

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA

Felipe Penazzo Johanns¹ (felipepj@usp.br); **Antonio Alves Dias²** (dias@sc.usp.br)

^{1,2} Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo

Resumo

A revisão da ABNT NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira encontra-se em fase de conclusão, e o critério de dimensionamento de ligações realizadas por meio de parafusos passantes foi baseado no modelo de cálculo utilizado pelo Eurocode 5. Contudo, a resistência ao embutimento da madeira é calculada pela norma europeia por meio de equações advindas de análises experimentais, e diversas espécies de madeiras existentes no Brasil possuem propriedades físicas e mecânicas muito diferentes das espécies europeias. Neste trabalho foram avaliadas as resistências ao embutimento na direção paralela às fibras de nove espécies de madeiras folhosas brasileiras, cujas densidades variavam entre baixa a alta. Para tal, foram utilizados parafusos com diâmetros nominais de 10 mm, 12,5 mm e 16mm, e seis corpos de prova para cada espécie e cada diâmetro de parafuso. De modo geral, observou-se uma boa concordância entre as resistências ao embutimento estimadas pelo critério da revisão da norma brasileira e seus valores experimentais.

Palavras-chave: Ligações parafusadas. Resistência ao embutimento.

Abstract

The revision of ABNT NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira is in phase of completion, and the design criteria of bolted joints was based on EUROCODE 5. However, embedment strength is calculated by EUROCODE 5 through equations derived from experimental analyses, and many timber species in Brazil have physical and mechanical properties that are very different from European species. In this paper, parallel to the grain embedment strength of nine Brazilian hardwood species were evaluated, whose densities varied between low and high. To that end, bolts with nominal diameters of 10 mm, 12,5 mm e 16 mm were used, and six specimens of each specie and each bolt diameter were tested. In general, a good agreement between embedment strengths estimated by Brazilian standard revision criteria and its experimental values was observed.

Keywords: Bolted connections. Embedment strength.

1 Introdução

O texto da ABNT NBR 7190:1997 encontra-se em processo de revisão, e os critérios de dimensionamento de ligações parafusadas adotados foram baseados no EUROCODE 5:2004.

No que diz respeito à resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira, o EUROCODE 5:2004 calcula seu valor por meio de uma equação advinda de experimentos realizados com espécies de madeira europeias (WHALE e SMITH, 1986), e que, no caso das espécies brasileiras, pode não estimar de forma adequada o valor da propriedade em questão.

Nesse contexto, estudos direcionados à determinação experimental da resistência ao embutimento de espécies de madeira empregadas no Brasil tornam-se relevante, sobretudo para madeiras folhosas de alta densidade.

2 Revisão de literatura

No modelo de dimensionamento de ligações parafusadas proposto pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997, o qual foi baseado no EUROCODE 5:2004, a resistência da ligação é calculada em função da espessura das peças de madeira ligadas, do diâmetro e da resistência à tração última do parafuso e da resistência ao embutimento na direção em que a madeira é solicitada.

Dentre as propriedades citadas, a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira pode, segundo a norma brasileira vigente, ser estimada em função do valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras.

No projeto de revisão da norma brasileira, a determinação teórica da resistência ao embutimento foi alterada, e pode, para parafusos com diâmetro igual ou inferior a 30 mm, ser realizada por meio da Equação 1.

$$f_{h0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k \quad (1)$$

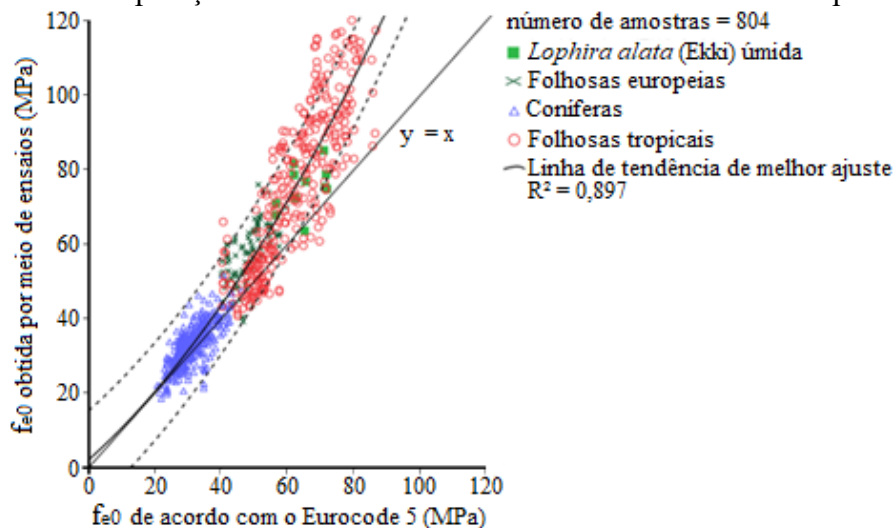
Em que:

- $f_{h0,k}$: valor característico da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira em MPa;
- d : diâmetro do parafuso em mm;
- ρ_k : valor característico da densidade da madeira em kg/m³.

Essa equação é advinda do estudo experimental realizado por Whale e Smith (1986). Em seu trabalho, os autores ensaiaram quatro espécies de madeira coníferas e duas espécies de madeira folhosas, e empregaram parafusos com diâmetros que variavam entre 8 e 20 mm.

No entanto, autores como Hettiarachchi e Nawagamuwa (2005) e Sandhaas et al. (2010) observaram que, para espécies de madeira de maior densidade, os resultados experimentais de resistência ao embutimento tendem a ser superiores aos valores estimados pela norma europeia e, quanto maior é a densidade da madeira, maior é a diferença entre os resultados teórico e experimental, conforme ilustrado na Figura 1.

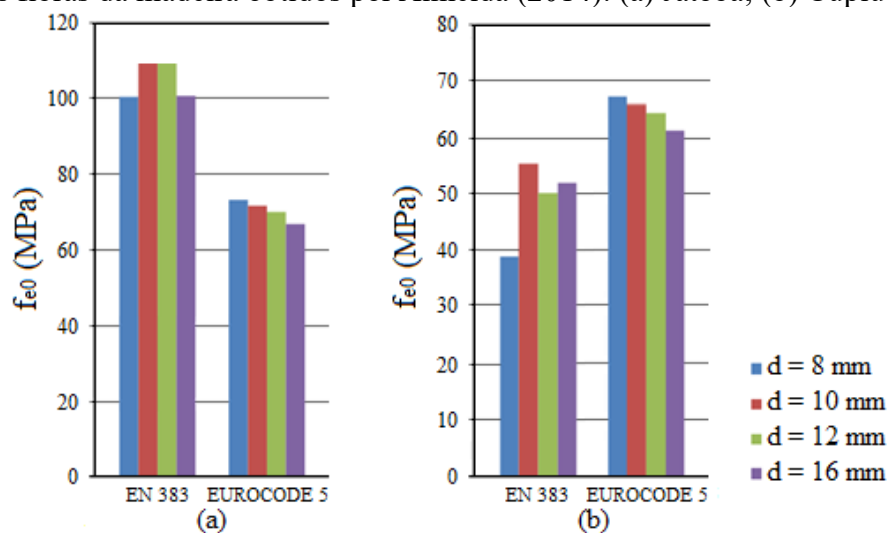
Figura 1 – Comparação entre resistências ao embutimento teórica e experimental



Fonte: adaptado de Sandhaas et al. (2010).

No Brasil, Almeida (2014) determinou experimentalmente a resistência ao embutimento de seis espécies de madeira, utilizando, para tal, quatro diâmetros de parafuso. Dentre os testes realizados, destaca-se os ensaios de embutimento conduzidos de acordo com a BS EN 383:2007, cujos resultados foram comparados aos valores teóricos calculados por meio do EUROCODE 5:2004. Na Figura 2, o comparativo em questão é realizado para as espécies Jatobá (*Hymenaea spp*) e Cupiúba (*Goupia glabra*), ambas folhosas nativas de alta densidade. Em ambos os casos, a resistência ao embutimento foi avaliada na direção paralela às fibras da madeiras, sendo possível observar uma divergência entre os resultados experimentais e teóricos. Destaca-se ainda que, apesar de ser uma espécie de grande densidade, os valores de resistência ao embutimento da espécie Cupiúba foram inferiores aos estimados pelo EUROCODE 5:2004.

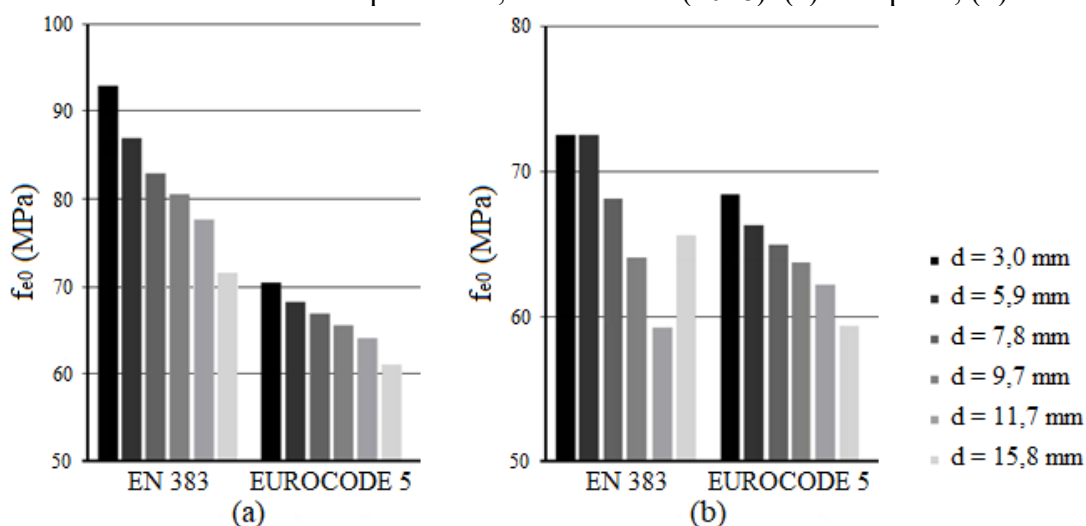
Figura 2 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Almeida (2014): (a) Jatobá; (b) Cupiúba



Fonte: adaptado de Almeida (2014).

Terrin, Góes e Pletz (2018) apresentaram resultados de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira para quatro espécies de folhosas brasileiras, utilizando, para tal, seis diâmetros de pinos metálicos diferentes. Os ensaios foram conduzidos de acordo com as prescrições da BS EN 383:2007, e os resultados para as duas espécies de maior densidade, Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e Itaúba (*Mezilaurus itauba*), são apresentados na Figura 3. O comparativo em questão é realizado entre os valores obtidos por intermédio das normas BS EN 383:2007 e EUROCODE 5:2004 e, de forma similar à Figura 2, observa-se uma diferença entre a resistência ao embutimento estimada e seu valor experimental. Contudo, apesar de apresentarem densidades muito similares, a divergência entre os valores teóricos e experimentais para a espécie Itaúba foi muito menor quando comparada aos resultados da espécie Garapeira.

Figura 3 – Resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira obtidos por Terrin, Góes e Pletz (2018): (a) Garapeira; (b) Itaúba



Fonte: adaptado de Terrin, Góes e Pletz (2018).

Destaca-se que estudos relacionados à determinação da resistência ao embutimento das espécies de madeira utilizadas no Brasil são escassos, sobretudo para madeiras folhosas de alta densidade, evidenciando a importância do presente trabalho.

3 Materiais e métodos

Para execução do plano experimental, foram utilizadas as espécies de madeira: Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Caixeta (*Simarouba amara*), Caroba (*Jacaranda copaia*), Caucho (*Maquira coriácea*), Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Catuaba (*Qualea albiflora* Warm.), Catanudo (*Chrysophyllum anomalum* Pires), *Eucalyptus grandis* e Goiabão (*Planchonella pachycarpa* Pires). As espécies apresentavam densidades que variavam de baixa a alta, permitindo avaliar o critério que foi utilizado no projeto de revisão da norma brasileira.

Para os testes de embutimento na direção paralela às fibras foram confeccionados seis corpos de prova de cada espécie para três diâmetros de parafuso diferentes: 10 mm, 12,5 mm e 16 mm, todos fabricados em aço SAE 1020. Os corpos de prova foram

confeccionados a partir de nove peças de madeira com comprimento nominal de 55 cm, sendo que, de cada peça, foram retirados dois corpos de prova relativos à dois diâmetro de parafuso diferentes. Contudo, devido a disponibilidade de peças, foram elaborados apenas 12 corpos de prova para a espécie *Eucalyptus grandis*, dos quais seis eram relativos ao diâmetro de 10 mm e seis ao diâmetro de 12,5 mm.

Todos os corpos de prova para os ensaios de embutimento possuíam dimensões compatíveis com as exigências da BS EN 383:2004 e, considerando que a norma citada permite espessuras que variam entre 1,5d e 4d, optou-se por manter o valor da espessura nominal igual a 2d, que é o estipulado pela norma brasileira vigente.

Os testes foram conduzidos de acordo com as prescrições da BS EN 383:2007, e os deslocamentos relativos entre o parafuso metálico e a borda do corpo de prova foram medidos com o auxílio de um relógio comparador com resolução de 0,01 mm.

Na Figura 4 é ilustrado o ensaio de um corpo de prova da espécie Goiabão confeccionado para o diâmetro de 16 mm. Para medir o embutimento do parafuso na madeira, a base do relógio comparador e seu cursor foram fixados nas bases inferior e superior da prensa hidráulica, respectivamente.

Figura 4 – Ensaio de embutimento para a espécie Goiabão e diâmetro de 16 mm



Fonte: autores.

De acordo com o procedimento de ensaio definido pela BS EN 383:2007, o teste deve ser interrompido em duas situações: quando a força última for alcançada ou quando o deslocamento relativo entre o parafuso e a borda da peça de madeira atingir 5 mm. A força obtida deve ser registrada como força máxima, e a resistência ao embutimento na direção paralela às fibras calculada conforme a Equação 2.

$$f_{h0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{t \, d} \quad (2)$$

Em que:

f_{h0} : resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira, em MPa.

$F_{m\acute{a}x}$: força máxima obtida, em N.

t: espessura do corpo de prova, em mm;

d: diâmetro do pino metálico, em mm.

De cada peça de madeira foi extraído um corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão na direção paralela às fibras da madeira. O teor de umidade e a densidade aparente de cada corpo de prova foram obtidos instantes após os ensaios. Esses testes seguiram as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

Cabe ressaltar, ainda, que o objetivo deste trabalho é a avaliação da equação proposta pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 para a estimativa da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira, e não a caracterização das espécies utilizadas, justificando o número de corpos de prova utilizados.

4 Resultados e discussões

Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$), corrigidos para um teor de umidade de referência igual a 12%, encontram-se na Tabela 1, com seus respectivos coeficientes de variação (CV). Os valores médios de teor de umidade e de densidade aparente para cada espécie também são apresentados.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras

	$f_{c0,m}$ (MPa)	U_m (%)	ρ_{12} (g/cm ³)
Paricá	29,0	9,8	0,34
(CV)	13,6 %	3,0 %	12,9 %
Caixeta	36,5	10,3	0,42
(CV)	8,6 %	3,3 %	8,3 %
Caroba	35,7	10,4	0,45
(CV)	10,5 %	5,9 %	6,4 %
Caucho	47,0	9,6	0,53
(CV)	12,6 %	6,1 %	15,9 %
Cedrinho	47,1	13,2	0,58
(CV)	4,6 %	5,6 %	2,8 %
Catuaba	50,5	12,6	0,59
(CV)	6,7 %	4,9 %	5,8 %
Catanudo	51,0	11,4	0,71
(CV)	9,9 %	1,6 %	3,2 %
<i>E. grandis</i>	62,8	12,3	0,71
(CV)	7,4 %	4,0 %	6,8 %
Goiabão	69,3	11,3	0,84
(CV)	9,6 %	2,7 %	3,9 %

Fonte: autores.

Os resultados dos ensaios de embutimento na direção paralela às fibras para cada diâmetro de parafuso são apresentados na Tabela 2. Os valores mostrados correspondem aos valores médios de resistência ao embutimento corrigidos para um teor de umidade de

12%, e os valores médios de densidade aparente e teor de umidade no momento dos ensaios também são apresentados.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de embutimento na direção paralela às fibras

d (mm)	$f_{h0,m}$ (MPa)			U_m (%)			ρ_{12} (g/cm ³)		
	10	12,5	16	10	12,5	16	10	12,5	16
Paricá	21,4	25,1	22,6	8,9	9,4	8,9	0,33	0,35	0,34
(CV)	10,7 %	14,0 %	19,2 %	2,8 %	2,8 %	3,0 %	7,8 %	13,2 %	12,2 %
Caixeta	30,0	31,5	29,2	9,2	9,2	9,2	0,43	0,43	0,42
(CV)	9,3 %	10,9 %	12,1 %	2,4 %	2,8 %	3,7 %	4,7 %	9,3 %	6,5 %
Caroba	31,0	31,9	31,3	9,2	10,1	9,4	0,44	0,43	0,45
(CV)	14,1 %	12,6 %	9,6 %	3,0 %	3,3 %	3,2 %	8,1 %	6,3 %	5,1 %
Cauchó	39,7	42,8	40,2	9,2	9,6	9,2	0,53	0,50	0,52
(CV)	12,6 %	13,8 %	19,8 %	3,2 %	1,3 %	3,0 %	11,4 %	12,0 %	14,5 %
Cedrinho	45,3	41,7	45,6	13,0	11,3	12,5	0,58	0,57	0,57
(CV)	6,7 %	12,5 %	7,4 %	4,8 %	5,1 %	3,7 %	1,8 %	2,6 %	2,8 %
Catuaba	34,6	36,9	38,6	11,6	12,0	11,9	0,57	0,59	0,58
(CV)	8,5 %	9,1 %	7,2 %	1,7 %	2,3 %	1,9 %	5,3 %	6,5 %	5,7 %
Catanudo	56,0	57,9	54,5	10,9	11,0	11,8	0,71	0,72	0,71
(CV)	4,0 %	10,6 %	10,0 %	1,9 %	1,2 %	6,2 %	3,5 %	4,2 %	4,4 %
E. grandis	54,2	53,3	-	11,8	11,8	-	0,71	0,71	-
(CV)	9,8 %	14,2 %	-	2,1 %	2,1 %	-	6,5 %	8,4 %	-
Goiabão	75,3	77,7	74,8	10,9	11,3	12,3	0,83	0,83	0,82
(CV)	5,3 %	7,7 %	8,6 %	1,9 %	1,6 %	4,5 %	3,6 %	3,0 %	3,0 %

Fonte: autores.

Os valores teóricos de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira, calculados por meio do critério proposto pelo projeto de revisão da norma brasileira, encontram-se descritos na Tabela 3. As densidades utilizadas no cálculo foram retiradas da Tabela 2, permitindo a posterior comparação entre os resultados teóricos e experimentais.

Tabela 3 - Valores teóricos de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras

d (mm)	f_{h0} (MPa)		
	10	12,5	16
Paricá	24,5	25,1	23,5
Caixeta	31,9	30,8	29,0
Caroba	32,7	30,8	31,0
Cauchó	39,3	35,8	35,9
Cedrinho	43,1	40,9	39,3
Catuaba	42,3	42,3	40,0
Catanudo	52,7	51,6	49,0
E. grandis	52,7	50,9	-
Goiabão	61,6	59,5	56,6

Fonte: autores.

Na Tabela 4 é mostrada a relação entre valores experimentais e teóricos obtidos na Tabela 2 e na Tabela 3, respectivamente, possibilitando avaliar a aplicabilidade do critério proposto no projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 às espécies de madeira estudadas.

Tabela 4 – Relação entre os resultados experimentais e teóricos de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras

	$f_{h0, Experimental} / f_{h0, Teórico}$		
d (mm)	10	12,5	16
Paricá	0,87	1,00	0,96
Caixeta	0,94	1,02	1,01
Caroba	0,95	1,04	1,01
Caucho	1,01	1,20	1,12
Cedrinho	1,05	1,02	1,16
Catuaba	0,82	0,87	0,97
Catanudo	1,06	1,12	1,11
<i>E. grandis</i>	1,03	1,05	-
Goiabão	1,22	1,31	1,32

Fonte: autores.

Analisando a Tabela 4, é possível observar que os resultados teóricos obtidos por meio da equação proposta pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190:1997 foram próximos aos valores obtidos experimentalmente e, na maior parte dos casos, não divergiram em mais de 10%.

A maior divergência ocorreu para a espécie Goiabão, que também possui a maior densidade dentre as espécies estudadas. Em valores absolutos, a diferença para os diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm foram iguais à 13,7 MPa, 18,2 MPa e 18,2 MPa, respectivamente, com valores experimentais sempre superiores aos estimados.

No caso da espécie Catuaba, os resultados experimentais foram sempre inferiores aos estimados, de modo similar ao que ocorreu com a espécie Cupiúba no estudo de Almeida (2014).

Para o restante das espécies, de média e baixa densidade, os resultados experimental e teórico apresentaram boa concordância, e poucos foram os casos com divergências superiores à 10%. Valores experimentais inferiores aos teóricos foram observados em algumas situações, caracterizando uma situação contra a segurança.

É possível, ainda, relacionar os valores experimentais de resistência ao embutimento apresentados na Tabela 2 com a resistência à compressão paralela às fibras, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre a resistência ao embutimento experimental e a resistência a compressão paralela às fibras

	$f_{h0,Experimental}/f_{c0,m}$		
d (mm)	10	12,5	16
Paricá	0,74	0,87	0,78
Caixeta	0,82	0,86	0,80
Caroba	0,87	0,89	0,88
Cauchó	0,84	0,91	0,86
Cedrinho	0,96	0,89	0,97
Catuaba	0,69	0,73	0,76
Catanudo	1,10	1,14	1,07
<i>E. grandis</i>	0,86	0,85	-
Goiabão	1,09	1,12	1,08

Fonte: autores.

Por meio da Tabela 5, é possível observar que o critério teórico da norma vigente para estimar a resistência ao embutimento ($f_{h0} = f_{c0}$) apresentou resultados superiores aos experimentais para a maior parte dos casos, denotando uma situação contra a segurança. É importante salientar que, se usado o método de ensaio da norma vigente para determinar a resistência ao embutimento da madeira, essa situação seria agravada, tendo em vista que os valores experimentais da norma vigente são sempre inferiores aos da proposta de revisão. Por outro lado, para as espécies Catanudo e Goiabão, de maior densidade, a situação se inverte.

5 Considerações finais

O presente trabalho apresentou resultados experimentais de resistência ao embutimento na direção paralela às fibras para nove espécies diferentes de madeiras folhosas utilizadas no Brasil. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a BS EN 383, e os resultados obtidos foram comparados aos valores estimados por meio da norma brasileira vigente e seu projeto de revisão.

É possível observar uma boa concordância entre a resistência ao embutimento estimada pelo projeto de revisão da ABNT NBR 7190 e seu valor experimental, com divergência entre as relações inferiores a 10% na maior parte dos casos. Contudo, também foram observadas situações onde o resultado experimental foi inferior ao teórico, caracterizando uma situação contra a segurança.

Com relação ao critério da norma vigente, que permite considerar a igualdade entre as resistências ao embutimento e à compressão, ambos na direção paralela às fibras da madeira, os resultados indicaram valores contra a segurança para a maioria dos casos avaliados.



Encontro Brasileiro
em Madeiras e em
Estruturas de Madeira

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

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 CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa, concessão de bolsas e participação no evento.

Referências

ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para a determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paula, São Carlos, 2014.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **BS EN 383**: Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. Brussels: CEN, 2007.

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

HETTIARACHCHI, M.T.P.; NAWAGAMUWA, A.D. Embedment strength of tropical timber species. **Engineering**: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, v. 38, n.1, p. 39-45. 2005.

SANDHASS, C. et al. Embedment test parallel-to-grain and ductility in tropical hardwood species. In: 11th World Conference on Timber Engineering, 2010, Trentino. **Proceedings...** Trentino, WCTE, 2010, v. 1, p. 482-491.

TERRIN, M.V.P.; GÓES, J.L.N.; PLETZ, E. Avaliação experimental da resistência da madeira ao embutimento. In: XVI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Anais...** São Carlos, 2018. 13 p.

WHALE, L.R.J.; SMITH, I. The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5. In: CIB-W18 Meeting 19, 1986, Florence. **Proceedings...** Florence, 1986, paper 19-7-6.