

# Estimativa das propriedades de flexão estática, dureza e tenacidade de madeiras tropicais brasileiras através de análise de porosimetria por intrusão de mercúrio

*Estimation of static bending properties, hardness and toughness of Brazilian tropical woods using mercury intrusion porosimetry analysis*

Andréa de Souza Almeida   
Gabriel Criscuolo   
Diogo Aparecido Lopes Silva   
Túlio Hallak Panzera   
Francisco Antonio Rocco Lahr   
André Luis Christoforo 

## Resumo

**A**NBR 7190 (ABNT, 1997) define a caracterização simplificada, onde há o uso de relações matemáticas entre as propriedades de resistência e rigidez. Devido à grande influência da porosidade e da densidade aparente nas propriedades das madeiras e à busca por modelos matemáticos cada vez mais precisos, este trabalho teve como objetivo gerar modelos de regressão para a estimativa das propriedades de flexão estática (resistência " $f_M$ " e módulo " $E_M$ "), resistência à dureza paralela " $f_{H,0}$ " e normal às fibras " $f_{H,90}$ ", e resistência à tenacidade " $W$ " de madeiras tropicais brasileiras a partir dos valores de porosidade, obtidos por meio da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, da densidade aparente e com base em ambas as propriedades em modelos de regressão multivariáveis. Todos os modelos de regressão apresentaram coeficientes de determinação " $R^2$ " superiores a 50%. A  $f_M$ , a  $f_{H,90}$  e a  $W$  foram melhor estimadas pela densidade aparente, enquanto o  $E_M$  e a  $f_{H,0}$  foram melhor estimados considerando a densidade aparente e a porosidade.

**Palavras-chave:** Estimativa das propriedades da madeira. Modelos de regressão. Porosidade. Densidade aparente.

## Abstract

*NBR 7190 (ABNT, 1997) defines the simplified characterization, where there is the use of mathematical relationships between the properties of strength and stiffness. Due to the great influence of porosity and apparent density on wood properties and the search for increasingly accurate mathematical models, this work aimed to generate regression models for the estimation of static bending properties (strength " $f_M$ " and modulus " $E_M$ "), hardness parallel to the grain " $f_{H,0}$ " and normal to the grain " $f_{H,90}$ " and toughness " $W$ " of Brazilian tropical woods from the porosity values, obtained through the analysis mercury intrusion porosimetry, apparent density and based on both properties in multivariate regression models. All regression models presented coefficients of determination " $R^2$ " greater than 50%, where  $f_M$ ,  $f_{H,90}$  and  $W$  were best estimated by density apparent,  $E_M$  and  $f_{H,0}$  were better estimated considering apparent density and porosity.*

**Keywords:** Estimation of wood properties. Regression models. Porosity. Apparent density.

<sup>1</sup>Andréa de Souza Almeida  
<sup>1</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

<sup>2</sup>Gabriel Criscuolo  
<sup>2</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

<sup>3</sup>Diogo Aparecido Lopes Silva  
<sup>3</sup>Universidade Federal de São Carlos  
Sorocaba - SP - Brasil

<sup>4</sup>Túlio Hallak Panzera  
<sup>4</sup>Universidade Federal de São João Del-Rei  
São João Del Rei - MG - Brasil

<sup>5</sup>Francisco Antonio Rocco Lahr  
<sup>5</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

<sup>6</sup>André Luis Christoforo  
<sup>6</sup>Universidade Federal de São Carlos  
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 19/07/21  
Aceito em 10/08/22

## Introdução

A madeira, material de origem biológica, é utilizada como material de construção civil desde os primórdios da humanidade. Por ser um material renovável, sustentável e reutilizável, e por possuir boas propriedades físicas e mecânicas, a madeira é eleita como um dos materiais mais vantajosos para ser utilizado na construção civil. Porém, grande parte dos usuários finais tem preconceito quanto à utilização da madeira devido à falta de informações tecnológicas sobre seu potencial de utilização (WANG; TOPPINEN; JUSLIN, 2014).

O Brasil possui uma vasta área de florestas nativas e, atualmente, conta também com florestas de espécies plantadas e certificadas para usos comerciais e industriais, o que possibilitou o cultivo em larga escala de espécies de rápido crescimento. Assim, intensificou-se a economia brasileira com o comércio da madeira reflorestada, utilizada como matéria-prima na construção civil, na fabricação de painéis compostos estruturais e não estruturais, em móveis e em estruturas pré-fabricadas de madeira (SANTOS *et al.*, 2020).

Segundo Beech *et al.* (2017), existem 60.065 espécies de madeira conhecidas pela ciência, e países como o Brasil, a Colômbia e a Indonésia são detentores das maiores quantidades de espécies. O Brasil é, ainda, detentor da maior variedade de espécies, com um total de 8.715 espécies arbóreas, seguido pela Colômbia, com 5.776 espécies, e pela Indonésia, com 5.142 espécies.

Com a grande diversidade de espécies tropicais brasileiras e com a incorporação de áreas de reflorestamento no país, a caracterização física e mecânica da maior quantidade possível de espécies tropicais brasileiras é primordial para que se atinja todo seu potencial de utilização (CHRISTOFORO *et al.*, 2017). Os procedimentos para a caracterização das espécies de madeira podem ser executados de acordo com os três tipos de caracterização estipulados pela NBR 7190 (ABNT, 1997): Projeto de estruturas de madeira, que são as caracterizações completa, mínima e simplificada. Nas caracterizações mínima e simplificada, há o uso de relações matemáticas entre as propriedades de resistência e rigidez, o que torna o trabalho mais fácil, barato e rápido (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016).

Por meio da propriedade física de densidade da madeira é possível estimar suas propriedades mecânicas, fato que confere alto valor de importância às propriedades de densidade das espécies de madeira (LOGSDON; CALIL JUNIOR, 2002; ALMEIDA *et al.*, 2014; CHRISTOFORO *et al.*, 2016). Segundo Almeida *et al.* (2015), como a madeira é um material de origem natural e suas propriedades são fortemente influenciadas pelas características anatômicas, como a porosidade, são imprescindíveis estudos que definam com mais precisão a interação entre as propriedades através de equações empíricas.

Dessa forma, pesquisadores como Almeida *et al.* (2014) avaliaram a possibilidade de estimar a tenacidade da madeira por meio da densidade aparente. Para isso, utilizaram-se modelos de regressão polinomial (linear, quadrática e cúbica), e foram analisadas 6 espécies de madeira: angico, eucalipto, jatobá, paricá, pinus e teca. Foram obtidas boas estimativas das tenacidades através das densidades aparentes, principalmente quando aplicado o modelo de regressão cúbica.

Cavalheiro *et al.* (2018) avaliaram a possibilidade de estimar o módulo de elasticidade na flexão estática de peças estruturais de *Shizolobium amazonicum* Herb em função da vibração transversal e da densidade. Para isso, foram estimados os módulos de elasticidade na flexão estática de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e de acordo com a FAKOPP Enterprise. Foram utilizados modelos de regressão linear e quadrática para estimar o módulo obtido de acordo com a norma brasileira em função do módulo gerado no ensaio de vibração transversal. Além disso, foi gerado um modelo de regressão multivariada para a consideração da densidade da madeira. Os modelos de regressão propostos apresentaram coeficiente de determinação próximo de 60%.

Christoforo *et al.* (2020) avaliaram a possibilidade de estimar a tenacidade através do valor da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c,0}$ ) ou do módulo de ruptura na flexão estática ( $f_M$ ). Para tal, foram testadas 36 espécies de madeiras tropicais brasileiras e aplicados modelos de regressão exponencial e polinomial (linear, quadrática e cúbica) para gerar as equações simplificadas. Os resultados apresentaram significância e representatividade em todos os ajustes realizados, e a função polinomial cúbica foi a mais indicada na estimativa da tenacidade.

Duarte *et al.* (2020) avaliaram a possível correlação entre a densidade aparente de 10 espécies de madeiras tropicais e a porosidade, que foi determinada através da técnica por intrusão de mercúrio. Para isso, escolheram as seguintes espécies, com densidades entre 0,4 g/cm<sup>3</sup> e 1,1 g/cm<sup>3</sup>:

(a) tatajuba;

- (b) roxinho;
- (c) cambará;
- (d) cedroarana;
- (e) cumaru;
- (f) cupiúba;
- (g) caixeta;
- (h) cedro;
- (i) sucupira; e
- (j) cajueiro.

Mediante análise estatística, conseguiram desenvolver uma equação relacionando a densidade com a porosidade com  $R^2$  igual a 0,88, valor que permitiu considerar a porosidade como bom estimador da densidade. Porém, devido à ocorrência de obstruções dos poros na execução da técnica por intrusão de mercúrio, a validade da hipótese poderia invalidar a equação de correlação obtida com essa análise. Assim, sugeriram pesquisas futuras que contemplassem um maior número de espécies de madeira.

Segundo Webb e Orr (1997) e Gigac *et al.* (2017), a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio se baseia na propriedade do mercúrio de não molhar a grande maioria das substâncias. Dessa forma, não penetra nos poros através da capilaridade, sendo necessária a aplicação de pressão em proporção inversa ao diâmetro dos poros após a amostra a ser analisada passar pelo vácuo antes de ser envolvida pelo mercúrio. A técnica fornece bons resultados na determinação da porosidade de materiais lignocelulósicos e previsão de seu comportamento, fornecendo informações sobre a anatomia, como distribuição, volume e área de superfície dos poros.

Pesquisadores como Ding *et al.* (2008), Plötze e Niemz (2010) e Zauer *et al.* (2013) comprovaram que os valores de porosidade das espécies de madeira estão diretamente relacionados com a densidade, a permeabilidade, a condutividade térmica, a estabilidade, as propriedades dielétricas e a resistência mecânica. Por isso, a estrutura porosa da madeira influencia significativamente em seu comportamento.

Tendo em vista a grande influência da porosidade em propriedades importantes das madeiras e a busca por modelos matemáticos cada vez mais precisos, este trabalho visa gerar modelos de regressão múltipla para a estimativa das propriedades de flexão estática (resistência e módulo), de resistência à dureza paralela e normal às fibras e de resistência à tenacidade de madeiras tropicais brasileiras a partir dos valores de porosidade obtidos através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, da densidade aparente e de ambas as propriedades em modelos de regressão multivariáveis.

## Material e métodos

A presente pesquisa foi dividida em três etapas:

- (a) ensaios físico-mecânicos para a obtenção dos valores das propriedades analisadas;
- (b) análise da porosidade; e
- (c) aplicação de modelos de regressão.

Dessa forma, foi possível estabelecer correlação entre a densidade aparente e a porosidade, avaliar a estimativa das propriedades analisadas apenas pela densidade aparente, apenas pela porosidade e utilizando ambas as variáveis (densidade aparente e porosidade) para a estimativa das propriedades de flexão estática (resistência e rigidez), de resistência à dureza na direção paralela e normal às fibras e de resistência à tenacidade das espécies de madeiras.

## Ensaio físico-mecânico para a obtenção dos valores das propriedades analisadas

No presente trabalho foram analisadas 8 espécies de madeiras tropicais brasileiras: cedro-amazonense (*Cedrella spp.*), cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke), cambará (*Erisma uncinatum* Warm), tatajuba (*Bagassa guianensis*), cupiúba (*Goupia glabra*), jatobá (*Hymenaea spp.*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e champanhe (*Dipteryx odorata*). Todos os ensaios realizados para a determinação das propriedades físico-mecânicas avaliadas foram executados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas

de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

As 8 espécies investigadas foram provenientes de lotes homogêneos e devidamente estocadas. Os ensaios para a obtenção das propriedades foram realizados conforme recomendado pelo Anexo B, Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas, da NBR 7190 (ABNT, 1997). Os valores das propriedades de resistência e de rigidez foram corrigidos para a umidade padrão de referência de 12%, conforme prescrito na referida normativa. Foram fabricados e testados 12 corpos de provas por espécie e para cada tipo de ensaio realizado para a determinação das propriedades avaliadas, mostradas no Quadro 1. Dessa forma, foram obtidas 576 determinações (8 espécies  $\times$  12 amostras  $\times$  6 propriedades), além dos valores da porosidade (Por), em que foram realizadas duas determinações por espécie investigada.

## Porosidade

Os ensaios para a determinação da porosidade foram conduzidos no equipamento Micromeritics Poresizer, modelo 9320, capacidade de pressão de 200 MPa (Figura 1), que pertence ao Instituto de Física de São Carlos, da USP. Foram adotadas, por disponibilidade do equipamento, duas amostras por lote. Os parâmetros utilizados no ensaio consistiram em:

- mercúrio com tensão superficial de 0,494 g/cm<sup>2</sup>;
- densidade de 13,533 g/mL;
- ângulo de contato do avanço e retrocesso de 130°; e
- tempo de equilíbrio entre a baixa e a alta pressão de 10 s.

Adotou-se 130° como o ângulo de contato do avanço e retrocesso por sugestão do software do equipamento Micromeritics. Foram ensaiadas duas amostras por lote de 2 cm de altura e 1 cm<sup>2</sup> de área, secos em estufa por 24 h a 50 °C com circulação de ar.

Quadro 1 - Propriedades avaliadas

Sigla	Propriedade
$\rho_{12\%}/\rho_{12}$	Densidade aparente
$f_M$	Resistência convencional na flexão estática
$E_M$	Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática
$f_{H,0}$	Dureza paralela às fibras
$f_{H,90}$	Dureza perpendicular/normal às fibras
W	Tenacidade

Figura 1 - Imagem do equipamento Micromeritics Poresizer, modelo 9320



## Modelos de Regressão

As Equações de 1 a 8 expressam os modelos de regressão lineares e não lineares utilizados para a estimativa das propriedades analisadas. Nesses modelos, que possuem de dois ( $\beta_0, \beta_1$ ) a três ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ ) parâmetros, (Y) representa as propriedades investigadas e (X) as variáveis independentes. Assim, foi possível utilizar tanto a densidade aparente ( $\rho_{12\%}$ ) quanto a porosidade (Por) como variáveis independentes para a estimativa das cinco demais propriedades (Y) investigadas na presente pesquisa. Essas equações também foram utilizadas para relacionar a densidade aparente ( $\rho_{12\%}$ ) e a porosidade (Por), possibilitando estimar a porosidade se conhecido o valor médio da densidade aparente da madeira.

$$Y = \beta_0 \cdot X + \beta_1 \quad \text{Eq. 1}$$

$$Y = \beta_0 \cdot \ln(X + \beta_1) + \beta_2 \quad \text{Eq. 2}$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(X) \quad \text{Eq. 3}$$

$$Y = \beta_0 \cdot X^{\beta_1} + \beta_2 \quad \text{Eq. 4}$$

$$Y = \beta_0 \cdot X^{\beta_1} \quad \text{Eq. 5}$$

$$Y = \beta_0 \cdot e^{\beta_1 \cdot X} \quad \text{Eq. 6}$$

$$Y = (\beta_0 + \beta_1 \cdot X)^2 \quad \text{Eq. 7}$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X^2 + \beta_2 \cdot X^3 \quad \text{Eq. 8}$$

O erro percentual absoluto médio MAPE, calculado pela Equação 9, foi utilizado como critério (menor erro) para a escolha do modelo mais preciso (1 entre 8) por propriedade estimada, sendo obtidos ainda o coeficiente de variação da regressão (CV), através da Equação 10, e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pela Equação 11. Esse último mede a qualidade do ajuste.

$$\text{MAPE}(\%) = 100 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left\| \frac{Y_{\text{predito}_i} - Y_{\text{dados}_i}}{Y_{\text{dados}_i}} \right\| \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{CV}(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{predito}_i} - Y_{\text{dados}_i})^2}{n}}}{\bar{Y}_{\text{dados}}} \quad \text{Eq. 10}$$

$$R^2(\%) = 100 \cdot \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{predito}_i} - Y_{\text{dados}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{dados}_i} - \bar{Y}_{\text{dados}})^2} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

Das Equações de 9 a 11, n é o número considerado de amostras,  $Y_{\text{predito}_i}$  é o valor estimado pelo modelo de regressão,  $Y_{\text{dados}_i}$  é o valor determinado experimentalmente, e  $\bar{Y}_{\text{dados}}$  é o valor médio dos resultados determinados experimentalmente.

Testados os modelos dependentes de uma única variável livre ( $\rho_{12\%}$  ou Por), que possibilita identificar quem melhor explica determinada propriedade ( $\rho_{12\%}$  ou Por), com o objetivo de ajustes de melhor precisão, modelos de regressão linear múltipla foram usados conforme a Equação 12, sendo Y as propriedades estimadas.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho_{12\%} + \beta_2 \cdot \text{Por} \quad \text{Eq. 12}$$

Destaca-se que os modelos de regressão foram avaliados com o auxílio do software Mathcad versão 15 e gerados com base nos valores médios de cada propriedade por espécie, reduzindo assim a variabilidade nas propriedades e proporcionando a efetiva busca por tendência de comportamento (ALMEIDA *et al.*, 2017), sendo necessário respeitar os valores médios extremos (menor e maior) encontrados por propriedade.

## Resultados e discussões

Nas Tabelas de 1 a 8 são apresentados e discutidos os resultados das propriedades físicas e mecânicas das 8 espécies de madeira avaliadas, com os respectivos valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), os coeficientes de variação (CV), os valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios, as resistências características ( $f_{w,k}$ ) e alguns valores da literatura. Nas Tabelas de 9 a 14 são apresentados os resultados da análise estatística e discussões.

Não foi encontrada em outras literaturas a caracterização completa para as madeiras de cedro-amazonense ao consultar as diversas bases de dados como Web of Science, Portal Capes Periódicos, Scopus, ResearchGate e Engineering Village. Ao comparar os resultados experimentais com os encontrados no Portal do Instituto

de Pesquisas Tecnológicas (INSTITUTO..., 2021), nota-se que os valores experimentais estão dentro do esperado para as propriedades investigadas da espécie.

O valor de porosidade experimental foi inferior ao obtido por Duarte *et al.* (2020), de 73,29%. Como a técnica traz imprecisões devido à ocorrência de obstruções dos poros pela intrusão de mercúrio, o valor experimental de 65,9% é considerado uma boa estimativa.

Os valores de  $\rho_{12\%}$ ,  $f_M$ ,  $E_M$  e  $W$  obtidos experimentalmente seguiram o padrão de valores encontrados para a espécie por Almeida *et al.* (2019), com variações dentro do esperado devido à anisotropia e à heterogeneidade da madeira. O valor médio experimental para porosidade foi próximo ao encontrado por Duarte *et al.* (2020). Os valores para dureza normal e paralela às fibras experimentais foram muito inferiores aos literários, o que pode ser explicado pela grande variabilidade que uma mesma espécie pode apresentar em suas propriedades devido às diferenças no lote.

Os valores para as propriedades investigadas obtidos experimentalmente foram semelhantes aos obtidos por Almeida *et al.* (2019), já o valor médio experimental para porosidade foi superior ao encontrado na literatura.

De acordo com a Tabela 4, o valor experimental que mais se distanciou do valor encontrado no Portal do IPT (INSTITUTO..., 2021) foi dureza paralela às fibras. As demais propriedades investigadas foram muito próximas aos valores literários.

Como apresenta a Tabela 5, os valores obtidos experimentalmente foram condizentes com os encontrados na literatura, e o valor experimental médio para porosidade foi muito próximo ao encontrado por Duarte *et al.* (2020).

De acordo com a Tabela 6, os resultados experimentais obtidos foram próximos aos encontrados no Portal do IPT (INSTITUTO..., 2021), e o valor médio experimental para porosidade foi inferior ao obtido por Varanda (2016) para a madeira de jatobá.

Os valores experimentais médios foram próximos aos literários, principalmente os valores para dureza normal e paralela às fibras. O valor médio experimental para porosidade foi menor que o encontrado por Varanda (2016), o que é explicado pelas variações que a técnica e o tipo de material analisado geram.

**Tabela 1 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de cedro-amazonense (C40)**

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Duarte <i>et al.</i> (2020)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,58	2,26	0,56	0,60	---	0,53 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	92,00	8,58	75,00	100,00	83,16	81,20 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	12.743	6,92	11.082	14.003	---	8.336 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	61,83	7,19	56,00	71,00	---	31,38 (verde)	---
$f_{H,90}$ (MPa)	40,33	6,37	37,00	45,00	---	---	---
W (daN.m)	0,29	13,98	0,24	0,38	---	---	---
$P_{or}$ (%)	65,90	---	---	---	---	---	73,29

**Tabela 2 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de cedroarana**

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	Almeida <i>et al.</i> (2019)	Duarte <i>et al.</i> (2020)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,57	7,44	0,50	0,64	---	0,54	---
$f_M$ (MPa)	60,73	18,36	40,70	85,20	45,54	71,43	---
$E_M$ (MPa)	10.119	10,71	8.404	12.324	---	11.048	---
$f_{H,0}$ (MPa)	58,30	31,21	31,80	85,60	---	508,98	---
$f_{H,90}$ (MPa)	35,85	18,65	24,30	44,70	---	346,06	---
W (daN.m)	0,46	37,97	0,06	0,78	---	62,85	---
$P_{or}$ (%)	66,80	---	---	---	---	---	72,04

Tabela 3 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de cambará

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	Almeida <i>et al.</i> (2019)	Duarte <i>et al.</i> (2020)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,56	4,17	0,53	0,61	---	0,73	---
$f_M$ (MPa)	93,57	18,09	71,88	122,22	75,46	97,06	---
$E_M$ (MPa)	9.905	17,53	7.728	12.560	---	15.601	---
$f_{H,0}$ (MPa)	52,75	17,05	37,69	64,76	---	79,58	---
$f_{H,90}$ (MPa)	40,43	16,12	29,86	49,45	---	51,50	---
W (daN.m)	0,58	32,13	0,32	0,88	---	55,24	---
$P_{or}$ (%)	64,20	---	---	---	---	---	46,10

Tabela 4 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de tatajuba

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Duarte <i>et al.</i> (2020)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,94	6,07	0,83	1,06	---	0,82 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	110,58	21,78	69,40	156,40	83,82	138,20 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	18.114	16,00	13.697	24.828	---	15.857 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	119,25	18,17	80,90	141,10	---	72,08 (verde)	---
$f_{H,90}$ (MPa)	88,41	16,27	68,30	116,70	---	---	---
W (daN.m)	1,02	30,39	0,66	1,66	---	---	---
$P_{or}$ (%)	35,80	---	---	---	---	---	31,60

Tabela 5 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de cupiúba

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Duarte <i>et al.</i> (2020)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,85	2,77	0,81	0,88	---	0,87 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	75,01	15,12	59,80	93,10	60,00	96,70 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	13.217	14,75	10.010	16.777	---	13.690 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	97,06	15,51	69,30	117,40	---	62,66 (verde)	---
$f_{H,90}$ (MPa)	66,35	16,89	53,80	82,19	---	---	---
W (daN.m)	0,61	37,76	0,32	1,02	---	---	---
$P_{or}$ (%)	40,60	---	---	---	---	---	40,36

Tabela 6 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de jatobá

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Varanda (2016)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,08	3,61	1,03	1,14	---	0,96 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	152,78	18,38	86,00	195,10	106,98	151,80 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	20.865	7,99	18.301	24.667	---	14.837 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	166,03	8,38	138,50	188,00	---	111,80 (verde)	---
$f_{H,90}$ (MPa)	128,64	10,23	103,90	158,60	---	---	---
W (daN.m)	2,17	13,27	1,83	2,88	---	---	---
$P_{or}$ (%)	22,40	---	---	---	---	---	34,50

Tabela 7 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de angelim-vermelho

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Varanda (2016)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,13	9,75	0,95	1,25	---	1,09 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	110,17	13,55	86,60	128,80	89,98	138,10 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	16.500	6,76	14.721	18.283	---	14.013 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	145,80	13,65	101,40	165,40	---	143,18	---
$f_{H,90}$ (MPa)	136,98	14,56	97,50	159,90	---	135,43	---
W (daN.m)	1,980	34,86	1,01	3,01	---	---	---
P <sub>or</sub> (%)	16,40	---	---	---	---	---	22,60

Tabela 8 - Valores médios experimentais obtidos ( $X_m$ ), coeficientes de variação (CV), valores máximos (Max) e mínimos (Min) obtidos nos ensaios, resistências características ( $f_{w,k}$ ) e valores da literatura obtidos para as propriedades estudadas para a madeira de champanhe

Sigla	$X_m$	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)	IPT (2021)	Varanda (2016)
$\rho_{12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,09	3,08	1,04	1,14	---	1,09 (15% U)	---
$f_M$ (MPa)	164,81	19,01	92,20	216,00	128,70	178,30 (15% U)	---
$E_M$ (MPa)	24.007	12,59	19.785	29.463	---	18.547 (verde)	---
$f_{H,0}$ (MPa)	138,07	10,31	112,50	161,70	---	97,87 (verde)	---
$f_{H,90}$ (MPa)	127,28	13,30	105,70	157,90	---	---	---
W (daN.m)	2,29	20,42	1,67	3,01	---	---	---
P <sub>or</sub> (%)	19,60	---	---	---	---	---	32,40

Os valores experimentais obtidos para as propriedades investigadas das madeiras de Champanhe foram próximos aos literários, e, como pode ser observado, o valor médio experimental para a propriedade porosidade foi inferior ao encontrado por Varanda (2016).

Não foram encontradas pesquisas que abordassem a caracterização completa das seguintes espécies de madeira: cedro-amazonense, tatajuba, cupiúba, jatobá, angelim-vermelho e champanhe. Assim, não foi possível fazer mais comparações.

O melhor ajuste obtido para a estimativa da porosidade (Por - adimensional) em função da densidade aparente ( $\rho_{12\%}$  - g/cm<sup>3</sup>) é expressa pela Equação 13, onde se considerou o conjunto de todas as espécies de madeira investigadas (com densidades entre 0,56 g/cm<sup>3</sup> e 1,13 g/cm<sup>3</sup>). Destaca-se que o coeficiente de variação (CV), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram iguais a 3,31%, 2,73% e 99,54% respectivamente, ficando evidente a excelente precisão obtida na estimativa da Por pela  $\rho_{12\%}$ . A Figura 2 ilustra o ajuste da Equação 13 ao conjunto de pares ordenados formados pelos valores médios de  $\rho_{12\%}$  e Por.

$$\text{Por} = -0.864 \cdot \rho_{12\%} + 1,15 \quad \text{Eq. 13}$$

Analisando os resultados apresentados pela Tabela 10, pode-se afirmar que a densidade aparente foi uma boa estimadora das propriedades de  $f_M$ ,  $E_M$ ,  $f_{H,0}$ ,  $f_{H,90}$  e W, pois o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram todos acima de 50% e alcançando valores altos e significativos, como na determinação da  $f_{H,90}$ , que obteve  $R^2$  igual a 99,99%.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas estimadas ( $X_{\text{aprox}}$ ) pelos melhores ajustes da Tabela 9 considerando os resultados experimentais ( $X_{\text{exp}}$ ) médios provenientes da pesquisa de Christoforo *et al.* (2017), que realizaram a caracterização da madeira *Anadenanthera colubrine*, de densidade aparente média igual a 0,71 g/cm<sup>3</sup>.

Na Tabela 11 são apresentados os modelos de regressão, os erros quadráticos médios (MAPE) e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos considerando a porosidade como estimadora das demais propriedades, e o coeficiente de variação (CV) variou entre 3,99% e 21,75%.

Como se pode observar na Tabela 11, todas as propriedades investigadas nesta pesquisa foram bem estimadas considerando a porosidade como estimadora, e todos os modelos apresentaram  $R^2$  maiores que

50%, sendo a  $f_{H,90}$  a propriedade que mais obteve sucesso quando estimada apenas pela porosidade, seguida pela  $W$  e pela  $f_{H,0}$ .

Com a finalidade de testar os modelos de estimativa de propriedades a partir do valor médio de porosidade e considerando os resultados do trabalho de Christoforo *et al.* (2017), o uso do modelo de regressão  $Po = -0,864 \cdot \rho_{12\%} + 1,15$  nas equações da Tabela 11 possibilitou considerar a porosidade, mas dependente da densidade aparente, cujo valor médio para a madeira *Anadenanthera colubrina* é de  $0,71 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados das estimativas de propriedades com base nos modelos de regressão da Tabela 11 são apresentados na Tabela 12.

Figura 2 - Ajuste da Equação 13 aos valores médios da porosidade para as 8 espécies investigadas

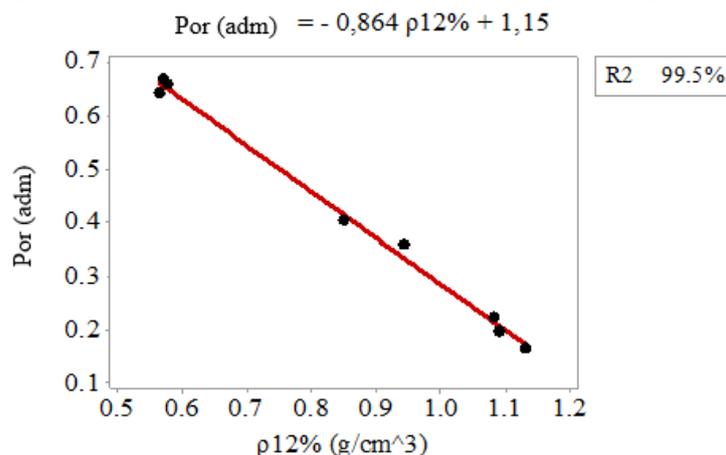


Tabela 9 - Resultados dos modelos de regressão (Modelo, MAPE e R<sup>2</sup>) considerando a densidade aparente como estimadora das demais propriedades

Modelo	MAPE (%)	R <sup>2</sup> (%)
$f_M = 271,77 \cdot \rho_{12}^2 - 343,99 \cdot \rho_{12} + 188,69$	18,63	61,10
$E_M = 1,85 \cdot 10^4 + 1,40 \cdot 10^4 \cdot \ln(\rho_{12})$	12,19	73,90
$f_{H,0} = (2,64 + 8,70 \cdot \rho_{12})^2$	5,60	95,22
$f_{H,90} = 264,11 \cdot \rho_{12}^2 - 268,88 \cdot \rho_{12} + 105,55$	3,23	99,99
$W = 8,89 \cdot \rho_{12}^2 - 11,72 \cdot \rho_{12} + 4,23$	16,14	93,99

Tabela 10 - Valores experimentais (X<sup>exp</sup>) e estimados (X<sup>aprox</sup>) de propriedades mecânicas pela densidade aparente média da pesquisa de Christoforo *et al.* (2017), com base nos modelos da Tabela 10, e os erros percentuais relativos (Er)

Sigla	X <sup>exp</sup>	X <sup>aprox</sup>	Er (%)
$f_M$ (MPa)	89,00	81,44	8,49
$E_M$ (MPa)	15776	13721,16	13,03
$f_{H,0}$ (MPa)	70,00	77,75	11,07
$f_{H,90}$ (MPa)	61,00	48,14	21,08
$W$ (N.m)	38,50	39,00	1,22

Tabela 11 - Resultados dos modelos de regressão (Modelo, MAPE e R<sup>2</sup>) considerando a porosidade como estimadora das demais propriedades

Modelo	MAPE (%)	R <sup>2</sup> (%)
$f_M = 247,39 \cdot Po^2 - 336,59 \cdot Po + 194,41$	19,67	58,81
$E_M = -2,02 \cdot 10^4 \cdot Po + 2,40 \cdot 10^4$	13,45	72,89
$f_{H,0} = (14,13 - 9,85 \cdot Po)^2$	8,06	92,09
$f_{H,90} = 280,15 \cdot Po^2 - 437,11 \cdot Po + 204,70$	4,82	98,81
$W = -9,80 \cdot Po^2 - 11,95 \cdot Po + 4,04$	18,99	92,70

Tabela 12 - Valores experimentais ( $X^{exp}$ ) e estimados ( $X^{aprox}$ ) de propriedades mecânicas pela porosidade [ $Po = -0,864 \cdot \rho_{12\%} + 1,15$ ] média da pesquisa de Christoforo *et al.* (2017), com base nos modelos da Tabela 12, e os erros percentuais relativos ( $Er$ )

Sigla	$X^{exp}$	$X^{aprox}$	$Er$ (%)
$f_M$ (MPa)	89,00	85,03	4,46
$E_M$ (MPa)	15776	13224,73	16,17
$f_{H,0}$ (MPa)	70,00	78,29	11,84
$f_{H,90}$ (MPa)	61,00	50,82	16,70
W (daN.m)	0,38	0,46	18,32

Na Tabela 13 são apresentados os modelos de regressão linear múltipla, os erros quadráticos médios (MAPE) e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos considerando a densidade aparente e a porosidade como estimadoras das demais propriedades, e o coeficiente de variação (CV) variou entre 7,37% e 26,25%.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13, todas as propriedades foram bem estimadas utilizando os modelos de regressão linear múltipla, considerando a densidade aparente e a porosidade como variáveis independentes.

Na Tabela 14 são apresentados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos dependentes da densidade aparente [ $f(\rho_{12\%})$ ] (Tabela 10), da porosidade [ $f(Po)$ ] (Tabela 12) e de ambas as variáveis livres [ $f(\rho_{12\%}, Po)$ ] (Tabela 13), possibilitando identificar os melhores modelos para a estimativa de cada propriedade.

Com base na Tabela 14, pode-se afirmar que a  $f_M$ , a  $f_{H,90}$  e a W foram mais bem estimadas pela densidade aparente, enquanto o  $E_M$  e a  $f_{H,0}$  foram mais bem estimados considerando a densidade aparente e a porosidade, evidenciando que o fator anatômico influencia significativamente nos valores dessas propriedades, e isso fez com que os modelos de regressão alcançassem maiores precisões com a inclusão dos valores médios de porosidade das espécies.

É importante destacar que foram calculados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de cada modelo, sendo possível afirmar que de 100% dos dados o modelo explica y%, sendo y% o  $R^2$ .

Os modelos podem ser usados desde que os limites inferiores e os superiores dos estimadores (das variáveis independentes) sejam seguidos. Por exemplo, a densidade média das espécies varia entre um menor e um maior valor. Para o uso dos modelos com base na densidade para estimativa de certa propriedade para uma espécie de madeira não considerada na geração do modelo, a densidade dessa espécie deve estar situada entre o menor e o maior valor da densidade considerada na geração do modelo. Por fim, os modelos foram testados em outras espécies de madeira, o que reforçou a precisão deles.

## Conclusão

Os resultados obtidos pela presente pesquisa permitem concluir o seguintes pontos:

- todas as propriedades puderam ser estimadas pela densidade aparente e pela porosidade, considerando tanto a densidade aparente quanto a porosidade nos modelos de regressão;
- o fator da anatomia considerada pela porosidade aprimorou os modelos de regressão multivariáveis na estimativa das propriedades de  $f_{H,0}$  e  $E_M$ , pois são propriedades que sofrem grande influência dos fatores anatômicos considerados pelos valores médios de porosidade das espécies de madeira;
- os modelos de regressão gerados na presente pesquisa podem também ser aplicados para outras espécies de madeiras; e
- como sugestão para trabalhos futuros, devem ser elaboradas mais pesquisas que abordem o tema com as demais propriedades e espécies das madeiras, avaliando a eficácia da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio e gerando equações cada vez mais precisas.

Tabela 13 - Resultados dos modelos de regressão linear múltipla (Modelo, MAPE e R2)

Modelo	MAPE (%)	R <sup>2</sup> (%)
$f_M = 166,68 - 131,01 \cdot P_o - 5,76 \cdot \rho_{12}$	20,37	55,84
$E_M = -4,70 \cdot 10^4 + 4,15 \cdot 10^4 \cdot P_o + 5,35 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12}$	10,71	76,05
$f_{H,0} = -436,08 + 343,17 \cdot P_o + 468,75 \cdot \rho_{12}$	5,36	96,47
$f_{H,90} = 83,78 - 126,68 \cdot P_o + 60,88 \cdot \rho_{12}$	9,11	96,24
$W = 6,82 - 6,67 \cdot P_o + 2,74\rho_{12}$	29,56	84,37

Tabela 14 - Resultados dos modelos de regressão (R2) considerando a densidade aparente [f( $\rho_{12\%}$ )], a porosidade [f(Po)] e a densidade e a porosidade [f( $\rho_{12\%}$ ; Po)]

Sigla	R <sup>2</sup> (%) [f( $\rho_{12\%}$ )]	R <sup>2</sup> (%) [f(Po)]	R <sup>2</sup> (%) [f( $\rho_{12\%}$ ; Po)]
$f_M$ (MPa)	61,10	58,81	55,84
$E_M$ (MPa)	73,90	72,89	76,05
$f_{H,0}$ (MPa)	95,22	92,09	96,47
$f_{H,90}$ (MPa)	99,99	98,81	96,24
W (N.m)	93,99	92,70	84,37

## Referências

- ALMEIDA, A. de S. *et al.* Influence of treatment with water-soluble CCB preservative on the physical-mechanical properties of brazilian tropical timber. **Materials Research**, v. 22, n. 6, p. 1-8, out. 2019.
- ALMEIDA, D. H. de *et al.* Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 203-207, fev. 2014.
- ALMEIDA, T. H. de *et al.* Correlation between dry density and volumetric shrinkage coefficient of three Brazilian tropical wood species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 5, n. 1, p. 50-63, 2015.
- ALMEIDA, T. H. de *et al.* Density as estimator of dimensional durability quantities of Brazilian tropical woods. **Bioresources**, v. 12, n. 3, p. 6579-6590, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- BEECH, E. *et al.* GlobalTreeSearch: the first complete global database of tree species and country distributions: the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 36, n. 5, p. 454-489, 2017.
- CAVALHEIRO, R. S. *et al.* Estimation of modulus of elasticity in static bending of wood in structural dimensions as a function of longitudinal vibration and density. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 26, n. 1, p. 1-8, 2018.
- CAVALHEIRO, R. S. *et al.* Density as estimator of shrinkage for some Brazilian wood species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 107-112, 2016.
- CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Estimation of wood toughness in Brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 232-237, 2020.
- CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrine* wood specie. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 376-384, 2017.
- CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Shrinkage for some wood species estimated by density. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 23-27, 2016.
- DING, W.-D. *et al.* Relationship between wood porosity, wood density and methyl methacrylate impregnation rate. **Wood Material Science and Engineering**, v. 3, n. 1- 2, p. 62-70, 2008.
- DUARTE, B. B. *et al.* Correlation between density and porosity from ten species of tropical wood. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 10, n. 3, p. 30-32, 2020.
- GIGAC, J. *et al.* Comparison of capillary flow porosimetry and mercury intrusion porosimetry in determination pore size distribution of papers. **Wood Research**, v. 62, n. 4, p 587-596, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras**. 2021. Disponível em: [https://www.ipt.br/consultas\\_online/informacoes\\_sobre\\_madeira](https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira). Acesso em: 9 jun. 2021.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, n. 18, p. 77-107, 2002.

PLÖTZE, M.; NIEMZ, P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 4, p. 649-657, 2010.

SANTOS, S. N. C. dos *et al.* Surface properties and crystallinity of *Pinus taeda* and *Hymenaea stilbocarpa* treated at low temperatures in different grain directions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 17, p. 1-8, 2020.

VARANDA, L. D. **Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho**. São Carlos, 2016. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

WANG, L.; TOPPINEN, A.; JUSLIN, H. Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK: a study of expert perspectives from the UK. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 350-361, 2014.

WEBB, P. A.; ORR, C. Micromeritics Instrument corporation. In: WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical methods in fine particle technology**. Norcross, 1997.

ZAUER, M. *et al.* Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 6, p. 1197-1211, 2013.

#### **Andréa de Souza Almeida**

Conceitualização, Metodologia, Validação de Dados e Experimentos, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia de Materiais | Universidade de São Paulo | Av. João Dagnone, 1100, Jardim Santa Angelina | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13563-120 | Tel.: (1 4) 98158-3166 | E-mail: andreadsa.engcivil@gmail.com

#### **Gabriel Criscuolo**

Metodologia, Análise de Dados, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia de Materiais | Universidade de São Paulo | Tel.: (14) 98120-9438 | E-mail: gabriel.criscuolo@usp.br

#### **Diogo Aparecido Lopes Silva**

Análise de dados, Revisão e edição do texto.

Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba | Universidade Federal de São Carlos | Rod. João Leme dos Santos, km 110, SP 264, Bairro do Itinga | Sorocaba - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (15) 3229-7454 | E-mail: diogo.apls@ufscar.br

#### **Túlio Hallak Panzera**

Experimentação e validação dos dados experimentais.

Departamento de Engenharia Mecânica | Universidade Federal de São João Del-Rei | Praça Frei Orlando, 170, Campus Santo Antônio | São João Del Rei - MG - Brasil | CEP 36300-000 | Tel.: (32) 3379-2395 | E-mail: panzera@ufsj.edu.br

#### **Francisco Antonio Rocco Lahr**

Pesquisa, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Estrutural | Universidade de São Paulo | Av. Trab. São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-8206 | E-mail: frocco@sc.usp.br

#### **André Luis Christoforo**

Pesquisa, Administração do projeto, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luiz, s/n, Monjolinho | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: christoforoal@yahoo.com.br

### **Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.