

Critérios normativos para dimensionamento de ligações por parafusos passantes: avaliação experimental de protótipos

Antonio Alves Dias ^[1], João Vitor Kochinski Trevisan ^[2], Felipe Penazzo Johanns ^[3]

[1] dias@sc.usp.br. Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Engenharia de Estruturas.

[2] joao.trevisan@usp.br. Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos.

[3] felipepj@usp.br. Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Engenharia de Estruturas.

RESUMO

A revisão da norma brasileira norma NBR 7190 (ABNT, 1997) está em fase final e foram 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 (CEN, 2004). O objetivo deste trabalho foi comparar resultados experimentais com os calculados pelos critérios das duas versões da norma. Nos testes, foram utilizadas duas espécies: Roxinho (*Peltogyne* spp.) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), escolhidas por terem alta e baixa densidade, respectivamente. Os parafusos foram obtidos de barras de aço SAE 1020 com diâmetros de 10 mm e 16 mm. Os testes foram feitos em corpos de prova com 4 parafusos em corte duplo, força aplicada na direção paralela às fibras, seguindo as recomendações do projeto de norma ABNT PN02:126.10-001-4 (ABNT, 2020). Para cada espécie de madeira e diâmetro de parafuso foram feitos 12 testes (48 no total), metade sem porcas e arruelas. Os valores calculados pelos critérios da proposta de revisão tiveram melhor concordância com os resultados experimentais do que os obtidos pela norma vigente.

Palavras-chave: Madeira. Dimensionamento. Ligações. Parafusos passantes.

ABSTRACT

*The revision of Brazilian standard NBR 7190 (ABNT, 1997) is finishing, and significant changes have been made in the design criteria of joints. For bolts in double shear and forces applied in the direction parallel to the grain there is a increase in load carrying capacity obtained from the proposed design criteria, based on EUROCODE 5 (CEN, 2004). The objective of this work was to compare experimental results with those calculated from the criteria of the two versions of the Brazilian standards. In the tests, two species were used: Roxinho (*Peltogyne* spp.) and Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), chosen because they have high and low density, respectively. The bolts were obtained from SAE 1020 steel bars with diameters of 10 mm and 16 mm. The tests were carried out in specimens with 4 bolts in double shear, force applied in parallel to the grain direction, according to standard ABNT PN02:126.10-001-4 (ABNT, 2020), draft version. For each wood specie and bolt diameter were made 12 tests (totaling 48), half without nuts and washers. 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: Timber. Design. Connections. Bolts.

1 Introdução

Com a implementação do texto da norma NBR 7190 (ABNT, 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. Um dos aspectos analisados pela Comissão de Estudos para o processo de revisão do texto da norma vigente 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 (CEN, 2004), por ser um documento normativo cujo uso está sedimentado.

Nesse contexto, 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 porcas e arruelas. Foram escolhidas duas espécies provenientes de florestas tropicais (folhosas), uma delas com alta densidade e a outra com baixa densidade: Roxinho (*Peltogyne* spp) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), respectivamente.

2 Referencial teórico

O critério da norma brasileira vigente NBR 7190 (ABNT, 1997) especifica que a resistência de uma ligação por pinos metálicos, nos quais se enquadra o parafuso passante, deve ser calculada em função dos parâmetros β e β_{lim} mostrados na Equação 1 e na Equação 2, respectivamente. Para situações de corte duplo, 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 a partir do qual são fabricados os parafusos e f_{ed} é o valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira.

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

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

Quando $\beta \leq \beta_{lim}$, a ruptura da ligação é caracterizada pelo embutimento do parafuso nas peças de madeira e o valor de cálculo da resistência da ligação para uma seção de corte ($R_{vd,1}$) pode ser estimado por meio da Equação 3. Para o caso em que $\beta > \beta_{lim}$, o modo de

falha da ligação é a flexão do parafuso e a estimativa da resistência da ligação para uma seção de corte pode ser realizada por meio da Equação 4. O valor de cálculo da resistência ao embutimento da madeira pode ser obtido experimentalmente ou estimado em função do valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{co,d}$). Para ambas as equações apresentadas, o resultado refere-se a um único parafuso.

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

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

Os 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 do parafuso nas peças de madeira, os resultados experimentais da resistência da ligação são superiores aos calculados segundo o critério da norma brasileira vigente. O autor também salientou que a norma brasileira é a única que considera a deformação residual de 2‰ como critério para estimar experimentalmente tanto o valor da resistência ao embutimento da madeira como o valor da resistência da ligação, fazendo com que ambos sejam inferiores aos calculados em outros documentos normativos.

Dias, Assunção e Almeida (2014) indicaram que, para valores menores do parâmetro β da ligação, quando a ruptura é caracterizada pelo embutimento do parafuso nas peças de madeira, os valores estimados por meio da norma brasileira vigente são significativamente inferiores aos obtidos experimentalmente e aos calculados por meio de outros documentos normativos.

O projeto de revisão PN02:126-10 REVISÃO NBR 7190 (ABNT, 2020), atualmente em fase de conclusão, baseou seus critérios de dimensionamento de ligações por parafusos passantes na norma europeia EUROCODE 5 (CEN, 2004). O modelo de cálculo adotado na norma europeia para estimar a resistência de ligações por parafusos passantes é fundamentado na teoria desenvolvida inicialmente por Johansen (1949), em que quatro possíveis modos de ruptura são associados à situação de corte duplo. Assim, o valor característico da resistência da ligação por plano de corte ($F_{v,Rk}$) pode ser obtida por meio da Equação 5, sendo 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.

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

no qual: $f_{e,1,k}$ e $f_{e,2,k}$ são os valores característicos da resistência ao embutimento das peças externas e internas, respectivamente; t_1 e t_2 são as espessuras das peças externas e da peça interna, respectivamente; d é o diâmetro do parafuso passante; β é a razão entre $f_{e,1,k}$ e $f_{e,2,k}$; $M_{y,Rk}$ é o valor característico do momento resistente do parafuso passante.

O valor característico do momento resistente do parafuso é dado pela Equação 6, em função do valor característico da resistência última (MPa) do aço do parafuso e do diâmetro (mm) do parafuso.

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

Uma importante diferença entre o modelo de cálculo apresentado no projeto de revisão e o modelo de cálculo da norma brasileira vigente é a utilização do coeficiente de segurança. Enquanto na NBR 7190 (ABNT, 1997) são utilizados valores de projeto das propriedades mecânicas para calcular a resistência da ligação, no modelo de cálculo apresentado no projeto de revisão são considerados os valores característicos dessas propriedades, o que acarreta em uma melhor interpretação do problema. Nesse caso, a minoração da resistência é realizada após a obtenção do valor característico da resistência da ligação.

No que diz respeito aos modos de ruptura (c) e (d) da Equação 5, Porteous e Kermani (2007) esclarecem que o primeiro termo da equação representa a resistência 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 7. Destaca-se, ainda, que a norma europeia estabelece limites para a representatividade do efeito de corda sobre a resistência da ligação que, no caso de parafusos passantes, não deve ser superior a 25% do valor obtido na primeira parcela.

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{u,k} A_p \\ 3 f_{c,90,k} A_c \end{cases} \quad (7)$$

no qual: $f_{u,k}$ é o valor característico da resistência à tração última do parafuso; $f_{c,90,k}$ é o valor característico da resistência à compressão da madeira na direção perpendicular às suas fibras; A_p é a área da seção transversal do parafuso; A_c é a área de contato entre a arruela e a peça de madeira.

Com o objetivo de determinar a contribuição da parcela de resistência proveniente do efeito de corda, alguns estudos foram conduzidos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Silva Junior e Góes (2016) ensaiaram protótipos de ligações entre peças de madeira realizadas por meio de parafusos passantes com 12 mm de diâmetro submetidos a corte duplo. As espécies de madeira utilizadas na confecção dos corpos de prova foram a Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e a Caixeta (*Tabebuia cassinoides*). Como resultado, os autores observaram que o processo de cálculo proposto pela norma europeia foi o que melhor estimou a capacidade de carga da ligação.

Maia e Góes (2017) estudaram ligações pregadas utilizando a espécie Garapeira para confeccionar os corpos de prova. O uso das equações presentes no texto da norma europeia conduziu a estimativas mais próximas do valor experimental quando comparadas às estimativas realizadas por meio das equações presentes no texto da norma brasileira vigente. Quando o efeito de corda foi considerado, o valor médio calculado por meio das equações da norma europeia foi 13,8% inferior ao valor obtido experimentalmente.

Couto e Góes (2018) ensaiaram protótipos de ligação confeccionados a partir da espécie Garapeira, em que as peças de madeira externas foram substituídas por chapas de aço. O valor médio obtido experimentalmente foi 21,9% superior ao valor médio calculado a partir das equações do EUROCODE 5 (CEN, 2004) com a consideração do efeito de corda, sendo essa a melhor estimativa dentre as realizadas.

3 Materiais e métodos

As espécies escolhidas foram Roxinho (*Peltogyne* spp.) e Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), duas espécies com grande diferença na densidade. Para cada espécie foram utilizadas seis peças de madeira, numeradas de 1 a 6. 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 NBR 7190 (ABNT, 1997), utilizando três corpos de prova para cada peça e tipo de ensaio. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios e respectivos coeficientes de variação (em %) para o teor de umidade (U) e a densidade de cada peça corrigida para 12% de umidade (ρ_{12}).

Tabela 1 – Valores médios e coeficientes de variação do teor de umidade (U) e da densidade (ρ_{12})

Peça	U (%)		ρ_{12} (kg/m ³)	
	Roxinho	Marupá	Roxinho	Marupá
1	11,1 (0,5%)	12,0 (6,3%)	850 (0,7%)	400 (1,4%)
2	13,6 (1,3%)	12,5 (6,2%)	910 (1,1%)	430 (0,0%)
3	12,1 (1,0%)	11,7 (1,0%)	910 (0,6%)	440 (1,3%)
4	12,1 (1,9%)	11,9 (0,5%)	870 (0,0%)	430 (1,3%)
5	12,2 (2,9%)	11,7 (5,3%)	930 (5,9%)	400 (2,5%)
6	11,9 (0,8%)	11,5 (4,5%)	940 (0,6%)	400 (0,0%)

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 2 constam os valores médios e os respectivos coeficientes de variação (em %) para a resistência à compressão paralela às fibras de cada peça (f_{c0}).

Tabela 2 – Valores médios e coeficientes de variação da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

Peça	f_{c0} (MPa)	
	Roxinho	Marupá
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: elaboração própria.

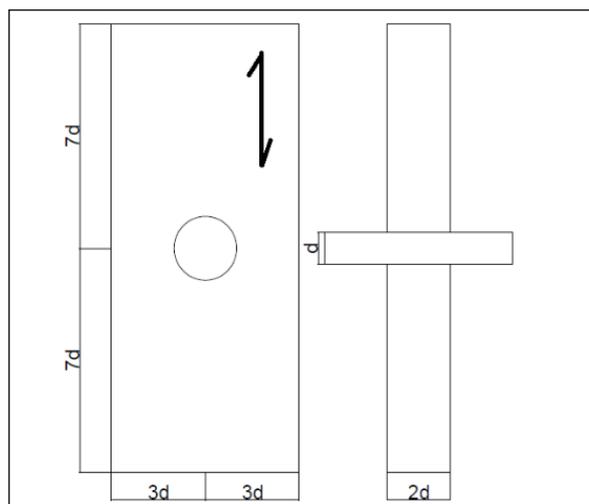
Os parafusos utilizados nos ensaios de embutimento e nos protótipos das ligações foram obtidos a partir de barras de aço SAE 1020 com diâmetros nominais (d) iguais a 10 mm e 16 mm. O aço utilizado na confecção dos pinos metálicos foi caracterizado quanto à sua resistência à tração por meio de testes realizados de acordo com as prescrições da norma NBR 6892-1 (ABNT, 2013). Foram obtidas a resistência ao escoamento $f_y = 470$ MPa e a resistência última $f_u = 564$ MPa.

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).

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 norma europeia EN 383 (CEN, 2007) para os diâmetros de parafuso utilizados, 10 mm e 16 mm, e a espessura nominal foi tomada igual a 2d. Na Figura 1 estão mostradas as dimensões do corpo de prova, em função do diâmetro do parafuso.

Na Figura 2 está ilustrado um ensaio de embutimento, para um corpo de prova da espécie Marupá. O deslocamento relativo foi obtido com relógios comparadores, resolução de 0,01 mm.

Figura 1 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de embutimento na direção paralela às fibras da madeira



Fonte: elaboração própria.

Figura 2 – Teste de embutimento (direção paralela às fibras)

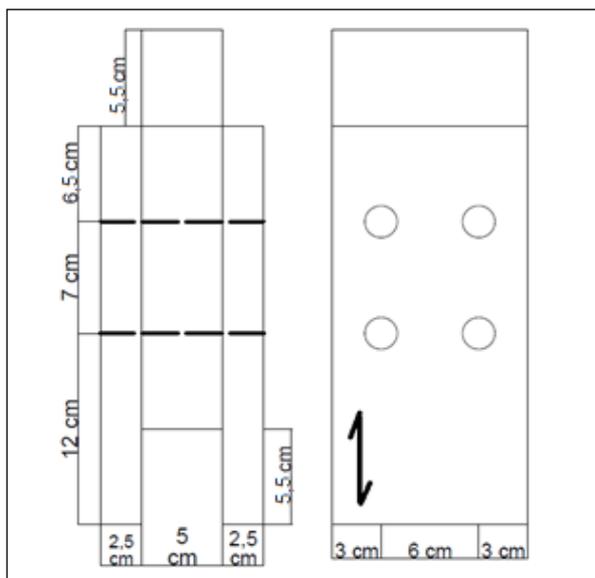


Fonte: arquivo dos autores

A força máxima (F_{max}) é definida como o menor valor entre a força que provoca embutimento de 5 mm do pino no corpo de prova ou a força última. A resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}) é a razão entre F_{max} e a área de embutimento ($t \times d$).

Na Figura 3 estão mostradas as dimensões dos protótipos e os espaçamentos entre os parafusos e as bordas dos corpos de prova, que foram iguais para todos os tipos testados, obedecendo aos espaçamentos mínimos recomendados na NBR 7190 (ABNT, 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 3 – Dimensões dos protótipos e espaçamentos entre parafusos e as bordas das peças



Fonte: elaboração própria.

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, feito de madeira da espécie Roxinho e parafusos com 16 mm de diâmetro com porcas e arruelas, pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Protótipo da ligação de Roxinho - parafusos de 16 mm com porcas e arruelas



Fonte: arquivo dos autores

Os testes foram realizados de acordo com o projeto de norma ABNT PN02:126.10-001-4 (ABNT, 2020) 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 (ISO, 1983): "Timber structures joints made with mechanical fasteners – General principles for the determinatios 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.

A força máxima (F_{max}) é definida como sendo a força que provoca deslocamento relativo entre a peça central e as peças laterais igual a 15 mm ou a maior força suportada pela ligação, caso seja atingida antes.

Na Figura 5 está mostrado o aparato utilizado nos testes dos protótipos, exemplificando os casos com porcas e arruelas e sem.

Figura 5 – Ensaios de protótipos da ligação



Fonte: arquivo dos autores

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 são 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.

Para a comparação entre os valores experimentais da resistência da ligação e os valores teóricos obtidos por meio da norma vigente e do projeto de revisão foi utilizado o teste t pareado. Esses testes foram realizados para os protótipos sem porcas e arruelas.

O teste consiste em estabelecer uma hipótese nula (média populacional das diferenças igual a zero) e, por consequência, uma hipótese alternativa (média populacional das diferenças diferente de zero). A hipótese nula é testada, podendo ser rejeitada ou não. Para tal, calcula-se o valor do parâmetro t (Equação 8), que deve ser comparado ao valor de t_{crit} . Caso $|t| > |t_{crit}|$, rejeita-se a hipótese nula, indicando que as médias populacionais em questão são diferentes. Caso $|t| < |t_{crit}|$, a hipótese nula não é rejeitada, o que significa que não foram encontradas evidências estatísticas de que exista diferença entre as médias populacionais.

$$t = \frac{\bar{X}_d - \mu_d}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (8)$$

Em que:

\bar{X}_d : média amostral das diferenças;

μ_d : média populacional das diferenças (valor tomado igual a zero sob a hipótese nula);

S_d : desvio padrão amostral das diferenças;

n : tamanho da amostra.

O valor do t_{crit} é determinado em função do nível de significância (α) adotado e dos graus de liberdade ($n - 1$). Neste trabalho, foi utilizado um nível de significância igual a 5%. Para seis amostras, o valor de t_{crit} é igual à 2,571.

4 Resultados obtidos e análise

Na Tabela 3 são apresentadas as médias dos valores obtidos experimentalmente para a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras (f_{e0}) com seus respectivos coeficientes de variação (CV), para cada peça, em função da espécie de madeira e do diâmetro do parafuso.

Tabela 3 – Resultados experimentais da resistência ao embutimento (f_{e0})

Peça	Resistência ao embutimento f_{e0} (MPa) e coeficiente de variação CV (%)			
	Roxinho		Marupá	
	d = 10 mm	d = 16 mm	d = 10 mm	d = 16 mm
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: dados da pesquisa

Observou-se que a resistência ao embutimento no caso do diâmetro de 10 mm foi superior à resistência no caso do diâmetro de 16 mm, para ambas as espécies, sendo a diferença proporcionalmente maior no caso do Marupá.

Com relação à determinação da força máxima, no caso da espécie Marupá, o determinante foi o limite de embutimento do pino na madeira (5 mm). Entretanto, para o caso da espécie Roxinho o determinante foi a força última, sem que o limite de deslocamento relativo fosse atingido.

Na Figura 6 é mostrado um corpo de prova de cada espécie após os testes. Pode ser notado que, para a espécie Marupá, ocorreu embutimento do pino na madeira, enquanto que, para a espécie Roxinho, ocorreu ruptura por fendilhamento da madeira.

Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos para a força máxima (F_{max}) nos ensaios das ligações, e a média e o coeficiente de variação em cada grupo, para as duas espécies, os dois diâmetros de parafuso, e a as situações com porcas e arruelas e sem.

O projeto de norma ABNT PN02:126.10-001-4 (ABNT, 2020) estipula que a força máxima da ligação é aquela que corresponde a um deslocamento entre a peça central e as peças laterais igual a 15 mm, ou à força última, caso ocorra antes.

Para a maioria dos protótipos da espécie Marupá e diâmetro do parafuso igual a 10 mm, a força máxima foi obtida para o deslocamento de 15 mm.

Figura 6 – Forma de ruptura nos ensaios de embutimento: Marupá (a); Roxinho (b)



Fonte: arquivo dos autores

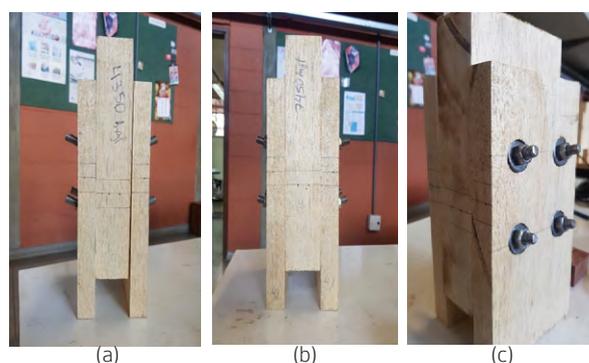
Tabela 4 – Valores da Força máxima (F_{max}) das ligações (experimental)

Peça	Fmax (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: dados da pesquisa

Na Figura 7 são mostrados corpos de prova desse caso, com porcas e arruelas e sem, onde pode ser observado o embutimento da arruela no corpo de prova (esmagamento por compressão normal às fibras) e a flexão que ocorreu no parafuso. O embutimento do parafuso na madeira na direção paralela às fibras pode ser visualizado por meio dos riscos transversais espaçados de 15 mm, feitos previamente.

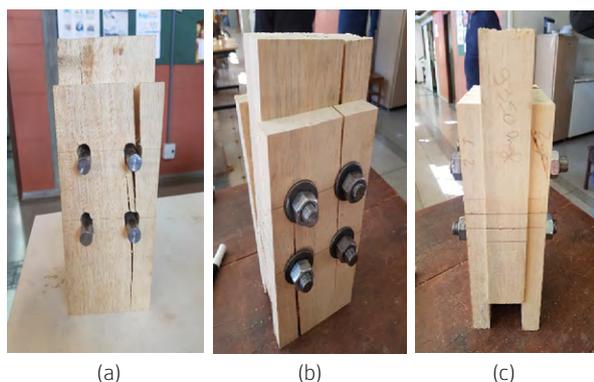
Figura 7 – Espécie Marupá; diâmetro de 10 mm: sem porcas e arruelas (a) e com (b, c); 15 mm atingido (a, b, c)



Fonte: arquivo dos autores

Na Figura 8 são mostrados corpos de prova da espécie Marupá e parafusos com diâmetro de 16 mm, após os testes. Nesse tipo de ligação, a forma de ruptura foi por fendilhamento da madeira após o embutimento do parafuso; em alguns protótipos, o embutimento do pino na madeira foi próximo ao limite de 15 mm, como pode ser visto na Figura 8 (c).

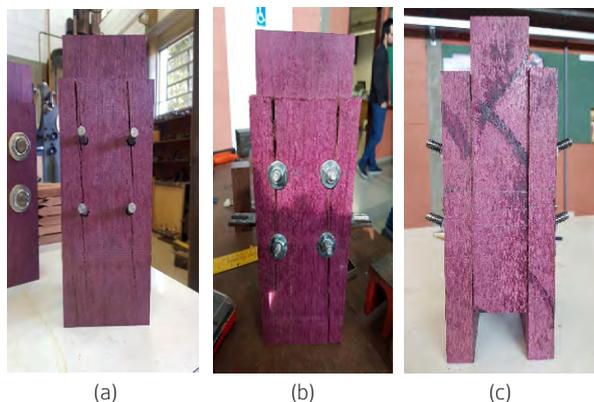
Figura 8 – Espécie Marupá; diâmetro de 16 mm: ruptura por fendilhamento da madeira



Fonte: arquivo dos autores

No caso dos protótipos da espécie Roxinho com diâmetro dos parafusos igual a 10 mm, observou-se a predominância da flexão do pino (Figura 9). Nesses casos, a ruptura por fendilhamento ocorreu antes do limite de deslocamento relativo (15 mm), com apenas uma exceção, que é mostrada na Figura 9 (c).

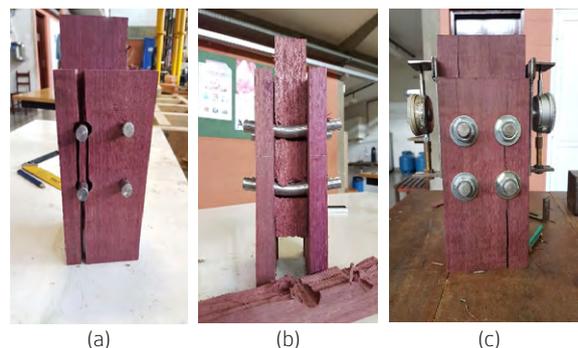
Figura 9 – Espécie Roxinho; diâmetro de 10 mm: sem porcas e arruelas (a) e com (b, c); 15 mm atingido (c)



Fonte: arquivo dos autores

Para os protótipos de Roxinho e diâmetro 16 mm, as rupturas ocorreram por fendilhamento, notando-se menor flexão do parafuso, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Espécie Roxinho; diâmetro de 16 mm: ruptura por fendilhamento (a, b, c); flexão do pino (b)



Fonte: arquivo dos autores

Na Tabela 5 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 6 estão apresentados os valores teóricos ($R_{lig,2}$) calculados de acordo com os critérios do projeto de revisão (Equação 5).

Tabela 5 – Valores teóricos da resistência das ligações – NBR 7190 (ABNT, 1997)

Peça	$R_{lig,1}$ (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

Fonte: dados da pesquisa

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 da resistência por plano de corte foram utilizados os valores médios experimentais das resistências ao embutimento para cada peça e diâmetro (Tabela 4), as espessuras reais de cada elemento de madeira que compõe a ligação, a resistência ao escoamento ($f_y = 470$ MPa) e a resistência última à tração ($f_u = 564$ MPa) do aço dos parafusos determinadas em ensaio de tração.

No cálculo da resistência da ligação segundo a norma brasileira vigente, inicialmente foi verificado o modo de ruptura crítico, utilizando valores de cálculo para as resistências dos materiais madeira e aço. Foi observado que o embutimento seria o mais crítico em todos os casos.

Então, foram calculados os valores apresentados na Tabela 5, sem considerar o K_{mod} e o fator de ponderação da resistência, isto é, na Equação 4 foram utilizados os valores de resistência ao embutimento, determinados nos ensaios de cada peça em função do diâmetro do parafuso, e as dimensões reais das peças de madeira. Essa providência teve por objetivo possibilitar a comparação direta com os valores experimentais para aferição do modelo dessa norma.

No cálculo de acordo com os critérios do projeto de revisão, que utiliza valores característicos, a aferição do modelo pode ser feita pela comparação direta com os resultados experimentais, utilizando as características dimensionais dos elementos que compõem cada protótipo e da resistência ao embutimento de cada peça de madeira obtida experimentalmente (Tabela 4).

Ao contrário do que ocorreu no cálculo teórico segundo a norma vigente, a flexão do parafuso foi a situação mais crítica, para a grande maioria dos casos calculados pelo projeto de revisão. Os protótipos em que isso não ocorreu, isto é, para os quais a situação mais crítica é o embutimento, estão marcados com um asterisco na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores teóricos da resistência das ligações - PN02:126-10 REVISÃO NBR 7190 (ABNT, 2020)

Peça	$R_{lig,2}$ (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*

Fonte: dados da pesquisa

Deve ser destacado que os valores apresentados nas colunas “SEM” e “COM” da Tabela 5 são quase iguais, pois a norma vigente não considera o efeito de corda proporcionado pelo uso das porcas e arruelas. A pequena discrepância observada é devida à utilização, nos cálculos efetuados, das espessuras reais dos elementos de madeira que compõem cada protótipo de ligação.

Comparando os resultados experimentais mostrados na Tabela 4 com os valores teóricos mostrados na Tabela 5 (norma vigente) e na Tabela 6 (projeto de revisão), para espécie, peça e diâmetro, pode-se concluir que os critérios da norma vigente, mesmo para a situação sem porcas e arruelas, levam a valores subestimados de resistência da ligação. No caso de haver porcas e arruelas, as diferenças são ainda maiores.

Como o experimento foi feito de forma pareada, isto é, para cada peça de determinada espécie foram feitos 4 protótipos, variando o diâmetro do parafuso (10 e 16 mm) e o uso de porcas e arruelas (sem e com), é possível aplicar o teste estatístico “t” para comparar as diferenças entre os valores experimentais e os teóricos obtidos para cada peça de madeira, possibilitando aferir a pertinência de cada modelo de cálculo.

Essa análise foi feita apenas para os resultados dos protótipos sem o uso de porcas e arruelas, pois o modelo da norma vigente não considera esse uso, e existe limitação no acréscimo de resistência devido a porcas e arruelas, no caso do projeto de revisão.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores do módulo de “t”, calculados para cada situação, para a norma vigente e para o projeto de revisão.

Tabela 7 – Comparação entre valores experimentais e teóricos: análise estatística – teste t pareado

Espécie	Diâmetro (mm)	Cálculo de t/	
		Vigente	Revisão
Roxinho	10	5,495	1,291
	16	14,275	1,886
Marupá	10	10,524	2,889
	16	10,099	0,254

Fonte: dados da pesquisa

Como o valor crítico de $t(t_{crit})$ para esse caso (6 pares de resultados e nível de significância igual a 5%) é igual à 2,571, pode-se concluir que existem diferenças significativas entre os valores experimentais, que são sempre superiores, e os teóricos calculados pela norma vigente.

No caso do projeto de revisão não foram encontradas evidências estatísticas de que os valores experimentais e teóricos são diferentes, com exceção do caso da espécie Marupá e diâmetro igual a 10 mm. Nesse caso, os valores teóricos foram conservadores, isto é, inferiores aos experimentais.

A partir dessa constatação estatística, foram feitas comparações entre os resultados experimentais e os resultados calculados pelo projeto de revisão.

Na Tabela 8 são apresentadas as relações entre os valores experimentais e os valores teóricos calculados pelos critérios do 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: dados da pesquisa

Comparando os resultados da Tabela 4 e da Tabela 6, com o auxílio da Tabela 8 e da análise estatística, pode ser verificado que os critérios teóricos do projeto de revisão 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 importante destacar que a situação com porcas e arruelas conduz a maiores relações entre os valores experimentais e os teóricos. Para essa situação, em apenas um caso o valor experimental foi menor do que 95% do valor teórico (espécie Marupá,

peça 6, d = 16 cm-COM), sendo que o modo de falha foi embutimento.

Isso indica que o ganho de resistência devido ao uso de porcas e arruelas 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. Na Tabela 9 estão suprimidos os valores correspondentes aos casos em que o embutimento é crítico, Equações 5 (a) e 5 (b), nos quais não há aumento teórico da resistência devido ao uso de porcas e arruelas.

É importante destacar que, para as situações de flexão do parafuso, 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. Isso explica os maiores ganhos obtidos para os valores experimentais, na maioria dos casos.

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%	
3	34%	25%	29%	25%	61%	25%	4%	15%
4	38%	25%	33%	24%	38%	25%	5%	
5	57%	25%	22%	25%	57%	25%	31%	
6	28%	25%	27%	25%	56%	25%	14%	

Fonte: dados da pesquisa

É interessante salientar que apenas o protótipo correspondente à peça 3 de Marupá, com d = 16 mm, apresentou modo de falha teórico por flexão do parafuso. A peça 3 foi a que apresentou maior resistência ao embutimento para a espécie Marupá.

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 pelo uso de porcas e arruelas foi conservador do ponto de vista teórico, na grande maioria dos casos.

5 Considerações finais

Neste trabalho foram comparados os valores experimentais da resistência de ligações por parafusos passantes, na situação de corte duplo, com os valores calculados pelos critérios da norma brasileira vigente e do projeto de revisão. Foram estudadas ligações com parafusos de diâmetros iguais a 10 mm e 16 mm, para duas situações: com porcas e arruelas e sem.

Pôde-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 ainda maiores.

Por outro lado, pôde ser verificado que os critérios da proposta de revisão foram apropriados para estimar os valores experimentais da resistência da ligação, 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. A limitação imposta pelo projeto de revisão (valor da parcela de resistência proveniente do efeito de corda devido ao uso de porcas e arruelas não superior a 25% do valor da resistência calculada sem a sua consideração) contribui para isso.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq). Os autores agradecem o apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa e a concessão de bolsas.

REFERÊNCIAS

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

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02:126-10 NBR 7190 – Projeto**

de estruturas de madeira (proposta de revisão). ABNT: Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02:126.10-001-4 – Método de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos em estruturas de madeira (proposta de norma)**. ABNT: Rio de Janeiro, 2020.

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

COUTO, N. G.; GÓES, J. L. N. Avaliação experimental da resistência de ligações madeira-aço com chapas laterais em corte duplo e parafusos sextavados passantes. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 16., E CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 2018, São Carlos. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 2018. 13 p. Disponível em: <http://soac.eesc.usp.br/index.php/eb Bramem/xviebramem/paper/view/1121/687>. Acesso em: 18 out. 2019.

DIAS, A. A.; ASSUNÇÃO, C. H. S.; ALMEIDA, D. H. Comparação de critérios de dimensionamento de ligações por pinos em estruturas de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014, Natal. **Anais...** Natal: IBRAMEM, 2014. 10 p.

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

MAIA, B. B.; GÓES, J. L. N. Resistência de ligações pregadas em madeira. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2., E CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 2., 2017, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: UNNOBA, OSCM, Lat-Rilem, 2017. 12 p. Disponível em: <https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T6-18.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

OLIVEIRA, M. A. M. **Ligações com pinos metálicos em estruturas de madeira**. 2001. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30032016-152053/pt-br.php>. Acesso em: 16 nov. 2019.

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

SILVA JUNIOR, J.; GÓES, J. L. N. Avaliação experimental da resistência de ligações em madeira com parafusos passantes em corte duplo. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15., 2016, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IBRAMEM, 2016. 10 p.