



INFLUÊNCIA DO EFEITO DE CORDA NA RESISTÊNCIA DE PARAFUSOS NA DIREÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DA MADEIRA

INFLUENCE OF THE ROPE EFFECT ON THE LOAD- CARRYING CAPACITY OF BOLTS LOADED PARALLEL TO THE GRAIN

Dias, Antonio Alves ⁽¹⁾*; Trevisan, João Vitor Kochinski ⁽²⁾; Johanns, Felipe Penazzo ⁽³⁾

⁽¹⁾ Prof. Associado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

⁽²⁾ Eng. Civil (graduação). Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

⁽³⁾ Eng. Civil (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, Brasil

* Contacto: dias@sc.usp.br

CÓDIGO: 4461930

Resumo

A revisão da norma brasileira “ABNT: NBR7190-Projeto de Estruturas de Madeira” se encontra em fase final, e foram feitas alterações significativas nos critérios de dimensionamento de ligações que, na nova versão, são baseados nos critérios do EUROCODE-5, que possibilitam considerar a influência do efeito de corda, em elementos de ligação metálicos do tipo pino carregados lateralmente. No caso de parafusos passantes, a consideração desse efeito possibilita aumentar em até 25% a parcela de resistência calculada pela teoria de Johansen para os modos de ruptura que envolvam a flexão do pino. Para avaliar a influência do efeito de corda para esse tipo de elemento, foi desenvolvido trabalho experimental que utilizou duas espécies de madeira: 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 foram feitos em corpos de prova com 4 parafusos em corte duplo, as espessuras das peças de madeira foram 50 mm, para a peça central, e 25 mm, para as peças laterais, e o carregamento foi aplicado na direção paralela às fibras da madeira. Para cada espécie de madeira/diâmetro do parafuso foram feitos 12 ensaios, sendo metade sem o uso de porcas e arruelas. Os resultados obtidos indicaram que a contribuição do efeito de corda deve ser considerada na avaliação da resistência de parafusos passantes com porcas e arruelas.

Palavras-chave: parafusos, efeito de corda, resistência de parafusos.

Abstract

The revision of the Brazilian standard "ABNT: NBR7190-Projeto de estruturas de madeira" is in the final phase, and significant changes have been made in the design criteria of connections, which in the new version are based on the EUROCODE-5 criteria which allow consider the influence of the rope effect in the lateral load-carrying capacity of metal dowel-type fasteners. In the case of bolts, the contribution to the load-carrying capacity due to the rope effect can increase up to 25% the part calculated by Johansen's theory for the failures modes related to the bolt bending. In order to evaluate the influence of the rope effect for bolts, experimental work was carried out using two species of wood: Roxinho (*Peltogyne spp*) of high density, and Marupá (*Simarouba amara Aubl.*) of low density. The bolts were made from SAE 1020 steel bars, with diameters equal to 10 mm and 16 mm. The tests were done on specimens with four bolts in double shear, the thicknesses of the wood pieces were 50 mm for the centerpiece and 25 mm for the sidepieces, and the loading was applied in the direction parallel to the grain of wood. For each species of wood/bolt diameter, 12 tests were done, half of which were without the use of nuts and washers. The results indicated that the contribution of the rope effect should be considered in the evaluation of the load-carrying capacity of of bolts with nuts and washers..

Keywords: bolts, rope effects, load-carrying capacity of bolts.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente em fase de conclusão, o projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 baseou seus critérios de dimensionamento de ligações por parafusos passantes no Eurocode 5:2004.

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 1, 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.

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

Onde:

- $f_{h,1,k}$: resistência ao embutimento das peças externas;
- $f_{h,2,k}$: resistência ao embutimento da peça interna;
- t_1 : espessura das peças externas;
- t_2 : espessura da peça interna;
- d : diâmetro do parafuso passante;
- β : 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.

Nos casos (c) e (d), 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, Porteous e Kermani (2007). 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 2. Destaca-se, ainda, que o Eurocode 5:2004 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.

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{u,k} \cdot A_p \\ 3 \cdot f_{c,90,k} \cdot A_c \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

- $f_{u,k}$: 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.



Tendo em vista que tal processo de cálculo foi adotado pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997, estudos direcionados a avaliar sua aplicabilidade no âmbito das espécies de madeiras brasileiras tornam-se necessários, uma vez que as espécies de madeiras empregadas na Europa possuem resistência e densidade inferiores às brasileiras.

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. Os corpos de prova foram confeccionados a partir das espécies Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Caixeta (*Tabebuia cassinoides*), e os resultados do experimento são apresentados na Tabela 1. É possível observar que o processo de cálculo proposto pelo Eurocode 5:2004 com a consideração do efeito de corda foi o que melhor estimou a capacidade de carga da ligação, apresentando, porém, maior divergência entre os resultados teórico e experimental no caso da espécie Caixeta, de menor densidade.

Tabela 1: Capacidades de carga teórica e experimental da ligação.

Espécie	Densidade $\rho_{12\%}$	Eurocode 5 (sem efeito de corda)	Eurocode 5 (com efeito de corda)	Resultado experimental
Garapeira	740,0 kg/m ³ CV = 1,4 %	124,1 kN	153,5 kN	177,8 kN CV = 5,2%
Caixeta	410,0 kg/m ³ CV = 2,6 %	63,2 kN	78,2 kN	108,5 kN CV = 2,7%

Fonte: Silva Junior e Góes (2016)

Com base no exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a contribuição da parcela de resistência advinda do efeito de corda para duas espécies de madeiras com densidade e resistência muito diferentes, Roxinho (*Peltogyne* spp) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), sendo a primeira uma espécie de alta densidade, e a segunda de baixa densidade, ambas folhosas e provenientes da região amazônica.

2. METODOLOGIA

Foram utilizadas três peças de madeira da espécie Roxinho e 6 peças de madeira da espécie Marupá, numeradas de 1 a 6 em cada espécie. Cada peça de madeira foi caracterizada quanto à resistência na compressão paralela às fibras, densidade e ao teor, de acordo com os procedimentos do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, utilizando três corpos de prova para cada peça e tipo de ensaio.

Também foi determinada a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras, utilizando três corpos de prova para cada peça. Esses testes foram realizados de acordo com as prescrições da EN 383:2007, para ambos os diâmetros de parafuso utilizados, isto é, 10 mm e 16 mm. As dimensões dos corpos de prova são compatíveis com as exigências dessa norma, e a espessura nominal foi tomada igual a 2d. Na Figura 1 está mostrado um ensaio de embutimento, para a espécie Roxinho. O deslocamento relativo foi obtido com relógio comparador com resolução de centésimo de milímetro.

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, com diâmetros (d) iguais a 10 mm e 16 mm. A resistência última da barra de aço (f_u), determinada em ensaio de tração foi 564 MPa. Os diâmetros externo e interno das arruelas utilizados foram iguais a 25 mm e 10,5 mm (para d=10mm), e 38 mm e 17 mm (para d=16 mm).



Figura 1: Ensaio de embutimento na direção paralela às fibras

Foram montados e testados 48 protótipos de ligações, todos com forças aplicadas na direção paralela às fibras. De cada peça de madeira foram feitos 4 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 2.



Figura 2: Exemplo de protótipo da ligação.

Em cada protótipo, a peça de madeira central possuía dimensões nominais iguais a 50 x 120 x 250 mm, e as duas peças laterais 25 x 120 x 250 mm. Foram utilizados os mesmos espaçamentos para os dois diâmetros de parafusos, que obedeceram aos espaçamentos mínimos da norma ABNT: NBR 7190/97, como mostrado na Figura 3.

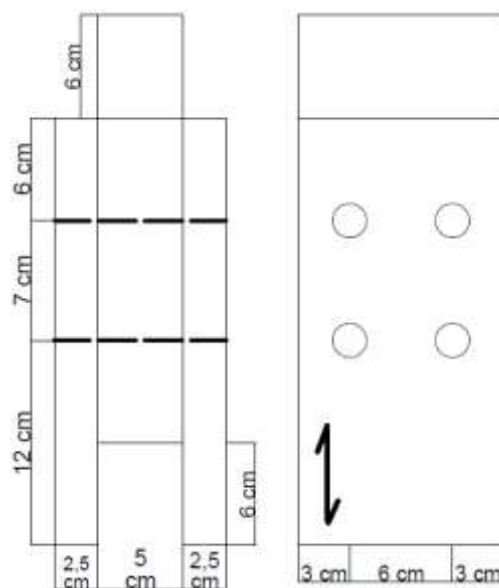


Figura 3: Espaçamentos entre parafusos e as bordas das peças.

Na Figura 4 está mostrado o aparato utilizado em dois testes de protótipo. Os testes foram realizados de acordo com a proposta da ABNT PN 02:126.10-001-4: 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 6891/1983: 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 1 centésimo de milímetro, em duas faces opostas.



Figura 4: Ensaio de protótipos da ligação.



3. RESULTADOS E ANÁLISE

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos para os valores de umidade e densidade aparente (para umidade igual a 12%), para cada peça de madeira utilizada.

Tabela 2: Valores de umidade e densidade.

Peça	Roxinho		Marupá	
	U (%)	ρ_{12} (kg/m ³)	U (%)	ρ_{12} (kg/m ³)
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

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios obtidos para a resistência na compressão paralela às fibras (f_{c0}) e os coeficientes de variação (CV), para cada peça.

Tabela 3: Resistência na 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

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_h) e os coeficientes de variação, para cada peça.

Tabela 4: Resultados experimentais da resistência ao embutimento (f_h)

Peça	Roxinho				Marupá			
	d = 10 mm		d = 16 mm		d = 10 mm		d = 16 mm	
	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (MPa)	CV (%)	f_h (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



Na Tabela 5 estão mostrados os valores obtidos para a força última (F_{ult}) aplicada nos ensaios dos protótipos de ligações, e a média e coeficiente de variação em cada grupo.

Tabela 5: Valores da Força Última (F_{ult}) das ligações (experimental)

Peça	F_{ult} (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%

Na Tabela 6 estão apresentados os ganhos de resistência proporcionado pelo uso de porcas e arruelas, em relação ao caso em que não há essa providência, obtidos experimentalmente. São apresentados os ganhos observados em cada peça de madeira, e o valor médio.

Tabela 6: Ganho de resistência devido ao uso de porcas e arruela (experimental)

Peça	Roxinho		Marupá	
	d = 10 mm	d = 16 mm	d = 10 mm	d = 16 mm
1	77%	30%	71%	18%
2	32%	17%	69%	9%
3	34%	29%	61%	4%
4	38%	33%	38%	5%
5	57%	22%	57%	31%
6	28%	27%	56%	14%
Média	43%	26%	58%	13%

Na Tabela 7 estão apresentados os valores teóricos para a força última (F_{ult}) da ligação, definidos a partir dos resultados de resistência obtidos pela Equação 1. Para a obtenção desses valores teóricos de resistência foram utilizadas as espessuras e as resistências ao embutimento obtidos para cada peça (Tabela 4), e a resistência última do aço dos parafusos ($f_u = 564$ MPa) determinada em ensaio de tração.

Comparando os resultados das Tabelas 5 e 7, verifica-se que os critérios teóricos foram apropriados para estimar os valores experimentais, sendo que estes foram



superiores na maioria dos casos. Em apenas 3 casos o valor experimental foi menor do que 95% do valor obtido teoricamente.

Tabela 7: Valores da Força Última (F_{ult}) das ligações (teórico)

Peça	F_{ult} (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

Na Tabela 8 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 teórica (Tabela 7). Analisando os dados da Tabela 8, pode-se concluir que, pelos critérios da norma, em quase todos os casos o modo de falha predominante foi por flexão do pino, com exceção de 1 caso (Marupá, 16 mm, peça 1), pois apenas nesse tipo de falha o efeito de corda pode proporcionar ganho de resistência, no caso do uso de porcas e arruelas. Entretanto, é importante destacar que esse ganho é limitado a 25% do valor da primeira parcela das Equações 1(c) e 1(d).

Tabela 8: Ganho de resistência devido ao uso de porcas e arruela (teórico)

Peça	Roxinho		Marupá	
	d = 10 mm	d = 16 mm	d = 10 mm	d = 16 mm
1	25%	25%	24%	-
2	25%	25%	25%	4%
3	25%	25%	25%	15%
4	25%	24%	25%	8%
5	25%	25%	25%	12%
6	25%	25%	25%	7%

Os resultados experimentais apontaram essa característica (Tabela 6). Nos casos da espécie Roxinho (diâmetros 10 e 16 mm) e Marupá (diâmetro 10 mm), apenas dois resultados de ganho foram inferiores a 25%. No caso da espécie Marupá (diâmetro 16 mm), situação em que ocorreram falhas mais próximas do embutimento da madeira (grande diâmetro do parafuso e menor densidade da madeira), apenas em dois casos (peças 3 e 4) o ganho experimental foi inferior ao ganho esperado teoricamente.



4. CONCLUSÃO

Os ensaios experimentais para determinação da resistência em ligações de estruturas de madeiras proporcionaram a avaliação do efeito de confinamento dos pinos. Em todos os ensaios de protótipos com porcas e arruelas a resistência apresentada foi maior em relação aos protótipos sem porcas e arruelas.

Os critérios de dimensionamento normativos foram apropriados para estimar os valores experimentais na maioria dos casos. Em apenas 3 casos o valor experimental foi menor do que 95% do valor obtido teoricamente.

A limitação de aumento pelo efeito de corda em 25 % do valor da primeira parcela das equações referentes aos modos de falha por flexão do pino mostrou ser conservadora para os testes, obtendo-se ganhos experimentais superiores.

Tendo em vista os resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que o efeito de corda deve ser considerado na resistência de ligações com parafusos com porcas e arruelas, e que o critério normativo a ser estabelecido na ABNT: NBR7190 é apropriado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas e apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto e participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). 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.

European Committee for Standardization (2004). Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels: CEN.

Johansen, K.W. (1949). Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering, v.9.

Porteous, J.; Kermani, A. (2007). Structural Timber Design to Eurocode 5. Malden: Blackwell Publishing.

Silva Jr., J.; Góes, J.L.N. (2016). Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes em corte duplo. Anais do XV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, março.