madeira foram extraídos 4 protótipos de ligações (um de cada tipo), sendo que cada peça foi caracterizada experimentalmente quanto à compressão paralela, resistência ao embutimento na direção paralela, umidade e densidade (foram feitos três corpos de prova de cada peça). Na etapa de análise de resultados, os resultados teóricos da resistência da ligação serão calculados utilizando os valores médios de resistência ao embutimento obtidos experimentalmente para cada peça, buscando diminuir a influência da variabilidade da madeira na análise dos resultados.

Figura 4 – Ensaio de protótipos da ligação



Fonte: autores.

#### 4 Resultados obtidos e análise

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios do teor de umidade e da densidade aparente (corrigida para o teor de umidade igual a 12%), para cada peça de madeira utilizada.

Tabela 2 – Valores médios de umidade e densidade para cada peça

Peça	Roxinho		Marupá	
	U (%)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	U (%)	$\rho_{12}$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	11,1	850	12,0	400
2	13,6	910	12,5	430
3	12,1	910	11,7	440
4	12,1	870	11,9	430
5	12,2	930	11,7	400
6	11,9	940	11,5	400

Fonte: autores.

Na Tabela 3 estão apresentadas as médias dos valores obtidos experimentalmente para a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) e seus respectivos coeficientes de variação (CV), para cada peça.

Tabela 3 - Resultados experimentais da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ )

Peça	Roxinho		Marupá	
	$f_{c0}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c0}$ (MPa)	CV (%)
1	86,5	1,8	29,2	2,2
2	100,1	1,0	30,3	0,4
3	82,1	2,5	36,1	9,6
4	81,7	2,2	35,8	2,8
5	79,6	2,6	37,2	1,1
6	105,1	0,1	35,4	1,4

Fonte: autores.

Na Tabela 4 estão apresentados as médias dos valores obtidos experimentalmente para a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras ( $f_{e0}$ ) e os respectivos coeficientes de variação (CV), para cada peça.

Tabela 4 - Resultados experimentais da resistência ao embutimento ( $f_{e0}$ )

Peça	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	$f_{e0}$ (MPa)	CV(%)	$f_{e0}$ (MPa)	CV(%)	$f_{e0}$ (MPa)	CV(%)	$f_{e0}$ (MPa)	CV(%)
1	86,4	5,4	83,1	2,4	33,3	7,2	24,1	5,2
2	115,7	1,6	95,8	9,5	35,4	2,8	26,6	2,7
3	103,6	1,3	96,4	3,2	39,2	0,6	33,8	2,3
4	87,4	1,8	80,7	2,2	38,1	0,5	29,0	3,7
5	90,1	3,0	80,8	7,1	30,3	4,3	31,1	3,4
6	112,2	1,9	100,5	0,4	29,2	3,4	28,3	3,6

Fonte: autores.

Na Tabela 5 estão mostrados os valores obtidos para a força máxima ( $F_{max}$ ) nos ensaios



dos protótipos de ligações, e a média e o coeficiente de variação em cada grupo.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores teóricos para a resistência da ligação ( $R_{lig,1}$ ) calculados de acordo com os critérios da norma vigente (Equação 3 e Equação 4), e na Tabela 7 estão apresentados os valores teóricos ( $R_{lig,2}$ ) calculados de acordo com os critérios do projeto de revisão (Equação 5). Os valores foram definidos a partir dos resultados de resistência para um plano de corte, e considerando oito planos de corte (quatro parafusos com dois planos de corte cada um). Para a obtenção dos valores teóricos de resistência por plano de corte foram utilizadas as espessuras e o valor médio das resistências ao embutimento obtidos para cada peça (Tabela 4), e a resistência ao escoamento ( $f_y = 470$  MPa) e a resistência última do aço dos parafusos ( $f_u = 564$  MPa) determinadas em ensaio de tração.

Tabela 5 - Valores da Força máxima ( $F_{max}$ ) das ligações (experimental)

Peça	$F_{max}$ (kN) (*)							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	86,0	152,0	160,0	208,0	43,5	74,5	76,5	90,5
2	113,5	150,0	201,5	235,5	44,5	75,0	84,5	92,0
3	105,0	141,0	185,0	239,5	52,0	83,5	111,0	115,0
4	74,5	103,0	150,0	199,0	52,5	72,5	89,0	93,5
5	85,0	133,5	165,0	202,0	51,0	80,0	80,0	104,5
6	109,0	140,0	195,0	247,5	51,0	79,5	70,5	80,5
Média	95,5	136,6	176,1	221,9	49,1	77,5	85,3	96,0
CV	15%	12%	11%	9%	7%	5%	15%	11%

Fonte: autores.

(\*)  $F_{max}$  é a força correspondente ao deslocamento relativo igual a 15 mm, ou à força última, caso ocorra antes.

Para o cálculo segundo a norma brasileira vigente, inicialmente foram verificados o modo de ruptura com valores de cálculo; foi observado que o embutimento seria o mais crítico em todos os casos. Então, foram calculados os valores apresentados na Tabela 6, sem considerar o  $K_{mod}$  e o fator de ponderação da resistência, isto é, na Equação 4 foi usado o valor da resistência ao embutimento, determinada nos ensaios de cada peça em função do diâmetro do parafuso, e as dimensões reais das peças de madeira. Deve ser destacado que os valores apresentados nas colunas “SEM” e “COM” dessa tabela são quase iguais, tendo em vista que a norma vigente não considera o efeito de corda proporcionado pelas porcas e arruelas; a pequena diferença observada é devida às diferentes espessuras das peças de madeira. Por outro lado, no cálculo efetuado pelos critérios do projeto de revisão, na grande maioria dos casos, a flexão do parafuso foi o mais crítico.

Tabela 6 – Valores teóricos da resistência das ligações– norma brasileira vigente

Peça	R <sub>lig,1</sub> (kN)							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	69,1	69,4	106,6	106,6	27,3	27,4	31,9	31,2
2	93,7	93,7	124,5	125,4	28,9	29,1	35,2	34,6
3	79,7	82,8	121,7	121,5	31,4	31,8	43,8	43,7
4	69,6	69,9	103,0	103,3	30,7	30,6	37,3	37,5
5	74,0	73,5	107,0	107,1	24,5	24,4	40,8	40,4
6	90,9	90,8	129,7	129,6	23,6	23,5	36,5	36,7

Obs: todos os modos de falha foram por embutimento na madeira.

Fonte: autores.

Tabela 7 – Valores teóricos da resistência das ligações - projeto de revisão da norma

Peça	R <sub>lig,2</sub> (kN)							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	82,0	102,3	159,1	199,0	42,83	53,2	78,9	77,9*
2	104,3	130,1	175,0	219,8	44,4	55,4	83,0	86,5*
3	91,5	117,0	173,8	217,1	46,9	58,6	94,2	108,7
4	82,8	103,4	156,4	194,6	46,04	57,7	86,7	93,8*
5	85,4	106,5	157,5	196,4	40,0	50,0	90,0	101,0*
6	102,8	129,1	183,1	228,3	39,1	48,8	85,6	91,7*

(\*) modo de falha: embutimento na madeira; os demais casos foram por flexão do parafuso.

Fonte: autores.

Comparando os resultados experimentais mostrados na Tabela 5 com os valores teóricos mostrados na Tabela 6 (norma vigente) e na Tabela 7 (projeto de revisão), para cada situação, pode-se concluir que os critérios da norma vigente, mesmo para a situação sem porcas e arruelas, levam a valores subestimados para a resistência da ligação. No caso de haver porcas e arruelas, as diferenças são maiores ainda. A partir dessa constatação, nas análises seguintes será feita apenas a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo projeto de revisão. Na Tabela 8 é apresentada a relação entre os valores experimentais e os teóricos (projeto de revisão).

Tabela 8 – Relação entre os valores experimentais e os teóricos

Peça	$F_{max} / R_{lig,2}$							
	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
1	1,049	1,486	1,006	1,045	1,016	1,400	0,970	1,162
2	1,088	1,153	1,151	1,071	1,002	1,354	1,018	1,064
3	1,148	1,205	1,064	1,103	1,109	1,425	1,178	1,058
4	0,900	0,996	0,959	1,023	1,140	1,256	1,027	0,997
5	0,995	1,254	1,048	1,029	1,275	1,600	0,889	1,035
6	1,060	1,084	1,065	1,084	1,304	1,629	0,824	0,878

Fonte: autores.

Comparando os resultados da Tabelas 5 e da Tabela 7, com o auxílio da Tabela 8, pode ser verificado que os critérios teóricos foram apropriados para estimar os valores experimentais. Os valores experimentais foram superiores aos teóricos na maioria dos casos, sendo que em apenas quatro casos o valor experimental foi menor do que 95% do valor previsto teoricamente. Também é possível destacar que a situação com porcas e arruelas conduz a maiores relações entre os valores experimentais e os teóricos; em apenas um caso o valor experimental foi menor do que 95% do valor teórico (peça 6, d= 16 cm, COM), sendo que o modo de falha foi embutimento. Isso indica que o efeito de corda devido ao uso de porca e arruela está estimado a favor da segurança, na maioria dos casos.

Na Tabela 9 estão apresentados os ganhos de resistência proporcionado pelo uso de porcas e arruelas em relação ao caso em que não há essa providência, obtidos de forma experimental e teórica, comparando as mesmas peças de cada espécie e mesmos diâmetros de parafusos. Entretanto, é importante destacar que o ganho teórico é limitado a 25% do valor da primeira parcela das Equações 5 (c) e 5 (d) do projeto de revisão da norma brasileira.

Tabela 9 – Ganhos de resistência devido ao uso de porcas e arruela

Peça	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	Exp.	Teor.	Exp.	Teor.	Exp.	Teor.	Exp.	Teor.
1	77%	25%	30%	25%	71%	24%	18%	-
2	32%	25%	17%	25%	69%	25%	9%	4%
3	34%	25%	29%	25%	61%	25%	4%	15%
4	38%	25%	33%	24%	38%	25%	5%	8%
5	57%	25%	22%	25%	57%	25%	31%	12%
6	28%	25%	27%	25%	56%	25%	14%	7%

Fonte: autores.

É interessante salientar que, com exceção da peça 3 de Marupá com d=16mm, o modo de



Encontro Brasileiro  
em Madeiras e em  
Estruturas de Madeira

8 A 10 DE MARÇO DE 2021 | FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA

falha seria o embutimento para as demais peças desse grupo (ver Tabela 7). Observando a última coluna da Tabela 9, pode-se afirmar que, caso o efeito de corda não fosse considerado, o modo de falha crítico seria por flexão do pino, excetuando a peça 1, para a qual não houve ganho. No caso da espécie Roxinho, apenas em dois casos com o diâmetro de 16 mm (peças 2 e 5) o ganho experimental foi inferior ao teórico. Pode-se concluir que a consideração do efeito proporcionado pelas porcas e arruelas é conservador do ponto de vista teórico.

## 5 Considerações finais

Foram comparados os valores experimentais da resistência de ligações por parafusos na situação de corte duplo, com o uso de porcas e arruelas e sem, com os valores calculados pelos critérios da norma brasileira vigente e do projeto de revisão.

Pode-se concluir que os critérios da norma vigente, mesmo para a situação sem porcas e arruelas, levam a valores subestimados para a resistência da ligação. No caso de haver porcas e arruelas, as diferenças são maiores ainda.

Por outro lado, pode ser verificado que os critérios da proposta de revisão foram apropriados para estimar os valores experimentais, que foram superiores aos teóricos na maioria dos casos. Em apenas quatro casos dos 48 avaliados o valor experimental foi menor do que 95% do valor previsto teoricamente.

O uso de porcas e arruelas proporciona um aumento significativo na resistência da ligação, e o valor calculado está estimado a favor da segurança, na maioria dos casos, principalmente pela limitação a 25% do valor da primeira parcela das Equações 5 (c) e 5 (d) do projeto de revisão da norma brasileira.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa, concessão de bolsas e participação no evento.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02:126-10 NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira (proposta de revisão). São Carlos, 2019. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PNBR ISO 6891-02:126.10-001-4**: Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos em estruturas de madeira. São Carlos, 2019. 10p.



Encontro Brasileiro  
em Madeiras e em  
Estruturas de Madeira

8 A 10 DE MARÇO DE 2021 | FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA

DIAS, A.A.; ASSUNÇÃO, C.H.S.; ALMEIDA, D. H. Comparação de critérios de dimensionamento de ligações por pinos em estruturas de madeira. In: XIV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2014, Natal. **Anais...** Natal, IBRAMEM. 10p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004). **Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings.** Brussels: CEN. 123p.

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

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

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5.** Malden: Blackwell Publishing, 2007. 542 p.

SILVA JR., J.; GÓES, J.L.N. Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes em corte duplo. In: XV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2016, Curitiba. **Anais...** Curitiba, IBRAMEM, 10p.