

Estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos

Estimation of the characteristic tensile strength of the wood in the parallel direction to the grains through of probability models

Anderson Renato Vobornik Wolenski¹, Rodrigo Guerra Peixoto²,
André Luís Christoforo³, Francisco Antonio Rocco Lahr⁴,
Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias⁵,

¹ Laboratório de Construção Civil – Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Av. Aloísio Stoffel, 1271, Jardim Alvorada, CEP: 89885-000, São Carlos, SC, Brasil.

² Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas (PROPEEs) – UFMG – Av. Antonio Carlos, 6627, Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv) – UFSCAr – Rodovia Washington Luís, s/n, CEP: 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

⁴ Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM) – USP – Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP: 13566-590, São Carlos, SP, Brasil.

⁵ Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (UC) – Rua Luís Reis Santos - Pólo II, CEP: 3030-788, Coimbra, Beira Litoral, Portugal.

e-mail: anderson.wolenski@ifsc.edu.br, rodrigo.peixoto@dees.ufmg.br, christoforoal@yahoo.com.br, frocco@sc.usp.br, alfgdias@dec.uc.pt

RESUMO

Para um dimensionamento de estruturas de madeiras dentro das exigências de segurança, a resistência para determinada solicitação mecânica é calculada com base em seu valor característico, correspondente ao percentil de 5% de um determinado modelo de distribuição de probabilidades. A norma brasileira NBR 7190 [1] estabelece, para pequenas amostras, relações para estimar a resistência característica da madeira, que podem resultar em diferença significativa dos valores obtidos quando comparado a um modelo probabilístico adequado. Considerando os resultados da resistência à tração ($f_{t0,k}$) na direção paralela às fibras para 40 distintas espécies de madeira folhosas, com 480 determinações experimentais com teor de umidade padrão ($\approx 12\%$), empregou-se funções densidade de distribuição de probabilidades (Normal, LogNormal, Weibull e Exponencial) para cada espécie visando determinar o modelo de maior aderência. Uma vez determinados os valores e os respectivos modelos para cada espécie, um modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na análise de variância (ANOVA) e dependentes do valor médio (\bar{x}), do coeficiente de variação ($CV\%$) e do menor (min) e maior (max) valor da resistência para cada espécie, é adotado com objetivo de estimar a resistência $f_{t0,k}$ ajustada com aqueles termos mais significativos, de modo a inferir na qualidade do estimador e, conseqüentemente, na confiabilidade da obtenção desta propriedade mecânica. Por fim, o modelo de regressão aqui proposto é comparado a proposta da norma brasileira, a fim de avaliar a confiabilidade do modelo e sua adequação na estimativa da resistência $f_{t0,k}$.

Palavras-chave: madeiras tropicais, propriedades de resistência, valor característico.

ABSTRACT

For a structural design of wood within of the safety requirements, the strength for a certain mechanical request is calculated based on its characteristic value, corresponding to the 5% percentile of a given probability

distribution model. The Brazilian standard NBR 7190 [1] establishes, for small samples, relations to estimate the characteristic strength of the wood, which can result in a significant difference of the values obtained when compared to a suitable probabilistic model. Considering the results of the tensile strength ($f_{t0,k}$) in the direction parallel to the grain for 40 different hardwood species, with 480 experimental determinations with standard moisture content ($\approx 12\%$), were used distribution density functions (Normal, LogNormal, Weibull and Exponential) for each species, in order to determine the highest adhesion model. Once determined the values and respective models for each species, a multivariable linear regression model, based on analysis of variance (ANOVA) and dependent on the mean value (\bar{x}), coefficient of variation (CV%) and lowest (min) and the highest (max) strength value for each species, is adopted to estimate the $f_{t0,k}$ adjusted with the most significant terms, in order to infer the quality of the estimator and, consequently, the reliability of such mechanical property. Finally, the regression model proposed here is compared to the proposition of the Brazilian standard, in order to evaluate the reliability of the model and its adequacy in the estimation of the tensile strength $f_{t0,k}$ in the direction parallel to the grain.

Keywords: tropical woods, strength properties, characteristic value.

1. INTRODUÇÃO

A madeira, como elemento estrutural, possui elevado potencial de aplicabilidade no Brasil, proporcionado pela numerosa quantidade de espécies existentes na Floresta Amazônica. Segundo STEEGE *et al.*[2], até 2015, já haviam sido catalogadas mais de 10 mil espécies. Este número expressivo corrobora para o desenvolvimento de novas pesquisas visando à caracterização de espécies com potencial substitutivo àquelas comumente adotadas na construção civil. Em destaque, pode-se citar trabalhos originados por da SILVA *et al.*[3], CARREIRA *et al.*[4], ALMEIDA *et al.*[5], CHRISTOFORO *et al.*[6], LAHR *et al.*[7], dos REIS *et al.*[8], entre outros, que buscaram caracterizar novas espécies para fins estruturais.

No Brasil, quem regulamenta o uso de madeiras para esta finalidade é a NBR 7190 [1]. Dentre seus principais pontos, ela estabelece os condicionantes para elaboração de projetos e as exigências para execução e controle de estruturas de madeira, sendo pautada em métodos probabilísticos como na verificação do estado limite último, que avalia a capacidade resistente à ruptura e a instabilidade da estrutura, e na verificação do estado limite de utilização, responsável por avaliar a deformação excessiva e a durabilidade da estrutura.

Tais métodos supõem-se uma distribuição normal dos valores das resistências às solicitações mecânicas das madeiras, sendo esta a favor da segurança, ao condicionar tais valores a um valor característico correspondente ao percentil de 5% da respectiva distribuição de resistências, em conjunto com um valor limite para o coeficiente de variação igual a $\delta = 18\%$. Logsdon *et al.* [9] afirma, contudo, que tal critério pode não ser uma regra única na obtenção dos valores característicos das solicitações mecânicas. No trabalho em questão, os autores buscaram aferir o modelo para estimar a resistência característica à compressão $f_{c0,k}$, objetivando um modelo estatístico mais adequado para a espécie Angelim Pedra, concluindo que as equações da referida norma são mais conservadoras ao fornecerem valores levemente menores para a $f_{c0,k}$.

Analogamente ao estudo anterior, Matos e Molina [10] estudaram a relação entre as resistências à compressão e ao cisalhamento ($f_{v0,k}/f_{c0,k}$) das espécies de madeira de *Pinus elliotti* e *Eucalyptus citriodora* (*Corymbia citriodora*), comparando a relação obtida experimentalmente com as relações constantes nas normativas NBR 7190 [1] e ISO 13910 [11] e concluíram que as relações obtidas pela norma brasileira, para ambas às espécies, foram superiores às relações da normativa europeia.

Por outro lado, Pinto *et al.* [12] e Espinosa *et al.* [13] avaliaram resultados experimentais para 100 corpos de prova da espécie do gênero *Eucalyptus grandis*, visando obter a resistência $f_{c0,k}$ a partir do método probabilístico da norma brasileira [1], comparando-o ao método da teoria dos percentis para dados agrupados. Em ambos os trabalhos pôde-se concluir que a equação dos percentis se apresentou como a mais adequada para distribuições assimétricas (assimetria comumente encontrada na amostragem experimental), já que o valor obtido pela metodologia da norma apresentou um erro não conservador na ordem de 12%.

Enquanto os estudos anteriores se restringiram a análise de poucas espécies, a proposta de Dias e Lahr [14] reporta a caracterização de 40 espécies de madeira nativas, visando avaliar as equações simplificadas da norma brasileira [1] quanto à obtenção dos valores característicos para as resistências mecânicas, concluindo que as relações para as resistências ao cisalhamento e compressão da norma não se mostraram equivalentes ao conjunto obtido pela amostragem experimental. Destaca-se que dentre o conjunto de espécies estudadas no referido trabalho, 32 espécies também são aqui avaliadas.

Em comum, tais estudos demonstram a importância da obtenção das propriedades mecânicas, visando alcançar estimativas razoáveis e seguras para o dimensionamento de estruturas de madeira. Por isso, é notá-

vel a relevância por trabalhos que objetivem a obtenção de equações estimadoras das propriedades mecânicas para distintas espécies de uso estrutural, assim como prediz a norma NBR 7190 [1] ao propor um método probabilístico para obtenção das diferentes propriedades mecânicas das madeiras.

A necessidade por tais estimativas, portando, conduz este trabalho na avaliação de 40 espécies de madeira pertencentes ao grupo das folhosas. Quando comparado a NBR 7190 [1] (p. 90, Anexo E), a mesma traz valores médios para as propriedades físico-mecânicas de 43 espécies de madeiras nativas e de reflorestamento, conjunto este muito próximo às espécies aqui avaliadas, o que reforça o grau de confiabilidade das análises estatísticas aqui conduzidas exclusivamente para madeiras de florestas nativas.

Assim, com o uso de modelos de distribuição de probabilidades, este trabalho objetiva estimar o valor característico à tração ($f_{t0,k}$) na direção paralela às fibras para um conjunto de 40 espécies de madeira do grupo das folhosas, associando tal valor ao modelo probabilístico mais adequado, dentre os modelos Normal, LogNormal, Weibull e Exponencial. Na sequência, o conjunto formado pelos valores característicos de cada espécie será relacionado com um modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na análise de variância (ANOVA) e dependente do valor médio (\bar{x}), do coeficiente de variação (CV%) e do menor (*min*) e maior (*max*) valor da $f_{t0,k}$, a fim de ajustar tal resistência com os termos mais significativos, inferindo na qualidade da estimativa na confiabilidade dessa propriedade mecânica. Por fim, uma comparação desta regressão com a equação empírica da norma brasileira é realizada para avaliar a adequação destes modelos na obtenção desta propriedade visando sua segura adoção para o dimensionamento estrutural.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os valores da resistência $f_{t0,k}$ para as 40 espécies aqui estudadas, foram obtidos seguindo as premissas e métodos de ensaio e de cálculo da NBR 7190 [1] (p. 47, Anexo B). Os equacionamentos para avaliar tal propriedade são sumarizados na sequência. Além disto, são detalhados os modelos para as distribuições de probabilidades aqui consideradas, assim como o modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na análise ANOVA para estimar a resistência $f_{t0,k}$, considerando o conjunto de resultados das 40 espécies.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP). Para a resistência f_{t0} foram preparados e ensaiados 12 corpos de prova para cada uma das 40 espécies apresentadas na Tabela 1, resultando um total de $12 \times 40 = 480$ determinações experimentais.

Tabela 1: Nomes e identificação (ID) das 40 espécies nativas do grupo das folhosas.

ID	POPULAR	CIENTÍFICO	ID	POPULAR	CIENTÍFICO
01	Angelim-amargoso	<i>Vatairea fusca</i>	21	Cutiúba	<i>Goupia paraensis</i>
02	Angelim-araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>	22	Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
03	Angelim-ferro	<i>Hymenolobium cf. heterocarpum</i>	23	Goiabão	<i>Planchonella pachycarpa</i>
04	Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	24	Guaiçara	<i>Luetzelburgia cf. guaissara</i>
05	Angelim-saia	<i>Vatairea cf. guianensis</i>	25	Guajará	<i>Micropholis venulosa</i>
06	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	26	Guarucaia	<i>Peltophorum dubium</i>
07	Angico-branco	<i>Parkia cf. pendula</i>	27	Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>
08	Angico-preto	<i>Anadenanthera colubrina</i>	28	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>
09	Branquilha	<i>Sebastiania commersoniana</i>	29	Louro-preto	<i>Ocotea neesiana</i>
10	Cafearana	<i>Andira anthelmia</i>	30	Louro-verde	<i>Sextonia cf. rubra</i>
11	Cambará-rosa	<i>Erisma cf. fuscum</i>	31	Maçaranduba	<i>Manilkara cf. inundata</i>
12	Canafístula	<i>Cassia ferruginea</i>	32	Mandioqueira	<i>Qualea paraensis</i>
13	Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i>	33	Oiticica-amarela	<i>Clarisia racemosa</i>
14	Castelo	<i>Calycophyllum multiflorum</i>	34	Oiuchu	<i>Pradosia sp.</i>
15	Catanudo	<i>Calophyllum longifolium</i>	35	Parinari	<i>Parinari excelsa</i>
16	Cedro-amargo	<i>Cedrela odorata</i>	36	Pau-óleo	<i>Copaifera langsdorffii</i>
17	Cedro-doce	<i>Cedrela cf. fissilis</i>	37	Piolho	<i>Tapirira sp.</i>
18	Cedroarana	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	38	Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i>
19	Champanhe	<i>Dipteryx odorata</i>	39	Quina-rosa	<i>Geissospermum sericeum</i>
20	Copaíba	<i>Copaifera multijuga</i>	40	Rabo-de-arraia	<i>Vochysia haenkeana</i>

2.1 Valores característicos

As propriedades mecânicas de resistência tiveram seus valores corrigidos para o teor de umidade de 12%, assim como prediz a norma brasileira NBR 7190 [1], sendo 12% o teor de umidade de equilíbrio estabelecido por esse documento, conforme expressa a equação:

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

em que f_{12} e $f_{U\%}$ são, respectivamente, as resistências para a umidade corrigida de 12% e teor de U%.

Para a determinação dos valores característicos das resistências à tração das espécies aqui avaliadas, necessárias para compor a resistência de cálculo para uma determinada solicitação em um eventual projeto estrutural, deve-se considerar os valores das resistências às solicitações mecânicas das madeiras obtidos a partir do seu valor característico ($f_{w,k}$), que corresponde a um percentil de 5% da distribuição de resistências, e expresso segundo a equação a seguir, sendo f_m o valor médio da resistência e δ o respectivo desvio-padrão.

$$f_{w,k} = f_m [1 - 1,645 \delta] \quad (2)$$

Em adição, a NBR 7190 [1] (p. 18, item 6.4.7) exige que os projetos de estruturas de madeira sejam dimensionados sob a hipótese de linearidade cinemática (pequenos deslocamentos), além de exigir resistência à ação das forças atuantes. Assim, a metodologia probabilística da referida norma, supõe a normalidade nas distribuições dos valores da resistência, a favor da segurança, considerando um coeficiente de variação $\delta = 18\%$ para a resistência à tração, tal como expressa:

$$f_{w,k} = f_m [1 - 1,645 \delta] \approx 0,70 f_m \quad (3)$$

Por outro lado, para uma investigação direta da resistência, a normativa prevê a empregabilidade da equação sequencial, que estima o valor de $f_{w,k}$ na forma:

$$f_{w,k} = \left[2 \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{\left(\frac{n}{2}-1\right)}}{\left(\frac{n}{2}-1\right)} - f_{\left(\frac{n}{2}\right)} \right] \cdot 1,10 \quad (4)$$

em que f_n corresponde a n resultados da resistência à determinada solicitação, devendo ser colocados em ordem crescente ($f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_n$) desprezando-se o maior valor se o número de corpos de prova for ímpar. Ressalta-se que a Equação 4 baseia-se no estimador z_b para uma amostra de $2m$ valores $x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{2m}$, assim como expressa a equação:

$$z_b = \left[2 \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{(m-1)}}{(m-1)} - f_m \right] \quad (5)$$

Contudo, para uma distribuição de extremos centrada no valor característico, a Equação 4 tem um acréscimo de 10%, o que evita, segundo Logsdon *et al.*[9], que 50% das estimativas sejam feitas por valores abaixo da resistência característica. A norma brasileira adota, portanto, como valor de $f_{w,k}$ o maior dos valores compreendidos entre: a resistência f_1 , a resistência equivalente a 70% do valor de f_m (Equação 3) obtidas pela média das amostras ensaiadas e o valor obtido pela Equação 4 ([1], p. 18). Ainda segundo Pinto *et al.*[12], a Equação 5 pode resultar em valores significativamente diferentes a partir daqueles associados a uma dada função de probabilidade, tendo em vista a diversidade de funções de probabilidade existentes.

2.2 Análise Estatística.

A análise para as 40 espécies de madeiras foram inicialmente pautadas em 04 (quatro) funções para as distribuições de probabilidade, sendo estas adotadas na determinação dos valores característicos da resistência $f_{t0,k}$. Assim, as funções densidade de probabilidade (f), sobre a variável aleatória x são expressas conforme as Equações 6, 7, 8 e 9 para as funções Normal, LogNormal, Weibull e Exponencial, respectivamente:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad x \in (-\infty, \infty) \quad (6)$$

em que σ é o desvio padrão e μ a média populacional da função normal;

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma^2}\right)^2} & , \text{ se } x > 0 \\ 0 & , \text{ em caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

sendo σ o desvio padrão e μ a média populacional logarítmica;

$$f(x) = \frac{\delta}{\alpha^\delta} \cdot x^{\delta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\delta}, \quad x > 0 \quad (8)$$

onde δ e α são os parâmetros de forma e de escala, respectivamente;

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}, \quad x > 0 \quad (9)$$

em que λ é o parâmetro de taxa de distribuição da função exponencial.

Os testes de aderência (ao nível de 95% de confiabilidade) usados para verificar o melhor modelo de distribuição foram obtidos via Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) a partir do *Software Minitab*[®][15]. Ressalta-se que o *software* em questão dispõe de outras funções que podem ser adotadas para avaliar a aderência de um conjunto de dados amostrais, resultando em um estudo mais amplo capaz de contemplar outras funções probabilísticas, além das quatro aqui testadas.

Obtidos os valores característicos $f_{t0,k}$ para as 40 espécies, dentre os 04 (quatro) modelos de distribuição de probabilidade (Equações 6 a 9) os resultados são relacionados com o valor médio (\bar{x}), o coeficiente de variação (CV%) e com o menor (*min*) e maior (*max*) valor da $f_{t0,k}$, por meio de um modelo de regressão linear multivariável, expresso na equação a seguir (em MPa) e fundamentado na ANOVA, com a qualidade do ajuste avaliada pelo coeficiente de determinação (R_{aj}^2).

$$f_{t0,k}^{Prob} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \bar{x} + \beta_2 \cdot CV + \beta_3 \cdot min + \beta_4 \cdot max + \varepsilon \quad (10)$$

em que β_i consistem nos coeficientes ajustados pelo MMQ e ε é o erro aleatório.

A análise ANOVA, ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), foi utilizada para verificar a acurácia da Equação 10. Pelas hipóteses admitidas para a formulação ANOVA do modelo de regressão, $p \geq 0,05$ (probabilidade P) implica em se aceitar a hipótese nula (H_0), ou seja, o modelo ou seus coeficientes não são representativos (variações dos fatores não explicam as variações na variável dependente), e representativos no caso de $p < 0,05$ (hipótese alternativa, H_1).

Conjuntamente, pode-se testar a normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA com o auxílio do teste de *Anderson-Darling* [16], em conjunto com o gráfico dos resíduos versus valores ajustados (análise da homogeneidade das variâncias e da independência dos resíduos). Pela formulação do teste, P-valor igual ou superior ao nível de significância (5%) implica em aceitar a normalidade na distribuição dos resíduos e, em caso contrário, de rejeitar essa hipótese. Portanto, após o teste de aderência, o modelo empírico da norma (Equação 4), pode ser avaliado quanto a sua precisão e comparado ao modelo probabilístico aqui proposto.

3. RESULTADOS

Inicialmente, são apresentados na Tabela 2 os valores característicos $f_{t0,k}$ calculados via modelo empírico da norma brasileira [1], conforme Equação 4. Em adição, as classes de resistência (CR), obtidas via resistência característica à compressão ($f_{c0,k}$), são apresentados para evidenciar que a distribuição dos valores é assimétrica, ao contemplar todas as 04 (quatro) CR definidas pela norma brasileira [1].

Tabela 2: Resultados da resistência à tração via equação da norma ($f_{t0,k}$) e das classes de resistência (CR).

ID	POPULAR	CR	$f_{t0,k}$	ID	POPULAR	CR	$f_{t0,k}$
01	Angelim-amargoso	C40	52,56	21	Cutiúba	C40	75,22
02	Angelim-araroba	C40	48,63	22	Garapa	C60	81,62
03	Angelim-ferro	C60	83,51	23	Goiabão	C40	83,54
04	Angelim-pedra	C40	59,27	24	Guaiçara	C40	80,59
05	Angelim-saia	C40	67,12	25	Guajará	C60	83,43
06	Angelim-vermelho	C60	72,02	26	Guarucaia	C40	63,98
07	Angico-branco	C40	53,94	27	Itaúba	C60	72,60
08	Angico-preto	C40	76,65	28	Jatobá	C60	125,29
09	Branquilha	C40	67,20	29	Louro-preto	C40	61,36
10	Cafearana	C40	56,30	30	Louro-verde	C40	69,87
11	Cambará-rosa	C20	31,79	31	Maçaranduba	C60	109,40
12	Canafistula	C30	59,44	32	Mandioqueira	C60	65,13
13	Castanheira	C30	61,95	33	Oiticica-amarela	C60	74,23
14	Castelo	C40	86,42	34	Oiuchu	C60	85,29
15	Catanudo	C40	48,79	35	Parinari	C40	79,35
16	Cedro-amargo	C30	44,04	36	Pau-óleo	C40	50,30
17	Cedro-doce	C20	48,55	37	Piolho	C40	51,14

18	Cedroarana	C20	50,07	38	Quarubarana	C20	40,63
19	Champanhe	C60	87,30	39	Quina-rosa	C60	81,65
20	Copaíba	C40	52,67	40	Rabo-de-arraia	C40	51,39

Comparativamente, com uso das funções densidade de probabilidade, apresentadas nas Equações 6 a 9, as resistências $f_{t0,k}^{Prob}$ podem ser calculadas para cada conjunto de resultados (12 corpos de prova) das 40 espécies de madeira, elegendo a função densidade de melhor aderência pelo maior P-valor encontrado dentre as 4 (Quatro) funções. Em adição, os intervalos de confiança (IC) também são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da resistência à tração via funções densidade de probabilidade ($f_{t0,k}^{Prob}$).

ID	$f_{t0,k}^{Prob}$	IC	P-valor	MODELO	ID	$f_{t0,k}^{Prob}$	IC	P-valor	MODELO
01	46,96	(37,33; 59,08)	0,668	LogNormal	21	61,01	(46,45; 80,41)	0,268	LogNormal
02	44,31	(35,55; 55,22)	0,919	LogNormal	22	74,32	(61,86; 89,29)	0,908	LogNormal
03	52,28	(16,92; 87,64)	0,907	Normal	23	70,53	(54,64; 91,05)	0,823	LogNormal
04	49,71	(42,91; 57,59)	0,038	LogNormal	24	78,56	(58,41; 98,71)	0,341	Normal
05	47,72	(21,17; 74,26)	0,797	Normal	25	76,13	(53,41; 98,84)	0,893	Normal
06	63,73	(50,08; 81,11)	0,045	LogNormal	26	56,77	(49,38; 65,24)	0,676	LogNormal
07	50,73	(42,09; 59,37)	0,318	Normal	27	57,41	(32,98; 81,84)	0,603	Normal
08	55,92	(26,39; 85,45)	0,394	Normal	28	113,99	(86,93; 141,04)	0,508	Normal
09	61,98	(52,11; 73,71)	0,423	LogNormal	29	55,46	(47,96; 64,12)	0,511	LogNormal
10	47,31	(36,57; 61,19)	0,180	LogNormal	30	67,47	(60,79; 74,88)	0,867	LogNormal
11	27,17	(21,18; 34,85)	0,053	LogNormal	31	102,75	(88,48; 119,33)	0,334	LogNormal
12	51,03	(33,15; 68,91)	0,297	Normal	32	45,43	(20,31; 70,55)	0,796	Normal
13	54,80	(39,69; 75,66)	0,159	Weibull	33	64,55	(53,88; 77,34)	0,250	Weibull
14	81,49	(72,16; 92,04)	0,768	LogNormal	34	75,43	(59,72; 95,27)	0,848	LogNormal
15	37,88	(28,85; 49,75)	0,083	LogNormal	35	56,88	(27,08; 86,68)	0,935	Normal
16	38,84	(31,83; 47,40)	0,347	LogNormal	36	46,27	(37,93; 56,45)	0,292	LogNormal
17	45,91	(38,01; 55,45)	0,764	LogNormal	37	40,05	(29,99; 53,47)	0,214	LogNormal
18	33,31	(22,76; 48,77)	0,038	Weibull	38	37,40	(26,51; 48,29)	0,527	Normal
19	85,42	(71,09; 102,65)	0,754	LogNormal	39	72,37	(47,98; 96,76)	0,900	Normal
20	48,82	(40,53; 58,81)	0,227	LogNormal	40	45,63	(36,77; 56,63)	0,319	LogNormal

Das 40 espécies avaliadas 32,5% (13/40) obtiveram melhores ajustes pelo modelo de distribuição Normal, 60% (24/40) ajustadas pelo modelo LogNormal e 7,5% (3/40) pelo modelo de Weibull e com o modelo Exponencial não fornecendo ajuste significativo para nenhuma das espécies avaliadas.

Uma vez eleitos os modelos de densidade para as 40 espécies, os valores médios (\bar{x} em MPa), o coeficiente de variação (CV%) e os menores (min) e maiores (max) valores da resistência f_{t0} , são apresentados na Tabela 4, visando adotá-los na construção da equação para estimar a resistência $f_{t0,k}^{Mod}$, conforme modelo de regressão apresentado na Equação 10.

Tabela 4: Resultados estatísticos obtidos para a resistência f_{t0} (em MPa) das 40 espécies de madeira.

ID	\bar{x}	CV%	min	max	ID	\bar{x}	CV%	min	max
01	75,08	26,71	45,00	105,00	21	107,50	32,81	66,20	165,60
02	69,48	27,07	42,70	108,00	22	107,64	22,50	72,40	152,60
03	119,30	35,67	60,20	197,00	23	119,30	29,70	65,70	178,60
04	66,66	17,95	47,30	86,70	24	115,13	20,25	69,30	153,60
05	95,88	32,03	33,30	152,00	25	119,18	22,94	64,50	160,20
06	104,90	32,96	58,80	198,00	26	74,88	17,26	54,30	103,40
07	67,10	15,49	53,94	84,86	27	103,72	28,35	56,30	154,00
08	109,5	31,20	51,00	161,30	28	165,27	19,70	103,30	206,00
09	87,88	21,78	67,20	124,00	29	74,07	17,92	58,80	100,20
10	80,42	29,66	45,00	111,10	30	82,80	12,55	65,480	104,47
11	45,41	30,39	30,60	66,70	31	138,48	18,16	109,40	174,80
12	84,92	25,34	40,00	109,20	32	93,04	32,49	40,70	140,00
13	88,50	24,56	54,00	118,00	33	85,83	14,94	53,30	106,50
14	103,64	14,58	80,10	125,30	34	121,80	29,25	80,20	201,60
15	65,37	38,07	45,90	129,50	35	113,40	31,64	53,80	169,10
16	58,20	24,91	37,10	88,00	36	69,29	25,11	50,30	101,20
17	67,23	22,80	44,40	97,70	37	73,05	32,76	40,40	102,30
18	61,85	26,89	46,30	93,10	38	58,05	22,58	32,70	76,40
19	121,70	21,57	87,30	173,30	39	116,64	24,20	77,00	171,00
20	71,13	23,11	50,30	101,20	40	70,94	27,49	48,40	110,10

Assim, o modelo de regressão para a estimativa do valor característico $f_{t0,k}^{Mod}$ pode ser expresso pela Equação 11, com os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 5.

$$f_{t0,k}^{Mod} = 20,05 + 0,415 \cdot \bar{x} - 0,814 \cdot CV + 0,371 \cdot \min - 0,0045 \cdot \max \quad [R_{aj}^2 = 96,97\%] \quad (11)$$

Tabela 5: Resultados da ANOVA para o modelo de regressão de acordo com a Equação 11.

FATOR	GL	SQ _{aj}	QM _{aj}	VALOR F	P-valor
\bar{x}	1	289,0	288,98	28,96	0,000
CV	1	255,3	255,32	25,58	0,000
min	1	307,6	307,60	30,82	0,000
max	1	0,1	0,068	0,01	0,935
Erro	35	349,3	9,980	--	--
Total	39	12830,0	--	--	--

* **GL** - graus de liberdade; SQ_{aj} - soma de quadrados; QM_{aj} - quadrados médios.

Da análise de variância do modelo de regressão (Tabela 5), o modelo mostra-se significativo, dado um coeficiente $R_{aj}^2 = 96,97\%$, o que resulta em um erro próximo de 3%. Constata-se que 03 (três) termos são significativos (\bar{x} , CV, min) e apenas o termo referente ao máximo valor da resistência (max) não é significativo, o que possibilita excluí-lo do conjunto de coeficientes, por não influenciar nesta estimativa.

Admitindo, portanto, apenas os termos significativos para construir tal estimativa, adotam-se os três coeficientes significativos, conforme Equação 12, com os resultados da ANOVA expressos na Tabela 6.

$$f_{t0,k}^{Mod} = 20,28 + 0,4099 \cdot \bar{x} - 0,824 \cdot CV + 0,3694 \cdot \min \quad [R_{aj}^2 = 97,05\%] \quad (12)$$

Tabela 6: Resultados da ANOVA para o modelo de regressão de acordo com a Equação 12.

FATOR	GL	SQ _{aj}	QM _{aj}	VALOR F	P-valor
\bar{x}	1	980,0	980,01	100,99	0,000
CV	1	607,0	607,04	62,55	0,000
min	1	328,4	328,44	33,85	0,000
Erro	36	349,4	9,70	--	--
Total	39	12830,0	--	--	--

* GL - graus de liberdade; SQ_{aj} - soma de quadrados; QM_{aj} - quadrados médios.

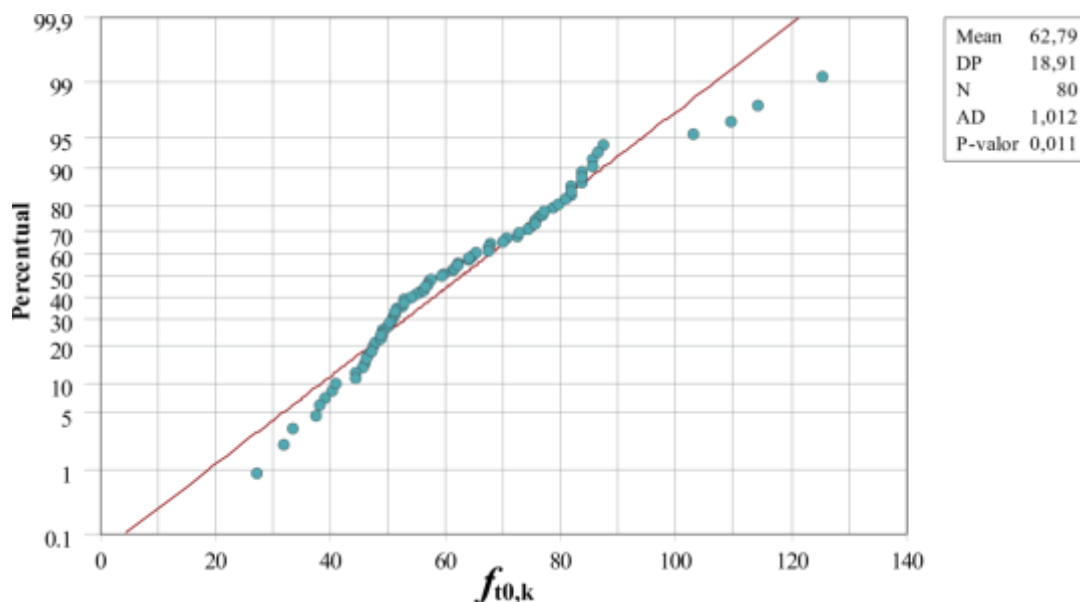
Por fim, a Tabela 7 apresenta os resultados da ANOVA para avaliar a equivalência dos conjuntos de valores para $f_{t0,k}$ (Equação 4) e $f_{t0,k}^{Mod}$ (Equação 12). Pelo P-valor inferior ao nível de significância (5%), constata-se a não equivalência das médias dos dois grupos confrontados, ou seja, não possuem médias estatisticamente equivalentes entre si.

Tabela 7: Resultados da ANOVA para o conjunto de valores característicos da $f_{t0,k}$ e $f_{t0,k}^{Mod}$.

FONTE	GL	SQ _{aj}	QM _{aj}	VALOR F	P-valor
Condição	1	1762	1762,3	5,19	0,025
Erro	78	26493	339,70	--	--
Total	79	28255	--	--	--

* GL - graus de liberdade; SQ_{aj} - soma de quadrados; QM_{aj} - quadrados médios.

O teste de normalidade de *Anderson-Darling* resultou em um P-valor < 0,05, assim como mostra a Figura 1, denotando a anormalidade da distribuição dos resíduos, indo de encontro ao resultado obtido pelo modelo da ANOVA, com um P-valor < 0,05 (Tabela 7).


Figura 1: Resultados de validação da ANOVA: teste de normalidade de *Anderson-Darling*.

Em síntese, a Tabela 8 agrupa os valores característicos calculados, comparativamente, pela norma brasileira ($f_{t0,k}$) (Tabela 2), pelas funções probabilísticas ($f_{t0,k}^{Prob}$) de melhor aderência (Tabela 3) e do modelo de regressão ($f_{t0,k}^{Mod}$) proposto neste trabalho (Equação 12).

Tabela 8: Comparativo dos valores característicos para a tração via norma ($f_{t0,k}$), função probabilística ($f_{t0,k}^{Prob}$) e pelo modelo de regressão ($f_{t0,k}^{Mod}$) aqui proposto.

ID	POPULAR	$f_{t0,k}$ (Tab. 2)	$f_{t0,k}^{Prob}$ (Tab. 3)	$f_{t0,k}^{Mod}$ (Eq. 12)	ID	POPULAR	$f_{t0,k}$ (Tab. 2)	$f_{t0,k}^{Prob}$ (Tab. 3)	$f_{t0,k}^{Mod}$ (Eq. 12)
01	Angelim-amargoso	52,56	46,96	45,67	21	Cutiúba	75,22	61,01	61,76
02	Angelim-araroba	48,63	44,31	42,23	22	Garapa	81,62	74,32	72,61
03	Angelim-ferro	83,51	52,28	62,03	23	Goiabão	83,54	70,53	68,98
04	Angelim-pedra	59,27	49,71	50,29	24	Guaíçara	80,59	78,56	76,39
05	Angelim-saia	67,12	47,72	45,49	25	Guajará	83,43	76,13	74,06
06	Angelim-vermelho	72,02	63,73	57,84	26	Guaruaia	63,98	56,77	56,81
07	Angico-branco	53,94	50,73	54,95	27	Itaúba	72,60	57,41	60,23
08	Angico-preto	76,65	55,92	58,30	28	Jatobá	125,29	113,99	109,95
09	Branquilha	67,20	61,98	63,18	29	Louro-preto	61,36	55,46	57,59
10	Cafearana	56,30	47,31	45,43	30	Louro-verde	69,87	67,47	68,07
11	Cambará-rosa	31,79	27,17	25,16	31	Maçaranduba	109,40	102,75	102,49
12	Canafistula	59,44	51,03	48,99	32	Mandioqueira	65,13	45,43	46,68
13	Castanheira	61,95	54,80	56,27	33	Oiticica-amarela	74,23	64,55	62,84
14	Castelo	86,42	81,49	80,34	34	Oiuchu	85,29	75,43	75,73
15	Catanudo	48,79	37,88	32,66	35	Parinari	79,35	56,88	60,57
16	Cedro-amargo	44,04	38,84	37,32	36	Pau-óleo	50,30	46,27	46,57
17	Cedro-doce	48,55	45,91	45,45	37	Piolho	51,13	40,05	38,15
18	Cedroarana	50,07	33,31	40,57	38	Quarubarana	40,63	37,40	37,55
19	Champanhe	87,30	85,42	84,64	39	Quina-rosa	81,65	72,37	76,59
20	Copaíba	52,67	48,82	48,97	40	Rabo-de-arraia	51,39	45,63	44,59

Por fim, a Figura 2 ilustra os valores médios e os intervalos de confiança da média, para um nível de 95% de confiabilidade ($p < 0,05$), dos valores da $f_{t0,k}$ obtidos por ambas as formas de cálculo.

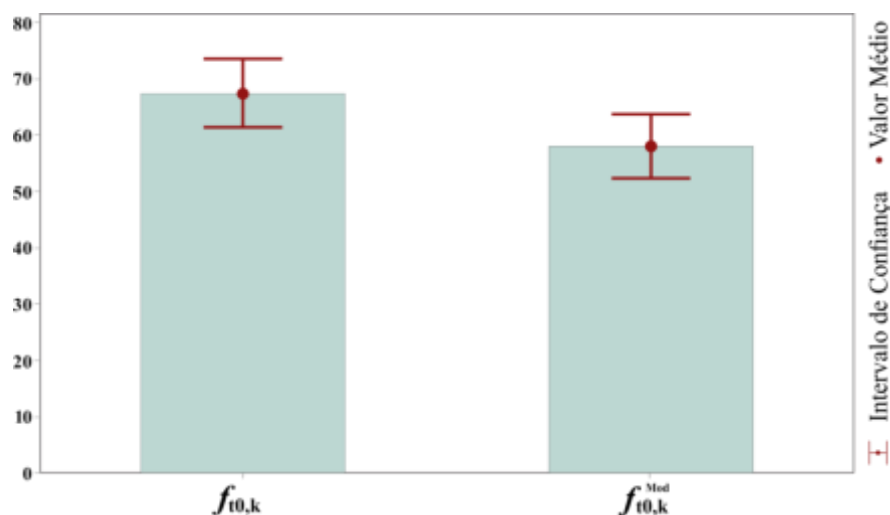


Figura 2: Valores médios e intervalos de confiança para a $f_{t0,k}$ obtidos por ambos métodos de cálculo, respectivamente pela norma brasileira e pelo modelo aqui proposto (Equação 12).

A Figura 2 ajuda a elucidar a não equivalência dos dois conjuntos ($f_{t0,k}$ e $f_{t0,k}^{Mod}$), sendo que as médias atingiram: $f_{t0,k} = 67$ MPa, enquanto que para $f_{t0,k}^{Mod} = 58$ MPa, respectivamente, para a norma (Equação 4) e para o modelo proposto neste trabalho (Equação 12).

4. DISCUSSÃO

Das 40 espécies aqui avaliadas (Tabela 1), muitas também foram objetos de estudos em outras pesquisas. Desde modo, cabe-se comparar as resistências f_{t0} (Tabela 4) com valores obtidos na literatura, a fim de cor-

roborar com os valores encontrados neste trabalho.

Ao comparar as resistências f_{t0} com os valores da NBR 7190 [1] (p. 90, Anexo E), que traz um total de 43 espécies do grupo das folhosas, sendo que 19 espécies são aqui avaliadas, verifica-se que todas estão dentro dos ICs aqui obtidos com os valores médios em sua maioria, próximos aos obtidos neste trabalho.

Podem-se comparar também os valores dispostos no estudo de Dias e Lahr [14], que avaliaram 40 espécies, dentre as quais 32 espécies são aqui avaliadas. Os valores médios da resistência f_{t0} obtidos pelos autores são congruentes com os valores alcançados neste trabalho, estando todos compreendidos no IC.

É possível ainda comparar alguns valores individuais para algumas das espécies estudadas neste trabalho. Os valores médios aqui encontrados para a f_{t0} se encontram no IC e podem ser equiparados aos obtidos por Lahr *et al.* [17] (Cambará-rosa (*Erisma* sp.) - $f_{t0} = 45$ MPa), Aquino *et al.* [18] (Copaíba (*Copaifera* sp.) - $f_{t0} = 71$ MPa) e Christoforo *et al.* [6] (Castelo (*Calycophyllum multiflorum*) - $f_{t0} = 104$ MPa).

Destaca-se ainda o valor apresentado por Tenorio *et al.* [19] para duas populações de Cedro-amargo (*Cedrela odorata*), com o valor médio $f_{t0} = 40$ MPa, sendo este inferior ao valor médio, mas no IC aqui calculado. Já a proposição de Lahr *et al.* [17] obteve um valor médio, para a espécie Jatobá (*Hymenaea courbaril*) extraída de três locais distintos, igual a $f_{t0} = 154$ MPa, valor este também compreendido dentro do IC obtido neste trabalho e próximo ao valor médio.

Outros autores avaliaram algumas das espécies aqui estudadas, porém, restritos às propriedades físicas: Itaúba (*Mezilaurus itauba*) [3]; Mandioqueira (*Qualea* sp) [5]; Cedro-amargo (*Cedrela odorata*) [19]; Cedrorana (*Cedrelinga cateniformis*) [20]; Garapa (*Apuleia leiocarpa*) [21] e Jatobá (*Hymenaea* sp.) [22].

5. CONCLUSÕES

Os resultados do modelo de regressão, proposto neste trabalho, alcançaram excelente precisão, mensurada pelo coeficiente R_{aj}^2 , superior a 97%. Ressalta-se a versatilidade no uso deste modelo para estimativa do valor característico da resistência $f_{t0,k}$, uma vez que dependem apenas dos valores médio, mínimo e do coeficiente de variação, variáveis estas facilmente obtidas a partir do conjunto de dados experimentais ensaiados.

Ao confrontar o conjunto de valores característicos advindos do modelo apresentado neste trabalho, verifica-se a não equivalência estatística com o modelo proposto pela norma brasileira. Destaca-se o fato dos valores para $f_{t0,k}^{Mod}$ (Equação 12) atingirem resultados, na média, inferiores ($\approx 14\%$) aos obtidos pelas equações da norma e, portanto, a favor da segurança.

Tal questão reforça a importância da incorporação do modelo probabilístico aqui proposto à futura revisão da normativa para projetos estruturais de madeira no Brasil, tendo em vista a confiabilidade deste modelo aliada a facilidade de seu uso no que condiz a obtenção da resistência $f_{t0,k}$, conduzida pelo conjunto de 40 espécies tropicais, que contemplam todas as classes de resistência das folhosas, grupo este imprescindível para o pré-dimensionamento estrutural em madeira.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190: projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.

[2] STEEGE, H., VAESSEN, R. W., LÓPEZ, D. C., *et al.*, *The discovery of the Amazonian tree flora with an update checklist of all known tree taxa*, In: Scientific Reports, pp. 1-15, 2016.

[3] DA SILVA, F., HIGUCHI, N., NASCIMENTO, C. C., *et al.*, “Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood”, *Journal of Tropical Forest Science*, v. 26, n. 1, pp. 69-74, 2014.

[4] CARREIRA, M. R., SEGUNDINHO, P. G. A., LAHR, F. A. R., *et al.*, “Bending stiffness evaluation of teca and guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration”, *Acta Scientiarum. Technology*, v. 34, n. 1, pp. 27-32, 2012.

- [5] ALMEIDA, T. H., ALMEIDA, D. H., ARAUJO, V. A., *et al.*, “Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods”, *BioResources*, v. 12, n. 3, pp. 6579-6590, 2017.
- [6] CHRISTOFORO, A. L., ARROYO, F. N., SILVA, D. A. L., *et al.*, “Full characterization of *Calycophyllum multiflorum* wood specie”, *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, v. 37, n. 4, pp. 637-643, 2017.
- [7] LAHR, F. A. R., ARROYO, F. N., ALMEIDA, T. H., *et al.*, “Full Characterization of *Erismia uncinatum* Warm. wood specie”, *International Journal of Materials Engineering*, v. 6, n. 5, pp. 147-150, 2016a.
- [8] REIS, P. C. M. SOUZA, A. L., REIS, L. P., *et al.*, “Artificial neural networks to estimate the physical-mechanical properties of Amazon second cutting cycle wood”, *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v. 20, n. 3, pp. 343-352, 2018.
- [9] LOGSDON, N. B., JESUS, J. M. H., PENNA, J. E., “Avaliação dos estimadores da resistência característica à compressão paralela às fibras”, *Scientia Forestalis*, v. 38, pp. 579-587, 2010.
- [10] MATOS, G. S., MOLINA, J. C., “Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190:1997 e ISO 13910:2005”, *Revista Matéria*, v. 21, n. 4, pp. 1069-1079, 2016.
- [11] INTERNATIONAL STANDARD. ISO 13910: Structural timber – characteristic values of strength-graded timber – sampling, full-size testing and evaluation. Suécia, 30 p., 2005.
- [12] PINTO, E. M., ESPINOSA, M. M., CALIL JR., C., “Métodos para Determinação do Valor Característico da Resistência à Compressão Paralela às Fibras da Madeira”, *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 5, n.14, pp. 1-6, 2004.
- [13] ESPINOSA, M. M., CALIL JR., C., LAHR, F. A. R., “Métodos paramétricos e não-paramétricos para determinar o valor característico em resultados de ensaio de madeira”, *Scientia Forestalis*, v. 66, pp. 76-83, 2004.
- [14] DIAS, F. M., LAHR, F. A. R., “Análise das relações propostas pela norma brasileira NBR 7190 para caracterização simplificada da resistência de madeiras”, In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, São Pedro, SP, 2000.
- [15] MINITAB, Minitab statistical software, <http://www.minitab.com>. Acessado em Agosto de 2018.
- [16] WEERAHANDI, S., “ANOVA under unequal error variances”, *International Biometric Society*, v. 51, pp. 589-599, 1995.
- [17] LAHR, F. A. R., CHRISTOFORO, A. L., SILVA, C. E. G., *et al.*, “Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa* Hayne) com diferentes teores de umidade e extraídas de regiões distintas”, *Revista Árvore*, v. 40, n. 1, pp. 147-154, 2016b.
- [18] AQUINO, V. B. M., ALMEIDA, J. P. B., ALMEIDA, D. H., *et al.*, “Physical and mechanical characterization of *Copaifera* sp. wood specie”, *International Journal of Materials Engineering*, v. 8, n. 3, pp. 55-58, 2018.
- [19] TENORIO, C., MOYA, R., “Evaluation of wood properties of four ages of *Cedrela odorata* trees growing in agroforestry systems with *Theobroma cacao* in Costa Rica”, *Agroforestry Systems*, pp. 1-16, 2018.
- [20] FERNANDES, N. C. L., VALLE, M. L. A., CALDERON, C. M. A., “Características físicas e anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke”, *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 1, pp. 1-10, 2018.
- [21] SORIANO, J., VEIGA, N. S., MARTINS, I. Z., “Wood density estimation using the sclerometric method”, *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 73, pp. 753-758, 2015.
- [22] TIAGO, P. V., ROSSI, A. A. B., CARPEJANI, A. A., *et al.*, “Diversidade genética e estrutura populacional de Jatobá: uma espécie com potencial econômico para a Amazônia”, *Ciência Florestal*, v. 28, n. 2, pp. 515-524, 2018.

ORCID

Anderson Renato Vobornik Wolenski
Rodrigo Guerra Peixoto
André Luís Christoforo
Francisco Antonio Rocco Lahr
Alfredo Manuel Pereira Geraldias Dias

<https://orcid.org/0000-0002-5709-1965>
<https://orcid.org/0000-0002-0163-211X>
<https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>
<https://orcid.org/0000-0002-3510-8498>
<https://orcid.org/0000-0002-9752-1907>