


# Modelos para estimativa das propriedades mecânicas de compressão e tração na direção paralela às fibras

*Models for estimation of mechanical properties of compressive and tensile strength in the parallel direction to the grains*

Anderson Renato Vobornik Wolenski 

Fabrício Moura Dias 

Rodrigo Guerra Peixoto 

André Luís Christoforo 

Francisco Antonio Rocco Lahr 

## Resumo

**A**s resistências mecânicas da madeira são calculadas, por questões de segurança, com base no seu valor característico. A norma brasileira para estruturas de madeira estabelece relações para estimar a resistência característica juntamente com três formas de caracterização da madeira, com destaque ao procedimento simplificado que permite, para espécies usuais, a obtenção dos valores característicos por meio de equações que correlacionam diferentes propriedades mecânicas. Ao considerar os resultados das resistências ( $f_{c0}$ ;  $f_{t0}$ ) e dos módulos de elasticidade ( $E_{c0}$ ;  $E_{t0}$ ) na compressão e tração paralelas às fibras de 40 espécies folhosas (960 experimentações com teor de umidade de  $\approx 12\%$ ), a precisão das relações  $f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$  e  $E_{c0} = E_{t0}$  propostas pela norma foram avaliadas com base na análise de variância (ANOVA). Além do objetivo de avaliar tais equações, modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico foram adotados como proposta alternativa na estimativa de tais propriedades. As análises estatísticas validaram as equações propostas pela norma brasileira e a equação geométrica, proposta neste trabalho, mostrou-se como o modelo de melhor ajuste.

**Palavras-chave:** Madeiras folhosas. Modelos de regressão. Valores característicos.

## Abstract

*The mechanical strengths of wood are calculated, for safety reasons, based on their characteristic value. The Brazilian standard for timber structures establishes relationships to estimate the characteristic strength together with three forms of wood characterisation, with emphasis on the simplified procedure that allows, for usual species, obtaining the characteristic values through equations that correlate different mechanical properties. Considering the results of strengths ( $f_{c0}$ ;  $f_{t0}$ ) and of the modulus of elasticity ( $E_{c0}$ ;  $E_{t0}$ ) on the compressive and tensile parallel to the grains of 40 hardwood species (960 experimental determinations with  $\approx 12\%$  moisture content), the precision of the relations  $f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$  and  $E_{c0} = E_{t0}$  proposed by the standard were evaluated based on the analysis of variance (ANOVA). Besides the objective of evaluating such equations, linear, exponential, logarithmic and geometric regression models were adopted as an alternative proposal in the estimation of such properties. The statistical analyzes validated the equations proposed by the Brazilian standard, and the geometric equation, proposed in this work, proved to be the best fit model.*

**Keywords:** Hardwoods. Regression models. Characteristic values.

<sup>1</sup>Anderson Renato Vobornik Wolenski

<sup>1</sup>Instituto Federal de Santa Catarina  
São Carlos - SC - Brasil

<sup>2</sup>Fabrício Moura Dias

<sup>2</sup>Centro Universitário do Leste de Minas Gerais  
Coronel Fabriciano - MG - Brasil

<sup>3</sup>Rodrigo Guerra Peixoto

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte - MG - Brasil

<sup>4</sup>André Luís Christoforo

<sup>4</sup>Universidade Federal de São Carlos  
São Carlos - SP - Brasil

<sup>5</sup>Francisco Antonio Rocco Lahr

<sup>5</sup>Universidade de São Paulo  
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 31/10/18

Aceito em 07/09/19

## Introdução

A Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), discorre sobre projetos de estruturas de madeira, regulando seu uso na construção civil. Dentre os principais pontos estabelece os condicionantes para elaboração de projetos e as exigências para execução e controle de estruturas de madeira. Está 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 serviço, responsável por avaliar a deformação excessiva e a durabilidade da estrutura.

Em adição, a norma também traz os quesitos sobre arranjo estrutural, ações atuantes, modelo e análise estrutural, critérios relativos ao dimensionamento e detalhamento das estruturas e elementos de ligação, além de elencar métodos específicos para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas das madeiras, prevendo para tanto métodos de caracterização completa, mínima ou simplificada, imprescindíveis para o dimensionamento estrutural em madeiras. Tal caracterização, segundo Christoforo *et al.* (2017), é justificada pela estrutura anatômica intrínseca a cada espécie, e que leva em consideração o tipo de esforço e a direção das fibras, assim como o teor de umidade da madeira.

Notadamente, uma caracterização completa de uma espécie é custosa, sendo poucos os laboratórios brasileiros capacitados para realizá-la. Tal questão fica evidenciada tendo em vista o grande número de experimentos exigidos por parte da NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 15, item 6.3.1), sendo estes: ensaios de densidades básica ( $\rho_{bas}$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ ), resistências na compressão ( $f_{c0}$ ), na tração ( $f_{t0}$ ), no cisalhamento ( $f_{v0}$ ) e no embutimento ( $f_{e0}$ ) paralelos às fibras e compressão ( $f_{c90}$ ), tração ( $f_{t90}$ ) e embutimento ( $f_{e90}$ ) normais às fibras, cabendo ressaltar que a normatização dos ensaios para determinação das propriedades é apresentada no Anexo B dessa norma.

Contudo, tal complexidade de ensaios pode ser minimizada, segundo a própria norma, ao detalhar a caracterização simplificada como sendo aquela realizada para espécies usuais ausentes de ensaios experimentais, exigindo para tanto resultados da  $f_{c0}$  para um número mínimo de seis corpos de prova, além de propor a adoção de algumas relações que visam facilitar a obtenção das propriedades mecânicas (ABNT, 1997, p. 15, item 6.3.3), com destaque aos equacionamentos que preveem a correlação das resistências características à compressão ( $f_{c0,k}$ ) e à tração ( $f_{t0,k}$ ) [ $f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$ ], e a relação entre os módulos de elasticidade na compressão ( $E_{c0}$ ) e na tração ( $E_{t0}$ ) [ $E_{c0} = E_{t0}$ ], ambos na direção paralela às fibras da madeira, sendo essas equações o objetivo central do estudo aqui apresentado.

Para tanto, este trabalho conduziu análises para 40 espécies de madeira do grupo das folhosas. Quando comparado com a NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 90, Anexo E), traz valores médios para 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.

Destaca-se, por fim, que em todos os métodos de caracterização a investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos não deve ser composta por volumes superiores a 12 m<sup>3</sup> (ABNT, 1997, Anexo B). A norma determina ainda que para lotes de madeira caracterizados pelos referidos métodos e com umidade contida no intervalo entre 10% e 20%, a correção para a umidade padrão é de 12% (classe 1).

Tais exigências foram conduzidas para todas as propriedades avaliadas neste trabalho, com o objetivo de obter relações simplificadas capazes de fornecer propriedades mecânicas seguras para o pré-dimensionamento de estruturas de madeira.

## Referencial teórico

Ao considerar a importância das propriedades mecânicas no dimensionamento de estruturas de madeira, como pontes, galpões e residências (RUELLE *et al.*, 2011; DADZIE; AMOAH, 2015), torna-se relevante a avaliação de equações que objetivem estimar as propriedades mecânicas para espécies de uso estrutural, assim como prediz a NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 15) ao citar o método simplificado com relações para obtenção de diferentes propriedades de resistência e rigidez para espécies usuais na ausência de resultados experimentais.

Conforme abordado por Logsdon *et al.* (2010), a NBR 7190 (ABNT, 1997) adota valores e critérios que podem não ser regra única quanto à obtenção dos valores característicos para as distintas solicitações de resistência. No trabalho em questão, os autores buscaram aferir o modelo para estimar a resistência  $f_{c0,k}$ , com objetivo de obter um modelo estatístico mais adequado para tal solicitação. Para tanto, 100 corpos de

prova da espécie angelim-pedra foram experimentalmente ensaiados para obtenção da referida resistência. Os autores concluíram que as equações propostas na referida norma são mais conservadores (a favor da segurança) por fornecerem valores menores para a  $f_{c0,k}$ .

De modo congruente ao estudo anterior, Matos e Molina (2016) estudaram a correlação 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*). Para tanto, os autores comparam a relação obtida experimentalmente com as constantes na NBR 7190 (ABNT, 1997) e na *International Organization for Standardization – ISO 13910* (INTERNATIONAL..., 2005). A conclusão foi que as relações obtidas para ambas as espécies pela norma brasileira foram superiores às da europeia.

Enquanto os estudos anteriores se restringiram à análise de até duas espécies, a proposta de Dias e Lahr (2004) reporta à caracterização de 40 espécies de madeira nativas, visando estimar as propriedades físico-mecânicas em função da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), justificada pela inexistência de relações como esta na NBR 7190 (ABNT, 1997). Ressalta-se que na pesquisa de Dias e Lahr (2004) são avaliadas diferentes relações entre propriedades físicas e mecânicas; contudo, não aborda as resistências características, assim como proposto neste trabalho. Destaca-se ainda que dentre o conjunto de espécies estudadas no referido trabalho 32 espécies também são aqui avaliadas.

Outros autores, por sua vez, também avaliaram algumas das espécies aqui estudadas; entretanto, restringiram seus estudos às propriedades físicas de algumas madeiras como jatobá (*Hymenea courbaril*) (CAVALHEIRO *et al.*, 2016; TIAGO *et al.*, 2018); mandioqueira (*Qualea paraensis*) (ALMEIDA *et al.*, 2017); itaúba (*Mezilaurus itauba*) (DA SILVA *et al.*, 2014); garapa (*Apuleia leiocarpa*) (SORIANO *et al.*, 2015); cedro-amargo (*Cedrela odorata*) (FERNANDES *et al.*, 2018).

## Materiais e métodos

Os valores das resistências características, para as 40 espécies avaliadas neste trabalho, na compressão e na tração paralela às fibras ( $f_{c0,k}$  e  $f_{t0,k}$ ) e da rigidez para os mesmos esforços ( $E_{c0}$  e  $E_{t0}$ ) foram obtidos seguindo as premissas e os métodos de ensaio e de cálculo da NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 47, Anexo B). Os equacionamentos empregados para avaliar tais propriedades são sumarizados na sequência.

Além disso, são detalhados os modelos de regressão empregados como estimador das propriedades de resistência e rigidez, assim como da análise de variância (ANOVA) para avaliação da equivalência das equações  $f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$  e  $E_{c0} = E_{t0}$  ao considerar o conjunto de resultados das 40 espécies de madeira do grupo das folhosas.

Os ensaios foram realizados nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Para cada uma das propriedades de resistência ( $f_{c0}$  e  $f_{t0}$ ) e de rigidez ( $E_{c0}$  e  $E_{t0}$ ), ensaiaram-se 12 corpos de prova para cada uma das 40 espécies (Tabela 1), o que resultou em um total de  $2 \times 12 \times 40 = 960$  determinações experimentais.

## Valores característicos

As propriedades mecânicas de resistência (Equação 1) e de rigidez (Equação 2) tiveram seus valores corrigidos para o teor de umidade de 12%, assim como prediz a NBR 7190 (ABNT, 1997), sendo 12% o teor de umidade de equilíbrio estabelecido por esse documento.

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

$$E_{12} = E_{U\%} \left[ 1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$f_{12}$  é a resistência corrigida para a umidade de 12%;

$f_{U\%}$  é a resistência para o teor de umidade U%;

$E_{12}$  é consiste no módulo de elasticidade corrigido para a umidade de 12%; e

$E_{U\%}$  é o módulo para o teor de umidade U%.

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

ID	Popular	Científico <sup>1</sup>	ID	Popular	Científico <sup>1</sup>
01	Angelim-saia	<a href="#"><i>Vatairea cf. guianensis</i></a>	21	Guajará	<a href="#"><i>Micropholis venulosa</i></a>
02	Angelim-vermelho	<a href="#"><i>Dinizia excelsa</i></a>	22	Guarucuia	<a href="#"><i>Peltophorum dubium</i></a>
03	Angico-branco	<a href="#"><i>Parkia cf. pendula</i></a>	23	Itaúba	<a href="#"><i>Mezilaurus itauba</i></a>
04	Angico-preto	<a href="#"><i>Anadenanthera colubrina</i></a>	24	Jatobá	<a href="#"><i>Hymenaea courbaril</i></a>
05	Branquilha	<a href="#"><i>Sebastiania commersoniana</i></a>	25	Louro-preto	<a href="#"><i>Ocotea neesiana</i></a>
06	Cafearana	<a href="#"><i>Andira antheimia</i></a>	26	Louro-verde	<a href="#"><i>Sextonia cf. rubra</i></a>
07	Cambará-rosa	<a href="#"><i>Erismia cf. fuscum</i></a>	27	Maçaranduba	<a href="#"><i>Manilkara cf. inundata</i></a>
08	Canafístula	<a href="#"><i>Cassia ferruginea</i></a>	28	Mandioqueira	<a href="#"><i>Qualea paraensis</i></a>
09	Castanheira	<a href="#"><i>Bertholletia excelsa</i></a>	29	Oiticica-amarela	<a href="#"><i>Clarisia racemosa</i></a>
10	Castelo	<a href="#"><i>Calycophyllum multiflorum</i></a>	30	Oiuchu	<a href="#"><i>Pradosia sp.</i></a>
11	Catanudo	<a href="#"><i>Calophyllum longifolium</i></a>	31	Parinari	<a href="#"><i>Parinari excelsa</i></a>
12	Cedro-amargo	<a href="#"><i>Cedrela odorata</i></a>	32	Pau-óleo	<a href="#"><i>Copaifera langsdorffii</i></a>
13	Cedro-doce	<a href="#"><i>Cedrela cf. fissilis</i></a>	33	Piolho	<a href="#"><i>Tapirira sp.</i></a>
14	Cedrorana	<a href="#"><i>Cedrelinga cateniformis</i></a>	34	Quarubarana	<a href="#"><i>Erismia uncinatum</i></a>
15	Champanhe	<a href="#"><i>Dipteryx odorata</i></a>	35	Quina-rosa	<a href="#"><i>Geissospermum sericeum</i></a>
16	Copaíba	<a href="#"><i>Copaifera multijuga</i></a>	36	Rabo-de-arraia	<a href="#"><i>Vochysia haenkeana</i></a>
17	Cutiúba	<a href="#"><i>Goupia paraensis</i></a>	37	Sucupira	<a href="#"><i>Diploptropis sp.</i></a>
18	Garapa	<a href="#"><i>Apuleia leiocarpa</i></a>	38	Tachi	<a href="#"><i>Tachigali glauca</i></a>
19	Goiabão	<a href="#"><i>Planchonella pachycarpa</i></a>	39	Tatajuba	<a href="#"><i>Bagassa guianensis</i></a>
20	Guaiçara	<a href="#"><i>Luetzelburgia cf. guaissara</i></a>	40	Umirana	<a href="#"><i>Ruizterania retusa</i></a>

Nota: <sup>1</sup>Flora do Brasil (2019).

Para a determinação dos valores característicos das resistências à compressão e à tração das espécies avaliadas, necessárias para compor a resistência de cálculo para uma determinada solicitação em um eventual projeto estrutural, devem-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 3, sendo  $f_m$  o valor médio da resistência e  $\delta$  o respectivo desvio padrão.

$$f_{w,k} = f_m [1 - 1,645 \delta] \quad \text{Eq. 3}$$

Em adição, a NBR 7190 (ABNT, 1997, 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 as resistências à tração e compressão, tal como expressa a Equação 4.

$$f_{w,k} = f_m [1 - 1,645 \delta] \approx 0,70 f_m \quad \text{Eq. 4}$$

Por outro lado, para uma investigação direta da resistência, a normativa prevê a empregabilidade da Equação 5, que estima o valor de  $f_{w,k}$  na forma:

$$f_{w,k} = \left[ 2 \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{\left(\frac{n}{2}-1\right)}}{\left(\frac{n}{2}-1\right)} - f_{\left(\frac{n}{2}\right)} \right] \cdot 1,10 \quad \text{Eq. 5}$$

Em que  $f_n$  corresponde a  $n$  resultados da resistência à determinada solicitação, devendo ser colocados em ordem crescente ( $f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_n$ ) ao desconsiderar o maior valor se o número de corpos de prova for ímpar. Ressalta-se que tal equação baseia-se no estimador  $z_b$  (Equação 6) para uma amostra de  $2m$  valores  $x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{2m}$ .

$$z_b = \left[ 2 \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{(m-1)}}{(m-1)} - x_m \right] \quad \text{Eq. 6}$$

Contudo, para uma distribuição de extremos centrada no valor característico, a Equação 5 tem um acréscimo de 10%, o que evita, segundo Logsdon *et al.* (2010), que 50% das estimativas sejam realizadas por valores abaixo da resistência característica. A norma brasileira adota como valor de  $f_{w,k}$  o maior dos valores

compreendidos entre a resistência  $f_1$ , a equivalente a 70% do valor de  $f_m$  (Equação 4) obtido pela média das amostras ensaiadas, e o valor obtido pela Equação 5 (ABNT, 1997, p. 18, item 6.4.8).

Destaca-se que o valor característico da resistência  $f_{c0,k}$  é a medida responsável por enquadrar as diferentes espécies de madeira em quatro classes de resistência (CR) referentes ao grupo das folhosas (ABNT, 1997, p. 16, item 6.3.5). Portanto, tais resistências foram calculadas conforme a Equação 5 com representatividade em todas as classes da Tabela 2, o que justifica a aplicabilidade das 40 espécies avaliadas neste trabalho para uso estrutural.

## Relações entre as propriedades

A NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 15, item 6.3.3) possibilita uma caracterização simplificada da madeira com base nos resultados de compressão na direção paralela às fibras. Para tanto, prevê algumas relações, com destaque para a Equação 7, foco deste estudo e que prevê a obtenção das resistências características  $f_{c0,k}$  em função da  $f_{t0,k}$  e vice-versa.

$$f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k} \quad \text{Eq. 7}$$

Deve-se ressaltar, contudo, que tal equação se restringe à caracterização de espécies usuais que, por ventura, tenham ausência de resultados experimentais advindos de uma caracterização completa. Da mesma forma, a NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 16, item 6.3.4) também admite que o valor médio do módulo de elasticidade  $E_{c0}$  é equivalente ao valor do  $E_{t0}$ , expresso na forma:

$$E_{c0} = E_{t0} \quad \text{Eq. 8}$$

Notadamente, a simplicidade exposta pelas equações lineares acima podem ou não serem coerentes com resultados reais advindos de análises experimentais. Nesse contexto, este trabalho busca responder tal indagação e mostrar, estatisticamente, a validade das Equações 7 e 8 a partir da análise do conjunto das 40 espécies (Tabela 1), de modo a considerar um espaço amostral significativo, fornecido pela variabilidade do conjunto de respostas dos ensaios experimentais dessas espécies.

## Análise estatística

A análise de variância (ANOVA), teste F ( $p < 0,05$ ), foi adotada para verificar a precisão das Equações 7 e 8 propostas pela norma brasileira. Da ANOVA, a hipótese nula consistiu na equivalência das médias das propriedades ( $f_{c0,k}$  e  $0,77 \cdot f_{t0,k}$ ;  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$ ), e na não equivalência das médias dos grupos confrontados como hipótese alternativa. Pelas hipóteses admitidas,  $p \geq 0,05$  implica aceitar a hipótese nula (as médias dos grupos confrontados são estatisticamente equivalentes entre si), e de rejeitá-la no caso de  $p < 0,05$  (grupos com médias significativamente diferentes).

A premissa de normalidade na distribuição dos resíduos da ANOVA é avaliada pelo teste de *Anderson-Darling* (WEERAHANDI, 1995). Pela formulação,  $p > 0,05$  implica aceitar a normalidade na distribuição dos resíduos, e de rejeitar essa hipótese em caso contrário.

Tabela 2 - Classes de resistência (CR) das folhosas, conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997)

CR	$f_{c0,k}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$\rho_{bas}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C20	20,00	9500	500,00	650,00
C30	30,00	14500	650,00	800,00
C40	40,00	19500	750,00	950,00
C60	60,00	24500	800,00	1000,00

Nota:  $f_{c0,k}$  e  $E_{c0}$  - resistência característica e rigidez na compressão paralela às fibras;  $\rho_{bas}$  e  $\rho_{ap}$  - densidades básica e aparente.

Avaliadas a precisão das Equações 7 e 8, na sequência, modelos de regressão a dois parâmetros (a e b) avaliados via ANOVA ( $F; p < 0,05$ ) foram utilizados para relacionar as variáveis das Equações 7 e 8, consistindo em modelos alternativos frente aos propostos pela norma brasileira. Os modelos de regressão consistiram no linear (Equação 9), exponencial (Equação 10), logarítmico (Equação 11) e geométrico (Equação 12).

$$Y = a + b \cdot X \quad \text{Eq. 9}$$

$$Y = a \cdot e^{b \cdot X} \quad \text{Eq. 10}$$

$$Y = a + b \cdot \ln(X) \quad \text{Eq. 11}$$

$$Y = a \cdot X^b \quad \text{Eq. 12}$$

Nas Equações de 9 a 12,  $Y$  é a variável dependente e  $X$  é a variável independente, e  $a$  e  $b$  consistem nos parâmetros dos modelos obtidos pelo método dos mínimos quadrados. Além do uso da ANOVA, que permite aceitar ou não a representatividade dos modelos de regressão testados, os valores do coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) permitem eleger, dentre os modelos significativos, o de melhor ajuste.

## Resultados e discussão

Nas Tabelas de 3 a 6 são apresentados os valores médios (em MPa), o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV%) e o intervalo de confiança (IC) da média ( $p < 0,05$ ), para as propriedades mecânicas das 40 espécies de madeira folhosas avaliadas neste trabalho.

É importante destacar que dentre as 40 espécies avaliadas (Tabela 1) muitas também foram objetos de estudos em outras pesquisas. Pode-se então comparar as propriedades mecânicas ( $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$ ) apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 com seus respectivos intervalos de confiança (IC), de modo a validar os valores das propriedades aqui estudadas.

Tabela 3 - Resultados estatísticos obtidos da resistência média na compressão,  $f_{c0}$  (MPa)

ID	$f_{c0}$	DP	CV%	IC	ID	$f_{c0}$	DP	CV%	IC
01	63,11	8,84	14,02	(58,46; 67,76)	21	74,97	6,05	8,07	(70,33; 79,55)
02	77,53	5,85	7,54	(72,88; 82,18)	22	62,38	5,67	9,09	(57,73; 67,03)
03	44,35	3,79	8,54	(39,70; 49,00)	23	69,04	4,24	6,14	(64,39; 73,69)
04	72,52	14,33	19,76	(67,87; 77,17)	24	93,27	7,79	8,35	(88,63; 97,92)
05	48,47	3,80	7,84	(43,83; 53,12)	25	59,99	7,60	12,66	(55,34; 64,64)
06	57,58	12,13	21,06	(52,93; 62,23)	26	52,95	5,67	10,71	(48,30; 57,60)
07	34,48	5,09	14,75	(29,83; 39,13)	27	82,93	6,18	7,45	(78,28; 87,57)
08	51,96	9,81	18,88	(47,31; 56,61)	28	69,17	11,09	16,04	(64,52; 73,82)
09	48,17	6,69	13,89	(43,52; 52,82)	29	70,33	6,86	9,76	(65,68; 74,97)
10	54,80	2,81	5,12	(50,15; 59,45)	30	77,35	8,53	11,03	(72,70; 82,00)
11	50,58	3,34	6,61	(47,84; 53,31)	31	60,56	5,06	8,35	(55,91; 65,21)
12	39,46	4,72	11,97	(34,81; 44,11)	32	53,34	8,06	15,10	(48,69; 57,99)
13	31,48	5,63	17,88	(26,83; 36,12)	33	61,88	13,34	21,55	(57,23; 66,53)
14	41,52	9,46	22,77	(36,87; 46,17)	34	37,83	9,62	25,42	(33,18; 42,48)
15	93,16	5,07	5,45	(88,51; 97,81)	35	59,17	2,62	4,43	(54,52; 63,82)
16	50,21	5,95	11,85	(45,56; 54,86)	36	57,58	11,50	19,97	(52,93; 62,23)
17	78,97	15,52	19,65	(74,32; 83,62)	37	94,53	7,17	7,59	(89,92; 99,15)
18	74,03	8,48	11,45	(69,38; 78,67)	38	87,75	9,73	11,08	(83,10; 92,40)
19	48,46	5,98	12,34	(43,81; 53,11)	39	80,16	14,88	18,56	(75,51; 84,81)
20	71,41	8,89	12,46	(66,76; 76,06)	40	53,27	4,11	7,72	(48,62; 57,92)

Nota:  $f_{c0}$  - resistência média na compressão; DP - desvio padrão; CV% - coeficiente de variação; IC - intervalo de confiança.

Tabela 4 - Resultados estatísticos obtidos da resistência média na tração,  $f_{t0}$  (MPa)

ID	$f_{t0}$	DP	CV%	IC	ID	$f_{t0}$	DP	CV%	IC
01	95,88	30,71	32,03	(81,53; 110,23)	21	119,18	27,34	22,94	(105,41; 132,96)
02	104,90	34,58	32,96	(91,16; 118,64)	22	74,88	12,92	17,26	(61,14; 88,61)
03	67,10	10,40	15,49	(53,37; 80,84)	23	103,72	29,40	28,35	(89,98; 117,45)
04	109,5	34,2	31,20	(95,2; 123,8)	24	165,27	32,56	19,70	(151,53; 179,00)
05	87,88	19,14	21,78	(74,14; 101,61)	25	74,07	13,27	17,92	(60,33; 87,80)
06	80,42	23,85	29,66	(66,69; 94,16)	26	82,80	10,40	12,55	(69,06; 96,54)
07	45,41	13,80	30,39	(31,67; 59,15)	27	138,48	25,14	18,16	(124,74; 152,21)
08	84,92	21,52	25,34	(71,18; 98,65)	28	93,04	30,23	32,49	(79,30; 106,78)
09	88,50	21,74	24,56	(74,76; 102,24)	29	85,83	12,82	14,94	(72,09; 99,56)
10	103,64	15,11	14,58	(89,90; 117,38)	30	121,8	35,6	29,25	(108,1; 135,6)
11	65,37	24,89	38,07	(53,94; 76,81)	31	113,4	35,9	31,64	(99,6; 127,1)
12	58,20	14,50	24,91	(44,46; 71,94)	32	69,29	17,40	25,11	(55,55; 83,03)
13	67,23	15,33	22,80	(53,50; 80,97)	33	73,05	23,93	32,76	(59,31; 86,79)
14	61,85	16,63	26,89	(48,11; 75,59)	34	58,05	13,11	22,58	(44,31; 71,79)
15	121,70	26,25	21,57	(107,35; 136,05)	35	116,64	28,23	24,20	(102,29; 130,98)
16	71,13	16,44	23,11	(57,39; 84,86)	36	70,94	19,51	27,49	(57,20; 84,68)
17	107,5	35,3	32,81	(93,7; 121,2)	37	130,94	22,36	17,07	(117,17; 144,71)
18	107,64	24,22	22,50	(93,90; 121,38)	38	106,75	27,45	25,71	(93,01; 120,49)
19	119,3	35,4	29,70	(105,6; 133,1)	39	92,92	20,90	22,49	(79,19; 106,66)
20	115,13	23,32	20,25	(100,78; 129,48)	40	57,13	17,48	30,60	(43,40; 70,87)

Nota:  $f_{t0}$  - resistência média na tração; DP - desvio padrão; CV% - coeficiente de variação; IC - intervalo de confiança.

Tabela 5 - Resultados estatísticos obtidos da rigidez na compressão,  $E_{c0}$  (MPa)

ID	$E_{c0}$	DP	CV%	IC	ID	$E_{c0}$	DP	CV%	IC
01	19748	3256	16,49	(18228; 21268)	21	14489	1612	10,13	(12967; 16012)
02	16695	2974	17,82	(15175; 18215)	22	16214	2139	13,19	(14694; 17734)
03	14962	2886	19,29	(13442; 16482)	23	17443	1785	10,23	(15923; 18963)
04	15375	5331	34,67	(13855; 16895)	24	24741	3691	14,92	(23221; 26261)
05	13813	1956	14,16	(12293; 15333)	25	15186	1505	9,91	(13666; 16706)
06	14089	3671	26,06	(12569; 15609)	26	15050	3083	20,48	(13530; 16570)
07	12967	2335	18,00	(11447; 14487)	27	21900	2680	12,24	(20380; 23420)
08	14613	2718	18,60	(13093; 16133)	28	19498	2615	13,41	(17978; 21018)
09	13639	2723	19,96	(12119; 15159)	29	14719	1362	9,25	(13199; 16239)
10	11188	1219	10,90	(9668; 12708)	30	17718	4403	24,85	(16130; 19305)
11	13029	2306	17,70	(12076; 13983)	31	22088	2755	12,47	(20568; 23608)
12	9466	1097	11,59	(7946; 10986)	32	13334	2736	20,52	(11814; 14854)
13	8354	1177	14,09	(6834; 9874)	33	13404	3082	23,00	(11884; 14924)
14	10394	1332	12,81	(8874; 11914)	34	8783	2620	29,84	(7263; 10303)
15	22706	2362	10,40	(21118; 24293)	35	23250	3343	14,38	(21730; 24770)
16	12845	2193	17,07	(11325; 14364)	36	13741	2253	16,39	(12221; 15261)
17	18238	3781	20,73	(16718; 19758)	37	20916	2328	11,13	(19396; 22436)
18	17716	2610	14,73	(16196; 19236)	38	19901	3051	15,33	(18381; 21421)
19	18717	2728	14,58	(17197; 20237)	39	18571	3244	17,47	(17051; 20091)
20	15302	2429	15,88	(13782; 16821)	40	9880	1359	13,76	(8360; 11400)

Nota:  $E_{c0}$  - rigidez na compressão; DP - desvio padrão; CV% - coeficiente de variação; IC - intervalo de confiança.

Tabela 6 - Resultados estatísticos obtidos da rigidez na tração,  $E_{t0}$  (MPa)

ID	$E_{t0}$	DP	CV%	IC	ID	$E_{t0}$	DP	CV%	IC
01	20214	2784	13,77	(18327; 22100)	21	14757	1906	12,89	(12959; 16555)
02	17024	2912	17,11	(15218; 18830)	22	14370	2210	15,38	(12564; 16176)
03	14745	2370	16,07	(12939; 16551)	23	17630	1705	9,67	(15824; 19436)
04	16040	2791	17,40	(14234; 17846)	24	22148	1149	5,19	(20341; 23954)
05	14439	2161	14,97	(12633; 16245)	25	14117	1815	12,85	(12311; 15923)
06	13212	2665	20,17	(11405; 15018)	26	13608	2233	16,41	(11801; 15414)
07	12764	1832	14,35	(10958; 14570)	27	20933	2712	12,96	(19127; 22739)
08	14087	2452	17,40	(12281; 15893)	28	18590	1749	9,41	(16784; 20396)
09	12501	1097	8,77	(10695; 14307)	29	14675	1410	9,61	(14494; 14856)
10	12920	1900	14,71	(11114; 14726)	30	18184	4210	23,15	(16297; 20070)
11	15014	1722	11,47	(13991; 16037)	31	19308	2392	12,39	(17502; 21114)
12	9920	1290	13,01	(8114; 11726)	32	13548	1446	10,67	(11742; 15354)
13	9523	1924	20,21	(7717; 11329)	33	13453	2082	15,48	(11647; 15260)
14	11051	1722	15,58	(9245; 12857)	34	9172	1443	15,74	(7366; 10978)
15	21203	1504	7,09	(19397; 23009)	35	21088	3532	16,75	(19202; 22974)
16	13382	1454	10,86	(11576; 15188)	36	13859	2982	21,51	(12052; 15665)
17	16802	3195	19,02	(14996; 18608)	37	21473	2773	12,91	(19667; 23279)
18	16698	2474	14,82	(14891; 18504)	38	19476	4577	23,50	(17670; 21282)
19	18267	3105	17,00	(16461; 20073)	39	17319	2087	12,05	(15513; 19125)
20	16148	2194	13,59	(14261; 18034)	40	10442	1840	17,62	(8635; 12248)

Nota:  $E_{t0}$  - rigidez na tração; DP - desvio padrão; CV% - coeficiente de variação; IC - intervalo de confiança.

Primeiramente, ao se comparar tais propriedades com as espécies presentes na NBR 7190 (ABNT, 1997, p. 90, Anexo E), que traz um total de 43 espécies do grupo das folhosas, das quais 19 espécies são aqui avaliadas, verifica-se que todas estão dentro dos ICs aqui obtidos, sendo os valores médios, em sua maioria, próximos aos encontrados neste trabalho.

Destaca-se ainda o estudo realizado por Dias e Lahr (2004), que avaliaram 40 espécies de madeiras, dentre as quais 32 espécies são aqui avaliadas. Ao se comparar os valores médios para as propriedades mecânicas aqui estudadas, todas estão compreendidas dentro do IC, encontrando-se também em sua maioria próximas aos valores médios aqui obtidos.

É possível ainda comparar alguns valores individuais para algumas das espécies estudadas neste trabalho. Os valores médios aqui encontrados para a  $f_{c0}$  se encontram dentro do IC e podem ser equiparados aos obtidos por Christoforo *et al.* (2017) para a madeira castelo ( $f_{c0} = 55$  MPa), Lahr *et al.* (2016a) para cambará-rosa ( $f_{c0} = 34$  MPa), Aquino *et al.* (2018) para copaíba ( $f_{c0} = 50$  MPa) e Tenorio e Moya (2018) para três idades de cedro-amargo, com o valor médio  $f_{t0} = 41,84$  MPa.

Para a resistência  $f_{t0}$  Tenorio e Moya (2018) também pode ser citado ao apontar um valor médio  $f_{t0} = 40,11$  MPa para o cedro-amargo, sendo este pouco abaixo do IC deste trabalho.

Para os módulos  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$  podem-se citar os valores médios, obtidos por Lahr *et al.* (2016b), para a espécie jatobá extraída de três locais distintos, com os valores médios das três populações  $E_{c0} = 21.881$  MPa e  $E_{t0} = 21.583$  MPa, sendo esses levemente abaixo dos valores médios, mas dentro dos ICs obtidos neste trabalho.

Com os valores médios, portanto, podem-se calcular os valores característicos (Equação 5), para as resistências na compressão e tração das 40 espécies de madeira avaliadas, juntamente com as respectivas classes de resistência (CR) (Tabela 7).

Ao considerar os 40 resultados para  $f_{c0,k}$  constantes na Tabela 7 e os 40 resultados estimados pela Equação 7 ( $f_{c0,k}^{Est} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$ ), sendo os valores estimados associados aos valores característicos da resistência à tração, tais grupos ( $f_{c0,k}^{Est}$  – resistência à compressão estimada pela Eq. 7) e ( $f_{c0,k}$  – resistência à compressão obtida experimentalmente) foram avaliados pela ANOVA, com resultados apresentados na Tabela 8.



Da Tabela 8, constata-se a equivalência da média dos dois conjuntos de valores confrontados, o que revela a boa precisão da Equação 7 proposta pela normativa brasileira, cabendo destacar o atendimento ( $p > 0,05$ ) da premissa de normalidade (Figura 1), o que valida os resultados obtidos da ANOVA.

Da relação  $E_{c0} = E_{t0}$  (Equação 8), com base nos valores médios contantes nas Tabelas 5 e 6, os resultados da ANOVA para a análise da equivalência dos dois grupos de valores ( $E_{c0}$  – rigidez na compressão) e ( $E_{t0}$  – rigidez na tração) são apresentados na Tabela 9 com os resultados do teste de normalidade de *Anderson-Darling* apresentados conforme a Figura 2.

Tabela 7 - Resultados das resistências características (MPa) e classes de resistência (CR)

Espécies	CR	$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$	Espécies	CR	$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$
Angelim-saia	C40	51,06	67,12	Guajará	C60	72,37	83,43
Angelim-vermelho	C60	72,73	72,02	Guaruaia	C40	53,30	63,98
Angico-branco	C40	41,87	53,94	Itaúba	C60	61,70	72,60
Angico-preto	C40	55,55	76,65	Jatobá	C60	79,60	125,29
Branquilha	C40	45,58	67,20	Louro-preto	C40	42,70	61,36
Cafearana	C40	40,50	56,30	Louro-verde	C40	45,07	69,87
Cambará-rosa	C20	27,30	31,79	Maçaranduba	C60	73,70	109,40
Canafístula	C30	36,37	59,44	Mandioqueira	C60	53,70	65,13
Castanheira	C30	38,93	61,95	Oiticica-amarela	C60	58,00	74,23
Castelo	C40	54,54	86,42	Oiuchu	C60	65,00	85,29
Catanudo	C40	50,91	48,79	Parinari	C40	47,30	79,35
Cedro-amargo	C30	33,18	44,04	Pau-óleo	C40	43,70	50,30
Cedro-doce	C20	29,99	48,55	Piolho	C40	39,80	51,14
Cedroarana	C20	29,06	50,07	Quarubarana	C20	27,20	40,64
Champanhe	C60	96,16	87,30	Quina-rosa	C60	55,00	81,65
Copaíba	C40	44,13	52,67	Rabo-de-arraia	C40	43,80	51,39
Cutiúba	C40	55,28	75,22	Sucupira	C60	93,02	98,00
Garapa	C60	65,36	81,62	Tachi	C60	72,90	74,73
Goiabão	C40	43,10	83,54	Tatajuba	C40	45,20	65,05
Guaiçara	C40	58,92	80,59	Umirana	C40	46,60	39,99

Nota:  $f_{c0,k}$  e  $f_{t0,k}$  - resistências característica à compressão e tração paralela às fibras.

Tabela 8 - Resultados da ANOVA para o conjunto de valores característicos da  $f_{c0,k}^{Est}$  e  $f_{c0,k}$

Fonte	GL	$SQ_{aj}$	$QM_{aj}$	Valor F	P-valor
Condição: ( $f_{c0,k}^{Est} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$ )	1	158,70	158,70	0,59	0,443
Erro	78	20807,80	266,80	--	--
Total	79	20966,50	--	--	--

Nota: GL - grau de liberdade;  $SQ_{aj}$  - soma de quadrados;  $QM_{aj}$  - quadrados médios.

Figura 1 - Resultado do teste de *Anderson-Darling* para a resistência característica

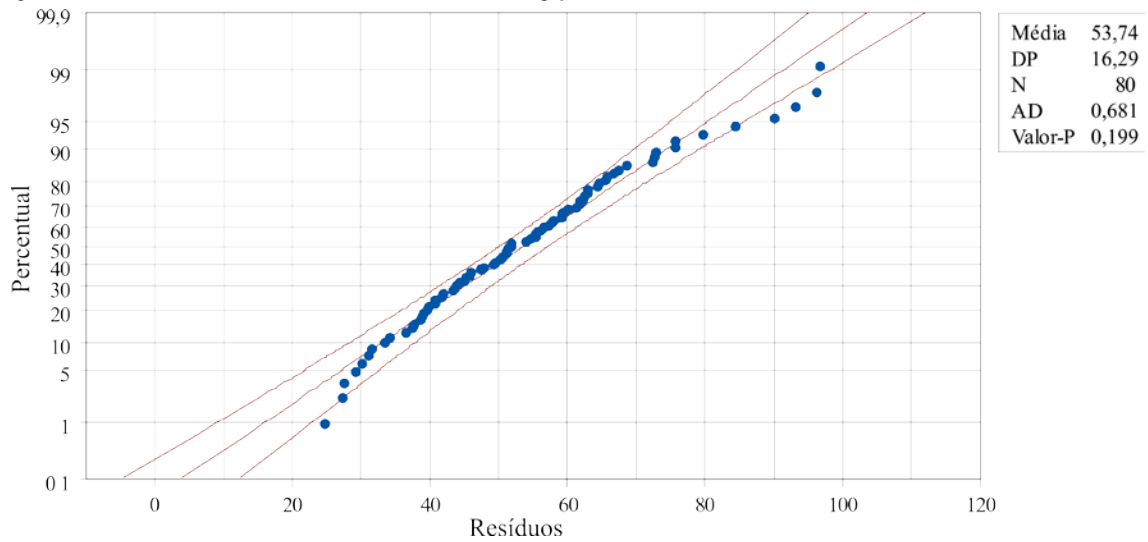
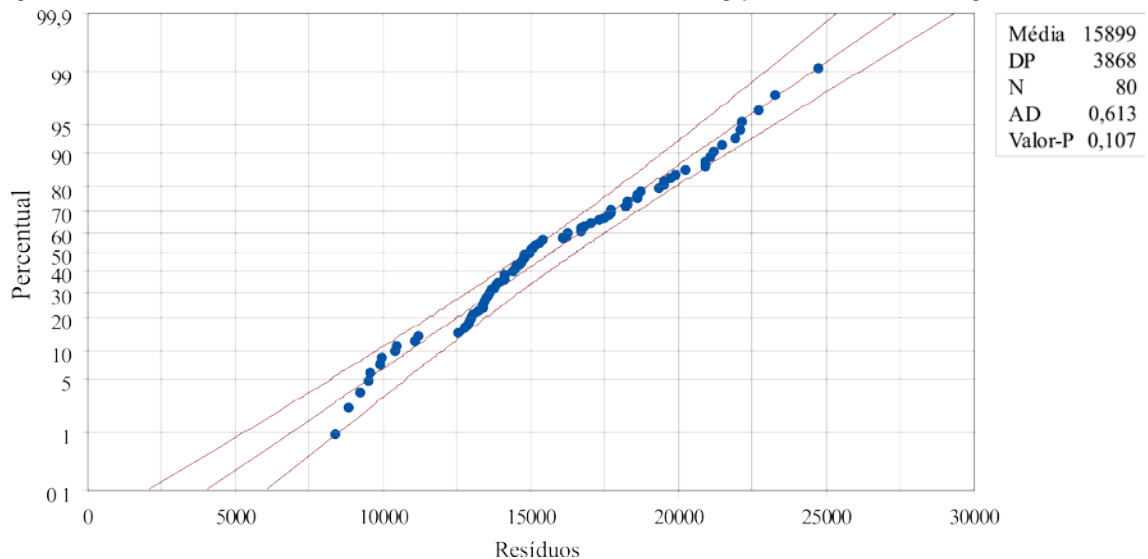


Tabela 9 - Resultados da ANOVA para o grupo de valores médios entre  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$

Fonte	GL	SQ <sub>aj</sub>	QM <sub>aj</sub>	Valor F	P-valor
Condição: ( $E_{c0} = E_{t0}$ )	1	1323294	1323294	0,09	0,768
Erro	78	1180474968	1513429	--	--
Total	79	1181798262	--	--	--

Nota: GL - graus de liberdade; SQ<sub>aj</sub> - soma de quadrados; QM<sub>aj</sub> - quadrados médios.

Figura 2 - Resultado do teste de normalidade de *Anderson-Darling* para os valores de rigidez



Pelo valor-p do teste de normalidade ser superior a significância adotada, constata-se a normalidade dos resíduos da ANOVA entre os valores de rigidez (Figura 2). Os resultados da Tabela 9 revelam a boa precisão da Equação  $E_{c0} = E_{t0}$  proposta pela norma brasileira, assim como também ocorreu com a relação entre os valores característicos de resistência.

A partir do resultado médio da resistência característica à compressão para as 40 espécies de madeira, pode-se obter valores de  $f_{c0,k}^{Est} \approx 52$  MPa, enquanto  $f_{c0,k} \approx 55$  MPa (Figura 3a). Para os módulos de elasticidade,

como esperado, as médias para o  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$  são estatisticamente equivalentes com valores  $\approx 16.000$  MPa (Figura 3b).

Embora tenha sido constatada a validade das Equações 7 e 8, na sequência são apresentados os modelos de regressão, com base na análise de variância (F;  $p < 0,05$ ), a fim de propor relações alternativas às equações existentes na normativa brasileira. Nas Tabelas 10 e 11 constam os resultados dos modelos obtidos para a resistência e rigidez, respectivamente.

Das Tabelas 10 e 11, todos os modelos foram considerados significativos (F,  $p < 0,05$ ) pela ANOVA. As Figuras de 4 a 7 apresentam, respectivamente, os ajustes linear, exponencial, logarítmico e geométrico, visando estimar as resistências  $f_{c0,k}$  em função da  $f_{t0,k}$  e os módulos  $E_{c0}$  em função do  $E_{t0}$ .

O modelo de melhor ajuste, eleito pelo maior coeficiente de determinação ( $R_{aj}^2 = 65,11\%$  e  $R_{aj}^2 = 94,68\%$ ), foi o geométrico para ambas as relações avaliadas. Em adição, nota-se que todos os modelos evidenciam que o aumento nos valores característicos da  $f_{c0,k}$  ou do módulo  $E_{c0}$  implicam aumentos nos valores da  $f_{t0,k}$  e do  $E_{t0}$ , como era de esperar. Em contrapartida, valores nulos para  $f_{t0,k}$  e  $E_{t0}$  só são nulos para a  $f_{c0,k}$  e  $E_{c0}$  para o modelo geométrico, o que reforça esse modelo como sendo o de melhor representatividade na estimativa dessas propriedades mecânicas.

Figura 3 - Valores médios e intervalos de confiança ( $p < 0,05$ ) para os grupos de valores da resistência característica à compressão  $f_{c0,k}^{Est}$  e  $f_{c0,k}$  (a) e dos módulos de elasticidade  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$  (b)

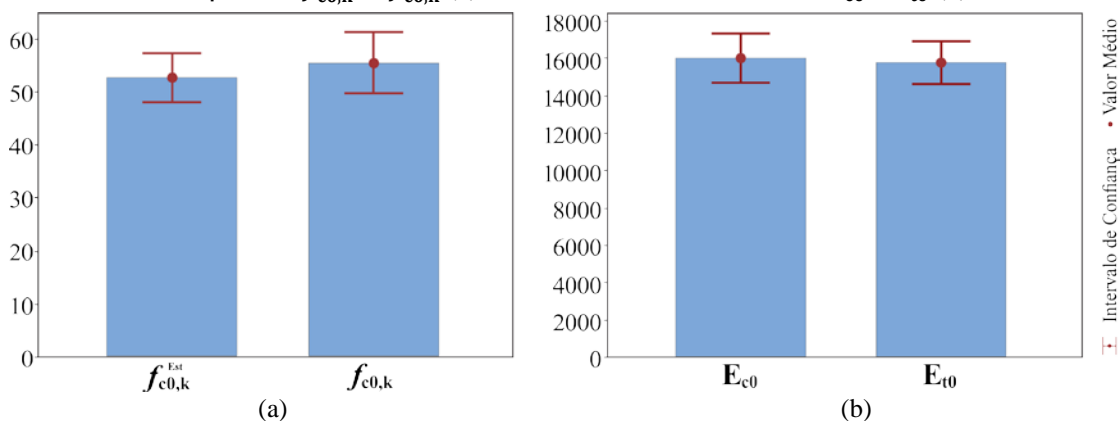


Tabela 10 - Resultados dos modelos de regressão para estimativa da resistência característica à compressão ( $f_{c0,k}$ ) em função da resistência característica à tração ( $f_{t0,k}$ )

Modelos	Equação	Parâmetros		P <sub>valor</sub>	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>
		a	b		
Linear	$f_{c0,k} = a + b \cdot (f_{t0,k})$	3,85	0,75	0,000	62,42%
Exponencial	$f_{c0,k} = a \cdot e^{b \cdot (f_{t0,k})}$	20,34	0,01	0,000	62,74%
Logarítmico	$f_{c0,k} = a + b \cdot \ln(f_{t0,k})$	-153,86	49,99	0,000	61,43%
Geométrico	$f_{c0,k} = a \cdot f_{t0,k}^b$	1,00	0,95	0,000	65,11%

Nota: a e b - parâmetros numéricos dos modelos de regressão; R<sub>aj</sub><sup>2</sup> - coeficiente de determinação.

Tabela 11 - Resultados dos modelos de regressão para a estimativa da rigidez na compressão ( $E_{c0}$ ) em função da rigidez na tração ( $E_{t0}$ )

Modelos	Equação	Parâmetros		P <sub>valor</sub>	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup>
		a	b		
Linear	$E_{c0} = a + b \cdot (E_{t0})$	-1702	1,12	0,000	94,19%
Exponencial	$E_{c0} = a \cdot e^{b \cdot (E_{t0})}$	5089	0,00007	0,000	92,47%
Logarítmico	$E_{c0} = a + b \cdot \ln(E_{t0})$	-147572	16972	0,000	92,75%
Geométrico	$E_{c0} = a \cdot E_{t0}^b$	0,31	1,12	0,000	94,68%

Nota: a e b - parâmetros numéricos dos modelos de regressão; R<sub>aj</sub><sup>2</sup> - coeficiente de determinação.

Figura 4 - Regressão linear para estimativa da resistência à compressão ( $f_{c0,k}$ ) em função da resistência à tração ( $f_{t0,k}$ ) e da rigidez na compressão ( $E_{c0}$ ) em função da rigidez na tração ( $E_{t0}$ )

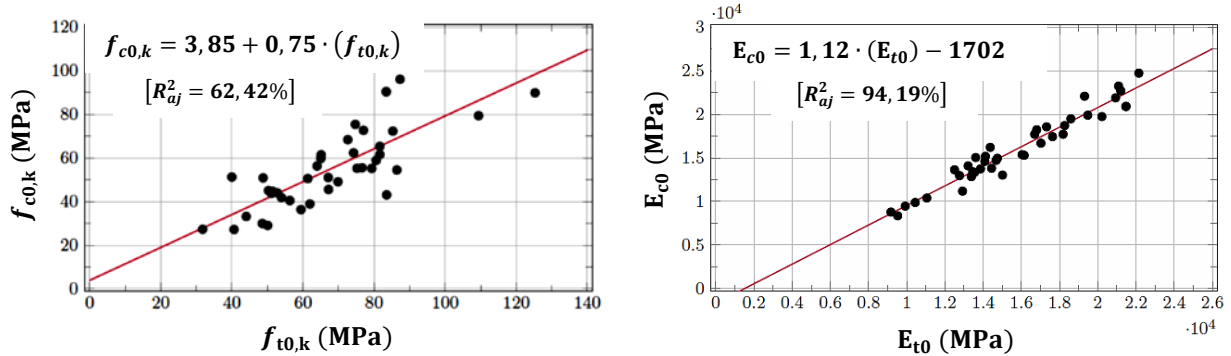


Figura 5 - Regressão exponencial para estimativa da resistência à compressão ( $f_{c0,k}$ ) em função da resistência à tração ( $f_{t0,k}$ ) e da rigidez na compressão ( $E_{c0}$ ) em função da rigidez na tração ( $E_{t0}$ )

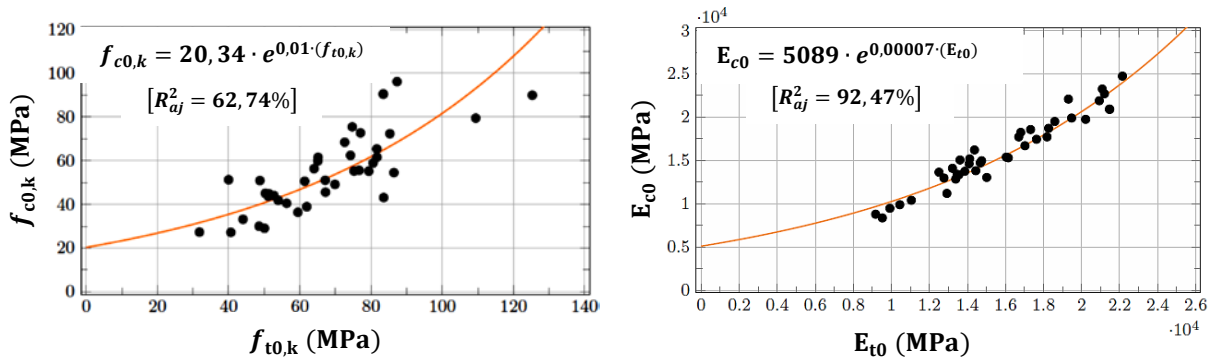


Figura 6 - Regressão logarítmica para estimativa da resistência à compressão ( $f_{c0,k}$ ) em função da resistência à tração ( $f_{t0,k}$ ) e da rigidez na compressão ( $E_{c0}$ ) em função da rigidez na tração ( $E_{t0}$ )

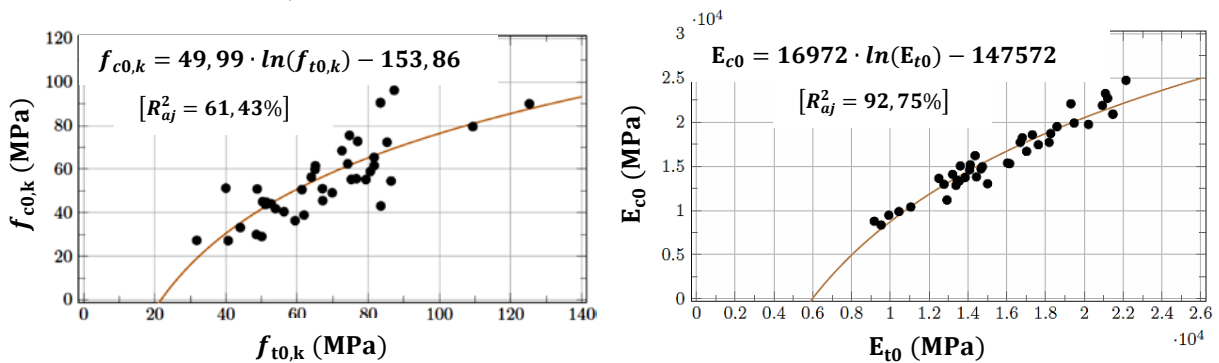
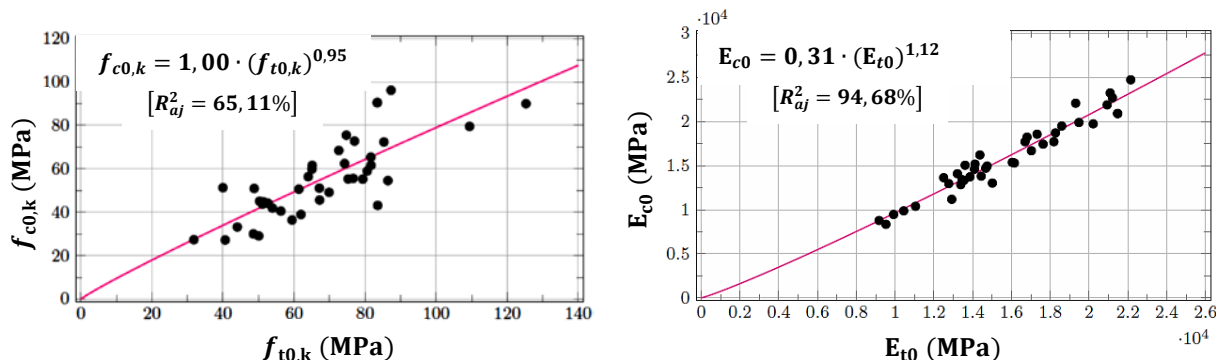


Figura 7 - Regressão geométrica para estimativa da resistência à compressão ( $f_{c0,k}$ ) em função da resistência à tração ( $f_{t0,k}$ ) e da rigidez na compressão ( $E_{c0}$ ) em função da rigidez na tração ( $E_{t0}$ )



## Considerações finais

Ao considerar as 40 espécies de madeira nativas usadas no presente estudo, as análises estatísticas permitem concluir que as relações  $f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k}$  e  $E_{c0} = E_{t0}$  propostas pela NBR 7190 (ABNT, 1997) fornecem boa precisão e podem ser efetivamente adotadas na estimativa de tais propriedades, cabendo destacar que as expressões da referida norma levam em consideração, conjunta, sete espécies do grupo das coníferas e 43 do grupo das folhosas, fato esse preponderante e que justifica a realização deste trabalho.

Com relação aos modelos avaliados, a regressão geométrica apresentou o melhor ajuste na estimativa da resistência ( $R^2_{aj} = 65,11\%$ ) e rigidez ( $R^2_{aj} = 94,68\%$ ), conforme Figura 7 e Tabelas 10 e 11. Tais coeficientes reforçam a aplicabilidade das funções propostas ao se apresentar como uma alternativa viável ao pré-dimensionamento de estruturas de madeiras folhosas, proporcionada pela ampla variabilidade de espécies avaliadas neste trabalho e pertencentes a todas as classes de resistência, segundo a normativa brasileira (ABNT, 1997, p. 16).

## Referências

- ALMEIDA, T. H. *et al.* Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 6579-6590, 2017.
- AQUINO, V. B. M. *et al.* Physical and mechanical characterization of *Copaifera* sp. wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 3, p. 55-58, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- CAVALHEIRO, R. S. *et al.* Density as estimator of shrinkage for some Brazilian wood species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, p. 107-112, 2016.
- CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Full characterization of *Calycophyllum multiflorum* wood specie. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 37, n. 4, p. 637-643, 2017.
- SILVA, F. *et al.* Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 1, p. 69-74, 2014.
- DADZIE, P. K.; AMOAH, M. Density, some anatomical properties and natural durability of stem and branch wood of two tropical hardwood species for ground applications. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 759-773, 2015.
- DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 102-113, 2004.
- FERNANDES, N. C. L. *et al.* Características físicas e anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1-10, 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13910**: structural timber: characteristic values of strength-graded timber: sampling, full-size testing and evaluation. Genebra, 2005.

JARDIM BOTÂNICO DO RIO DE JANEIRO. **Flora do Brasil 2020 em construção**. Disponível em: [floradobrasil.jbrj.gov.br](http://floradobrasil.jbrj.gov.br). Acesso em: 15 jul. 2019.

LAHR, F. A. R. *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, p. 147-154, 2016b.

LAHR, F. A. R. *et al.* Full characterization of *Erismia uncinatum* warm. wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 5, p. 147-150, 2016a.

LOGSDON, N. B. *et al.* Avaliação dos estimadores da resistência característica à compressão paralela às fibras. **Scientia Forestalis**, v. 38, p. 579-587, 2010.

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, p. 1069-1079, 2016.

RUELLE, J. *et al.* Variations in physical and mechanical properties between tension and opposite wood from three tropical rainforest species. **Wood Science and Technology**, v. 45, n. 2, p. 339-357, 2011.

SORIANO, J. *et al.* Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, p. 753-758, 2015.

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**, p. 1-16, 2018.

TIAGO, P. V. *et al.* Diversidade genética e estrutura populacional de Jatobá: uma espécie com potencial econômico para a Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 515-524, 2018.

WEERAHANDI, S. ANOVA under unequal error variances. **International Biometric Society**, v. 51, p. 589-599, 1995.

## Agradecimentos

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

### Anderson Renato Vobornik Wolenski

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Federal de Santa Catarina | Rua Aloísio Stoffel, 1271 | São Carlos - SC - Brasil | CEP 89885-000 | Tel: (49) 3325-4149 | [anderson.wolenski@ifsc.edu.br](mailto:anderson.wolenski@ifsc.edu.br)

### Fabício Moura Dias

Departamento de Engenharia Civil | Centro Universitário do Leste de Minas Gerais | Av. Tancredo Neves, 3500 | Coronel Fabriciano - MG - Brasil | CEP 35170-056 | Tel: (31) 3846-5500 | E-mail: [fmdias2@hotmail.com](mailto:fmdias2@hotmail.com)

### Rodrigo Guerra Peixoto

Departamento de Engenharia de Estruturas | Universidade Federal de Minas Gerais | Av. Antônio Carlos, 6627 | Belo Horizonte - MG - Brasil | CEP 31270-901 | E-mail: [rodrigo.peixoto@dees.ufmg.br](mailto:rodrigo.peixoto@dees.ufmg.br)

### André Luís Christoforo

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rodovia Washington Luís, Km 235 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | E-mail: [christoforoal@yahoo.com.br](mailto:christoforoal@yahoo.com.br)

### Francisco Antonio Rocco Lahr

Departamento de Engenharia de Estruturas | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-carlense, 400 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel: (16) 3373-9455 | E-mail: [frocco@sc.usp.br](mailto:frocco@sc.usp.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

Fax: +55 (51) 3308-4054

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

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.