

RESISTÊNCIA DE EMBUTIMENTO DA MADEIRA DE *PINUS* SEGUNDO AS NORMAS ABNT NBR 7190, EN 383 E ASTM D5764

EMBEDMENT STRENGTH OF *PINUS* WOODS ACCORDING TO ABNT NBR 7190, EN 383 AND ASTM D5764 STANDARDS

RESISTENCIA DE APLASTAMIENTO EN MADERAS DE *PINUS* DE ACUERDO CON LAS NORMAS ABNT NBR 7190, EN 383 Y ASTM D5764

Mario Brenner Ferreira da Silva Leite¹

Pedro Henrique Medeiros Fortes²

Rafael Massatoshi Tomita Tanabe²

Rafael dos Santos³

Julio Cesar Molina⁴

Resumo: Existem diversos tipos de ligações utilizadas nas estruturas de madeira, destacando-se ligações por pinos metálicos. Para avaliação destas ligações, diferentes recomendações normativas são utilizadas para determinação da resistência ao embutimento. Neste trabalho realizou-se uma avaliação dos métodos empregados pelas normas brasileira (NBR 7190), europeia (EN 383) e americana (ASTM D5764) para determinação da resistência ao embutimento da madeira de pinus. Em geral, a norma europeia apresentou valores mais consistentes para as resistências de embutimento analítica e experimental, favorecendo a segurança. A norma americana apresentou consistência para resistências experimentais na direção paralela, e a norma brasileira na direção perpendicular às fibras.

Palavras-chave: Madeira. Comparação. Embutimento. Ligações. *Pinus*.

¹ Graduado em Engenharia Mecânica. IFSP Campus Itapetininga. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7088-625X>. E-mail: mario.brenner@aluno.ifsp.edu.br

² Graduando em Engenharia Mecânica. IFSP Campus Itapetininga. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8982-542X>; <https://orcid.org/0009-0003-2065-4730>. E-mails: pedro.fortes@aluno.ifsp.edu.br; massatoshi.rafael@aluno.ifsp.edu.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Professor. IFSP Campus Itapetininga. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-5840>. E-mail: rafasantos01@ifsp.edu.br

⁴ Doutor em Engenharia Civil, Professor. USP Campus São Carlos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-0206>. E-mail: julio.molina@usp.br

Abstract: There are several types of connections used in timber structures, including connections using metallic pins. To evaluate these connections, different normative are used to determine the embedding strength. This study evaluates the methods employed by Brazilian (NBR 7190), European (EN 383), and American (ASTM D5764) standards for determining the embedment strength of pine wood. In general, the European standard presented more consistent values for analytical and experimental embedment strength, favoring safety. The American standard presented consistency for experimental strengths in the parallel direction, while the Brazilian standard in the direction perpendicular to the fibers.

Keywords: Wood; Comparison; Embedment; Connections; Pinus.

Resumen: Existen varios tipos de conexiones utilizadas en estructuras de madera, como pasadores metálicos. Para evaluarlos, se utilizan diferentes normativas para determinar la resistencia al aplastamiento. En este trabajo se realizó una evaluación de los métodos utilizados por las normas brasileña (NBR 7190), europea (EN 383) y americana (ASTM D5764) para determinar la resistencia al aplastamiento de madera de pino. Generalmente, la norma europea presentó valores más consistentes en los aplastamientos analítico y experimental, favoreciendo la seguridad. La norma americana mostró consistencia para las resistencias experimentales en la dirección paralela y la norma brasileña en la dirección perpendicular a las fibras.

Palabras-clave: Madera; Comparación; Aplastamiento; Conexiones; Pinus.

Submetido 02/10/2023

Aceito 19/11/2023

Publicado 20/11/2023

Introdução

Desde as épocas mais remotas da civilização humana, o uso da madeira como elemento estrutural na construção de habitações apresenta um papel preponderante no desenvolvimento da sociedade moderna. Um marco divisor na utilização desta matéria-prima foi a presença de elementos de união entre as peças, podendo estas serem dispostas horizontalmente ou verticalmente (Araujo *et al.*, 2019).

Os projetos de estruturas de madeira devem se atentar principalmente à escolha da conexão a ser utilizada, bem como ao seu dimensionamento, considerando os membros de suporte de carga. Tendo em vista quesitos como eficiência, impacto ambiental e praticidade, a união através de conectores mecânicos, como parafusos e pinos metálicos, se apresenta como uma alternativa muito utilizada pelos projetistas (Ramage *et al.*, 2017).

Existem basicamente dois modos de falha para as ligações por pinos: por flexão do pino metálico devido a um esforço perpendicular ao seu eixo, ou pelo embutimento do pino na peça de madeira, devido ao estado múltiplo de tensões na madeira (Almeida; Dias, 2019).

A resistência ao embutimento da madeira é um dos parâmetros analisados na avaliação da capacidade de carga da ligação. Pode ser entendida como as tensões que surgem do contato entre o elemento metálico e a madeira na ligação durante a atuação de uma força externa ao elemento de madeira (Schneid, 2017).

Visando estabelecer um padrão para os ensaios de embutimento e dimensionamentos das ligações em estruturas de madeira, existem documentos normativos com diferentes métodos de ensaios. Dentre estes documentos, destacam-se a proposta da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7190, de 1997, que orientou o cálculo das ligações e os respectivos ensaios até o ano de 2022, a da norma europeia da *European Standards* (EN) 383 de 2007 e a da norma americana da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D5764 de 2018. No entanto, observam-se algumas diferenças quanto aos parâmetros de ensaio entre estas normas, o que conseqüentemente acarreta diferentes resultados. Além disso, observam-se também critérios diferenciados para determinação da resistência analítica a depender do instrumento normativo. No Brasil, a própria ABNT NBR 7190 apresenta as orientações para sua determinação. Na Europa e nos Estados Unidos são utilizados dois outros documentos, respectivamente: o Eurocode 5 que recomenda o documento EN 383 e a norma americana ASTM D5764 que recomenda o documento NDS 2018.

Neste trabalho foi realizada uma avaliação dos métodos normativos para a determinação, de forma analítica e experimental, da resistência ao embutimento de pinos metálicos em peças de madeira de pinus com base nos documentos normativos ABNT NBR 7190, EN 383, ASTM D5764, com posterior comparação entre esses resultados.

Materiais e Métodos

Acondicionamento da madeira

Para este estudo foi utilizada a madeira do gênero *Pinus* adquirida em uma serraria na cidade de Lençóis Paulista - SP. As tábuas de madeira possuíam as seguintes dimensões: 20 mm de espessura, 200 mm de largura e 3000 mm de comprimento. Além das tábuas, para a caracterização da espécie também foram adquiridos dois caibros com as seguintes dimensões: 50 mm de espessura, 50 mm de largura e 1500 mm de comprimento. O armazenamento das tábuas e caibros foi realizado em forma de tabiques. Para estabilização e homogeneização do teor de umidade, as madeiras permaneceram armazenadas em local seco e arejado por aproximadamente 4 meses.

Caracterização da madeira

Para a caracterização física e mecânica da madeira de pinus foram utilizados os métodos contidos no método de ensaio ABNT NBR 7190-3 (2022) e foram determinadas, neste caso, as propriedades de densidade aparente, teor de umidade e resistência à compressão paralela às fibras da madeira.

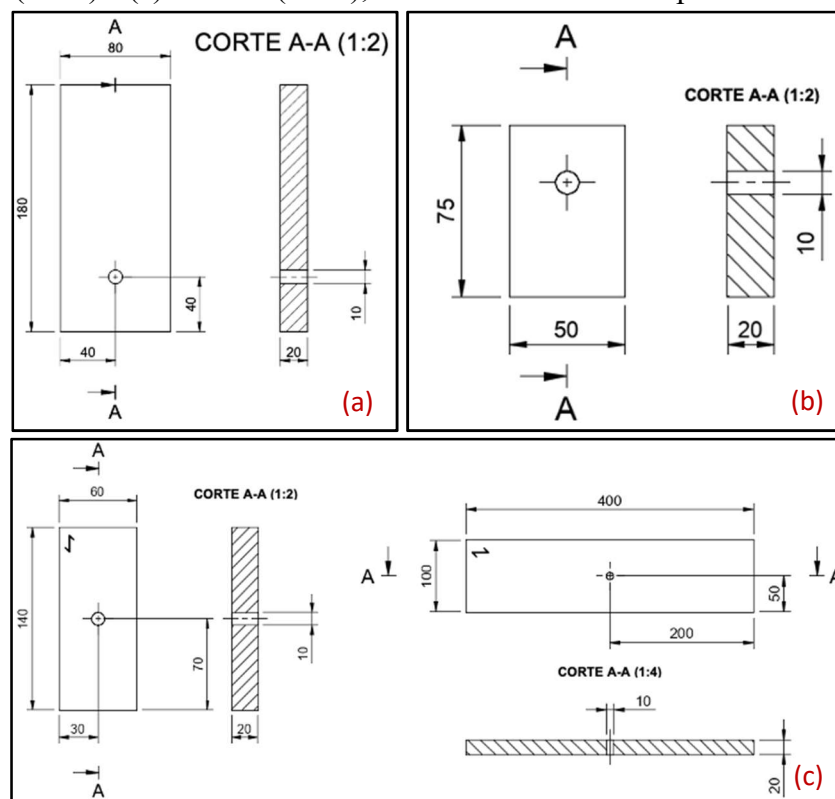
Os ensaios de densidade aparente e teor de umidade foram realizados a partir de quinze corpos de prova de seção retangular de 30 mm por 20 mm e comprimento de 50 mm a partir de todas as tábuas. Para os ensaios de compressão paralela às fibras, foram fabricados 6 corpos de prova de seção transversal quadrada de 50 mm de lado e 150 mm de comprimento.

Para a caracterização das propriedades físicas de umidade e densidade foi utilizada uma estufa de secagem regulada para $103 \pm 2^\circ\text{C}$ para a secagem dos corpos de prova e uma balança analítica de precisão para pesagem das amostras. Para medição dos corpos de prova, foi utilizado um paquímetro analógico de precisão centesimal.

Corpos de prova dos ensaios segundo as normas brasileira, europeia e americana

Os ensaios segundo a norma brasileira foram realizados com corpos de prova de largura de 80 mm, comprimento de 180 mm e espessura de 20 mm. Esses ensaios foram realizados principalmente para avaliação da resposta do método brasileiro, com relação aos métodos americano e europeu. Na Figura 1 são apresentados os corpos de prova confeccionados segundo as recomendações das normas brasileira, americana e europeia, respectivamente.

Figura 1 - Dimensões dos corpos de prova segundo as normas (a) ABNT NBR 7190 (1997), (b) ASTM D5764 (2018) e (c) EN 383 (2007), todas considerando um pino de diâmetro de 10 mm.



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Para a realização dos ensaios em corpos de prova de embutimento foram realizadas um total de 6 repetições para cada norma, totalizando, considerando-se as direções de fibras analisadas (paralela ou perpendicular), 36 ensaios de embutimento.

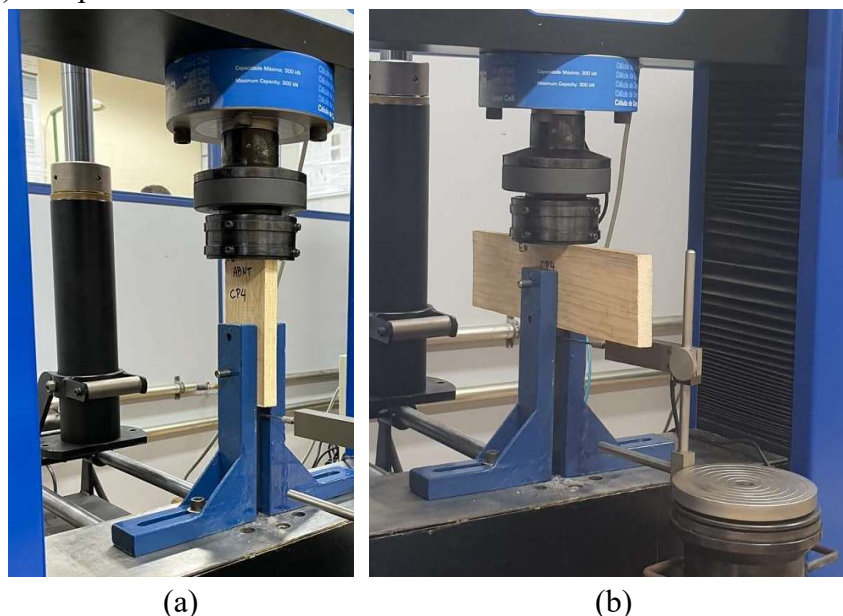
Equipamento utilizado para os ensaios

Os ensaios de compressão paralela às fibras (caracterização mecânica) e de embutimento foram realizados nas dependências do Laboratório de Ensaios dos Materiais (LabMat) do IFSP campus Itapetininga. O equipamento utilizado foi uma Máquina Universal de Ensaios modelo DL30000, fabricada pela empresa EMIC, cuja capacidade é de 300 KN.

Ensaio de embutimento e cálculos analíticos

Os pinos com os corpos de prova foram acomodados na máquina por meio de um aparato desenvolvido especificamente para estes os ensaios de embutimento. A Figura 2a apresenta o aparato desenvolvido acomodando os corpos de prova para os ensaios conforme a norma brasileira. A Figura 2b mostra também o transdutor de deslocamento LVDT utilizado para medição do deslocamento absoluto do conjunto em um ensaio segundo a norma europeia.

Figura 2 - Corpos de prova acomodados no aparato para ensaio de acordo com as normas (a) brasileira e (b) europeia.



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Os procedimentos quanto aos carregamentos e deslocamentos absolutos seguiram as orientações dadas pelas publicações mais atuais das normas ASTM D5764 e EN 383. Para os ensaios conforme a ABNT NBR 7190, foi utilizada a versão de 1997 da norma, visto que a

versão mais atual desta norma, publicada em junho de 2022 contempla os ensaios propostos pela norma europeia.

A resistência analítica de embutimento paralela às fibras segundo a ABNT NBR 7190 (1997) foi tomada como a resistência à compressão paralela às fibras, sendo considerada a tensão média corrigida para a umidade de 12%. Foi utilizado um coeficiente de correção α_e igual a 1,68 para o pino de diâmetro 10 mm. Os detalhes dos ensaios de embutimento nas direções paralela e perpendicular às fibras na EMIC são mostrados na Figura 2.

As resistências de embutimento analíticas paralela e perpendicular às fibras foram calculadas segundo a norma NDS 2018 (AWC, 2017). A massa específica utilizada foi obtida pela caracterização da madeira, e foi utilizada para determinação das resistências de embutimento analíticas segundo o Eurocode 5 (2004). Para a norma europeia, foi considerado o coeficiente k_{90} referente às coníferas. As equações utilizadas nos cálculos das resistências de embutimento analíticas estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 - Modelos de cálculo utilizados para obtenção das resistências analíticas segundo as normas brasileira, americana e europeia.

Direção do Ensaio	Normas utilizadas		
	<i>NBR 7190</i>	<i>NDS 2018</i>	<i>Eurocode 5</i>
Paralelo às fibras	$f_{e0,d} = f_{c0,d}$	$F_{e\parallel} = 77,25 (0,001 \cdot \rho)$	$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k$
Perpendicular às fibras	$f_{e90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_e$	$F_{e\perp} = \frac{212 \cdot (0,001 \cdot \rho^{1,45})}{(D)^{0,5}}$	$f_h = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}}$
Coeficiente k_{90} para coníferas conforme Eurocode 5 (EN, 2004)			$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d$

Fonte: AWC (2017); EN (2004); NBR 7190 (1997).

Análises estatísticas

Para verificação da consistência dos resultados obtidos e a forma como os valores de cada norma se relacionam entre si, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), modelo estatístico que testa a equivalência entre duas ou mais populações através da análise de uma hipótese nula (H_0) que conjectura que as médias das populações são iguais, e uma hipótese alternativa (H_1), que entende que pelo menos uma das populações apresentou uma diferença estatística significativa das demais (Gomes, 1990).

Para verificação da normalidade da distribuição dos dados obtidos foi utilizado o Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). A ANOVA foi empregada para analisar os dados de ambas as direções em relação às fibras, abarcando os resultados dos ensaios segundo as três normas. Para os casos em que se constatou diferença estatística significativa entre os valores, foi utilizado o Teste de Tukey para verificação de quais ensaios, especificamente, apresentaram diferença estatística significativa entre si.

Os cálculos estatísticos foram feitos utilizando o *software* Excel, e foi admitido um nível de significância de 5% para todas as análises.

Resultados

Caracterização da madeira

Para os resultados de densidade aparente, obteve-se uma média de 0,51987 g/cm³ (519,87 kg/m³), com um desvio padrão de 0,05564 g/cm³. Para os resultados de umidade, obteve-se uma média de 13,85%, com um desvio padrão 0,1858%.

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos para o valor característico de resistência à compressão paralela. Foi obtido um valor de 40,73 MPa, categorizando a amostra estudada em uma classe de resistência C30, conforme a ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 1 - Resultados para valor característico e classe de resistência da madeira de pinus.

Corpos de Prova	f_{c0} (MPa)	f_{c0} (U12%, MPa)	f_{wk} (MPa)
1	36,44	38,46	40,73
2	38,98	41,14	
3	40,34	42,58	
4	40,65	42,91	
5	41,04	43,32	
6	48,40	52,09	
Média (MPa)	-----	43,25	-----
Desvio Padrão (MPa)	-----	4,23	-----
Coef. de Variação (%)	-----	9,77	-----

Fonte: (Elaboração própria, 2022).

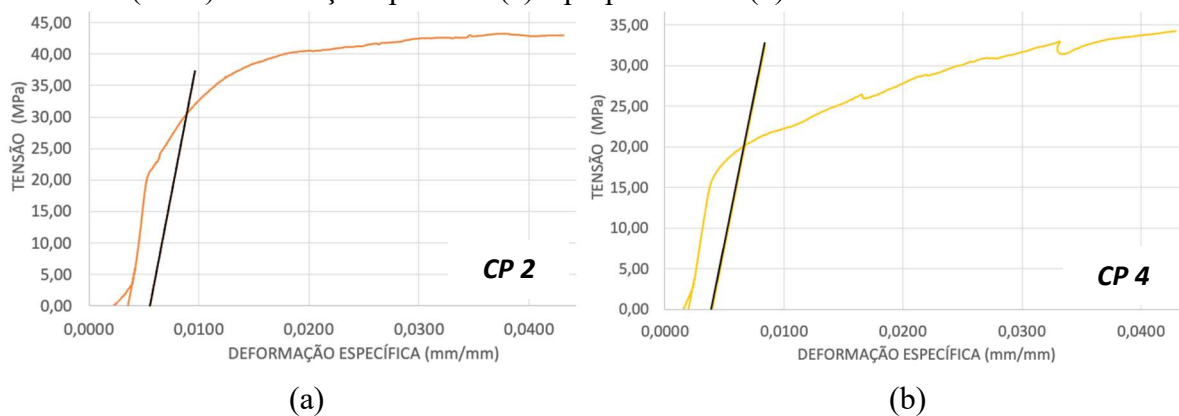
Morales (2008) apresenta os valores médios da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) para as coníferas *Pinus hondurensis* e *Pinus oocarpa* de 42,3 MPa e 43,6 MPa,

respectivamente. A autora também classificou a espécie *Pinus hondurensis* como resistência C30. Verificou-se assim a consistência entre os valores obtidos no presente trabalho com espécies similares do gênero *Pinus* obtidos por outros autores.

Ensaio e cálculos para a resistência de embutimento segundo a ABNT NBR 7190

A Figura 3a apresenta um gráfico tensão (MPa) x deformação específica (mm/mm) referente a um dos ensaios realizados conforme a ABNT NBR 7190 (1997) na direção paralela às fibras. Similarmente, a Figura 3b apresenta um gráfico tensão (MPa) x deformação específica (mm/mm) referentes aos ensaios realizados conforme a norma brasileira na direção perpendicular às fibras. O comportamento dos ensaios para os demais corpos de prova foi similar, sendo que a linha preta traçada representa a reta secante 2%, utilizada para encontrar a resistência de embutimento, conforme preconiza a norma supracitada.

Figura 3 - Gráficos tensão x deformação para os ensaios realizados de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997) nas direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras.



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

A Tabela 2 sumariza os resultados de resistência ao embutimento paralela e perpendicular às fibras com umidade corrigida para 12% conforme a norma ABNT NBR 7190, com seus respectivos desvios padrão, bem como os valores analíticos calculados.

Observou-se que em ambos os ensaios, a resistência ao embutimento paralela às fibras foi superior à resistência ao embutimento perpendicular às fibras. Além disso, a resistência analítica perpendicular às fibras foi menor à média experimental, porém próxima. Além disso,

o valor analítico da resistência ao embutimento paralelo às fibras foi consideravelmente superior ao valor experimental.

Tabela 2 - Resultados de resistência ao embutimento paralela e perpendicular às fibras com seus respectivos desvios padrão segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Corpos de Prova	f_{e0} (MPa)	Valor Analítico (MPa)	f_{e90} (MPa)	Valor Analítico (MPa)
1	29,64	43,25	18,91	18,16
2	32,18		25,10	
3	32,13		19,19	
4	32,18		21,29	
5	28,31		18,90	
6	34,23		19,46	
Média (MPa)	31,45	-----	20,48	-----
Desvio Padrão (MPa)	2,12	-----	2,43	-----
Coef. de Variação (%)	6,74	-----	11,87	-----

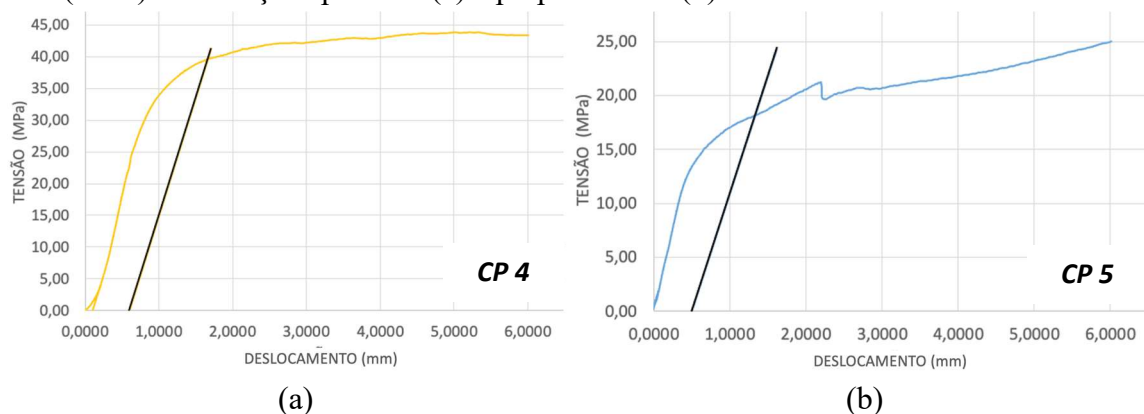
Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Almeida *et al.* (2014) e Molina e Ribas Junior (2020) realizaram ensaios de embutimento similares aos propostos neste trabalho, porém com pinos metálicos de diâmetro 10 mm e madeira da espécie *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, respectivamente. Os autores também encontraram valores maiores para a resistência ao embutimento paralelo às fibras em relação à perpendicular às fibras. Eles observaram também que os valores analíticos obtidos foram maiores que os valores experimentais em ambas as direções, ao passo que neste trabalho o valor analítico foi maior na direção paralela e menor na direção perpendicular. Neste caso, além das possíveis diferenças causadas pela espécie da madeira, outro fator que pode ter contribuído é o fato de que os autores Almeida *et al.* (2014) e Molina e Ribas Junior (2020), utilizaram uma interpolação linear entre os diâmetros de 0,95 cm e 1,25 cm para obter um coeficiente α_e equivalente ao diâmetro de 10 mm para o cálculo da resistência ao embutimento analítica, enquanto no presente trabalho optou-se por utilizar o coeficiente referente ao diâmetro imediatamente superior (1,25 cm).

Ensaio e cálculos para a resistência de embutimento segundo a ASTM D5764

A Figura 4a apresenta um gráfico tensão (MPa) x deslocamento (mm) referente aos ensaios realizados conforme a ASTM D5764 (2018) na direção paralela às fibras. A Figura 4b, por sua vez, apresenta um gráfico tensão (MPa) x deslocamento (mm) referente aos ensaios realizados conforme a ASTM D5764 na direção perpendicular às fibras. O comportamento dos ensaios para os demais corpos de prova foi similar, sendo que a linha preta traçada representa a reta secante de 5% do diâmetro do pino utilizada para encontrar a tensão a ser utilizada como resistência de embutimento.

Figura 4 - Gráficos tensão x deslocamento para os ensaios performados de acordo com a ASTM D5764 (2018) nas direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras.



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

A Tabela 3 sumariza os resultados de resistência ao embutimento paralela e perpendicular às fibras com umidade corrigida para 12% conforme a ASTM D5764 (2018), com seus respectivos desvios padrão, bem como o valor analítico calculado segundo a NDS 2018 (AWC, 2017).

Notou-se que, para os ensaios e cálculos analíticos referentes à resistência perpendicular às fibras, o valor médio experimental foi menor que o valor calculado, ao passo que, para a resistência paralela, o valor analítico foi menor, porém muito próximo.

Molina *et al.* (2017a; 2017b) realizaram ensaios de embutimento similares utilizando *Pinus elliottii* e um pino de 6,35 mm (1/4") de diâmetro. Os autores também identificaram valores próximos para a resistência experimental e analítica, porém na direção perpendicular às fibras. Para os valores paralelos às fibras, o resultado experimental foi maior que o analítico em

aproximadamente 15,33%. Os autores pontuam, no entanto, a possível influência do efeito de flexão do pino devido ao seu diâmetro, e a relevância das recomendações da norma brasileira a respeito da utilização de um pino de diâmetro igual ou maior que 10 mm, diâmetro que foi utilizado no presente estudo e onde não foi observada a flexão do pino metálico.

Tabela 3 - Resultados de resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras com seus respectivos desvios padrão segundo a ASTM D5764 (2018) e NDS 2018 (AWC, 2017).

Corpos de Prova	$F_{e\parallel}$ (MPa)	Valor Analítico (MPa)	$F_{e\perp}$ (MPa)	Valor Analítico (MPa)
1	37,50	40,14	22,72	25,96
2	42,80		15,76	
3	41,14		19,96	
4	41,80		18,75	
5	44,18		19,19	
6	37,71		16,03	
Média (MPa)	40,86	-----	20,48	-----
Desvio Padrão (MPa)	2,72	-----	2,60	-----
Coef. de Variação (%)	6,66	-----	12,70	-----

Fonte: (Elaboração própria, 2022).

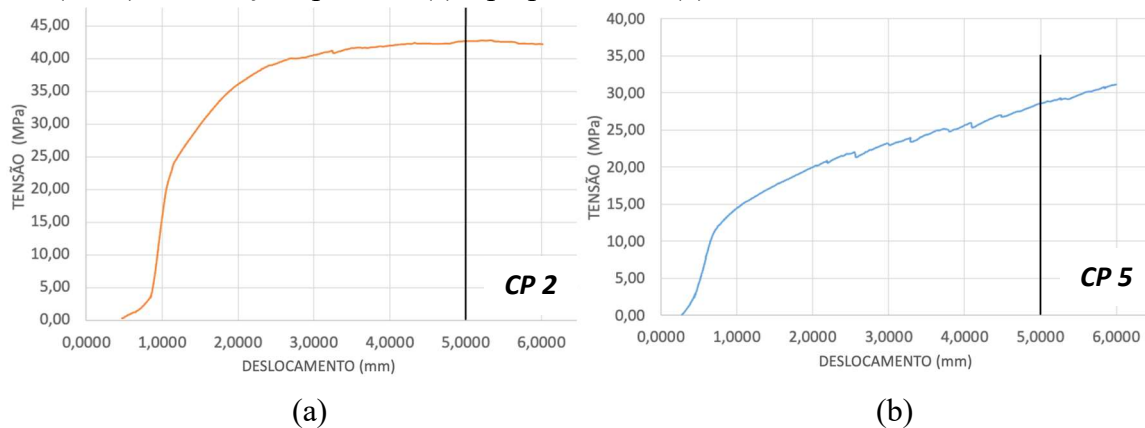
Ensaio e cálculos para a resistência de embutimento segundo a EN 383

A Figura 5a apresenta um gráfico tensão (MPa) x deslocamento (mm) referente a um dos ensaios realizados conforme a norma EN 383 (2007) na direção paralela às fibras. A Figura 5b apresenta um gráfico tensão (MPa) x deslocamento (mm) referente a um dos ensaios realizados conforme a EN 383 na direção perpendicular às fibras. O comportamento dos ensaios para os demais corpos de prova foi similar, sendo que a linha preta traçada representa a reta com deslocamento de 5 mm utilizada para encontrar a tensão a ser utilizada como resistência de embutimento. A Tabela 4 sumariza os resultados de resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras com umidade corrigida para 12% conforme a EN (2007), com seus respectivos desvios padrão, bem como o valor analítico calculado segundo o Eurocode 5.

Em ambas as direções de esforços em relação às fibras, observou-se que os valores de resistência analítica foram inferiores à resistência experimental. Glišović, Stevanović e Kočetov-Mišulić (2012) realizaram ensaios similares utilizando madeira do tipo *Pinus*

silvestris, pinos metálicos de 12 mm de diâmetro e encontraram valores quase idênticos para a resistência paralela experimental e analítica de 38,00 MPa e 38,12 MPa respectivamente, muito próximas ao valor analítico do presente trabalho.

Figura 5 - Gráficos tensão x deslocamento para os ensaios realizados de acordo com a EN 383 (2007) nas direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras.



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Tabela 4 - Resultados de resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras segundo a EN 383 (2007) e valor analítico conforme Eurocode 5 (2004).

Corpos de Prova	Paralelo às fibras		Perpendicular às fibras	
	f_h (MPa)	Valor Analítico (MPa)	f_h (MPa)	Valor Analítico (MPa)
1	38,26	38,37	25,99	25,58
2	45,01		23,12	
3	42,24		34,56	
4	46,83		32,11	
5	41,08		30,19	
6	46,74		36,44	
Média (MPa)	43,36	-----	30,40	-----
Desvio Padrão (MPa)	3,42	-----	5,08	-----
Coef. de Variação (%)	7,89	-----	16,71	-----

Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Terrin (2018) efetuou ensaios com *Pinus elliottii* e pinos metálicos de diâmetro 3,00 mm, 5,90 mm, 7,80 mm, 9,70 mm e 11,70 mm. Para todos os casos, obteve valores de

resistência calculados pelo Eurocode 5 inferiores ao experimental da EN 383 na direção perpendicular às fibras, assim como observado neste trabalho.

Comparação entre as normas

Para os ensaios segundo a norma brasileira na direção paralela às fibras, foi obtida uma resistência ao embutimento média de $31,45 \pm 2,12$ MPa. As resistências na mesma direção para as normas americana e europeia foram, respectivamente, $40,86 \pm 2,72$ MPa e $43,36 \pm 3,42$ MPa. Para os ensaios na direção perpendicular às fibras, foi obtida uma resistência ao embutimento média de $20,48 \pm 2,43$ MPa pela norma brasileira, sendo as respectivas resistências para as normas americana e europeia de $18,74 \pm 2,60$ MPa e $30,40 \pm 5,08$ MPa.

Com base nestes dados, foi verificada a normalidade da distribuição dos dados através do Teste K-S. Observou-se que, para todos os casos, o valor de K-S calculado foi inferior ao tabelado, indicando assim de que não houve evidências para rejeitar a hipótese nula de que os ensaios possuem uma distribuição normal. Assim, como todos os conjuntos de dados possuem distribuição normal foi possível realizar uma análise de variância para comparar tais conjuntos.

Para a ANOVA, os dados foram agrupados em dois grupos: ensaios na direção paralela e ensaios na direção perpendicular, com seus respectivos resultados de acordo com cada norma. A hipótese nula foi de que não existiu diferença significativa entre as três normas, sendo tal hipótese verificada de modo independente para cada direção. A hipótese alternativa foi de que há diferença significativa entre dois ou entre todos os ensaios.

Para os ensaios na direção paralela às fibras observou-se que, como o valor P é menor que o nível de significância assumido (0,05) e como a razão F é maior que o valor F crítico, houve variação significativa entre os ensaios, de modo que a hipótese alternativa se comprova. Para os ensaios na direção perpendicular, a análise dos resultados por meio da ANOVA também mostrou que houve diferença significativa entre dois ou entre todos os ensaios.

Para verificação específica de quais ensaios apresentaram diferenças significativas, foi aplicado o Teste de Tukey. Os resultados mostraram que para os ensaios na direção perpendicular às fibras, há diferença significativa entre as normas americana e europeia e entre as normas brasileira e europeia. Na direção paralela, houve diferença na comparação entre a normas brasileira e europeia e entre as normas brasileira e americana. Os ensaios que não apresentaram diferenças significativas entre si foram os resultados das normas brasileira e a

americana na direção perpendicular, e os resultados das normas americana e europeia na direção paralela.

A Tabela 5 apresenta os valores médios obtidos de acordo com cada direção e normativa para resistência de embutimento e deslocamentos médios, bem como os valores analíticos calculados para cada caso. Para evidenciar as diferenças entre os ensaios, foi utilizado o princípio de letras associadas às médias dos resultados, onde médias seguidas de mesma letra não diferiram estatisticamente entre si ao nível de significância adotado.

Tabela 5 - Resultados médios para resistência ao embutimento para os ensaios realizados pelas normas estudadas.

Ensaio	Resistência ao embutimento média (MPa)	Valor Analítico (MPa)	Deslocamento médio (mm)
Direção paralela - ABNT NBR 7190	31,45a \pm 2,12	43,25	1,05 \pm 0,14
Direção paralela - ASTM D5764	40,86b \pm 2,72	40,14	1,68 \pm 0,20
Direção paralela - EN 383	43,36b \pm 3,42	38,37	4,72 \pm 0,71
Direção normal - ABNT NBR 7190	20,48c \pm 2,43	18,16	0,96 \pm 0,07
Direção normal - ASTM D5764	18,74c \pm 2,60	25,96	1,24 \pm 0,26
Direção normal - EN 383	30,40d \pm 5,08	25,58	5,00 \pm 0,01

Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Análise das resistências de embutimento experimentais

Analisando a direção perpendicular às fibras, os valores obtidos para as normas brasileira e americana não apresentaram diferença estatística significativa, e apresentaram valores muito próximos, considerando-se o desvio padrão. Comparando-se a maneira como as duas normas entendem a resistência ao embutimento, observou-se uma consonância entre o deslocamento específico de 2‰ da norma brasileira e o deslocamento absoluto de 5% do diâmetro do pino da norma americana, visto que estas são as referências para a reta secante utilizada para se determinar a carga de embutimento nas respectivas normas e que os deslocamentos absolutos foram próximos. A norma europeia assume um deslocamento maior, de 5 mm, que é um grande diferencial ao se comparar com o deslocamento das outras normas.

Outro ponto de análise são as diferentes dimensões dos corpos de prova. Para o ensaio segundo a ABNT NBR 7190 (1997), na direção perpendicular às fibras, a distância entre o

centro do pino metálico e a borda da madeira é de 140 mm. Já nas normas americana e europeia, esta distância é de 50 mm. Apesar desta igualdade entre as duas normas estrangeiras nesta distância, o comprimento dos corpos de prova é muito diferente, sendo 400 mm segundo a EN 383 (2007) comparados aos 50 mm da ASTM D5764 (2018). O fato de ser quatro vezes menor pode justificar um fenômeno observado em muitos corpos de prova da norma americana, que foi o fendilhamento. A Figura 6 destaca o fenômeno observado.

Figura 6 - Fendilhamento observado em corpos de prova segundo a ASTM D5764 (2018).



Fonte: (Elaboração própria, 2022).

Como observam Santos *et. al.* (2010), o fendilhamento observado nos ensaios segundo a norma americana leva a uma abrupta perda de resistência, o que compromete os valores da resistência ao embutimento.

Voltando atenção agora para os ensaios na direção paralela às fibras, as normas americana e europeia não apresentaram diferença estatística significativa para a resistência de embutimento, apesar de deslocamentos absolutos médios diferentes. Nesta direção, os corpos de prova entre as duas normas apresentam dimensões mais próximas, sendo para a ASTM D5764 (2018) as mesmas da direção normal às fibras, e segundo a EN 383 (2007), uma distância de 70 mm entre o centro do pino metálico e a borda de compressão, e comprimento de 60 mm.

A norma brasileira apresentou diferença estatística significativa com a norma europeia em ambas as direções, o que é um indicativo de discrepâncias entre os processos de ensaio.

Enquanto a norma europeia considera um ciclo de carregamento, a norma brasileira considera dois. A norma europeia fixa um deslocamento de 5 mm para determinação da carga de embutimento, enquanto a norma brasileira considera uma deformação específica de 0,002 (valor adimensional) por meio da reta secante. Ademais, os corpos de prova apresentam dimensões diferentes tanto na distância pino-borda, quanto no comprimento, o que influencia diretamente nos resultados do ensaio.

Análise das resistências analíticas

Quanto aos cálculos analíticos para as diferentes normas, uma das principais diferenças que se observou foi que a norma brasileira considera somente a resistência à compressão paralela às fibras para o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras. Por outro lado, as normas europeia e americana levam em conta parâmetros como o diâmetro do pino e a massa específica da madeira. Apesar da diferença nos modelos de cálculo, a maneira brasileira para estimativa da resistência ao embutimento paralela às fibras apresentou resultados próximos aos calculados pelas normas internacionais.

Para o cálculo analítico na direção perpendicular às fibras, observa-se que a norma brasileira ficou consideravelmente abaixo das outras normas, que apresentaram resultados muito próximos. Isto pode ser um indicativo que a correção de 25% utilizada no cálculo pode ser uma métrica conservadora quando comparada aos padrões internacionais. Ademais, a necessidade de utilização de um coeficiente aproximado devido a quantidade limitada de diâmetros previstos na ABNT NBR 7190 (1997) pode ser outro ponto que necessite de revisão.

Através da assertividade das normas americana e europeia, principalmente no ensaio na direção perpendicular às fibras, pode-se observar a relevância da consideração da densidade nos cálculos analíticos. O Eurocode 5 (2004) apresenta um refinamento adicional em sua análise, ao considerar coeficientes diferenciados pelo tipo de madeira utilizada (coníferas ou folhosas), conferindo mais acurácia aos resultados, como observado por Molina, Ribas Junior e Christoforo (2020). Além disso, dentre as normas estudadas, a europeia foi a única que apresentou um valor analítico inferior à média experimental. Isto indica um favorecimento da segurança, com uma diferença de mais de 10% entre os valores calculados e obtidos por ensaio.

Considerações finais

No que tange as resistências ao embutimento, os maiores valores médios, em ambas as direções, foram obtidos através dos ensaios segundo a norma europeia EN 383 (2007).

Quando comparado com os outros métodos de cálculo analítico, o Eurocode 5 foi o único que apresentou menores valores em relação ao experimental, o que indicou um favorecimento da segurança para a estimativa da resistência.

O método brasileiro para determinação da resistência analítica de embutimento se mostrou efetivo na direção paralela às fibras, mas conservadora na direção perpendicular.

Vê-se oportunidades para revisão nos cálculos analíticos para que se considere também a massa específica como uma das variáveis, visto que as normas internacionais a consideram e obtiveram valores próximos da experimental, principalmente na direção paralela às fibras.

Estatisticamente, as normas brasileira e americana não apresentaram diferenças significativas na direção perpendicular às fibras, além de valores para a resistência de embutimento similares. Atribui-se a isso às dimensões dos corpos de prova mais próximas entre elas quando comparadas com as dimensões dos corpos de prova da norma europeia.

O fendilhamento nos corpos de prova da norma americana se mostrou um fator influente nos resultados, sendo uma característica inerente ao menor comprimento do corpo de prova.

Na direção paralela às fibras, observou-se mais consistência entre as normas europeia e americana, onde observou-se mais similaridade entre as dimensões influentes.

A norma brasileira apresentou diferença estatística significativa em relação à norma europeia, e de fato observou-se procedimentos de ensaios diferentes quanto aos ciclos de carregamento, corpos de prova e referências para a carga de embutimento.

Referências

ALMEIDA, D. H.; DIAS, A. A. Resistência da madeira ao embutimento perpendicular às fibras: comparação de métodos de ensaio. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 175-181, out./dez. 2019. ISSN 1678-8621.

ALMEIDA, D. H. *et al.* Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 347-352, abr. 2014.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **NDS 2018**: National design specification for wood construction 2018 Edition. Leesburg: American Wood Council, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5764: Evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products**. West Conshohocken: ASTM, 2018.

ARAUJO, V. A. *et al.* Disponibilidade de las técnicas constructivas de habitación en madera en Brasil. **Revista de Arquitectura**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 68-75, set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190. Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro, 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 383:2007 – Timber structures – Test methods - Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners**. Brussels: 2007.

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

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; KOČETOV-MIŁULIĆ, T. Embedment test of wood for dowel-type fasteners. **Wood Research**, v. 4, n. 57, p. 639-650, jan. 2012.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

MOLINA, J. C. *et al.* Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004). **REM - International Engineering Journal**, v. 70, p. 9-17, 2017a.

MOLINA, J. C. *et al.* Embedment strength of steel dowel in wood specimens according to ABNT NBR 7190:1997 and ASTM D5764: 2007 Standards. **Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería**, Aricaq, v. 25, n. 3, p. 492-500, set. 2017b.

MOLINA, J. C.; RIBAS JUNIOR, A. S.; CHRISTOFORO, A. L. Embedding strength of Brazilian woods and recommendation for the Brazilian standard. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**, v. 173, n. 12, p. 948-955, Dec. 2020.

MOLINA, J. C.; RIBAS JUNIOR, A. S. Resistência de embutimento em amostras padronizadas de madeira segundo as normas brasileira, europeia e americana. In: GONÇALVES, F. G. (Org.). **Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendências**, [S.l.]: Editora Científica Digital, 2020, cap. 21. p. 317-329.

MORALES, E. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos**. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: the use of timber in construction. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 68, n. 1, p. 333-359, Feb. 2017.

SANTOS, C. L. *et al.* A comparison between the EN 383 and ASTM D5764 test methods for dowel-bearing strength assessment of wood: experimental and numerical investigations. **Strain**, v. 46, n. 2, p. 159-174, 2010.

SCHNEID, E. **Influência da temperatura e do ângulo da grã na resistência ao embutimento da madeira**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

TERRIN, M. V. P. **Avaliação experimental da resistência da madeira ao embutimento**. 2018. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.