

# COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS DA RESISTÊNCIA AO EMBUTIMENTO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L.<sup>1</sup>

Diego Henrique de Almeida<sup>2</sup>, Fabiane Salles Ferro<sup>3</sup>, Luciano Donizeti Varanda<sup>3</sup>, André Luis Christoforo<sup>4</sup>, Francisco Antonio Rocco Lahr<sup>5</sup>, Julio Cesar Molina<sup>6</sup> e Carlito Calil Junior<sup>5</sup>

RESUMO – Para dimensionar ligações entre membros estruturais de madeira com pinos metálicos (pregos ou parafusos), dois fenômenos devem ser levados em consideração: a flexão do pino metálico e a resistência da madeira ao embutimento. A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 preconiza a metodologia empregada em ensaios laboratoriais para determinação da resistência da madeira ao embutimento com pino metálico e, na ausência dos ensaios, especifica relações para estimar a resistência da madeira ao embutimento a partir da resistência na compressão. O objetivo desta pesquisa consistiu na comparação entre valores de resistência ao embutimento da madeira determinados experimentalmente e calculados utilizando parâmetros recomendados pela ABNT NBR 7190:1997. Pelos resultados dos testes de hipótese, pode-se concluir que a estimativa da resistência ao embutimento paralelo às fibras proposta pela ABNT NBR 7190:1997, que estabelece equivalência com os resultados de compressão na mesma direção, mostrou-se precisa para as madeiras de *Pinus taeda* L.. Entretanto, o mesmo não foi observado na direção normal em relação às fibras, possivelmente explicada pelo valor do coeficiente  $\alpha_c$  presente na equação para o cálculo de  $f_{e90}$ .

Palavras-chave: Resistência ao embutimento; Ligações; Estruturas de madeira.

## COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL TESTS AND CALCULATED VALUES FOR THE EMBEDMENT STRENGTH OF *Pinus taeda* L. WOOD

ABSTRACT – To design connections between timber parts with metal dowels (nails or bolts), two phenomena must be considered: bending of the metal dowel and the embedment strength in the wood. The Brazilian Standard ABNT NBR 7190:1997 proposes the methods used in the laboratory tests to determine the embedment strength with the metal dowel and, in the absence of testing, specifies relations to calculate the embedment strength from the compression strength. The aim of this research was to compare the embedment strength values obtained by experimental tests and calculated by the relationships established by the Brazilian Standard ABNT NBR 7190:1997. By the results of the hypothesis tests, it was possible to conclude that the estimate of the embedment strength parallel to the grain proposed by the Brazilian standard ABNT NBR 7190:1997, establishing equivalence with the strength compression results in the same direction, must be effective to the wood species *Pinus taeda* L., however, the same was not found in the perpendicular direction with respect to the grain, possibly explained by the  $\alpha_c$  values in the equation to calculate  $f_{e90}$ .

Keywords: Embedment strength; Connections; Timber structures.

<sup>1</sup> Recebido em 28.05.2013 aceito para publicação em 13.03.2014.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC/Minas, Campus de Poços de Caldas, Brasil. E-mail: <almeida@pucpcaldas.br>.

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, USP, Brasil. E-mail: <fsferro@usp.br> e <lu.varanda@hotmail.com>.

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, UFSCAR, Brasil. E-mail: <alchristoforo@yahoo.com.br>.

<sup>5</sup> Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, Brasil. E-mail: <frocco@sc.usp.br> e <calil@sc.usp.br>.

<sup>6</sup> Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira, Campus de Itapeva, UNESP, Brasil. E-mail: <molina@itapeva.unesp.br>.



## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil, principalmente a empregada em estruturas perenes, está condicionada a alguns aspectos que favorecem o uso desse material como elemento estrutural, tais como: emprego de pré-tratamento contra a proliferação de organismos xilófagos, o dimensionamento correto seguindo prerrogativas de documentos normativos, o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira, entre outros fatores (OLIVEIRA, 2001; BERTOLINI, 2011; CHRISTOFORO et al., 2012; CHRISTOFORO et al., 2013; ALMEIDA et al., 2013b; FERRO, 2013).

Na construção de estruturas de madeira é necessário a realização de ligações entre os elementos estruturais. Existem vários tipos de ligações, entre eles os que utilizam pinos metálicos, exemplificados pelos pregos e parafusos (CALIL JUNIOR et al., 2003; CALIL JUNIOR; BRITO, 2010; ALMEIDA, 2011; CALIL JUNIOR; MOLINA, 2011; DIAS et al., 2014). A Norma Brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 7190:1997 "Projeto de Estruturas de Madeira" fornece as diretrizes necessárias para o dimensionamento de ligações com esses tipos de conectores.

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, dois fenômenos podem explicar a ruptura de uma ligação: o embutimento do pino metálico na madeira ou a flexão do pino metálico. Em relação ao primeiro fenômeno, a norma ABNT NBR 7190:1997 fornece as diretrizes para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento com pino metálico nas direções paralela e normal em relação às fibras, dadas pela razão entre as respectivas forças ( $F_{e0}$ ;  $F_{e90}$ ) que causam a deformação específica residual de 2% (determinada por método gráfico) e a área resistente ao embutimento ( $A$ ) (Equações 1 e 2). A área resistente ao embutimento do pino metálico é determinada pelo produto entre a espessura da peça de madeira ( $t$ ) e o diâmetro do pino metálico ( $d$ ).

$$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{A} = \frac{F_{e0}}{t \cdot d} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{A} = \frac{F_{e90}}{t \cdot d} \quad (\text{Eq. 2})$$

Na ausência de ensaios laboratoriais ou na caracterização simplificada da madeira, a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 fornece relações para o cálculo da resistência ao embutimento da madeira nas direções paralela ( $f_{e0, \text{calc}}$ ) e normal ( $f_{e90, \text{calc}}$ ) em relação às fibras, expressas pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$f_{e0, \text{calc}} = f_{c0} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$f_{e90, \text{calc}} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (\text{Eq. 4})$$

Das Equações 3 e 4,  $f_{c0}$ , denotam-se a resistência na compressão paralela às fibras da madeira ( $f_{c0}$  é determinado pela razão entre máxima força de compressão resistida pela madeira na direção paralela às fibras ( $F_{c0}$ ); a área resistente à compressão ( $A_c$ ), utilizando corpos de prova padronizados e livres de defeitos, de acordo com a ABNT NBR 7190: 1997); e  $\alpha_e$ , coeficiente em função do diâmetro do pino metálico (Tabela 1).

Os equacionamentos fornecidos pela Norma Brasileira são diferentes dos encontrados no documento normativo europeu EUROCODE 5:2004 e americano NDS:2001, que, em vez da resistência na compressão na direção paralela às fibras, levam em consideração como parâmetros o diâmetro do pino metálico e a densidade da madeira utilizada (SANTOS et al., 2008; RIBEIRO, 2010; FRANKE; QUENNEVILLE, 2011).

Logsdon et al. (2007) realizaram a caracterização mínima e simplificada de resistência da madeira da espécie Cambará (*Vochisya guianensis* Aubl.) e utilizaram as relações preconizadas pela Norma Brasileira para determinação das resistências da madeira ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras, ressaltando a necessidade de pesquisas, a fim de melhorar as relações fornecidas pela norma ABNT NBR 7190:1997 para caracterização simplificada.

Valle (1999) ensaiou corpos de prova retirados de vigas de Madeira Laminada Colada (MLC) fabricadas com madeira de *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo à base de resorcinol para colagem entre as lamelas, nas direções paralela e normal em relação às fibras. Esse autor também determinou a resistência estimada de embutimento nas direções paralela e normal pelos critérios de cálculo fornecidos pela Norma Brasileira, constatando que os valores calculados nas direções paralela e normal em relação às fibras foram superiores aos determinados experimentalmente.

Como intuito de avaliar a precisão das relações estabelecidas pela Norma Brasileira ABNT NBR 7190:1997 para a determinação da resistência ao embutimento, este trabalho objetivou comparar os resultados da resistência ao embutimento (direções paralela e normal) obtidos das experimentações com os de resistência calculados, corroborando o aumento do conhecimento sobre as relações entre as resistências comumente utilizadas em projetos de estruturas de madeira.

**Tabela 1** – Valores de  $\alpha_e$  para diferentes diâmetros de pinos metálicos.  
**Table 1** –  $\alpha_e$  values for different metal dowels diameters.

Diâmetro do pino (cm)	≤ 0,62	0,95	1,25	1,60	1,90	2,20	2,50	3,10	3,80	4,40	5,00	≥ 7,50
$\alpha_e$	2,50	1,95	1,68	1,52	1,41	1,33	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,00

Fonte: ABNT NBR 7190:1997.  
 Source: ABNT NBR 7190:1997.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

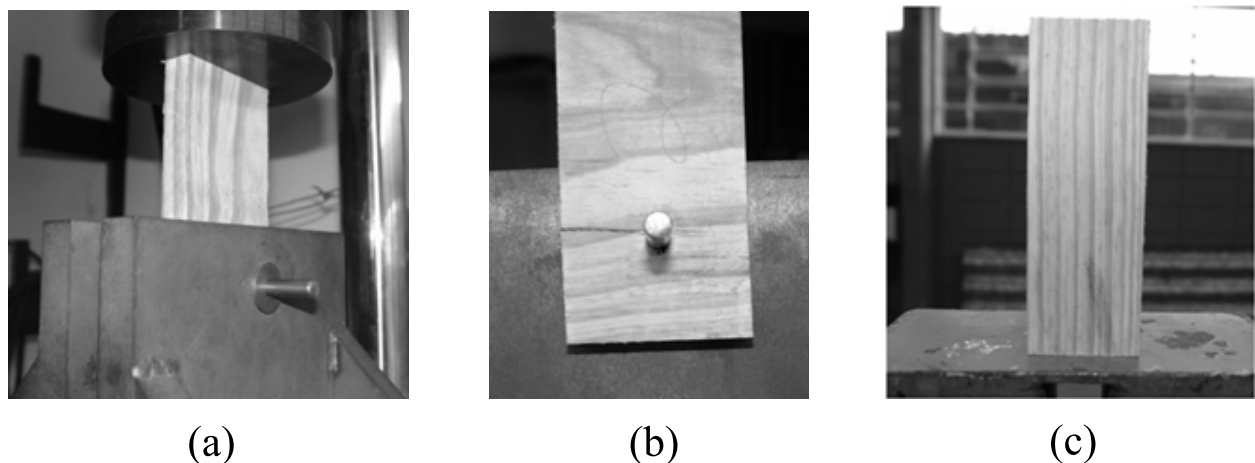
Para realização desta pesquisa, foram realizados ensaios laboratoriais utilizando madeira da espécie *Pinus taeda* (*Pinus taeda* L.), proveniente de um lote considerado homogêneo, possuindo teor de umidade da ordem de 12%. Foram confeccionados 12 corpos de prova para realização dos ensaios de resistência da madeira ao embutimento nas direções paralela (seis corpos de prova) e normal (seis corpos de prova) em relação às fibras, bem como seis para os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras, nas dimensões padronizadas pela Norma Brasileira ABNT NBR 7190:1997.

Os corpos de prova para determinação da resistência ao embutimento da madeira nas direções paralela e normal em relação às fibras foram ensaiados na máquina universal de ensaios mecânicos DARTEC, com capacidade de 100 kN, utilizando pinos metálicos com 1 cm de diâmetro com resistência ao escoamento ( $f_{yk}$ ) igual a 240 MPa (Figura 1). Para realização dos

ensaios de compressão paralela às fibras, também foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos DARTEC (Figura 1). Todos os ensaios ocorreram de acordo com o Apêndice B da Norma Brasileira ABNT NBR 7190:1997.

Para obtenção das resistências ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras pelos dados provenientes dos ensaios laboratoriais, foram utilizadas as Equações 2 e 3, respectivamente. Os valores calculados da resistência ao embutimento nas direções paralela e normal em relação às fibras foram determinados com o uso das Equações 3 e 4, respectivamente. Pelo diâmetro de 1 cm do pino metálico utilizado, o coeficiente  $\alpha_e$  foi igual a 1,905, obtido da interpolação dos valores contidos na Tabela 1.

A verificação da equivalência estatística entre os valores obtidos experimentalmente e calculados das resistências ao embutimento nas direções normal e paralela às fibras da madeira de *Pinus taeda* foi realizada com o emprego de teste de hipótese (Teste t), com



**Figura 1** – Corpos de prova instrumentados de *Pinus taeda* para realização dos ensaios de (a) resistência ao embutimento nas direções paralela e (b) normal em relação às fibras; (c) corpo de prova para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.

**Figure 1** – Instrumented specimens of *Pinus taeda* for tests. (a) embedment strength parallel to grain; (b) embedment strength perpendicular to grain; (c) compression parallel to grain.

o auxílio do software Minitab® versão 14. O teste de hipótese foi avaliado para um nível de significância de 5%, estipulando-se a equivalência entre médias para a hipótese nula ( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ) e a não equivalência como hipótese alternativa ( $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$ ). Dessa forma, P-valor superior ao nível de significância do teste implica aceitar  $H_0$ , rejeitando-a em caso contrário.

Para validar os resultados do teste de hipótese (intervalo de confiança entre médias), faz-se necessário verificar se as variáveis-resposta confrontadas apresentam distribuição normal. Para tanto, foi utilizado o teste de Anderson-Darling, com nível de significância de 5%, consistindo em ser normal a distribuição como hipótese nula e não normal como hipótese alternativa. P-valor superior ao nível de significância do teste implica aceitar a hipótese nula, refutando-a em caso contrário.

### 3. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os valores médios ( $X_m$ ) de resistência ao embutimento obtidos da experimentação, juntamente com os valores calculados de resistência ao embutimento, o desvio-padrão (Sd) e o coeficiente de variação (CV).

### 4. DISCUSSÕES

A Figura 2 ilustra os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling para as resistências ao embutimento. Pelo fato de os P-valores encontrados serem ambos superiores ao nível de significância do teste, constata-se a normalidade nas distribuições de ambas as respostas.

A Tabela 3 apresenta os intervalos de confiança (IC ( $\mu$ )), e os resultados do teste de hipótese referente à verificação da equivalência estatística entre os valores da resistência ao embutimento (valores experimentais e valores calculados) nas direções paralela e normal às fibras da madeira.

Da Tabela 3, constata-se que a relação proposta pela Norma Brasileira para o cálculo da resistência ao embutimento na direção paralela às fibras da madeira apresentou a resistência à compressão paralela às fibras como um bom parâmetro, por serem estatisticamente equivalentes, o mesmo não ocorrendo com relação à resistência ao embutimento na direção perpendicular às fibras das madeiras de *Pinus taeda*. A não equivalência entre os valores de resistência calculados e os valores obtidos nos ensaios para a direção normal em relação às fibras pode estar relacionada ao valor do coeficiente  $\alpha_c$ .

### 5. CONCLUSÕES

O cálculo da resistência ao embutimento paralelo às fibras proposta pela Norma Brasileira ABNT NBR 7190:1997, fazendo igual ao valor de resistência na compressão na mesma direção, apresentou ser eficiente para a madeira de *Pinus taeda*, o mesmo não ocorrendo na direção normal, possivelmente justificada pelos valores de  $\alpha_c$  nas equações para o cálculo da resistência ao embutimento, indicando a necessidade de novos estudos que venham a contribuir com maiores informações a respeito do embutimento na madeira, possibilitando o desenvolvimento de projetos estruturais mais seguros.

**Tabela 2** – Resultados das resistências ao embutimento paralelo e normal às fibras e da compressão paralela às fibras das madeiras de *Pinus taeda*.

**Table 2** – Embedment strength results at parallel and normal direction to the grain and compression strength parallel to the grain of *Pinus taeda* wood.

Corpos de prova	$f_{e0}$ (MPa)	$f_{e90}$ (MPa)	$f_{e0,calc}$ (MPa)	$f_{e90,calc}$ (MPa)
1	23,00	7,20	24,89	11,85
2	23,00	8,00	27,73	13,20
3	19,50	9,60	22,58	10,75
4	30,50	10,40	29,95	14,26
5	20,80	6,00	30,26	14,41
6	26,00	8,00	29,15	13,88
$X_m$	23,80	8,20	27,43	13,06
Sd	3,96	1,59	3,08	1,47
CV(%)	16,64	19,39	11,23	11,26

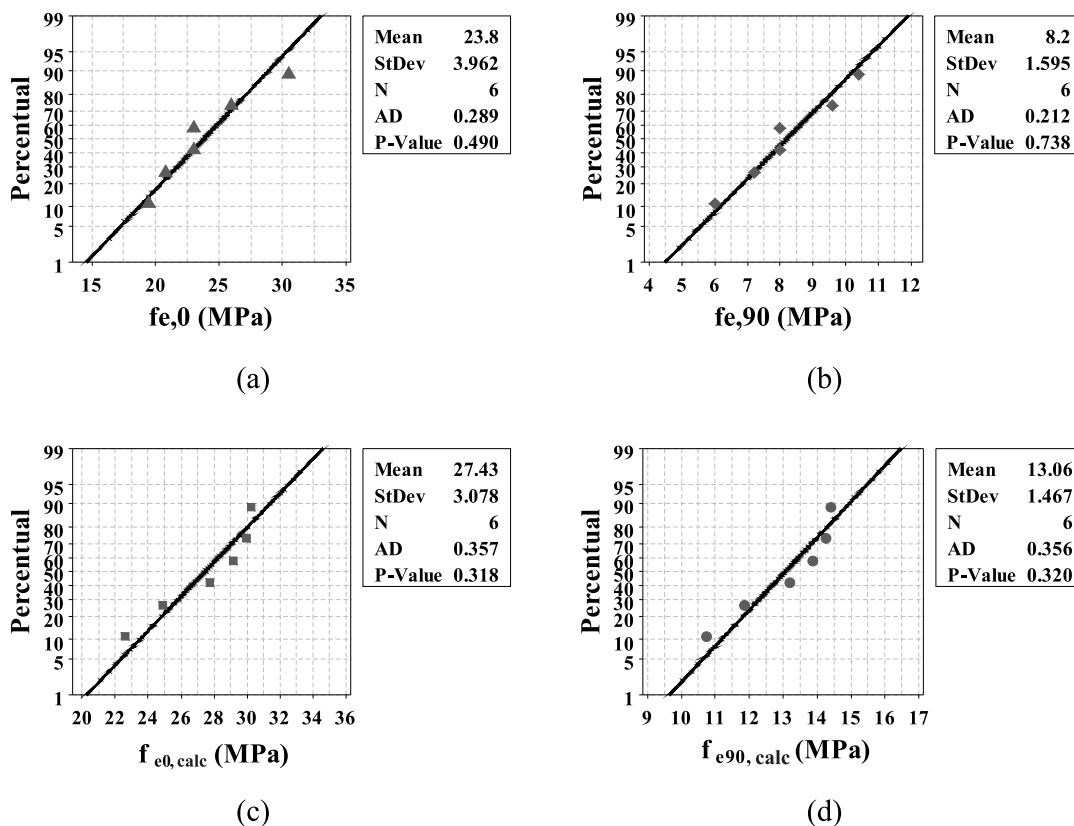


Figura 2 – Resultado do teste de normalidade de Anderson-Darling.  
 Figure 2 – Results of Anderson-Darling normality test.

Tabela 3 – Resultados do teste de hipótese.  
 Table 3 – Results of the hypothesis test.

Relações	Graus de liberdade	IC ( $\mu$ )	P-valor
$f_{e,0} \times f_{e0,calc}$	9	$-8,26 \leq \mu \leq 1,01$	0,110
$f_{e,90} \times f_{e90,calc}$	9	$2,86 \leq \mu \leq 6,86$	0,000

### 6. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), pela possibilidade de realização deste trabalho; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos financeiros concedidos.

### 7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. **Análise das resistências de embutimento e compressão para madeiras de Pinus e Eucalipto**. 2011. 100f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2011.

ALMEIDA, D. H. et al. Caracterização completa da madeira da espécie Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, v. 37, p. 1175-1181, 2013a.



ALMEIDA, D. H. et al. Full characterization of strength properties of *Schizolobium amazonicum* Wood for timber structures. **International Journal of Engineering & Technology**, v.13, p. 97-100, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeiras. Rio de Janeiro: 1997.

BERTOLINI, M. S. **Emprego de resíduos de *Pinnus sp* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona**. 2011. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL JUNIOR, C.; BRITO, L. D. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos: EESC, 2010. 312p.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 157p.

CALIL JUNIOR, C.; MOLINA, J. C. Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo. São Paulo: Pini, 2010. 208p.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, v.43, p.610, 2013.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Emprego de ferramentas numéricas na avaliação do módulo de elasticidade em vigas roliças de madeira. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.971-980, 2012.

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 DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014, Natal, Rio Grande do Norte. **Anais...** Natal, 2014. (CD-ROM).

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

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira de *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. 2013. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FRANKE, S.; QUENNEVILLE, P. Bolted and dowelled connections in Radiata pine and laminated veneer lumber using the European yield model. **Australian Journal of Structural Engineering**, v.12, n.1, p.13-27, 2011.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; ROSA, L. M. Caracterização da madeira de Cambará, *Vochisya guianensis Aubl.*, **Revista Engenharia Civil**, n.29, p.57-69, 2007.

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

RIBEIRO, N. H. P. **Avaliação experimental do esmagamento localizado da madeira**. 2010, 231f. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) - Universidade do Minho, Guimarães, 2010.

SANTOS, C. L. et al. Bearing properties of portuguese pine wood beneath a laterally loaded dowel. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v.20, n.1-2, p.45-51, 2008.

VALLE, A. **Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada**. 1999. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.