

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DE MADEIRAS
DO GRUPO DAS FOLHOSAS**

João Paulo Boff Almeida

São Carlos
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DE MADEIRAS
DO GRUPO DAS FOLHOSAS**

João Paulo Boff Almeida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato João Paulo Boff Almeida, realizada em 13/12/2019:

Andre Luis Christoforo

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Andre Luis Christoforo

PI Profa. Dra. Cristiane Inacio de Campos
UFSCar

Andre Luis Christoforo

PI Prof. Dr. Julio Cesar Molina
UNESP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Cristiane Inacio de Campos, Julio Cesar Molina e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Andre Luis Christoforo

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida, por sempre se fazer presente, me aconselhando, orientando e me conduzindo a Ele. Obrigado, Senhor, por toda graça recebida nesse período e por providenciar tudo. Bendito e louvado seja o teu Santo nome.

A minha mãe Praxedes Boff e minha irmã Carmelice Boff de Almeida, pelo exemplo, apoio e incentivo na busca do conhecimento. Eterna gratidão por possibilitarem essa conquista.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Christoforo por toda atenção, carinho e esforços a mim prestados. Grato a Deus pela amizade que construímos.

A Prof. Dr. Cristiane Inácio de Campos e ao Prof. Dr. Julio Cesar Molina, pela disponibilidade em participarem das bancas de avaliação deste trabalho. Agradeço-os imensamente por toda contribuição. Que Deus os abençoe grandemente.

A todos do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM - USP), em especial ao Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr pela atenção, carinho e por todo conhecimento a mim transmitido. Grato por todo auxílio no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade que construímos.

A todos os amigos que conheci em São Carlos, em especial aos amigos de caminhada, da Paróquia Nossa Senhora do Carmo e do Ministério Universidades Renovadas (MUR). Grato pelas partilhas e orações. Louvado seja Deus pela vida de cada um.

Aos eternos amigos do Mato Grosso, pelo carinho, apoio, e por torcerem de longe para a realização dessa conquista.

Por fim, agradeço ao PPGECiv pela oportunidade em cursar a pós-graduação.

RESUMO

ALMEIDA, J. P. B. **Relações entre propriedades de rigidez de madeiras do grupo das folhosas**. 2019. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2019.

Para o correto dimensionamento de estruturas de madeira faz-se necessário o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do material. Dentre tais propriedades, o módulo de elasticidade é de suma importância, haja vista o emprego nas verificações de segurança ao Estado Limite Último (ELU - estabilidade) e ao Estado Limite de Serviço (ELS - deformações excessivas). No Brasil, a norma ABNT NBR 7190 (1997) estabelece os métodos de ensaio para obtenção dessas propriedades; entretanto, as premissas exigem procedimentos realizados em laboratórios especializados e de alto custo. Na impossibilidade da determinação dos resultados experimentais, o próprio documento normativo estabelece relações entre propriedades mecânicas, visando simplificar a caracterização do material. Porém, a relação prescrita entre o módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) e na tração paralela às fibras (E_{t0}) [$E_{c0} = E_{t0}$] não faz distinção entre folhosas e coníferas. Além disso, a atual relação entre o E_{c0} e o módulo de elasticidade convencional na flexão (E_M) [$E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$] foi determinada com base no antigo documento normativo MB-26:1940 (NBR 6230), que preconizava dimensões diferentes dos corpos de prova na flexão, condicionando a outro modelo de cálculo (teoria de vigas de Timoshenko) e não ao utilizado pela norma brasileira (teoria de vigas de Euler Bernoulli). Neste contexto, este trabalho objetivou investigar, por meio da Análise de Variância (ANOVA), a eficácia das relações entre propriedades de rigidez prescritas pela norma brasileira, para madeiras folhosas, assim como verificar, por meio de modelos de regressão, a possibilidade de estimar E_{c0} , E_{t0} e E_M em função da densidade aparente, a 12% de umidade ($\rho_{ap,12\%}$). Para tanto, adotou-se corpos de prova isentos de defeitos provenientes de dez espécies de madeiras folhosas. Os resultados da ANOVA acusaram que E_{c0} e E_{t0} são estatisticamente equivalentes, o mesmo não ocorreu entre E_M e $0,90 \cdot E_{c0}$, implicando na determinação do coeficiente ótimo de 0,98 pelo método dos mínimos quadrados. Tal coeficiente mostrou ser 8,89% superior ao apresentado pela norma brasileira. Ademais, todos os modelos de regressão testados foram significativos e com bons ajustes. O modelo de regressão linear resultou no melhor ajuste na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$ e do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$ com coeficiente de determinação (R^2) igual a 80,71% e 84,95%, respectivamente. Enquanto, o modelo logarítmico mostrou-se o mais preciso na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$ com R^2 igual a 86,62%. Esses resultados, evidenciaram a possibilidade de estimar as propriedades de rigidez em função da densidade aparente.

Palavras-chave: Relações entre propriedades; Madeiras tropicais; Rigidez; Teoria de vigas.

ABSTRACT

ALMEIDA, J. P. B. **Relations between stiffness properties of hardwoods group.** 2019. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2019.

For a correct timber structures design, it is necessary to know the physical and mechanical properties of the material. Among these properties, the modulus of elasticity is highly important, in view of its use in the Ultimate Limit State (ULS - stability) and the Serviceability Limit State (SLS – excessive deformation) safety checks. In Brazil, the Brazilian Standard ABNT NBR 7190 establishes the test methods to obtain these properties, however, the premises require procedures performed in specialized and high-cost laboratories. In the impossibility of determining experimental results, the normative document itself establishes relation between mechanical properties, aiming to simplify the characterization of the material. But, the relation prescribed between the modulus of elasticity in compression (E_{c0}) and parallel tension to the grain (E_{t0}) [$E_{c0} = E_{t0}$] makes no distinction between hardwoods and softwoods. In addition, the current relation between the E_{c0} and the modulus of elasticity in bending (E_M) [$E_M = 0.90 \cdot E_{c0}$] was based on the ancient normative reference MB-26: 1940 (Brazilian Standard NBR 6230) which determined different specimens dimensions on bending test, conditioning to another calculation model (Timoshenko's beams theory) and not to the one used by the Brazilian standard (Euler Bernoulli's beams theory). In this context, this research aimed to investigate, through Analysis of Variance (ANOVA), the effectiveness of the relations among stiffness properties prescribed by the Brazilian Standard for hardwoods, as well as verifying, through regression models, the possibility of estimating E_{c0} , E_{t0} and E_M by of density at 12% moisture content ($\rho_{ap,12\%}$). To this end, defect-free specimens from ten hardwoods species were adopted. The ANOVA results showed that E_{c0} and E_{t0} were statistically equivalent, and relation between E_M and $0.90 \cdot E_{c0}$ was not statistically equivalent, implying the determination of the ideal coefficient equal to 0.98 by the least squares method. This coefficient was 8.89% higher than the Brazilian standard. In addition, all regression models tested were significant and with well adjust. The linear regression model resulted in the best fit in the estimate of $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$ and $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$ with coefficient of determination (R^2) equal to 80.71% and 84.95%, respectively. While the logarithmic model was the most accurate in estimating the $E_M(\rho_{ap,12\%})$ with R^2 equal to 86.62%. These results showed the possibility of estimating the stiffness properties by the density at 12% moisture content.

Key-words: Relations between properties; Hardwood; Stiffness; Beams theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquina universal AMSLER utilizada nos ensaios.	39
Figura 2: Esquema ilustrativo de extração das amostras e dimensões dos corpos de prova para a determinação das propriedades físico-mecânicas.	41
Figura 3: Diagrama de Kollmann para correção da densidade aparente.	42
Figura 4: Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.	42
Figura 5: Diagrama tensão <i>versus</i> deformação específica para determinação de E_{c0}	43
Figura 6: Diagrama de carregamento para determinação de E_{c0} e E_{t0}	44
Figura 7: Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.	44
Figura 8: Fixação dos relógios comparadores nos corpos de prova de compressão paralela às fibras.	45
Figura 9: Ensaio de tração paralela às fibras (a) Corpo de prova após o ensaio (b).	46
Figura 10: Ensaio de flexão estática a três pontos.	46
Figura 11: Diagrama carga <i>versus</i> deslocamento na flexão.	47
Figura 12: Diagrama de carregamento para determinação de E_M	48
Figura 13: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$	60
Figura 14: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$	61
Figura 15: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$	61
Figura 16: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrico na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$	62
Figura 17: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$	63
Figura 18: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$	63
Figura 19: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$	64
Figura 20: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrico na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$	64
Figura 21: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$	65
Figura 22: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$	66
Figura 23: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$	66
Figura 24: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrico na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físico-mecânicas do Angelim araroba pela ABNT NBR 7190 (1997).	16
Tabela 2: Propriedades mecânicas da Angelim araroba por Grobério e Lahr (2002).	16
Tabela 3: Propriedades físicas do Cambará por Lahr <i>et al.</i> (2016).	17
Tabela 4: Propriedades mecânicas do Cambará por Lahr <i>et al.</i> (2016).	18
Tabela 5: Propriedades de rigidez do Cambará por Morales <i>et al.</i> (2018).	18
Tabela 6: Propriedades físico-mecânicas do Canafístula pela ABNT NBR 7190 (1997).	19
Tabela 7: Propriedades físicas do Cedro pelo IPT (2019b).	20
Tabela 8: Propriedades mecânicas do Cedro pelo IPT (2019b).	20
Tabela 9: Propriedades físico-mecânicas do Cedro pela ABNT NBR 7190 (1997).	21
Tabela 10: Propriedades físicas da Cedroarana pelo IPT (2013).	22
Tabela 11: Propriedades mecânicas da Cedroarana pelo IPT (2013).	22
Tabela 12: Propriedades físico-mecânicas da Cedroarana por Gonzalez e Gonçalves (2001).	22
Tabela 13: Propriedades mecânicas da Cedroarana por Grobério e Lahr (2002).	23
Tabela 14: Propriedades físicas da Copaíba pelo IPT (2019c).	23
Tabela 15: Propriedades mecânicas da Copaíba pelo IPT (2019c).	24
Tabela 16: Propriedades físicas da Copaíba por Aquino <i>et al.</i> (2018a).	24
Tabela 17: Propriedades mecânicas da Copaíba por Aquino <i>et al.</i> (2018a).	24
Tabela 18: Propriedades mecânicas da Guaiçara por Grobério e Lahr (2002).	25
Tabela 19: Propriedades físico-mecânicas da Guaiçara pela ABNT NBR 7190 (1997).	26
Tabela 20: Propriedades físico-mecânicas da Guaiçara por Lahr <i>et al.</i> (2010).	26
Tabela 21: Propriedades físico-mecânicas do Louro verde pela ABNT NBR 7190 (1997). ...	27
Tabela 22: Propriedades mecânicas do Louro verde por Araújo (2007).	27
Tabela 23: Propriedades físico-mecânicas da Maçaranduba pela ABNT NBR 7190 (1997). .	28
Tabela 24: Propriedades mecânicas do Maçaranduba por Araújo (2007).	29
Tabela 25: Propriedades físico-mecânicas da Maçaranduba por Jesus <i>et al.</i> (2015).	29
Tabela 26: Propriedades físicas da Oiticica amarela pelo IPT (2019e).	30
Tabela 27: Propriedades mecânicas da Oiticica amarela pelo IPT (2019e).	30
Tabela 28: Propriedades físico-mecânicas da Oiticica amarela pela ABNT NBR 7190 (1997).	30
Tabela 29: Propriedades mecânicas da Oiticica amarela por Araújo (2007).	31
Tabela 30: Propriedades físico-mecânicas de Oiticica amarela por Jesus <i>et al.</i> (2015).	31
Tabela 31: Nome popular e científico das madeiras adotadas neste estudo.	40
Tabela 32: Categorização das madeiras nas classes de resistência do grupo das folhosas.	51
Tabela 33: Resultado das densidades das espécies estudadas.	53
Tabela 34: Resultados das rigidezes das espécies de madeira estudadas.	55
Tabela 35: Resultados da ANOVA (5% de significância) para a relação $E_{c0} = E_{t0}$	58
Tabela 36: Resultados da ANOVA (5% de significância) para a relação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$	58
Tabela 37: Resultado do coeficiente ótimo (λ) da relação entre E_M e E_{c0} para cada espécie e para o conjunto de todas as espécies estudadas.	59
Tabela 38: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_{c0} em função da $\rho_{ap,12\%}$	60
Tabela 39: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_{t0} em função da $\rho_{ap,12\%}$	62
Tabela 40: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_M em função da $\rho_{ap,12\%}$	65

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES DE MADEIRAS ESTUDADAS	15
2.1.1 Madeira de Angelim araroba	15
2.1.2 Madeira de Cambará.....	17
2.1.3 Madeira de Canafístula.....	18
2.1.4 Madeira de Cedro	20
2.1.5 Madeira de Cedroarana.....	21
2.1.6 Madeira de Copaíba.....	23
2.1.7 Madeira de Guaíçara.....	25
2.1.8 Madeira de Louro verde	26
2.1.9 Madeira de Maçaranduba	28
2.1.10 Madeira de Oiticica amarela.....	29
2.2 RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DA MADEIRA	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS.....	40
3.1.1 Densidade aparente a 12% de umidade	41
3.1.2 Resistência e rigidez à compressão paralela às fibras	42
3.1.3 Rigidez à tração paralela às fibras	45
3.1.4 Rigidez à flexão	46
3.1.5 Valores à condição padrão de umidade	48
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	51
4.2 DENSIDADE APARENTE a 12% de umidade.....	53
4.3 PROPRIEDADES DE RIGIDEZ.....	54
4.4 RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DE RIGIDEZ.....	57
4.5 ESTIMATIVAS DAS RIGIDEZES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE	60
5. CONCLUSÕES.....	69
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A madeira, material natural, renovável e de fácil obtenção, é a matéria-prima mais antiga adotada em construções. Devido à ampla disponibilidade na natureza e relativa facilidade de manuseio, tem sido usada pela humanidade ao longo da história, atendendo atividades habituais, como superar obstáculos, transporte, moradias, entre outros (CHRISTOFORO *et al.*, 2013a; ARAUJO *et al.*, 2016; WIERUSZEWSKI e MAZELA, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2018a).

Juntamente com o aço e o concreto armado, a madeira é atualmente um dos três materiais estruturais utilizados na construção de grandes estruturas. No que diz respeito à resistência à compressão, a madeira apresenta valor semelhante ao concreto e ambos possuem resistência inferior ao aço. No entanto, a madeira possui baixa densidade quando comparada aos outros materiais estruturais, resultando em uma excelente relação entre resistência mecânica e densidade (RAMAGE *et al.*, 2017).

Para Calil Júnior e Dias (1997), essa relação é aproximadamente três vezes maior que para o aço e dez vezes maior que para o concreto, o que evidencia a madeira como um material estrutural eficiente, sendo de uso inteligente em estruturas nas quais uma alta proporção das cargas a ser resistida é seu peso próprio, como em estruturas de cobertura, algumas pontes e edifícios altos (RAMAGE *et al.*, 2017).

Para a maioria dos países da América do Norte e Europa, casas de madeira são a solução habitacional mais comum, econômica e prática (ARAUJO *et al.*, 2016). No Reino Unido, aproximadamente 29% das novas residências são em madeira, na Escócia esse percentual é na ordem de 83%, na Inglaterra 23%, e na Irlanda do Norte 17% (ARAUJO *et al.*, 2018). Na Áustria, construções em *wood frame* representam cerca de 40% do total de edificações unifamiliares (HURMEKOSKI *et al.*, 2015), no Japão 45%, na Nova Zelândia tem-se 85%, chegando aos impressionantes 90% na América do Norte (MAHAPATRA *et al.*, 2012).

Com 8715 espécies, do total de 60.065 de árvores registradas em todo o mundo, o Brasil é o país com maior diversidade de espécies do planeta (BEECH *et al.*, 2017). Apesar de ter uma área de cobertura florestal nativa de 60,7% do território nacional, e do evidente potencial florestal, o aproveitamento dos recursos naturais madeireiros é insignificante, em função do potencial que representa (VIDAL *et al.*, 2015). Têm-se, como exemplo, as construções em madeira que ainda sofrem alguns preconceitos devido a questões culturais

remanescentes desde a colonização, à escassez de mão de obra qualificada e ao desconhecimento das espécies e suas propriedades. Tais fatores induzem ao uso inadequado da madeira, implicando construções com baixa vida útil que sucumbem as vantagens desse material (PEDRESCHI *et al.*, 2005).

Para a utilização racional da madeira nas mais diversas finalidades, torna-se necessário o conhecimento de suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas (ALMEIDA *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2018b). Dentre as propriedades requisitadas para o dimensionamento de uma estrutura, destaca-se o módulo de elasticidade. Em um projeto de vigas, assim como outros elementos estruturais, o conhecimento dos módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) é de suma importância (CHRISTOFORO *et al.*, 2013b).

No Brasil, o documento normativo ABNT NBR 7190 (1997), intitulado “Projeto de Estruturas de Madeira”, estabelece as premissas e métodos de cálculo para dimensionamento das estruturas em madeira, assim como os métodos de ensaios para caracterização das propriedades de resistência e rigidez da madeira.

Para a caracterização completa das espécies de madeira, a norma exige procedimentos que demandam laboratórios especializados com equipamentos de alto custo (DIAS e LAHR, 2004). Na impossibilidade da obtenção dessas propriedades via experimentação, a norma brasileira propõe algumas relações entre propriedades mecânicas visando a caracterização simplificada de espécies usuais de madeira.

Dentre tais relações, a ABNT NBR 7190 (1997) admite, no item 6.3.4, para madeiras folhosas e coníferas, que o módulo médio de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é igual ao módulo médio de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0}) [$E_{c0} = E_{t0}$]. Para as folhosas, a normativa brasileira permite a obtenção do E_{c0} por meio do módulo médio de elasticidade convencional na flexão (E_M), fazendo-se uso da relação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi investigar as relações entre as propriedades de rigidez de madeiras do grupo das folhosas. Especificamente, teve-se:

- Verificar se há equivalência entre E_{c0} e E_{t0} e entre E_M e $0,90 \cdot E_{c0}$, determinando, em caso de não equivalência, o coeficiente ótimo que melhor descreve as relações entre as propriedades estudadas;
- Avaliar quantitativamente as relações obtidas com as relações simplificadas de elasticidade, prescritas no item 6.3.4 da ABNT NBR 7190 (1997);

- Verificar a possibilidade da estimativa do E_{c0} , E_{t0} e E_M por meio da densidade aparente, a 12% de umidade;
- Fundamentar revisões da ABNT NBR 7190 (1997), no que diz respeito às relações entre propriedades de rigidez das madeiras folhosas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para o dimensionamento racional de elementos estruturais em madeira, faz-se necessário o conhecimento de algumas propriedades físico-mecânicas do material, tal como o módulo de elasticidade, que é de suma importância devido ao emprego nas verificações de estabilidade de peças comprimidas no Estado Limite Último (ELU) e também no cálculo das deformações excessivas, em atendimento à segurança ao Estado Limite de Serviço (ELS).

De acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), adota-se, para o dimensionamento estrutural, os valores de E_{c0} , os quais são multiplicados pelos coeficientes de modificação (K_{mod}) para a determinação da rigidez de cálculo ($E_{c0,ef}$).

Diante da possibilidade de relações entre propriedades, a ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que o E_{c0} assume o mesmo valor do E_{t0} [$E_{c0} = E_{t0}$], sem fazer distinção entre madeiras do grupo das folhosas e coníferas, apesar de apresentarem características anatômicas e fisiológicas distintas e, conseqüentemente, comportamentos mecânicos diferentes.

Para as folhosas, comumente empregadas em projetos estruturais devido à alta resistência mecânica, o mesmo documento normativo permite, na impossibilidade do ensaio de compressão simples, a determinação do E_{c0} por meio do ensaio de flexão estática a três pontos, considerando que o E_M corresponde a 0,90 (90%) do E_{c0} [$E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$].

A atual normativa brasileira prescreve, para determinação da rigidez à flexão da madeira, que os corpos de prova devem possuir as dimensões: 5 cm x 5 cm x 115 cm, atendendo à relação L/h igual a 21, sendo L o vão entre os apoios no ensaio de flexão e h a altura da seção transversal. Tal relação foi determinada por Lahr (1983), que constatou, contabilizando apenas a existência dos momentos fletores, equivalência entre os valores de E_M obtidos para relações $L/h \geq 21$, e divergência para relações inferiores. Esse resultado assegura que, respeitada a relação $L/h \geq 21$, a parcela devido ao cisalhamento pode ser desprezada na determinação dos deslocamentos, validando o modelo de vigas de Euler Bernoulli, o qual considera somente o efeito da flexão e é adotado pela norma brasileira para a obtenção do E_M .

Cabe destacar que o modelo de vigas que considera o efeito conjunto da flexão e do cisalhamento na determinação dos deslocamentos e conseqüentemente na obtenção da rigidez à flexão é o modelo de Timoshenko.

O antigo documento normativo MB-26:1940 (NBR 6230) preconizava que os corpos de prova destinados à obtenção da rigidez da madeira à flexão deveriam ter dimensões de 2 cm x 2 cm x 30 cm, implicando na relação $L/h < 21$ (Teoria de vigas de Timoshenko). Os resultados obtidos conforme a metodologia de ensaio proposta pela MB-26:1940 (NBR 6230) condicionaram a relação de equivalência entre o E_M e E_{c0} ($E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$), atualmente presente na ABNT NBR 7190 (1997). Com a mudança das dimensões dos corpos de prova pela ABNT NBR 7190 (1997), resultando na relação $L/h \geq 21$, as atuais relações entre E_M e E_{c0} podem estar incoerentes.

Diante do exposto, considerando as dificuldades associadas à caracterização completa de madeiras e a importância da determinação correta dos valores do módulo de elasticidade, justifica-se a necessidade de estudos que investiguem as relações entre as propriedades de rigidez das madeiras folhosas, com resultados em potencial a serem incorporados nas normas brasileiras, em especial na ABNT NBR 7190 (1997), atualmente em revisão.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O capítulo 1 introduz o tema apresentando: as vantagens do uso da madeira como material estrutural, o expressivo uso da madeira como solução habitacional em diversos países, o potencial florestal brasileiro e os fatores que contribuem para o insignificante uso da madeira em construções no Brasil, as dificuldades associadas a caracterização completa da madeira e as relações entre propriedades de rigidez investigadas neste trabalho. Ademais, descreve-se os objetivos e a justificativa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de trabalhos em que foram investigadas as propriedades físico-mecânicas das espécies de madeiras adotadas neste estudo. Além disso, o capítulo apresenta as relações entre as propriedades de resistência e rigidez prescritas pela norma brasileira, assim como pesquisas que investigaram estas e outras relações.

Tendo como referência a norma brasileira, o capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos adotados para a determinação das propriedades estudadas, assim como a análise estatística empregada na avaliação das relações entre as propriedades de rigidez e nas estimativas de tais propriedades em função da densidade aparente.

O capítulo 4 apresenta os valores das propriedades físico-mecânicas obtidas experimentalmente para cada espécie investigada, as comparações com os valores presentes na literatura, os resultados da análise estatística, as discussões frente às relações entre as rigidezes prescritas pela norma brasileira e os ajustes obtidos na estimativa das propriedades de rigidez por meio da densidade aparente.

O capítulo 5 exhibe as conclusões deste estudo.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas adotadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa revisão bibliográfica pautou-se na busca de trabalhos científicos que reportassem a temática investigada neste estudo. Como mecanismo de busca utilizou-se o Portal Periódicos CAPES e o Google Scholar, além do endereço eletrônico de revistas relacionadas às temáticas: propriedades da madeira e estruturas de madeira.

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES DE MADEIRAS ESTUDADAS

Os próximos subitens (2.1.1 a 2.1.10) descrevem características e propriedades das dez espécies nativas do grupo das folhosas adotadas neste estudo.

2.1.1 MADEIRA DE ANGELIM ARAROBA

As madeiras popularmente conhecidas como Angelim, Angelim araroba, Angelim-amargoso, Fava, Fava amarela, dentre outros, no Brasil, pertencem aos gêneros *Vatairea* e *Vataireopsis*.

Esses gêneros produzem madeiras duras e pesadas com coloração castanha-amarelada e castanha-avermelhada, comercializadas indistintamente como angelim-amargoso e tratadas em conjunto devido as semelhanças nas suas características (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, 2013).

Com ocorrência em alguns estados brasileiros como: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima, a madeira de Angelim araroba apresenta alta densidade, sendo comumente aplicada, na construção civil, na fabricação de dormentes ferroviários, cruzetas, estacas, caibros, vigas e ripas (IPT, 2013).

A ABNT NBR 7190 (1997) apresenta, por meio do Anexo E, os valores médios de propriedades de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de florestamento, determinadas à umidade padrão de 12%. A Tabela 1 apresenta os valores de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira de Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) contemplados no Anexo E da norma brasileira.

Tabela 1: Propriedades físico-mecânicas do Angelim araroba pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
688	50,5	69,2	3,1	7,1	12876

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Grobério e Lahr (2002) estudaram 21 espécies¹ tropicais de madeira, objetivando determinar a partir das propriedades físico-mecânicas, suas possíveis aplicações na construção civil. À umidade padrão de 12%, a madeira de Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) apresentou densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) de 680 kg/m³, retratibilidade radial total (RR) de 3,99% e retratibilidade tangencial total (RT) correspondente a 6,13%. Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas para a espécie estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas da Angelim araroba por Grobério e Lahr (2002).

f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)
50,2	69,5	3,2	11,3	0,6	79,9
E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N·m)
12525,4	11885,4	11943,3	61,2	39,8	68,9

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Grobério e Lahr (2002).

Almeida *et al.* (2015) investigaram a possibilidade da estimativa do coeficiente de retratibilidade volumétrica (VSC) em função da densidade seca ($\rho_{0\%}$) da madeira. Para tanto, os autores consideraram três espécies de madeira tropicais: *Cedrella* sp., *Cassia ferrugínea* e *Vataireopsis araroba*. A *Vataireopsis araroba* apresentou $\rho_{0\%}$ de 650 kg/m³ e VSC igual a 0,52%. Considerando o agrupamento das espécies, os autores constataram correlação linear entre $\rho_{0\%}$ e VSC ($VSC = 0,119 + 0,566 \cdot \rho_{0\%}$), com coeficiente de determinação (R^2) igual a 52%.

¹ Angelim araroba, Angelim ferro, Angelim vermelho, Branquilha, Cafearana, Castelo, Canatudo, Cedroarana, Champanhe, Cupiúba, Cutiúba, Guaiçara, Guaruaia, Itaúba, Oiuchu, Piolho, Quarubarana, Rabo de arraia, Tachi, Tatajuba e Umirana.

2.1.2 MADEIRA DE CAMBARÁ

A madeira popularmente conhecida como Cedrinho, Bruteiro, Cambará rosa, Quarubarana, Quarubatinga, dentre outros, cientificamente denominada *Erismia* sp., é uma espécie com ocorrência em alguns estados brasileiros como: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia (IPT, 2019a).

No que diz respeito ao uso na construção civil, o Cambará é empregado em elementos de uso temporário como: andaimes, formas para concreto e pontaletes, podendo também ser usado como matéria prima na confecção de ripas, portas, venezianas, molduras, guarnições, forros, dentre outros (IPT, 2019a).

Icimoto *et al.* (2015) investigaram a variabilidade do E_M determinados em cada uma das quatro faces do mesmo corpo de prova. Considerando as oito espécies² de madeira analisadas, o Cambará rosa (*Erismia* sp.) apresentou, à umidade padrão de 12%, densidade de 750 kg/m³ e enquadramento na classe de resistência C20 das dicotiledôneas. Por meio dos ensaios realizados, os autores obtiveram valores médios de E_M distintos para as quatro faces do corpo de prova (11857 MPa, 12061 MPa, 12294 MPa e 12390 MPa). Concluiu-se que, se os ensaios forem realizados nas quatro faces, recomenda-se adotar o valor médio do E_M (12151 MPa), se os ensaios forem realizados em apenas uma face, os valores do E_M devem ser corrigidos (minorados) em 8%.

Lahr *et al.* (2016) realizaram, a 12% de umidade, a caracterização completa de um lote da espécie *Erismia uncinatum* Warm. De acordo com o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), os autores enquadraram a espécie na classe de resistência C20. As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, os valores médios das propriedades físicas e mecânicas determinados pelos autores.

Tabela 3: Propriedades físicas do Cambará por Lahr *et al.* (2016).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	RT (%)	RT (%)
680	5,83	10,55

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; RT = retração radial total; RT = retração tangencial total.

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2016).

² Cambará rosa, Eucalipto grandis, Pinus elliottii, Cupiúba, Eucalipto citriodora, Ipê, Jatobá e Angico rosa.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do Cambará por Lahr *et al.* (2016).

f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)
34	45	4,9	14	0,8	63	12967
E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N·m)	f_{c90} (MPa)	E_{c90} (MPa)
12764	12376	51	67	33,39	7,0	7095

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela as fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras; W = tenacidade, f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; E_{c90} = módulo de elasticidade na compressão normal às fibras.

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2016).

Morales *et al.* (2018) analisaram a influência do número de ciclos de carregamento na determinação do E_{c0} , E_{t0} , E_M e do módulo de elasticidade na compressão normal às fibras (E_{c90}). Dentre as cinco espécies³ de madeira estudadas, o Cambará rosa (*Erismia sp.*) enquadrou-se na classe de resistência C20, apresentando $\rho_{ap,12\%}$ igual a 670 kg/m³. Concluiu-se, por meio da análise estatística, que o terceiro ciclo de carregamento pode ser desconsiderado, uma vez que as rigidezes mostraram-se equivalentes no segundo e terceiro ciclo de carregamento. A Tabela 5 apresenta os valores das propriedades de rigidez da madeira de Cambará rosa determinadas, no terceiro ciclo de carregamento, conforme prescrições da ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 5: Propriedades de rigidez do Cambará por Morales *et al.* (2018).

E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	E_{c90} (MPa)
12708	12509	11564	891

E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; E_{c90} = módulo de elasticidade na compressão normal às fibras.

Fonte: Adaptado de Morales *et al.* (2018).

2.1.3 MADEIRA DE CANAFÍSTULA

Cientificamente denominada *Cassia ferrugínea*, a madeira conhecida popularmente como Canafístula, Tapira coiana, Canafístula de besouro e Chuva de ouro é uma espécie nativa, com ocorrência do nordeste ao sul do Brasil (MARTINS *et al.*, 2012).

³ Cambará rosa, Cupiúba, Envira, Angico e Champanhe.

Com aplicações diversas, na construção civil, a Canafístula é empregada na confecção de vigamentos, caibros, caixilhos, rodapés, esquadrias, assoalhos, lambris, dentre outros (LORENZI, 1992; GONZAGA, 2006).

A ABNT NBR 7190 (1997), em seu Anexo E⁴, apresenta, dentre os valores médios das propriedades de resistência e rigidez de algumas espécies de madeiras nativas e de florestamento, os valores da madeira de Canafístula (*Cassia ferruginea*), os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades físico-mecânicas do Canafístula pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
871	52	84,9	6,2	11,1	14613

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Faria *et al.* (2012), considerando seis espécies⁵ de madeira, de diferentes classes de resistência (C30, C40 e C60) e com teores de umidade variados (12%, 20%, 25% e 30%), investigaram a influência da umidade na determinação do E_{t0} . A madeira de Canafístula (*Cassia ferruginea*) foi inserida na classe de resistência C40, apresentando, a 12% de umidade, E_{t0} igual a 15281,7 MPa. A equação obtida pelos autores, que relaciona $E_{t0(12\%)}$ e $E_{t0(U\%)}$ na faixa de umidade determinada (12% a 25%), conduziu a estimativas estatisticamente equivalentes aquelas obtidas por meio da atual equação prescrita pela ABNT NBR 7190 (1997).

Almeida *et al.* (2016) avaliaram, com o uso de modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, a possibilidade de estimar a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) por meio da $\rho_{ap,12\%}$, considerando para tanto três espécies de madeiras tropicais: Canafístula, Angelim araroba e Castelo. Dentre as espécies estudadas, a Canafístula (*Cassia ferruginea*) apresentou, a 12% de umidade, $\rho_{ap,12\%}$ igual a 860 kg/m³ e enquadramento na classe de resistência C30. Por meio do ensaio de compressão, obteve-se f_{c0} igual a 51,96 MPa, com valor mínimo e máximo correspondentes a 34,90 MPa e 64,70 MPa, respectivamente. Considerando o agrupamento das espécies, os autores obtiveram

⁴ Citado no subitem 2.1.1.

⁵ Jatobá, Maçaranduba, Canafístula, Cupiúba, Branquilha e Copaíba.

ajustes significativos (P-valor < 0,05) para todos os modelos investigados, todavia, nenhum mostrou-se eficiente.

2.1.4 MADEIRA DE CEDRO

Cientificamente denominada *Cedrella sp.*, a madeira de Cedro também é popularmente conhecida como Cedro doce, Cedro amargo, Cedro batata, Cedro branco, Cedro do Amazonas, dentre outros. É uma espécie de ocorrência em alguns estados brasileiros como: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo (IPT, 2019b).

Na construção civil, a madeira de Cedro é usada em esquadrias ou aplicações leves internas como: lambris, molduras, guarnições e forros, além de contemplar outros usos como: molduras para quadros, instrumentos musicais, chapas compensadas, embalagens etc. (IPT, 2019b).

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores médios de algumas propriedades físico-mecânicas, fornecidos pelo IPT (2019b), da madeira de Cedro.

Tabela 7: Propriedades físicas do Cedro pelo IPT (2019b).

$\rho_{15\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)	RV (%)
530	440	4,0	6,2	11,6

$\rho_{15\%}$ = densidade ao teor de umidade de 15%; ρ_{bas} = densidade básica; RR = contração radial; RT = contração tangencial; RV = contração volumétrica.

Fonte: Adaptado de IPT (2019b).

Tabela 8: Propriedades mecânicas do Cedro pelo IPT (2019b).

Condições da madeira	f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_M (MPa)
Mad _(15%)	39,1	-	-	-	81,2	-	-
Mad _(verde)	28,0	5,1	7,1	0,6	62,8	9630	8336

Mad_(15%) = madeira a 15% de umidade; Mad_(verde) = madeira verde; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática.

Fonte: Adaptado de IPT (2019b).

A Tabela 9 apresenta os valores de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira de Cedro doce (*Cedrella sp.*) contemplados no Anexo E⁶ da ABNT NBR 7190 (1997).

⁶ Citado no subitem 2.1.1.

Tabela 9: Propriedades físico-mecânicas do Cedro pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
500	31,5	71,4	3,0	5,6	8058

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Ferro *et al.* (2015) avaliaram a influência da posição dos relógios comparadores na determinação do E_{c0} de nove espécies⁷ de madeira distribuídas em todas as classes de resistência da ABNT NBR 7190 (1997). Em conformidade com o documento normativo, verificou-se o enquadramento da madeira de Cedro (*Cedrella* sp.) na classe C30. A partir dos ensaios realizados, observou-se significativa variação do E_{c0} quando tal propriedade foi determinada a partir das deformações de duas faces opostas (10837 MPa) e quando foi obtida por meio das deformações correspondentes as outras duas faces complementares (11899 MPa). Concluiu-se que, se o E_{c0} for determinado por meio das deformações de duas faces opostas do corpo de prova, os valores do módulo de elasticidade devem ser corrigidos (minorados) em 9%.

2.1.5 MADEIRA DE CEDROARANA

A madeira popularmente conhecida como Cedroarana, Cedro branco, Cedrarana, Cedromara, Taperibá açu, dentre outros, cientificamente denominada *Cedrelinga Catenaeformis*, é uma espécie tropical da Amazônia de ocorrência natural em alguns estados brasileiros como: Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia (IPT, 2013).

Em termos de construção civil, a madeira de Cedroarana pode ser utilizada como formas para concreto, ripas, portas, venezianas, guarnições, rodapés, andaimes e escoramentos. Como uso geral, pode ser empregada na confecção de móveis, chapas compensadas e embalagens (IPT, 2013).

Os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedroarana, fornecidos pelo IPT (2013), estão descritos, respectivamente, nas Tabelas 10 e 11.

⁷ Angico rosa, Cambará rosa, Cedro, Cupiúba, Eucalipto citriodora, Eucalipto grandis, Ipê, Jatobá e Pinus elliottii.

Tabela 10: Propriedades físicas da Cedroarana pelo IPT (2013).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)	RV (%)
520	440	4,8	7,9	11,8

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; ρ_{bas} = densidade básica; RR = contração radial; RT = contração tangencial; RV = contração volumétrica.

Fonte: Adaptado de IPT (2013).

Tabela 11: Propriedades mecânicas da Cedroarana pelo IPT (2013).

Condições da madeira	f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)
Mad _(12%)	46,6	4,5	7,2	77,8	12847
Mad _(verde)	40,6	4,4	6,7	70,8	12258

Mad_(12%) = madeira a 12% de umidade; Mad_(verde) = madeira verde; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática.

Fonte: Adaptado de IPT (2013).

Gonçalez e Gonçalves (2001) visando a valorização das espécies de madeira amazônica: Cedroarana (*Cedrelinga Catenaeformis*) e Orelha de macaco (*Enterolobium schomburgkii*), para a indústria madeireira, determinaram, algumas de suas propriedades físico-mecânicas e compararam com espécies tradicionalmente utilizadas. A Tabela 12 apresenta as propriedades físico-mecânicas obtidas para madeira de Cedroarana. Comparada com o Cedro (*Cedrela odotara*) e o Mogno (*Swietenia macrophylla*), os autores concluíram que a Cedroarana pode ser empregada para usos mais nobres, principalmente na indústria moveleira, haja vista que o coeficiente de anisotropia determinado foi próximo a 1,5, indicando que a espécie apresenta bom desempenho no que diz respeito à estabilidade dimensional.

Tabela 12: Propriedades físico-mecânicas da Cedroarana por Gonçalez e Gonçalves (2001).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)	RV (%)	RT/RV	E_M (MPa)	f_M (MPa)
470	3,9	6,5	10,3	1,7	11500	94,6

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; RR = retratibilidade radial; RT = retratibilidade tangencial; RV = retratibilidade volumétrica; RT/RV = coeficiente de anisotropia; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática.

Fonte: Adaptado de Gonçalez e Gonçalves (2001).

Grobério e Lahr (2002)⁸ verificaram, a 12% de umidade, que a madeira de Cedroarana (*Cedrelinga Catenaeformis*) apresenta $\rho_{ap,12\%}$ igual a 570 kg/m³, RR de 3,49% e RT correspondente a 6,44%. A Tabela 13 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas para a espécie.

Tabela 13: Propriedades mecânicas da Cedroarana por Grobério e Lahr (2002).

f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)
41,3	61,7	3,1	11,9	0,6	60,5
E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N·m)
10252,4	10969,7	10032,4	58	35,7	41,5

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Grobério e Lahr (2002).

2.1.6 MADEIRA DE COPAÍBA

Tradicionalmente denominada Copaíba, a madeira do gênero *Copaifera spp.* contempla, dentre outras, as espécies *C. trapezifolia* Hayne, *C. langsdorffii* Desf., *C. duckei* Duryer, *C. multijuga* Hayne, *C. martii* Hayne e *C. reticulata* Duckei, tratadas em conjunto devido à semelhança quanto à densidade e características anatômicas (IPT, 2019c).

Com ocorrência natural nos estados brasileiros do Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Rondônia e São Paulo, a madeira de Copaíba é empregada, na construção civil, de diversas formas: na confecção de portas, venezianas, ripas, guarnições, rodapés, pontaltes, andaimes, formas para concreto, entre outros (IPT, 2019c).

As Tabelas 14 e 15 apresentam valores médios de algumas propriedades físico-mecânicas da espécie *Copaifera multijuga* Hayne fornecidas pelo IPT (2019c).

Tabela 14: Propriedades físicas da Copaíba pelo IPT (2019c).

$\rho_{15\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)	RV (%)
690	575	3,8	7,1	13,4

$\rho_{15\%}$ = densidade ao teor de umidade de 15%; ρ_{bas} = densidade básica; RR = contração radial; RT = contração tangencial; RV = contração volumétrica.

Fonte: Adaptado de IPT (2019c).

⁸ Citados no subitem 2.1.1.

Tabela 15: Propriedades mecânicas da Copaíba pelo IPT (2019c).

Condições da madeira	f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)
Mad _(15%)	50,0	-	-	112,5	-
Mad _(verde)	38,7	4,0	0,6	93,5	10339

Mad_(15%) = madeira a 15% de umidade; Mad_(verde) = madeira verde; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática.

Fonte: Adaptado de IPT (2019c).

Dentre as seis espécies de madeiras tropicais estudadas por Faria *et al.* (2012)⁹, a Copaíba (*Copaifera sp*) foi inserida na classe de resistência C30, apresentando, à umidade padrão de 12%, E_{t0} igual a 11.957,7 MPa.

Aquino *et al.* (2018a) realizaram, de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), a caracterização completa de um lote da espécie *Copaifera sp*. As Tabelas 16 e 17 apresentam, respectivamente, os valores médios das propriedades físicas e mecânicas determinadas pelos autores à umidade padrão de 12%.

Tabela 16: Propriedades físicas da Copaíba por Aquino *et al.* (2018a).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)
700	3,51	7,03

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; RR = retração radial total; RT = retração tangencial total.

Fonte: Adaptado de Aquino *et al.* (2018a).

Tabela 17: Propriedades mecânicas da Copaíba por Aquino *et al.* (2018a).

f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)
50	71	3,0	15	0,6	80
E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N·m)
12845	13382	12440	79	47	5,90

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Aquino *et al.* (2018a).

⁹ Citados no subitem 2.1.3.

2.1.7 MADEIRA DE GUAÍÇARA

Cientificamente denominada *Luetzelburgia* sp., a madeira conhecida popularmente como Guaiçara ou Pau ripa é de ocorrência natural em alguns estados brasileiros como Minas Gerais, São Paulo e Paraná (LORENZI, 1992).

Pelos estudos de Grobério e Lahr (2002)¹⁰ a madeira de Guaiçara (*Luetzelburgia* sp) pode ser empregada na construção civil pesada externa na fabricação de pontes, dormentes ferroviários, estacas, torres de observação, cruzetas e escoras; na construção civil pesada interna na fabricação de tesouras, treliças, plataformas e escadas; e na fabricação de assoalhos domésticos e industriais. Os autores verificaram, à umidade padrão de 12%, que a espécie apresenta $\rho_{ap,12\%}$ igual a 1090 kg/m³, RR de 4,34% e RT correspondente a 6,54%. Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Propriedades mecânicas da Guaiçara por Grobério e Lahr (2002).

f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)
71,4	116,5	4,2	20,8	0,7	122,2
E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N·m)
15301,7	16304,7	15126,4	210	111,3	22,82

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Grobério e Lahr (2002).

Dentre os valores médios das propriedades de resistência e rigidez de algumas espécies de madeiras nativas e de florestamento, especificados no Anexo E¹¹ da ABNT NBR 7190 (1997), encontram-se os correspondentes a madeira de Guaiçara (*Luetzelburgia* spp), os quais são apresentados na Tabela 19.

¹⁰ Citados no subitem 2.1.1.

¹¹ Citado no subitem 2.1.1.

Tabela 19: Propriedades físico-mecânicas da Guaiçara pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
825	71,4	115,6	4,2	12,5	14624

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Lahr *et al.* (2010), considerando 16 espécies¹² de madeiras tropicais de alta densidade (superior a 850 kg/m³), investigaram, via modelos de regressão, a correlação da dureza da madeira nas direções paralela (f_{H0}) e normal às fibras (f_{H90}), em função da $\rho_{ap,12\%}$. Considerando o agrupamento das espécies, os autores concluíram que há correlação entre f_{H0} e $\rho_{ap,12\%}$ ($f_{H0} = 183 \cdot \rho_{ap,12\%} - 56$), e entre f_{H90} e $\rho_{ap,12\%}$ ($f_{H90} = 193 \cdot \rho_{ap,12\%} - 83$), sendo o modelo de regressão linear simples o que forneceu os melhores ajustes, com R² igual a 77% obtido na estimativa da f_{H90} . A Tabela 20 apresenta os valores das propriedades físicas e mecânicas obtidas, a 12% de umidade, para a madeira de Guaiçara (*Luetzelburgia sp.*).

Tabela 20: Propriedades físico-mecânicas da Guaiçara por Lahr *et al.* (2010).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)
1080	118	111

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2010).

2.1.8 MADEIRA DE LOURO VERDE

Cientificamente denominada *Ocotea sp.*, a madeira de Louro verde também é popularmente conhecida como Louro preto, Louro canela, Canela, dentre outros. É ocorrente no norte do país, Mato Grosso, Minas Gerais e Paraná, sendo empregada, dentre outros usos, como matéria prima na fabricação de móveis comuns, rodapés, treliças, venezianas e assoalhos (REMADE, 2019).

A ABNT NBR 7190 (1997), por meio do seu Anexo E¹³, apresenta, dentre os valores médios das propriedades de resistência e rigidez de algumas espécies de madeiras nativas e

¹² Angelim ferro, Angelim vermelho, Angico preto, Champanhe, Cutiúba, Garapa, Guaiçara, Guaruaia, Ipê, Itaúba, Jatobá, Maçaranduba, Oiuchu, Sucupira, Tachi e Tatajuba.

¹³ Citado no subitem 2.1.1.

de florestamento, os valores da madeira de Louro preto (*Ocotea spp*), os quais são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Propriedades físico-mecânicas do Louro verde pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
684	56,5	111,9	3,3	9,0	14185

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Araújo (2007), em estudo sobre relações entre propriedades físicas e mecânicas de 163 espécies de madeiras tropicais brasileiras, determinaram para o Louro canela (*Ocotea sp.*) densidade básica (ρ_{bas}) de 630 kg/m³, RR igual a 3,6% e RT equivalente a 7,8%. A Tabela 22 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas no estudo.

Tabela 22: Propriedades mecânicas do Louro verde por Araújo (2007).

f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)
63,45	4,81	6,96	119,74	14024	52,37	52,56

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela as fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras.

Fonte: Adaptado de Araújo (2007).

Christoforo *et al.* (2014) com o auxílio dos modelos de regressão linear, polinomial quadrático e cúbico, fundamentados na análise de variância (ANOVA), investigaram a possibilidade da determinação da tenacidade (W) por meio da $\rho_{ap,12\%}$ e da resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_M). Dentre as 15 espécies¹⁴ de madeira tropicais estudadas, o Louro preto (*Ocotea sp*) foi inserido na classe de resistência C40, apresentando $\rho_{ap,12\%}$ de 680 kg/m³, f_M igual a 104,6 MPa e W correspondente a 74 J.

¹⁴ Cedro doce, Cedroarana, Quarubarana, Canafístula, Cedro amargo, Cupiúba, Branquinho, Cafearana, Louro preto, Castelo, Angico preto, Catanudo, Garapa, Champanhe e Sucupira.

2.1.9 MADEIRA DE MAÇARANDUBA

A madeira popularmente conhecida como Maçaranduba, Aparaiú, Maparajuba, Paraju, dentre outros, pertence ao gênero *Manilkara* que contempla as espécies *Manilkara amazônica* (Huber) Chevalier, *M. cavalcantei* Pires & Barb. Rodr., *M. huberi* (Ducke) Chevalier e *M. inundata* (Ducke) Ducke, tratadas em conjunto devido à semelhança das suas características anatômicas (IPT, 2019d).

Ocorrente nos estados brasileiros do Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Paraná, Rio de Janeiro, Rondônia e Santa Catarina, a Maçaranduba é comumente empregada, na construção civil pesada externa, na fabricação de dormentes ferroviários, pontes, cruzetas e estacas; na construção civil pesada interna, na fabricação de tesouras, vigas e caibros e também na confecção de assoalhos (IPT, 2019d).

A Tabela 23 apresenta os valores médios de algumas propriedades de resistência e rigidez da madeira de Maçaranduba (*Manilkara spp*), os quais estão contemplados Anexo E¹⁵ da ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 23: Propriedades físico-mecânicas da Maçaranduba pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
1143	82,9	138,5	5,4	14,9	22733

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

Dentre as 163 espécies de madeiras tropicais investigadas por Araújo (2007)¹⁶ a Maçaranduba (*Manilkara amazônica*) apresentou ρ_{bas} de 830 kg/m³, RR de 5,9% e RT equivalente a 8,3%. Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas pelo autor estão apresentados na Tabela 24.

¹⁵ Citado no subitem 2.1.1.

¹⁶ Citado no subitem 2.1.8.

Tabela 24: Propriedades mecânicas do Maçaranduba por Araújo (2007).

f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)
63,55	5,59	4,31	128,17	13533	86,98	91,01

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras.

Fonte: Adaptado de Araújo (2007).

Jesus *et al.* (2015), com o intuito de subsidiar engenheiros em projetos de estruturas de madeira, realizaram, em conformidade com a ABNT NBR 7190 (1997), a caracterização de 26 espécies¹⁷ nativas do Mato Grosso. Dentre as madeiras investigadas a Maçaranduba (*Manilkara huberi*) apresentou $f_{c0,k}$ igual a 67,57 MPa e foi enquadrada classe de resistência D60. A Tabela 25 apresenta os demais resultados das propriedades físico-mecânicas obtidos pelos autores para essa espécie.

Tabela 25: Propriedades físico-mecânicas da Maçaranduba por Jesus *et al.* (2015).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	E_{c0} (MPa)
1019	82,48	11,77	15605	18620

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; $f_{t0,k}$ = resistência característica à tração paralela às fibras; $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,k}$ = módulo de elasticidade característico na compressão paralela às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de Jesus *et al.* (2015).

2.1.10 MADEIRA DE OITICICA AMARELA

A madeira popularmente conhecida como Oiticica amarela, Catruz, Guariúba, Janitá, Quariúba, dentre outros, cientificamente denominada *Clarisia racemosa*, é uma espécie da Amazônia e Mata Atlântica de ocorrência em alguns estados brasileiros como: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará e Rondônia (IPT, 2019e).

Em relação ao uso, na construção civil, a madeira de Oiticica amarela é comumente empregada na fabricação de esquadrias, rodapés, forros, lambris e ripas, sendo também utilizada como matéria prima na produção de móveis, instrumentos musicais, chapas compensadas, embalagens, entre outros (IPT, 2019e).

¹⁷ Amescla aroeira, Angelim amargoso, Angelim pedra, Cambará, Canelão, Castanheira, Cedro marinho, Cedro rosa, Cupiúba, Garapa, Guaritá, Guariúba, Inharé, Ipê amarelo, Ipê roxo, Itaúba, Maçaranduba, Marupá, Murapixi, Pau d'óleo, Peroba mica, Piquiá, Tamarindo, Tatajuba, Tauari rosa, Tauari vermelho.

As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores médios de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira de Oiticica amarela fornecidos pelo IPT (2019e).

Tabela 26: Propriedades físicas da Oiticica amarela pelo IPT (2019e).

$\rho_{15\%}$ (kg/m ³)	ρ_{bas} (kg/m ³)	RR (%)	RT (%)	RV (%)
560	467	2,2	4,4	7,3

$\rho_{15\%}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 15%; ρ_{bas} = densidade básica; RR = contração radial; RT = contração tangencial; RV = contração volumétrica.

Fonte: Adaptado de IPT (2019e).

Tabela 27: Propriedades mecânicas da Oiticica amarela pelo IPT (2019e).

Condições da madeira	f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_M (MPa)
Mad _(15%)	45,1	-	-	-	80,3	-	-
Mad _(verde)	36,9	5,8	9,8	0,6	72,0	11513	7963

Mad_(15%) = madeira a 15% de umidade; Mad_(verde) = madeira verde; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática.

Fonte: Adaptado de IPT (2019e).

Tem-se dentre os valores médios das propriedades de resistência e rigidez de algumas espécies de madeira, contemplados no Anexo E¹⁸ da ABNT NBR 7190 (1997), os correspondentes a madeira de Oiticica amarela (*Clarisia racemosa*), os quais estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Propriedades físico-mecânicas da Oiticica amarela pela ABNT NBR 7190 (1997).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
756	69,9	82,5	3,9	10,6	14719

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

¹⁸ Citado no subitem 2.1.1.

Nos estudos de Araújo (2007)¹⁹ a madeira de Guariúba (*Clarisia racemosa*) apresentou ρ_{bas} de 600 kg/m³, RR de 3,1% e RT equivalente a 6,2%. As demais propriedades mecânicas obtidas pelo autor estão descritas na Tabela 29.

Tabela 29: Propriedades mecânicas da Oiticica amarela por Araújo (2007).

f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)
64,53	2,84	5,0	108,85	12160	78,36	61,19

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_M = resistência convencional no ensaio de flexão estática; E_M = módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática; f_{H0} = dureza paralela às fibras; f_{H90} = dureza normal às fibras.

Fonte: Adaptado de Araújo (2007).

Dentre as 26 espécies, nativas do Mato Grosso, estudadas por Jesus *et al.* (2015)²⁰ a Guariúba (*Clarisia racemosa*) apresentou $f_{c0,k}$ de 59,14 MPa e foi enquadrada na classe de resistência D50 (arbitrada). Os demais resultados das propriedades físico-mecânicas obtidos pelos autores, para essa espécie, são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Propriedades físico-mecânicas de Oiticica amarela por Jesus *et al.* (2015).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)	E_{c0} (MPa)
696	53,72	8,69	13013	17512

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; $f_{t0,k}$ = resistência característica à tração paralela às fibras; $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,k}$ = módulo de elasticidade característico na compressão paralela às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de Jesus *et al.* (2015).

2.2 RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DA MADEIRA

No Brasil, a determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira é realizada com base no Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), que apresenta os métodos e ensaios para caracterização das espécies de madeira. Três métodos distintos podem ser adotados para a caracterização das propriedades de resistência da madeira (caracterização completa, mínima e simplificada) e dois para as propriedades de rigidez (completa e simplificada).

Tratando-se de propriedades de resistência, a caracterização completa, recomendada para espécies não conhecidas, se dá pela obtenção experimental, à umidade padrão de 12%,

¹⁹ Citado no subitem 2.1.8.

²⁰ Citados no subitem 2.1.9.

da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), resistência à compressão normal às fibras (f_{c90}), resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}), resistência de embutimento paralelo às fibras (f_{e0}), resistência de embutimento normal às fibras (f_{e90}), f_{c0} , $\rho_{ap,12\%}$ e ρ_{bas} . A caracterização mínima, indicada para espécies pouco conhecidas, consiste na determinação da f_{c0} , f_{t0} , f_{v0} , ρ_{bas} e $\rho_{ap,12\%}$.

Para espécies usuais, a normativa brasileira possibilita a caracterização simplificada a partir dos ensaios de compressão paralela às fibras, permitindo, na impossibilidade de realização dos ensaios experimentais, a determinação dos valores característicos por meio das relações (Equações 2.1 a 2.7):

$$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77 \quad (2.1)$$

$$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,00 \quad (2.2)$$

$$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (2.3)$$

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,00 \quad (2.4)$$

$$\frac{f_{e90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25 \quad (2.5)$$

Para coníferas:

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,15 \quad (2.6)$$

Para dicotiledôneas:

$$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,12 \quad (2.7)$$

Nas Equações 2.1 a 2.7, $f_{c0,k}$ denota a resistência característica à compressão paralela às fibras, $f_{t0,k}$ a resistência característica à tração paralela às fibras, $f_{tM,k}$ a resistência característica à tração na flexão, $f_{c90,k}$ a resistência característica à compressão normal às fibras, $f_{e0,k}$ a resistência característica ao embutimento paralelo às fibras, $f_{e90,k}$ a resistência característica ao embutimento normal às fibras e $f_{v0,k}$ corresponde a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras.

Em relação as propriedades de rigidez da madeira, a caracterização completa consiste na determinação experimental do E_{c0} e do E_{c90} . Assim como para as propriedades de resistência, para a caracterização simplificada das propriedades de rigidez, a normativa brasileira apresenta relações entre propriedades (Equações 2.8 a 2.11), com destaque as Equações 2.9 e 2.11, objetos de estudo desta dissertação.

$$E_{c90} = \frac{1}{20} \cdot E_{c0} \quad (2.8)$$

$$E_{c0} = E_{t0} \quad (2.9)$$

Para coníferas:

$$E_M = 0,85 \cdot E_{c0} \quad (2.10)$$

Para dicotiledôneas:

$$E_M = 0,90 \cdot E_{c0} \quad (2.11)$$

Devido às dificuldades para a caracterização completa da madeira, as relações entre as propriedades, sejam elas de resistência ou rigidez, são de suma importância para sua aplicação. Todavia, a simplicidade das relações lineares, podem ser ou não coerentes com os resultados reais obtidos via experimentação. Neste contexto, diversos trabalhos em âmbito mundial buscaram investigar as relações entre propriedades físico-mecânicas da madeira, utilizando-se de modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmico, geométrico, polinomial, entre outros) que pudessem melhor descrever a correlação entre as propriedades investigadas.

Dentre todas as propriedades físico-mecânicas da madeira, tem-se a densidade como a de mais fácil obtenção. Por essa razão, nos últimos anos, vários trabalhos foram desenvolvidos tomando-se a densidade como estimador das demais propriedades físico-mecânicas.

Para Dias e Lahr (2004) que, utilizando o agrupamento médio de 40 espécies²¹ tropicais brasileiras, investigaram as relações entre $\rho_{ap,12\%}$ e algumas propriedades físico-mecânicas da madeira, existe forte correlação entre a $\rho_{ap,12\%}$ e f_M , f_{H0} , f_{H90} , W , f_{c0} , f_{t0} , f_{v0} , E_{c0} , E_{t0} e E_M . Dentre essas, a relação de melhor ajuste deu-se entre $\rho_{ap,12\%}$ e f_{H0} , com R^2 igual a 92%. As relações obtidas entre $\rho_{ap,12\%}$ e a resistência ao fendilhamento paralelo às fibras (f_{s0}), a f_{t90} ,

²¹ Angelim amargoso, Angelim araroba, Angelim ferro, Angelim pedra verdadeiro, Angelim pedra, Angelim saia, Angico preto, Branquilha, Cafearana, Canafístula, Casca grossa, Castelo, Catanudo, Cedro amargo, Cedro doce, Cedroarana, Champanhe, Copaíba, Cupiúba, Cutiúba, Garapa, Goiabão, Guaiçara, Guaruaia, Ipê, Itaúba, Jatobá, Louro preto, Maçaranduba, Mandioqueira, Oiticica amarela, Oiuchu, Parinari, Piolho, Quarubarana, Rabo de arraia, Sucupira, Tachi, Tatajuba e Umirana.

a RR e a RT, apresentaram em todos os modelos de regressão analisados (linear, logarítmico, polinômio do segundo grau, potência e exponencial), baixos valores de R^2 , evidenciando, para os autores, uma fraca correlação entre a densidade aparente e estas propriedades.

Almeida *et al.* (2014) avaliaram, com o emprego de modelos de regressão polinomiais do tipo linear, quadrático e cúbico, a possibilidade da estimativa da W por meio da $\rho_{ap,12\%}$. Considerando o agrupamento das espécies²², os resultados evidenciaram a significância de todos os ajustes investigados (P -valor $< 0,05$), sendo o polinomial cúbico, o modelo mais eficiente ($R^2 = 84,70\%$) na estimativa da tenacidade das madeiras estudadas. De modo análogo, Christoforo *et al.* (2014)²³, agrupando 15 espécies de madeira e adotando distintos modelos de regressão, concluíram ser possível estimar a tenacidade por meio da densidade aparente, sendo o modelo polinomial quadrático o de melhor ajuste ($R^2 = 67,80\%$).

Igartúa *et al.* (2015), fazendo uso do modelo de regressão linear, constataram forte correlação entre a $\rho_{ap,12\%}$ e a f_M , a f_{c0} , a f_{c90} e o E_M para a madeira *Acacia melanoxylon*, proveniente da Argentina. Os autores obtiveram ajustes significativos (P -valor $< 0,05$) para todas as relações investigadas, com menor e maior R^2 correspondentes a 70% e 81%, respectivamente para as relações entre a $\rho_{ap,12\%}$ e o E_M e a $\rho_{ap,12\%}$ e a f_{c90} .

Almeida *et al.* (2017) e Dias *et al.* (2019) investigaram a estimativa da retratibilidade da madeira em função $\rho_{ap,12\%}$, via modelos de regressão fundamentados na ANOVA. O primeiro trabalho pautou-se em resultados experimentais advindos de um conjunto de 15 espécies²⁴ de madeiras tropicais, e o segundo de 43²⁵. Em ambos os trabalhos, os resultados da ANOVA demonstraram fraca correlação entre os parâmetros investigados, evidenciando que a $\rho_{ap,12\%}$ não é um bom estimador das propriedades relacionadas a estabilidade dimensional da madeira.

Silva *et al.* (2018), por meio dos modelos de regressão linear, exponencial, geométrico e logarítmico, tomando a $\rho_{ap,12\%}$ como variável independente, investigaram a possibilidade da estimativa das propriedades físico-mecânicas da madeira de Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.), proveniente de três locais de extração distintos. Os ajustes resultaram significativos (P -valor $< 0,05$) e com boa precisão ($R^2 \approx 70\%$) para as 15 relações investigadas. Dentre essas, a

²² Adotaram: Teca (C20), Paricá (C20), Pinus (C20), Eucalipto (C40), Angico (C60) e Jatobá (C60).

²³ Citados no subitem 2.1.8.

²⁴ Cedro doce, Cedro amargo, Cambará, Canafístula, Canatudo, Casca grossa, Angelim araroba, Cupiúba, Angelim amargoso, Mandioqueira, Castelo, Tatajuba, Angelim vermelho, Champanhe e Itaúba.

²⁵ Abuí, Angelim amargoso, Angelim araroba, Angelim ferro, Angelim vermelho, Angelim pedra, Angelim saia, Angico preto, Branquilha, Cafearana, Cambará rosa, Canafístula, Casca grossa, Castelo, Canatudo, Cedro amargo, Cedro doce, Cedroarana, Champanhe, Copaíba, Cupiúba, Cutiúba, Grápia, Goiabão, Guaiçara, Guarucaia, Ipê, Itaúba, Jatobá, Louro preto, Maçaranduba, Mandioqueira, Oiticica amarela, Oiuchu, Parinari, Piolho, Quarubarana, Quina rosa, Rabo de arraia, Sucupira, Tachi, Tatajuba e Umirana.

mais expressiva deu-se entre a $\rho_{ap,12\%}$ e a f_{H0} [assim como no trabalho de Dias e Lahr (2004)] com R^2 igual a 87,96%.

Em comum, os estudos supracitados evidenciam a possibilidade da estimativa de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira por meio da densidade aparente. Ademais, trabalhos como os originados por: Kiaei (2012), Lukásek *et al.* (2012), Machado *et al.* (2014), Bader *et al.* (2015), Missanjo e Matsumura (2016), Krajewski *et al.* (2016), Christoforo *et al.* (2017), Miyoshi *et al.* (2018), Reis *et al.* (2018), entre outros, evidenciam a abrangência mundial do tema.

Em adição aos estudos relacionados a estimativa das propriedades da madeira em função da densidade aparente, tem-se estudado relações entre outras propriedades, bem como relações entre propriedades determinadas por métodos de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Carrillo *et al.* (2011) investigaram a correlação entre a densidade básica, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) de 14 espécies²⁶ de madeira nativas do México. O modelo de regressão linear tendo a densidade básica como variável independente na estimativa do MOE e MOR mostrou-se representativo (P-valor < 0,05), apresentando, respectivamente, R^2 igual a 67% e 64%. O modelo significativo de melhor ajuste ($R^2 = 87\%$) foi obtido na estimativa do MOR em função do MOE, com aproximação linear ($MOR = 31,7335 + 10,896 \cdot MOE$).

Segundinho *et al.* (2013) estudaram a correlação entre o módulo de elasticidade obtido por meio de ensaios dinâmicos de vibração transversal (E_{Mvt}) com o E_M , a f_M , o módulo de elasticidade paralelo (E_{cp}) e a resistência à compressão (σ_{cp}) de vigas de madeira laminada colada da espécie Cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.). Dentre os modelos de regressão linear investigados, o de melhor ajuste deu-se na estimativa do E_M em função do E_{Mvt} [$E_M = 1,044 \cdot E_{Mvt} - 907,22$], com R^2 correspondente a 86%, significativo ao nível de 1% probabilidade (P-valor < 0,01). Os autores concluíram que E_{Mvt} é um bom estimador de E_M .

Baar *et al.* (2015) investigaram a relação entre o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), ambos advindos do ensaio de flexão à três pontos, e entre o MOE e os módulos de elasticidade determinados por meio de técnicas não destrutivas [E_{fr} (*flexural resonance method*), E_{lr} (*longitudinal resonance method*) e E_u (*ultrasound method*)]. Considerando o agrupamento das espécies²⁷, os autores obtiveram modelos de regressão

²⁶ Gavia, Huizache, Hizache chino, Brasil, Anacahuita, Chapote blanco, Chapote obscuro, Ebano, Tenaza, Barreta, Leucaena, Palo verde, Mezquite e Coma.

²⁷ Doussié (*Azelia bipindensis*), Merbau (*Intsia bijuga*), Wengé (*Millettia laurentii* De Wild.), Muiracatiara (*Astronium graveolens* Jacq.) e Zebrano (*Microberlinia brazzavillensis*).

lineares significativos e com bons ajustes ($R^2 \approx 85\%$) para as relações entre MOE e E_{fr} , E_{lr} e E_u , assim como na estimativa do MOR em função do MOE ($R^2 = 73\%$).

Moreira *et al.* (2017), com o auxílio dos modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, fundamentados na ANOVA, investigaram a estimativa da W e da resistência ao impacto na flexão (f_{bw}) em função da resistência e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras de dez espécies²⁸ de madeira tropicais de diferentes classes de resistência. Analisando por espécie, o modelo de regressão que obteve melhor ajuste foi o logarítmico na determinação da W ($R^2 = 61,75\%$ e P-valor = 0,0024) e da f_{bw} ($R^2 = 61,75\%$ e P-valor = 0,0024) da madeira de Cedroarana, ambos em função da f_{c0} . Agrupando as espécies, o modelo de melhor ajuste foi o linear, obtido na estimativa da W por meio da f_{c0} ($R^2 = 37,42\%$ e P-valor = 0,0000).

Aquino *et al.* (2017), considerando modelos de regressão com uma ou mais variáveis independentes, avaliaram a determinação das propriedades mecânicas das madeiras *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. por meio de 11 propriedades físicas²⁹. Das 27 propriedades mecânicas investigadas, 23 apresentaram correlação significativa com ao menos uma propriedade física. O modelo de regressão univariado de melhor ajuste ($R^2 = 49,4\%$) foi obtido na estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (MOE_{AC}) em função da S_t , enquanto o melhor modelo de regressão multivariado ($R^2 = 93\%$) deu-se na determinação do módulo de ruptura na condição padrão de umidade ($MOR_{12\%}$) em função do módulo de elasticidade convencional na flexão ($MOE_{12\%}$), AR, BD, MC_{green} , S_t , S_r e AD.

Chen e Guo (2017), por meio de modelos de regressão linear, investigaram, para a madeira *Abies fabri* (Mast.), a possibilidade da estimativa da densidade verde (ρ), da resistência à compressão paralela às fibras (UCS), do módulo de elasticidade na flexão estática (MOE) e do módulo de ruptura (MOR) em função de propriedades provenientes de ensaios não destrutivos [amplitude da resistência (F) e módulo de elasticidade dinâmico (E_D)]. Os autores concluíram que todas as relações investigadas [$\rho(F)$, $MOE(E_D)$, $MOR(E_D)$ e $UCS(E_D)$] foram significativas, sendo que o melhor ajuste deu-se na estimativa do MOE, com R^2 igual a 63,50%.

Cavalheiro *et al.* (2018) avaliaram a estimativa do módulo de elasticidade na flexão estática (MOE_{sb}) em função do módulo de elasticidade obtido por meio do ensaio de vibração

²⁸ Os autores estudaram as espécies: Cedro (C20), Cambará Rosa (C20), Cedroarana (C20), Catanudo (C20), Cupiúba (C40), Angelim Saia (C40), Tatajuba (C50), Guaiçara (C50), Cumaru (C60) e Angelim Vermelho (C60).

²⁹ Teor de umidade da madeira verde (MC_{green}), densidade básica (BD), densidade ao teor de 12% de umidade (ND), densidade verde (GD), densidade anidra (AD), retração tangencial (S_t), retração radial (S_r), retração longitudinal (S_l), retração volumétrica (VS), coeficiente de anisotropia (AR) e ponto de saturação das fibras (FSP).

longitudinal (MOE_{IV}) de peças estruturais da madeira *Schizolobium amazonicum* Herb. Modelos de regressão linear e quadrático foram utilizados, assim como um modelo de regressão linear multivariado considerando a $\rho_{ap,12\%}$. Os autores concluíram que todos os modelos foram significativos (P-valor = 0,00) e com bons ajustes ($R^2 > 60\%$), não havendo influência da $\rho_{ap,12\%}$ e da parcela quadrática (MOE_{IV}^2), no modelo de regressão linear multivariado e no modelo quadrático, respectivamente.

Hein e Brancheriau (2018) determinaram, para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, o módulo de ruptura obtido por ensaios de flexão estática a três (MOR_{3p}) e quatro pontos (MOR_{4p}). Os autores desenvolveram relações entre o MOR_{3p} e o MOR_{4p} com a densidade (ρ) e os módulos de elasticidade dinâmicos: longitudinal (E_L) e na flexão (E_F), obtidos por meio de ensaios não destrutivos (*acoustic resonance*). Dentre as relações investigadas [$MOR_{3p}(\rho)$, $MOR_{4p}(\rho)$, $MOR_{3p}(E_F)$, $MOR_{4p}(E_F)$, $MOR_{3p}(E_L)$ e $MOR_{4p}(E_L)$], a de melhor ajuste foi obtida entre MOR_{4p} e E_F , com R^2 igual a 65%.

Por fim, recentemente, os estudos de Matos e Molina (2016), Lahr *et al.* (2017), Almeida *et al.* (2018) e Christoforo *et al.* (2019), avaliaram algumas relações entre propriedades de resistência e rigidez propostas pela norma brasileira.

Matos e Molina (2016) estudaram a correlação entre as resistências características: ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras para madeiras coníferas (Equação 2.6) e dicotiledôneas (Equação 2.7). Para tanto, os autores adotaram as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. Os resultados experimentais obtidos mostraram que para as dicotiledôneas a relação determinada ($f_{v0,k} = 0,13 \cdot f_{c0,k}$) foi muito próxima a apresentada pela norma brasileira ($f_{v0,k} = 0,12 \cdot f_{c0,k}$), enquanto para as coníferas a relação obtida foi aproximadamente 95% maior.

Lahr *et al.* (2017) determinaram, com base em ensaios de flexão estática a três e quatro pontos, a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G). Adotando o agrupamento de cinco espécies³⁰ tropicais, distribuídas nas classes de resistência C20 a C60, e com base no método dos mínimos quadrados, os autores determinaram a relação $E = 35 \cdot G$, com coeficiente 75% superior ao presente na relação ($E = 20 \cdot G$) prescrita pela norma brasileira (Equação 2.8).

Almeida *et al.* (2018) investigaram a relação entre o E_{c0} e E_{c90} , considerando para tanto, cinco espécies³¹ de madeira tropicais. O coeficiente ótimo (α) da relação $E_{c0} = \alpha \cdot E_{c90}$, determinado pelo método dos mínimos quadrados considerando o agrupamento das

³⁰ Cedrinho, Peroba rosa, Tereticornis, Canafístula e Jatobá.

³¹ Cambará rosa (C20), Cedro amazonense (C30), Cupiúba (C40), Itaúba (C50) e Roxinho (C60).

espécies, foi igual a 20,64, compatível com o proposto pela ABNT NBR 7190 (1997) (Equação 2.8).

Christoforo *et al.* (2019) estudaram as relações entre a resistência característica a compressão paralela às fibras com as resistências características: à tração paralela às fibras e ao cisalhamento. Agrupando as espécies estudadas³² e com o auxílio do método dos mínimos quadrados, os coeficientes (α) determinados pelos autores resultaram em 0,96 e 0,23, respectivamente para as relações $f_{c0,k} = \alpha \cdot f_{t0,k}$ e $f_{v0,k} = \alpha \cdot f_{c0,k}$, sendo 25% e 92% maiores que os coeficientes das Equações 2.1 e 2.7, prescritos pela ABNT NBR 7190 (1997).

Em comum, os últimos quatro trabalhos citados adotaram quantidades de espécies inferiores ao proposto nesta pesquisa. Ademais, todos os trabalhos obtiveram coeficientes superiores aos prescritos pela ABNT NBR 7190 (1997), evidenciando que a normativa brasileira está sendo favorável à segurança das estruturas, quando no dimensionamento estrutural o $f_{v0,k}$ for determinado pelas Equações 2.6 e 2.7. Por outro lado, tal conservadorismo pode estar conduzindo a elementos estruturais com dimensões superestimadas, o que implica diretamente no custo da estrutura. Para $f_{t0,k}$ e G , os valores dos coeficientes obtidos pelos autores, acarretam em uma situação contrária ao exposto para $f_{v0,k}$.

Por fim, essa revisão bibliográfica apresentou estudos recentes que objetivaram investigar a coerência das relações entre propriedades de resistência e rigidez prescritas pela ABNT NBR 7190 (1997), apresentadas aqui pelas Equações 2.1 a 2.11. Todavia, estudos relacionados à eficácia das relações entre E_{c0} com: E_{t0} e E_M (Equações 2.9 e 2.11) para madeiras do grupo das folhosas não foram encontrados, evidenciando, portanto, a relevância e a contribuição deste trabalho.

³²Cambará rosa, Cedro amazonense, Guarucaia, Cupiúba e Roxinho.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Todos ensaios mecânicos descritos a seguir foram realizados, com o auxílio da máquina AMSLER com capacidade de 250 kN (Figura 1), no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) pertencente ao Departamento de Engenharia (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), seguindo as premissas e métodos de cálculo apresentados no Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 1: Máquina universal AMSLER utilizada nos ensaios.



Para tanto, foram utilizadas peças serradas de dez espécies de madeira distribuídas nas classes de resistência do grupo das folhosas. A Tabela 31 apresenta os nomes populares e científicos das espécies empregadas neste estudo.

Tabela 31: Nome popular e científico das madeiras adotadas neste estudo.

Nome Popular	Nome Científico
Angelim araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>
Cambará rosa	<i>Erismia</i> sp.
Canafístula	<i>Cassia ferruginea</i>
Cedro	<i>Cedrella</i> sp.
Cedroarana	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>
Copaíba	<i>Copaiba resinífera</i>
Guaíçara	<i>Luetzelburgia</i> sp.
Louro verde	<i>Ocotea</i> sp.
Maçaranduba	<i>Manilkara</i> sp.
Oiticica amarela	<i>Clarisia racemosa</i>

3.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

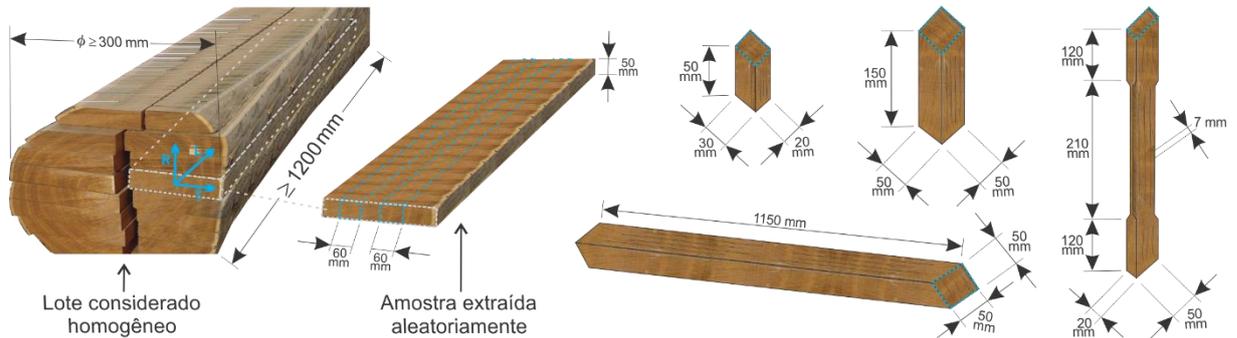
Para a caracterização simplificada (espécies usuais) e mínima (espécies pouco conhecidas) das espécies de madeira, a ABNT NBR 7190 (1997) prescreve, respectivamente, a amostragem mínima de 6 e 12 corpos de prova, os quais devem ser isentos de defeitos. Para a caracterização completa (espécies não conhecidas) o documento normativo brasileiro não faz menção ao número mínimo de corpos de prova que devem ser adotados.

Neste estudo, adotou-se, para a determinação das propriedades físico-mecânicas, a amostragem correspondente a 12 corpos de prova, resultando, ao todo, em 600 determinações experimentais.

Do mesmo modo que são obtidos os lotes de madeira utilizados na construção civil brasileira, as espécies de madeira (Tabela 31), foram adquiridas no comércio local, na forma de tábuas (madeira serrada) com dimensões próximas de: 5 cm x 11 cm x 300 cm. Portanto, não foi possível identificar a origem e a idade das árvores.

A Figura 2 esquematiza a forma de extração das amostras e dimensões dos corpos de prova conforme preconiza o documento normativo brasileiro. Destaca-se que, para cada espécie, foram utilizadas 12 tábuas, extraídas aleatoriamente de um lote considerado homogêneo.

Figura 2: Esquema ilustrativo de extração das amostras e dimensões dos corpos de prova para a determinação das propriedades físico-mecânicas.



3.1.1 DENSIDADE APARENTE A 12% DE UMIDADE

A densidade aparente ($\rho_{ap,U\%}$), a um certo teor de umidade ($U\%$), foi determinada pela razão entre a massa ($m_{U\%}$) e o volume ($V_{U\%}$) do corpo de prova, conforme expressa a Equação 3.1.

$$\rho_{ap,U\%} = \frac{m_{U\%}}{V_{U\%}} \quad (3.1)$$

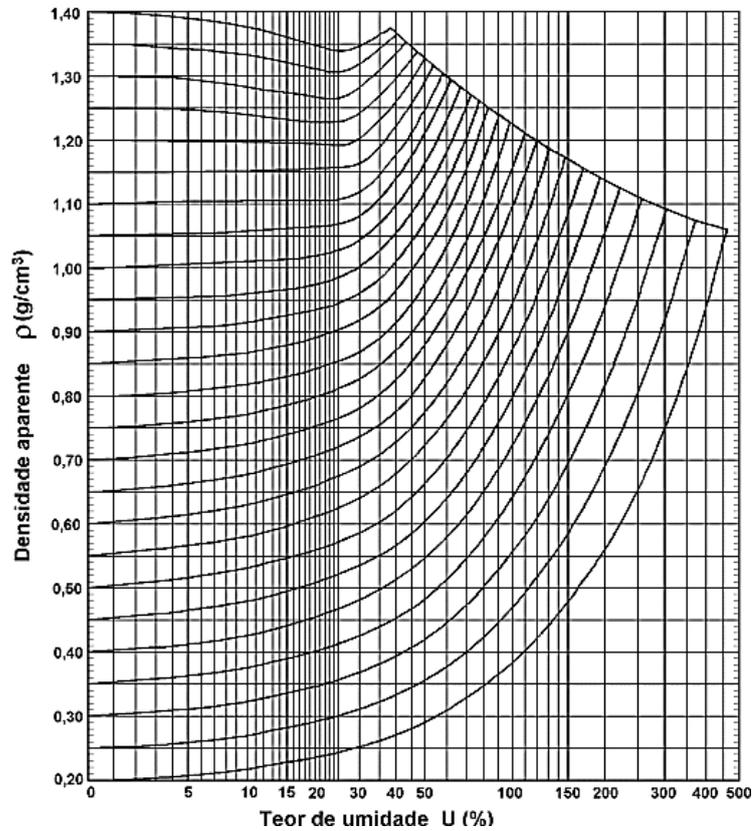
Para a determinação da $m_{U\%}$ (obtida com exatidão de 0,01 g) e do $V_{U\%}$, utilizou-se paquímetro digital, balança eletrônica e corpos de prova prismáticos com 2 cm x 3 cm de lado e comprimento, na direção das fibras, de 5 cm.

Visando conhecer o teor de umidade ($U\%$) correspondente a $\rho_{ap,U\%}$, utilizou-se a Equação 3.2, na qual $m_{0\%}$ denota a massa seca da madeira, obtida com o auxílio de uma estufa, com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Considerou-se como $m_{0\%}$ o valor de massa, medido a cada seis horas, no qual a variação, em relação a medida anterior, foi menor ou igual a 0,5%.

$$U\% = \frac{m_{U\%} - m_{0\%}}{m_{0\%}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Para corpos de prova com teor de umidade ($U\%$) iguais a 12%, assumiu-se como densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{ap,12\%}$) os valores obtidos pela Equação 3.1. Enquanto, para teores de umidade distintos, adotou-se o diagrama de Kollmann (Figura 3) para corrigir o valor da $\rho_{ap,U\%}$ para $\rho_{ap,12\%}$.

Figura 3: Diagrama de Kollmann para correção da densidade aparente.



Fonte: Kollmann e Coté (1984).

3.1.2 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

A resistência (f_{c0}) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), das madeiras estudadas, foram determinados por meio do ensaio de compressão paralela às fibras (Figura 4) com carregamento monotônico crescente, à taxa em torno de 10 MPa/min.

Figura 4: Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.



A f_{c0} foi expressa pela razão entre a força máxima de compressão ($F_{c0,máx}$), aplicada no decorrer do ensaio, e a área da seção transversal do corpo de prova (A), conforme apresenta à Equação 3.3.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (3.3)$$

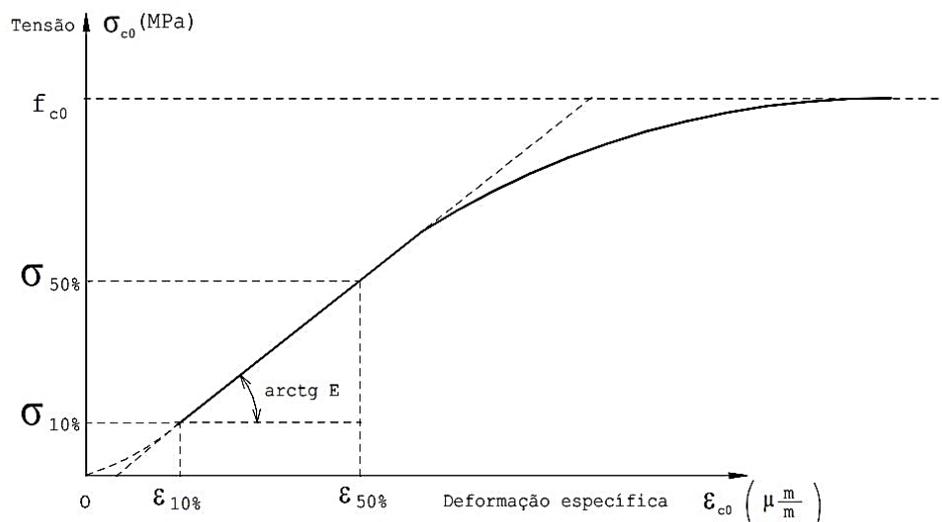
O E_{c0} foi obtido pela inclinação da reta secante à curva tensão *versus* deformação (Figura 5) medido no trecho linear, definido pelos pontos $(\sigma_{10\%}, \epsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}, \epsilon_{50\%})$, e expresso pela Equação 3.4.

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4, $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{50\%}$ e $\epsilon_{10\%}$, $\epsilon_{50\%}$ denotam, respectivamente, as tensões e as deformações de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência estimada ($f_{c0,est}$) pelo ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo (décimo terceiro), pertencente à amostra investigada.

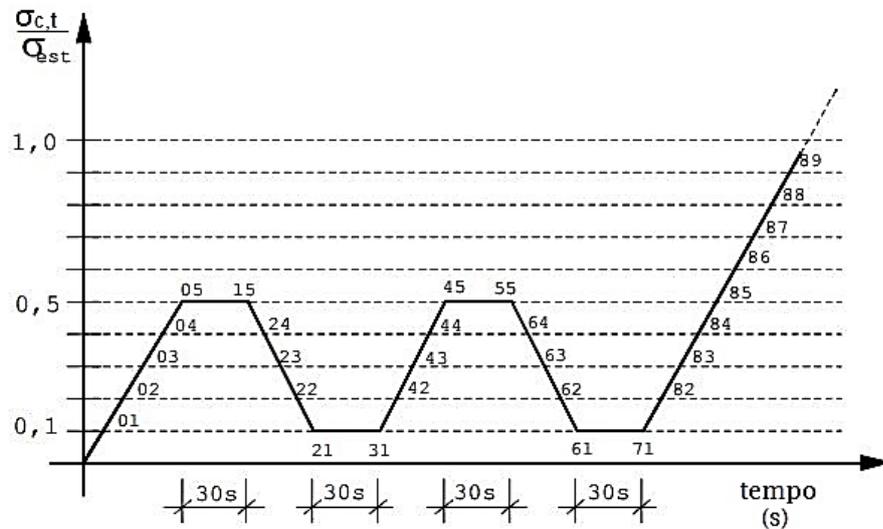
Atendendo as prescrições da normativa brasileira, o E_{c0} foi determinado no terceiro ciclo de carregamento do diagrama ilustrado pela Figura 6, no qual as tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são representadas pelos pontos 71 e 85, respectivamente.

Figura 5: Diagrama tensão *versus* deformação específica para determinação de E_{c0} .



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 6: Diagrama de carregamento para determinação de E_{c0} e E_{t0} .



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Os corpos de prova destinados a obtenção de f_{c0} e E_{c0} foram confeccionados com dimensões de 5 cm x 5 cm x 15 cm e exatidão dimensional de 0,1 mm. A Figura 7 ilustra um dos corpos de prova utilizados.

Figura 7: Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.



Na determinação do E_{c0} foi considerado a média das deformações de compressão (medidas com precisão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$) proveniente de dois relógios comparadores, com precisão de 0,001 mm, posicionados em faces opostas do corpo de prova por meio de cantoneiras metálicas espaçadas a 100 mm (Figura 8).

Figura 8: Fixação dos relógios comparadores nos corpos de prova de compressão paralela às fibras.



3.1.3 RIGIDEZ À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Para a determinação do E_{t0} , os ensaios de tração paralela às fibras foram realizados com aplicação de carregamento monotônico crescente, à taxa de 10 MPa/min, adotando corpos de prova de seção transversal retangular de 5 cm x 2 cm de lado e altura, na direção longitudinal, de 45 cm, sendo que no trecho central, ao longo de 21 cm, a seção é reduzida para 5 cm x 0,7 cm de lado.

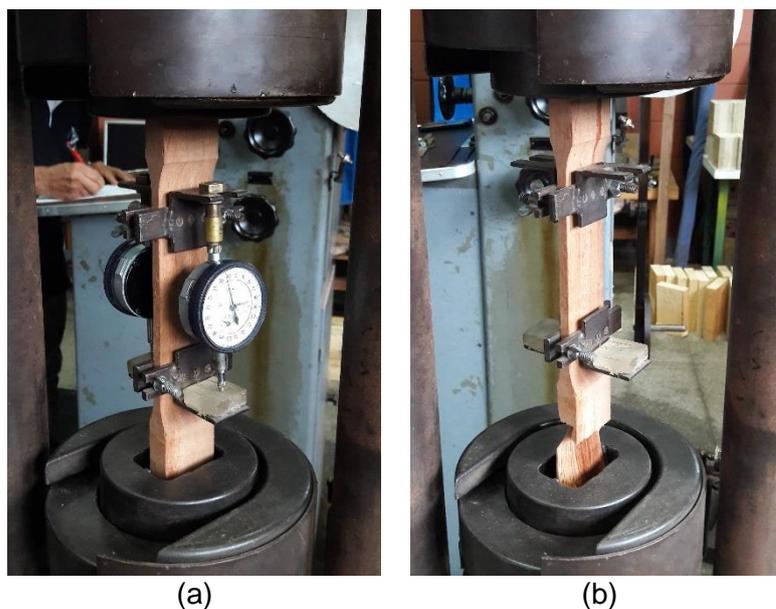
Com posse dos valores de tensões ($\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$) e deformações ($\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$), correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras estimada ($f_{t0,est}$)³³, os E_{t0} foram determinados, conforme a Equação 3.5, pela inclinação da reta secante à curva tensão *versus* deformação (análoga a Figura 5), no trecho linear, delimitado pelos pontos ($\sigma_{10\%}$, $\epsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$, $\epsilon_{50\%}$).

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3.5)$$

Para a determinação das deformações de tração, fixou-se, em faces opostas do corpo de prova, dois relógios comparadores de mesmas especificações aqueles mencionados para a obtenção do E_{c0} . A rigidez à tração paralela às fibras, analogamente ao E_{c0} , foi obtida no terceiro ciclo de carregamento do diagrama evidenciado pela Figura 6, no qual os pontos 71 e 85, representam, respectivamente, as tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$. A Figura 9 ilustra o ensaio de tração paralela às fibras.

³³ $f_{t0,est}$ foi determinada de modo análogo ao especificado para $f_{c0,est}$ no subitem 3.1.1.

Figura 9: Ensaio de tração paralela às fibras (a) Corpo de prova após o ensaio (b).



3.1.4 RIGIDEZ À FLEXÃO

O módulo de elasticidade aparente na flexão (E_M), das madeiras estudadas, foram determinados por meio do ensaio de flexão estática à três pontos (Figura 10), com carga concentrada aplicada no meio no vão, por intermédio de um cutelo acoplado, de forma monotônica crescente à taxa de 10 MPa/min.

Figura 10: Ensaio de flexão estática a três pontos.



Atendendo as prescrições da ABNT NBR 7190 (1997), os corpos de prova prismáticos foram confeccionados com exatidão dimensional de 0,1 mm, seção transversal quadrada de 5 cm de lado e comprimento (na direção paralela às fibras) de 115 cm, respeitando-se a relação $L/h \geq 21$.

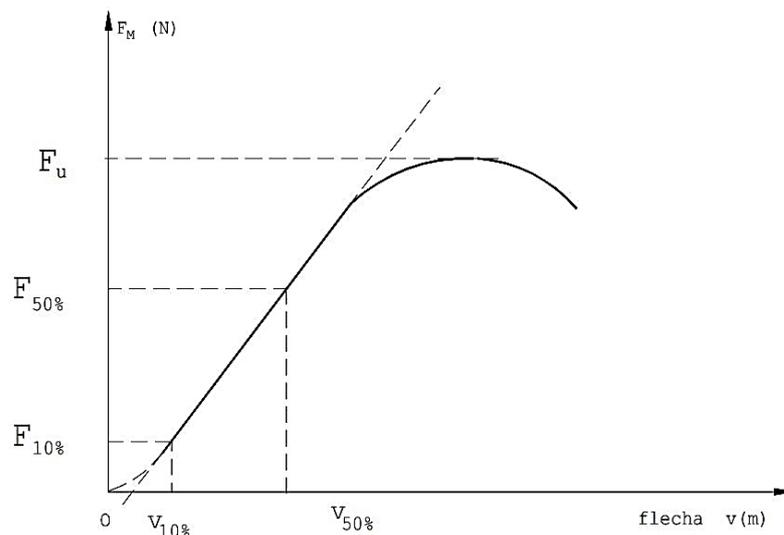
Para cada amostra, o E_M foi determinado pela inclinação da reta secante à curva carga *versus* deslocamento (Figura 11), no trecho linear, delimitado pelos pontos $(F_{M10\%}, v_{10\%})$ e $(F_{M50\%}, v_{50\%})$, conforme expressa a Equação 3.6.

$$E_M = \frac{(F_{M50\%} - F_{M10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3.6)$$

Na Equação 3.6, $F_{M10\%}$ e $F_{M50\%}$ correspondem, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima ($F_{M,est}$)³⁴; $v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ referem-se aos deslocamentos no meio do vão correspondentes, respectivamente, à $F_{M10\%}$ e $F_{M50\%}$; enquanto b e h denotam a largura e a altura da seção transversal do corpo de prova, respectivamente.

Para medir as deformações, fez-se uso de um transdutor de deslocamento, com precisão de 0,01 mm, posicionado no meio do vão. A rigidez à flexão, análogo as demais propriedades de rigidez, foi obtida após a realização de dois ciclos de carga e descarga, tomando como valores de $F_{M10\%}$ e $F_{M50\%}$, respectivamente, os pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento retratado pela Figura 12.

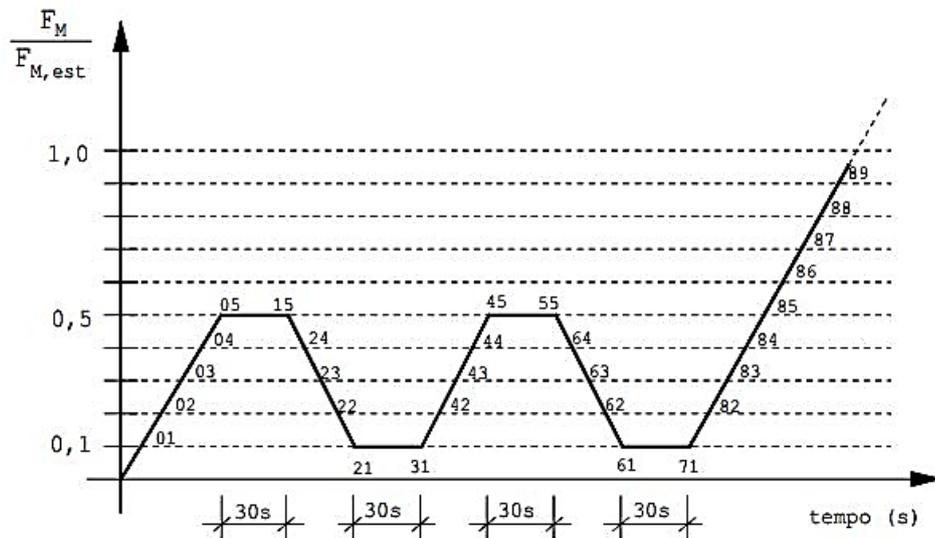
Figura 11: Diagrama carga *versus* deslocamento na flexão.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

³⁴ $F_{M,est}$ foi determinada de modo análogo ao especificado para $f_{c0,est}$ no subitem 3.1.1.

Figura 12: Diagrama de carregamento para determinação de E_M .



3.1.5 VALORES À CONDIÇÃO PADRÃO DE UMIDADE

Para a determinação das propriedades mecânicas deste trabalho, os corpos de prova foram ensaiados com teores de umidade próximos a 12%, sendo este o teor de equilíbrio da madeira e, portanto, de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), a condição padrão de referência para apresentação dos resultados experimentais.

As resistências e rigidezes obtidas com teores de umidade diferentes ao padrão ($10\% \leq U \leq 20\%$) foram corrigidas para a umidade de referência, respectivamente, por meio das Equações 3.7 e 3.8, conforme preconiza a normativa brasileira.

$$f_{12} = f_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.7)$$

$$E_{12} = E_{U\%} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.8)$$

Das Equações 3.7 e 3.8, f_{12} , $f_{U\%}$ e E_{12} , $E_{U\%}$ denotam, respectivamente, às resistências e as rigidezes correspondentes aos teores de umidade $U\%$ e 12%.

Com posse dos valores de resistência à condição padrão de umidade, seguindo as prescrições da norma brasileira, as espécies de madeiras foram categorizadas em classes de resistência, para o grupo das folhosas, de acordo com o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), expresso pela Equação 3.9, em que f_1, f_2, f_3 a f_n denotam os resultados amostrais, em ordem crescente, dos n exemplares ensaiados.

$$f_{c0,k} = \text{Máx} \left\{ \begin{array}{l} f_1 \\ 0,7 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \\ \left[2 \cdot \left(\frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} \right) - f_{n/2} \right] \cdot 1,1 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizada, inicialmente, na verificação das relações entre E_{t0} e E_{c0} ($E_{c0} = E_{t0}$) e E_M e E_{c0} ($E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$), propostas pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Acusada equivalência entre as médias (P-valor maior ou igual a 5% - hipótese nula - H_0), isso implica na boa precisão fornecida pelas relações estabelecidas pela norma brasileira, e em caso contrário (P-valor < 5% - hipótese alternativa - H_1), novos coeficientes devem ser determinados.

No caso da não equivalência estatística entre as relações investigadas, utilizou-se do método dos mínimos quadrados³⁵ (Equações 3.10 e 3.11), possibilitando determinar o coeficiente ótimo (λ) das relações entre os módulos de elasticidade ($E_{c0} = \lambda \cdot E_{t0}$ e $E_M = \lambda \cdot E_{c0}$), com o auxílio do método de Newton com aproximação quadrática (Equação 3.12), ficando a convergência para solução ótima independente da escolha da estimativa inicial λ_0 do método iterativo.

$$f(\lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (E_{c0i} - \lambda \cdot E_{t0i})^2 \quad (3.10)$$

$$f(\lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (E_{Mi} - \lambda \cdot E_{c0i})^2 \quad (3.11)$$

$$\lambda = \lambda_0 - \left(\frac{d^2}{d\lambda^2} [f(\lambda_0)] \right)^{-1} \cdot \frac{d}{d\lambda} [f(\lambda_0)] \quad (3.12)$$

³⁵ Adotado nos estudos de: Christoforo *et al.* (2012), Icimoto *et al.* (2015), Ferro *et al.* (2015), Lahr *et al.* (2017), Almeida *et al.* (2018) e Christoforo *et al.* (2019).

Como alternativa as equações simplificadas prescritas pela norma brasileira, modelos de regressão (Equações 3.13 a 3.16), a dois parâmetros (a e b), foram adotados, visando a estimativa das rigidezes (E_{c0} , E_{t0} e E_M - variáveis dependentes - y) em função da $\rho_{ap,12\%}$ (variável independente - x).

$$y = a + b \cdot x \quad [\text{Linear}] \quad (3.13)$$

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \quad [\text{Exponencial}] \quad (3.14)$$

$$y = a + b \cdot \ln(x) \quad [\text{Logarítmico}] \quad (3.15)$$

$$y = a \cdot x^b \quad [\text{Geométrico}] \quad (3.16)$$

Os modelos de regressão, fundamentados na ANOVA ao nível de 5% de significância, foram utilizados considerando o agrupamento das espécies e os respectivos valores médios das propriedades. Pela ANOVA dos modelos de regressão, constituiu-se em hipótese nula (H_0) a não representatividade dos modelos testados e em hipótese alternativa (H_1) a representatividade.

Valores de P-valor superior ao nível de significância adotado ($P\text{-valor} > 0,05$) implicam em aceitar H_0 (o modelo de regressão testado não é representativo - variações de x não são capazes de explicar as variações de y), rejeitando-a em caso contrário ($P\text{-valor} \leq 0,05$ - o modelo de regressão testado é representativo).

Em adição a ANOVA, obteve-se os valores do coeficiente de determinação (R^2) possibilitando avaliar a qualidade do ajuste obtido, elegendo dentre os modelos representativos ($P\text{-valor} \leq 0,05$) o mais preciso, ou seja, o que melhor descreve as variações da variável dependente y em função da variável independente x.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos e discutidos em subitens. O primeiro apresenta os valores característicos das resistências à compressão paralela às fibras e o enquadramento das espécies nas classes de resistência da ABNT NBR 7190 (1997). Em seguida, são apresentados e discutidos os valores médios da densidade aparente (a 12% de umidade), assim como os valores das propriedades de rigidez estudadas, as quais foram discutidas em conjunto. Por fim, tem-se as análises estatísticas, as comparações com as equações preconizadas pela norma brasileira e os modelos para estimativa das propriedades de rigidez em função da densidade aparente.

4.1 RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

A Tabela 32 apresenta os resultados das resistências características à compressão paralela às fibras, determinados conforme 3.1.1 e 3.1.4, e os respectivos enquadramentos das espécies nas classes de resistência do grupo das folhosas.

Tabela 32: Categorização das madeiras nas classes de resistência do grupo das folhosas.

Espécie	$f_{c0,k}$ (MPa)	Classe de Resistência
Cedroarana	24,84	C20
Cambará rosa	25,67	C20
Cedro	29,36	C20
Canafístula	31,83	C30
Angelim araroba	44,24	C40
Copaíba	45,53	C40
Louro verde	49,14	C40
Guaíçara	60,10	C60
Oiticica amarela	62,41	C60
Maçaranduba	78,20	C60

Os valores de $f_{c0,k}$ obtidos, neste estudo, para as madeiras de Cedroarana (24,84 MPa), Cambará rosa (25,67 MPa) e Cedro (29,36 MPa), próximos aos obtidos por Dias e Lahr

(2004) [Cedroarana (28,90 MPa), Cambará rosa (27,20 MPa) e Cedro (27,90 MPa)], enquadraram as espécies na classe de resistência C20. Tais classificações também foram constatadas no estudo de Christoforo *et al.* (2014). A madeira de Cambará rosa obteve mesma classificação nos estudos de Icimoto *et al.* (2015), Ferro *et al.* (2015), Lahr *et al.* (2016), Lahr *et al.* (2017) e Morales *et al.* (2018), enquanto Moreira *et al.* (2017) e Almeida *et al.* (2018b) classificaram, respectivamente, as madeiras de Cedroarana e Cedro na classe de resistência C30.

A madeira de Canafístula, assim como nos estudos de Dias e Lahr (2004) e Almeida *et al.* (2016), foi e classificada na classe de resistência C30. Para a mesma espécie, classificação distinta foi obtida por Faria *et al.* (2012) (C40) e Lahr *et al.* (2017) (C50).

As madeiras de Angelim araroba, Copaíba e Louro, classificadas neste estudo como C40, apresentaram valores de $f_{c0,k}$ próximos aos determinados por Dias e Lahr (2004) [Angelim araroba (45,30 MPa), Copaíba (44,10 MPa) e Louro verde (42,10 MPa)]. Christoforo *et al.* (2014), Almeida *et al.* (2016) e Aquino *et al.* (2018a), obtiveram mesma classificação, respectivamente, para as madeiras de Louro verde, Angelim araroba e Copaíba. Todavia, no estudo de Faria *et al.* (2012), a madeira de Copaíba foi enquadrada na classe de resistência C30.

No que diz respeito as madeiras de Guaiçara, Oiticica amarela e Maçaranduba, os valores de $f_{c0,k}$, determinados neste estudo, conduziram a classificação das espécies na classe de resistência C60. Para a madeira de Guaiçara, Dias e Lahr (2004) obtiveram $f_{c0,k}$ igual a 58,9 MPa, o que acarretou a classificação da espécie na classe C40, haja vista a inexistência da classe C50 na ABNT NBR 7190 (1997). Além disso, os autores enquadraram as madeiras de Oiticica amarela e Maçaranduba nas classes de resistência C60, com $f_{c0,k}$ correspondentes, respectivamente, a 73,50 MPa e 79,50 MPa. Jesus *et al.* (2015), obtiveram, para a madeira de Oiticica amarela, $f_{c0,k}$ igual a 59,14 MPa e enquadraram a espécie na classe C50 (arbitrada pelos autores), mesma classificação foi determinada por Moreira *et al.* (2017) para a madeira de Guaiçara. Por fim, Faria *et al.* (2012) classificaram a madeira de Maçaranduba na classe de resistência C60.

Conforme apresentado, as classificações das dez espécies de madeira, aqui estudadas, foram condizentes com as presentes na literatura e contemplaram todas as classes de resistência da ABNT NBR 7190 (1997), evidenciando a abrangência e relevância deste trabalho.

4.2 DENSIDADE APARENTE A 12% DE UMIDADE

A Tabela 33 apresenta os valores médios ($\rho_{ap,12\%}$), mínimos (Mín), máximos (Máx) e o coeficiente de variação (Cv) das densidades aparente, a 12% de umidade, das dez espécies de madeira estudadas.

Tabela 33: Resultado das densidades das espécies estudadas.

Espécie	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	Cv (%)	Mín (kg/m ³)	Máx (kg/m ³)
Cedroarana	540	7	480	610
Cambará rosa	640	5	580	700
Cedro	530	5	470	580
Canafístula	890	9	770	990
Angelim araroba	720	5	650	780
Copaíba	710	4	680	790
Louro verde	700	7	640	800
Guaíçara	1030	2	1000	1060
Oiticica amarela	730	3	700	750
Maçaranduba	1180	7	990	1250

As espécies Cedroarana e Cedro, apresentaram valores próximos de $\rho_{ap,12\%}$ (540 kg/m³ e 530 kg/m³, respectivamente) e condizentes aos determinados por Dias e Lahr (2004) (566 kg/m³), IPT (2013) (520 kg/m³) e Aquino *et al.* (2018b) (570 kg/m³) para a madeira de Cedroarana e por Dias e Lahr (2004) (512 kg/m³) e Christoforo *et al.* (2014) (500 kg/m³) para a madeira de Cedro. Gonzalez e Gonçalves (2001) obtiveram, para a madeira de Cedroarana, $\rho_{ap,12\%}$ (470 kg/m³) inferior a determinada neste estudo, enquanto a norma brasileira apresenta, para a madeira de Cedro, valor próximo (500 kg/m³).

Morales *et al.* (2018) e Lahr *et al.* (2016) determinaram, para a madeira de Cambará, valores de $\rho_{ap,12\%}$ (670 kg/m³ e 680 kg/m³, respectivamente), próximos aos determinados neste estudo. Para a mesma espécie, Grobério e Lahr (2002) (540 kg/m³) e Logsdon (2003) (569 kg/m³) obtiveram valor inferior de $\rho_{ap,12\%}$, enquanto Icimoto *et al.* (2015) (750 kg/m³) determinaram valor superior.

O valor de $\rho_{ap,12\%}$ obtido neste estudo (890 kg/m³), para a madeira de Canafístula, foi condizente ao determinado por Almeida *et al.* (2016) (860 kg/m³) e ao apresentado pela norma brasileira (871 kg/m³). Ambos compreendidos na faixa de valores determinada neste estudo.

As madeiras de Angelim araroba (720 kg/m³), Copaíba (710 kg/m³), Louro verde (700 kg/m³) e a Oiticica amarela (730 kg/m³), apresentaram valores próximos de $\rho_{ap,12\%}$. O valor de

$\rho_{ap,12\%}$ determinado para a madeira de Angelim araroba, foi condizente com os valores determinados por Grobério e Lahr (2002) (680 kg/m³), Dias e Lahr (2004) (674 kg/m³), Christoforo *et al.* (2016) (690 kg/m³) e Almeida *et al.* (2016) (700 kg/m³). Para a mesma espécie a norma brasileira apresenta valor próximo de $\rho_{ap,12\%}$ (688 kg/m³).

Valores próximos de $\rho_{ap,12\%}$ foram obtidos por Dias e Lahr (2004) (695 kg/m³), Jesus *et al.* (2015) (796 kg/m³) e Aquino *et al.* (2018a) (700 kg/m³) para a madeira de Copaíba, por Christoforo *et al.* (2014) (680 kg/m³) para a madeira de Louro verde e por Dias e Lahr (2004) (756 kg/m³) e Jesus *et al.* (2015) (696 kg/m³) para a madeira de Oiticica amarela. Para as madeiras de Louro verde e Oiticica amarela, a norma brasileira apresenta valores de $\rho_{ap,12\%}$ (respectivamente: 684 kg/m³ e 756 kg/m³) próximos aos obtidos neste estudo.

As madeiras de Guaiçara e Maçaranduba apresentaram valores próximos de $\rho_{ap,12\%}$ (1030 kg/m³ e 1180 kg/m³, respectivamente). Para a madeira de Guaiçara, Grobério e Lahr (2002) (1090 kg/m³) e Lahr *et al.* (2010) (1080 kg/m³), determinaram valores próximos, enquanto Dias e Lahr (2004) (995 kg/m³) e a norma brasileira (825 kg/m³) apresentaram valores inferiores de $\rho_{ap,12\%}$. Para a madeira de Maçaranduba, Lahr *et al.* (2010) e Jesus *et al.* (2015) obtiveram valores próximos (1140 kg/m³ e 1019 kg/m³, respectivamente) ao determinado neste estudo. O mesmo ocorre com o valor apresentado pela norma brasileira (1143 kg/m³).

4.3 PROPRIEDADES DE RIGIDEZ

A Tabela 34 apresenta os valores médios (X_m), coeficientes de variação (C_v), os valores máximos (Máx) e mínimos (Mín) das propriedades de rigidez (E_{c0} , E_{i0} e E_M) obtidos experimentalmente para cada uma das espécies investigadas.

Tabela 34: Resultados das rigidezes das espécies de madeira estudadas.

Propriedades de rigidez	Cedroarana				Cambará rosa			
	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
E_{c0}	10394	13	8484	12913	12578	18	9635	16790
E_{t0}	10967	15	8113	13304	12636	14	10692	15728
E_M	10119	11	8404	12324	12530	8	10161	13978
Propriedades de rigidez	Cedro				Canafístula			
	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
E_{c0}	8270	14	6515	10915	14175	19	9882	17982
E_{t0}	9523	20	6743	13499	13665	17	9021	17034
E_M	8717	20	6591	12384	14326	16	10537	18293
Propriedades de rigidez	Angelim araroba				Copaíba			
	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
E_{c0}	12714	19	9850	18308	12662	17	9416	16018
E_{t0}	12371	16	9383	16093	13188	12	10591	15482
E_M	12633	22	8126	17392	12617	11	10164	14554
Propriedades de rigidez	Louro verde				Guaíçara			
	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
E_{c0}	14649	16	10577	18929	15148	16	11073	17959
E_{t0}	14026	17	11339	19467	16055	13	12423	19702
E_M	15178	21	9689	19487	15132	11	12521	17225
Propriedades de rigidez	Oiticica amarela				Maçaranduba			
	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)	X_m (MPa)	C_v (%)	Mín (MPa)	Máx (MPa)
E_{c0}	14277	9	11994	16889	21681	12	17832	26488
E_{t0}	14235	10	12466	16661	20933	13	14787	23810
E_M	14057	9	12281	16871	19934	12	17743	24528

A madeira de Cedroarana apresentou valor do E_M correspondente a 10119 MPa, com variações de 8404 MPa a 12324 MPa. Gonçalves e Gonçalves (2001) determinaram valor médio de E_M igual a 11500 MPa, contemplado na faixa de valores obtidos neste estudo. O E_M , assim como os demais valores das propriedades de rigidez obtidos [E_{c0} (10394 MPa), E_{t0} (10967 MPa)], foram condizentes aos determinados por Grobério e Lahr (2002) [E_{c0} (10252,4 MPa), E_{t0} (10969,7 MPa) e E_M (10032,4 MPa)]. Para a mesma espécie, o resultado obtido do E_{c0} (10394 MPa) diverge do encontrado por Moreira *et al.* (2017) (8962 MPa).

Para a madeira de Cambará os valores de E_{c0} (12578 MPa), E_{t0} (12636 MPa) e E_M (12530 MPa), determinados neste estudo, foram próximos aos apresentados por Morales *et al.* (2018) [E_{c0} (12708 MPa), E_{t0} (12509 MPa) e E_M (11564 MPa)], por Lahr *et al.* (2016) [E_{c0} (12967 MPa), E_{t0} (12764 MPa) e E_M (12376 MPa)], por Moreira *et al.* (2017) [E_{c0} (12967 MPa)] e por Icimoto *et al.* (2015) [E_M (12150,50 MPa)]. Considerando a mesma espécie, valores

superiores de E_{c0} foram determinados por Almeida *et al.* (2018b), em torno de 13000 MPa, com variações de 11000 MPa a 15000 MPa, e por Ferro *et al.* (2015) (13867,50 MPa). Para esta propriedade a norma brasileira apresenta valor inferior [E_{c0} (9067 MPa)]. Valores inferiores também foram determinados por Grobério e Lahr (2002) [E_{c0} (8782,8 MPa), E_{t0} (9172,3 MPa) e E_M (8841,9 MPa)] e por Araújo (2007) para o E_M (10787 MPa).

Dias e Lahr (2004) determinaram para a madeira de Cedro valores médios de 8358 MPa, 9851 MPa e 8866 MPa, correspondentes respectivamente a E_{c0} , E_{t0} e E_M . Tais valores foram próximos aos obtidos neste estudo [E_{c0} (8270 MPa), E_{t0} (9523 MPa) e E_M (8717 MPa)], assim como os valores de E_{c0} apresentados por Moreira *et al.* (2017) (8354 MPa) e pela norma brasileira (8058 MPa). Para a mesma espécie, valores superiores de E_{c0} foram determinados nos estudos de Ferro *et al.* (2015) (11368 MPa) e Almeida *et al.* (2018b) (13000 MPa), sendo que neste os valores variaram de 11000 MPa a 14500 MPa.

Em relação aos valores das propriedades de rigidez da madeira de Canafístula [E_{c0} (14175 MPa), E_{t0} (13665 MPa) e E_M (14326 MPa)], resultados próximos foram determinados por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (14613 MPa), E_{t0} (14087 MPa) e E_M (14769 MPa)], por Lahr *et al.* (2017) [E_M (14377 MPa)] e também pela norma brasileira [E_{c0} (14613 MPa)]. No que diz respeito ao E_{t0} , o valor determinado neste estudo mostrou-se inferior ao encontrado por Faria *et al.* (2012) (15281,7 MPa).

Os valores das propriedades de rigidez da madeira de Angelim araroba, determinados no presente estudo [E_{c0} (12714 MPa), E_{t0} (12371 MPa) e E_M (12633 MPa)], mostraram-se próximos aos valores encontrados por Grobério e Lahr (2002) [E_{c0} (12525,4 MPa), E_{t0} (11885,4 MPa) e E_M (11943,3 MPa)] e por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (12587 MPa), E_{t0} (11661 MPa) e E_M (11457 MPa)]. No que diz respeito ao E_{c0} , o valor determinado foi próximo ao apresentado pela norma brasileira (12876 MPa).

Em relação a madeira de Copaíba, os valores de E_{c0} (12662 MPa), E_{t0} (13188 MPa) e E_M (12617 MPa), determinados neste estudo, foram próximos aos encontrados por Araújo (2007) [E_M (12062 MPa)], por Jesus *et al.* (2015) [E_{c0} (12143 MPa)], por Aquino *et al.* (2018a) [E_{c0} (12845 MPa), E_{t0} (13382 MPa) e E_M (12440 MPa)] e inferiores aos obtidos por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (14012 MPa), E_{t0} (14627 MPa) e E_M (13572 MPa)]. Quanto ao E_{t0} , o valor determinado, com variações de 10591 MPa a 15482 MPa, foi superior ao encontrado por Faria *et al.* (2012) (11957,7 MPa).

Para a madeira de Louro verde, os valores de E_{c0} (14649 MPa), E_{t0} (14026 MPa) e E_M (15178 MPa), determinados neste estudo, foram superiores aos encontrados por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (13536 MPa), E_{t0} (12851 MPa) e E_M (13556 MPa)] e por Araújo (2007) [E_M (14024 MPa)]. No que diz respeito ao E_{c0} , a norma brasileira apresenta valor próximo (14185 MPa).

Os valores das propriedades de rigidez da madeira de Guaíçara, obtidos no presente estudo [E_{c0} (15148 MPa), E_{t0} (16055 MPa) e E_M (15132 MPa)], mostraram-se próximos aos encontrados por Grobério e Lahr (2002) para E_{c0} (15301,7 MPa), E_{t0} (16304,7 MPa) e E_M (15126,4 MPa) e por Moreira *et al.* (2017) para E_{c0} (15301 MPa). Para a mesma espécie, valores inferiores foram apresentados por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (14027 MPa), E_{t0} (14946 MPa) e E_M (13866 MPa)] e pela norma brasileira [E_{c0} (14624 MPa)].

Em relação às propriedades de rigidez da madeira de Oiticica amarela, o E_{c0} apresentou valor de 14277 MPa, com mínimo e máximo correspondentes, respectivamente, a 11994 MPa e 16889 MPa. Para a mesma propriedade, Jesus *et al.* (2015) determinaram valor superior (17512 MPa), enquanto a norma brasileira apresenta valor próximo (14719 MPa). No que diz respeito ao E_M , o valor determinado (14057 MPa) mostrou-se próximo ao definido por Dias e Lahr (2004) (14491 MPa) e superior ao encontrado por Araújo (2007) (12160 MPa). O resultado do E_{t0} (14235 MPa) foi condizente ao valor de 14.675 MPa apresentado por Dias e Lahr (2004).

Para a madeira de Maçaranduba, os valores determinados neste estudo [E_{c0} (21681 MPa), E_{t0} (20933 MPa) e E_M (19934 MPa)] mostraram-se próximos aos determinados por Dias e Lahr (2004) [E_{c0} (21900 MPa), E_{t0} (20267 MPa) e E_M (18184 MPa)]. Para a mesma espécie, a norma brasileira apresenta valor próximo de E_{c0} (22733 MPa), enquanto valores inferiores foram determinados por Faria *et al.* (2012) (17755 MPa) e por Jesus *et al.* (2015) (18620 MPa), para E_{t0} e E_{c0} , respectivamente.

As comparações das propriedades apresentadas na Tabela 34 com os valores determinados na literatura validam os resultados obtidos neste trabalho. Ressalta-se, contudo, que pequenas dispersões nos resultados podem ser justificadas, em partes, pela forma como os ensaios experimentais são executados, pelo modelo de cálculo adotado para determinação dos resultados e pela variabilidade intrínseca do material.

4.4 RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DE RIGIDEZ

Nas Tabelas 35 e 36 são apresentados os resultados da ANOVA das relações $E_{c0} = E_{t0}$ e $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$, respectivamente.

Tabela 35: Resultados da ANOVA (5% de significância) para a relação $E_{c0} = E_{t0}$.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
$E_{c0} = E_{t0}$	1	60506	60506	0,00	0,948
Erro	238	3388077580	14235620		
Total	239	3388138086			

GL = graus de liberdade; SQ (Aj.) = soma dos quadrados ajustados; QM (Aj) = média dos quadrados ajustados.

Tabela 36: Resultados da ANOVA (5% de significância) para a relação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
$E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$	1	81761550	81761550	6,48	0,012
Erro	238	3001462068	12611185		
Total	239	3083223618			

GL = graus de liberdade; SQ (Aj.) = soma dos quadrados ajustados; QM (Aj) = média dos quadrados ajustados.

Da Tabela 35, verifica-se que a média dos grupos E_{c0} e E_{t0} são estatisticamente equivalentes ($P\text{-valor} \geq 0,05$), o que implica a boa precisão da equação $E_{c0} = E_{t0}$ proposta pela norma brasileira. Por outro lado, a ANOVA acusou diferença significativa nas médias entre E_M e $0,90 \cdot E_{c0}$ ($P\text{-valor} < 0,05$ – Tabela 36), o que implica que o coeficiente de 0,90 da equação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$ não se apresenta como estimativa precisa na obtenção do módulo de elasticidade na flexão estática.

Constatada a não equivalência entre E_M e $0,90 \cdot E_{c0}$, o método dos mínimos quadrados (Equação 3.8 e 3.9) foi utilizado para a determinação do coeficiente ótimo (λ) da relação entre E_M e E_{c0} ($E_M = \lambda \cdot E_{c0}$). A Tabela 37 apresenta o resultado de λ considerando cada espécie individualmente e o conjunto de todas as espécies estudadas.

Tabela 37: Resultado do coeficiente ótimo (λ) da relação entre E_M e E_{c0} para cada espécie e para o conjunto de todas as espécies estudadas.

Espécie	λ [$E_M = \lambda \cdot E_{c0}$]
Cedroarana	0,97
Cambará rosa	1,00
Cedro	1,05
Canafístula	1,01
Angelim araroba	0,99
Copaíba	1,00
Louro verde	1,04
Guaíçara	1,00
Oiticica amarela	0,98
Maçaranduba	0,92
Todas as espécies	0,98

O coeficiente ótimo obtido para o conjunto envolvendo todas as espécies, apresentado na Tabela 37, corresponde a 0,98, sendo 8,89% superior ao atual valor de 0,90 apresentado pela normativa brasileira. A Equação 4.1 apresenta a relação de equivalência entre o E_M e E_{c0} obtida neste estudo.

$$E_M = 0,98 \cdot E_{c0} \quad (4.1)$$

Em termos de projeto, nas verificações do Estado Limite de Serviço (ELS), a adoção dos valores do E_{c0} determinados, a partir do E_M , por meio da Equação 4.1, conduzem a deslocamentos verticais maiores em relação aos calculados adotando-se os valores de E_{c0} obtidos pela equação prescrita pela norma brasileira ($E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$).

Em relação as verificações de estabilidade, em atendimento ao Estado Limite Último (ELU), os valores do E_{c0} , obtidos pela Equação 4.1, conduzem a valores maiores de carga crítica [carga crítica de Euler, denominada F_E pela ABNT NBR 7190 (1997)] quando comparado com os valores de F_E determinados com a adoção do E_{c0} obtido por meio da equação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$.

Desse modo, tanto para o ELS quanto para o ELU, o emprego da Equação 4.1 conduz a elementos estruturais de maior rigidez, e, portanto, a favor da segurança.

Cabe destacar que os resultados obtidos, para as relações entre propriedades de rigidez, não foram comparados com documentos normativos internacionais, uma vez que as relações determinadas dizem respeito, especificamente, a madeiras folhosas.

4.5 ESTIMATIVAS DAS RIGIDEZES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

O resultado dos modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmico e geométrico) para a estimativa do E_{c0} em função da $\rho_{ap,12\%}$ estão apresentados nas Tabelas 38.

Tabela 38: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_{c0} em função da $\rho_{ap,12\%}$.

Modelos	Parâmetros		P-valor	R ² (%)
	a	b		
$E_{c0} = a + b \cdot (\rho_{ap,12\%})$ [Linear]	2098	15111	0,000	80,71
$E_{c0} = a \cdot e^{b \cdot (\rho_{ap,12\%})}$ [Exponencial]	5918	1,06	0,000	76,90
$E_{c0} = a + b \cdot \ln(\rho_{ap,12\%})$ [Logarítmico]	17285	12147	0,000	80,03
$E_{c0} = a \cdot (\rho_{ap,12\%})^b$ [Geométrico]	17213	0,87	0,000	79,92

As Figuras 13, 14, 15 e 16, ilustram, respectivamente, os ajustes obtidos pelos modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$.

Figura 13: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$.

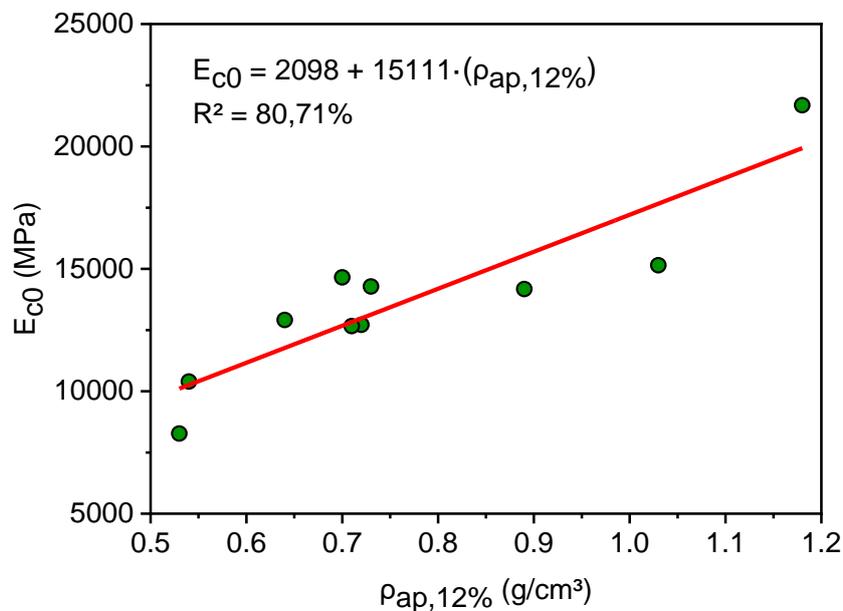


Figura 14: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$.

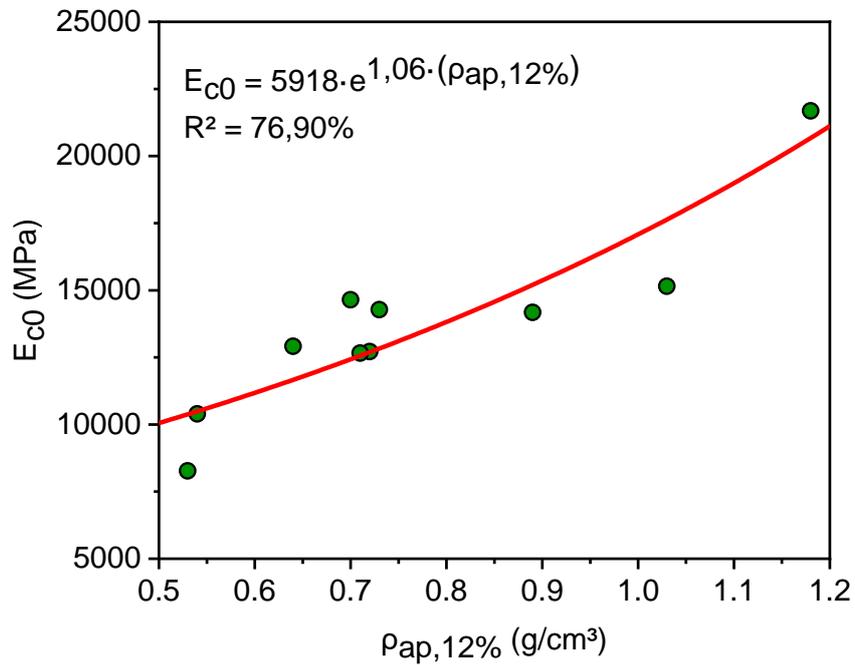


Figura 15: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$.

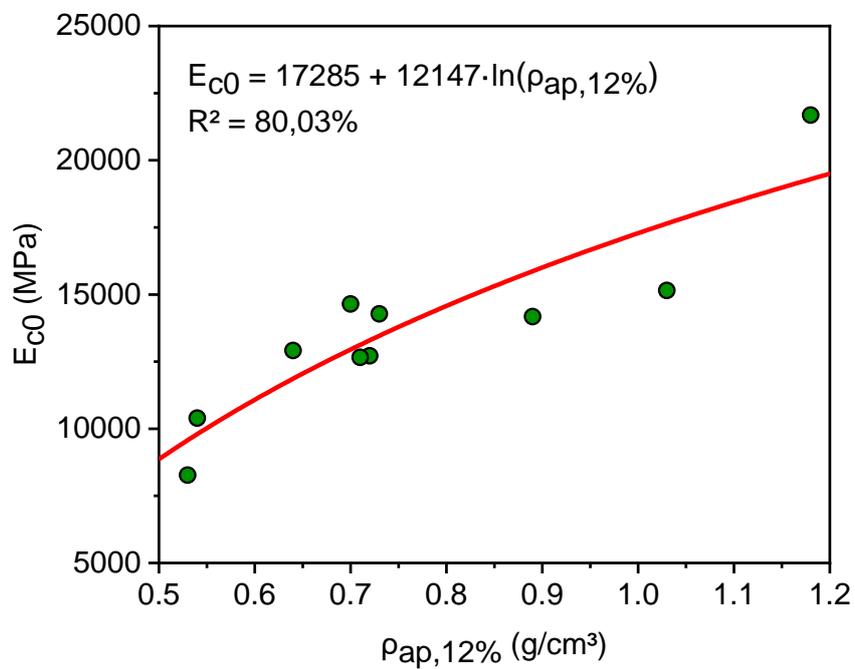
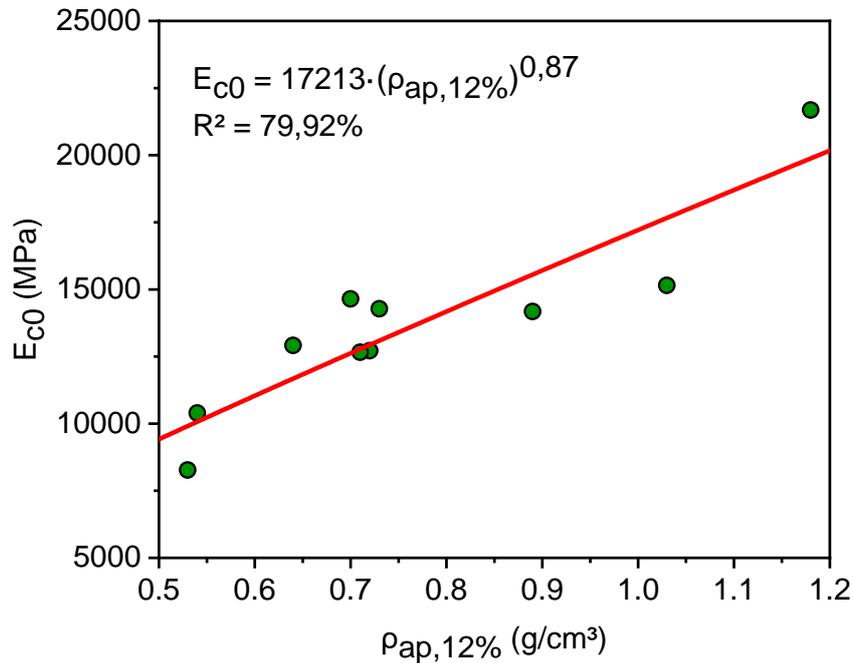


Figura 16: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrico na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$.



A Tabela 39 apresenta o resultado dos modelos de regressão para a estimativa do E_{t0} em função da $\rho_{ap,12\%}$.

Tabela 39: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_{t0} em função da $\rho_{ap,12\%}$.

Modelos	Parâmetros		P-valor	R ² (%)
	a	b		
$E_{t0} = a + b \cdot (\rho_{ap,12\%})$ [Linear]	3378	13623	0,000	84,95
$E_{t0} = a \cdot e^{b(\rho_{ap,12\%})}$ [Exponencial]	6661	0,93	0,000	83,46
$E_{t0} = a + b \cdot \ln(\rho_{ap,12\%})$ [Logarítmico]	17036	10839	0,000	82,52
$E_{t0} = a \cdot (\rho_{ap,12\%})^b$ [Geométrico]	16912	0,75	0,000	84,08

Os ajustes obtidos pelos modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$, estão ilustrados pelas Figuras 17, 18, 19 e 20, respectivamente.

Figura 17: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$.

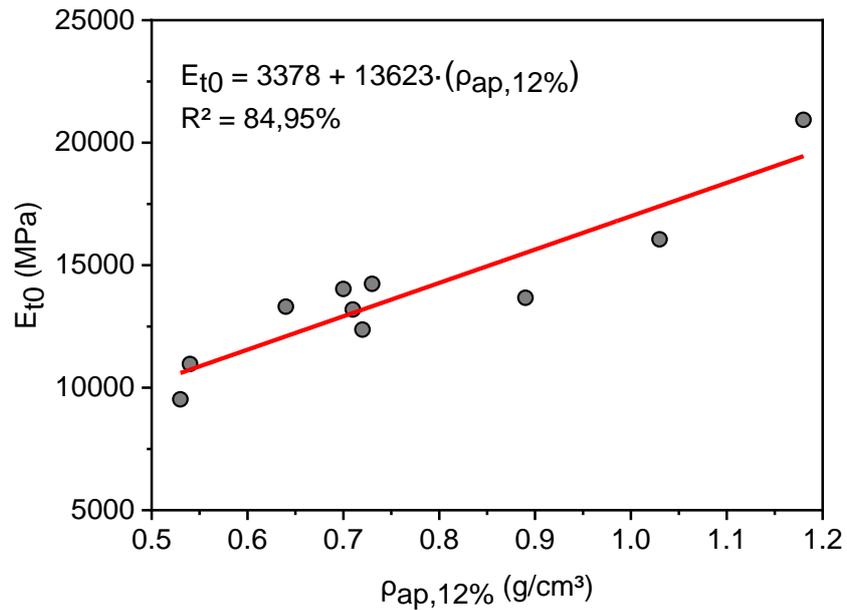


Figura 18: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$.

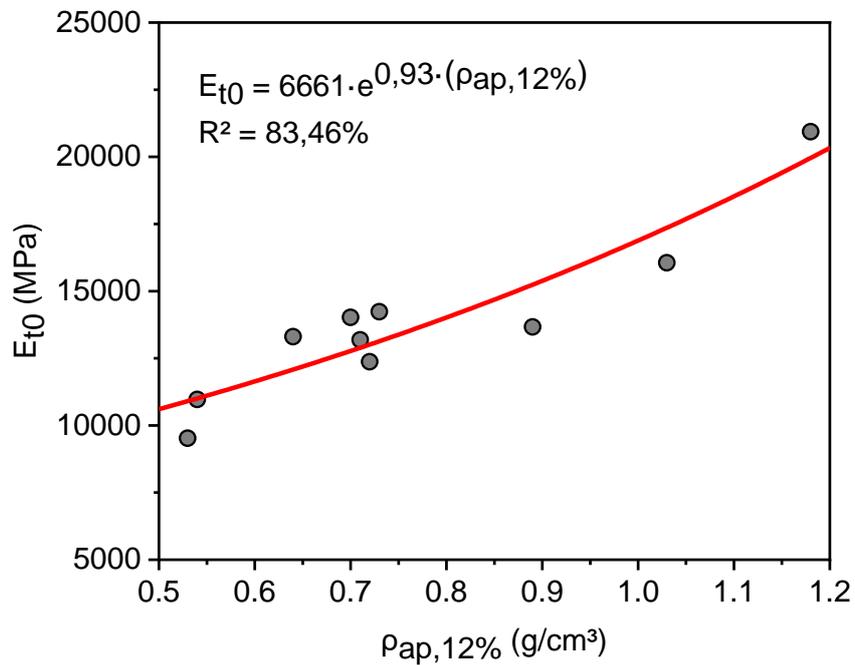


Figura 19: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$.

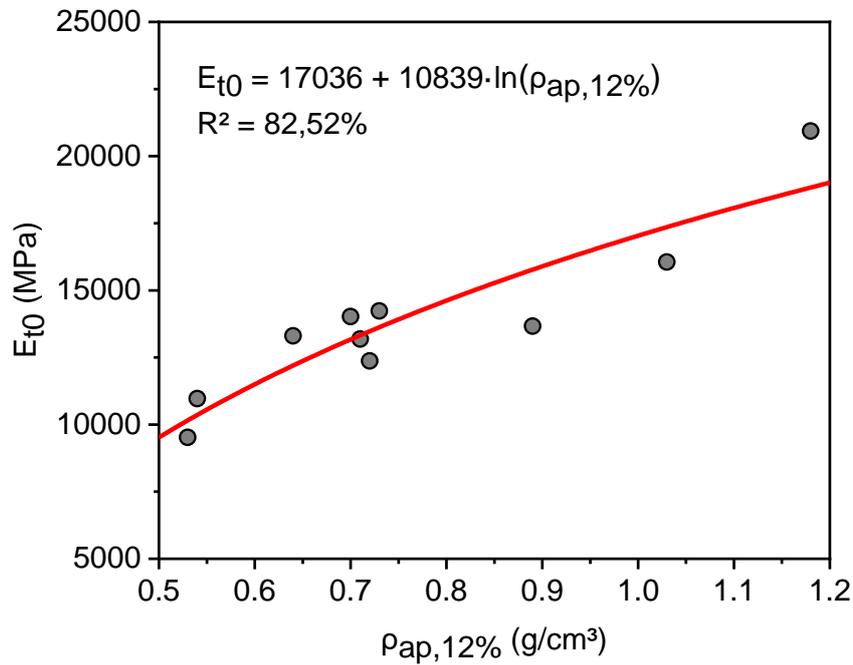
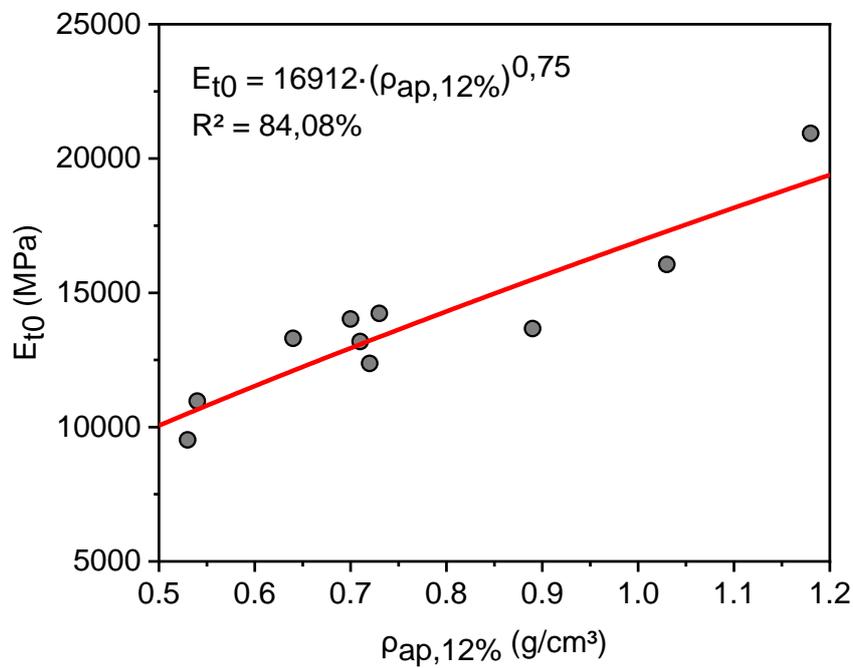


Figura 20: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrica na estimativa do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$.



O resultado dos modelos de regressão para a estimativa do E_M em função da $\rho_{ap,12\%}$ estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa do E_M em função da $\rho_{ap,12\%}$.

Modelos	Parâmetros		P-valor	R ² (%)
	a	b		
$E_M = a + b \cdot (\rho_{ap,12\%})$ [Linear]	3284	13324	0,000	81,37
$E_M = a \cdot e^{b(\rho_{ap,12\%})}$ [Exponencial]	6291	0,97	0,000	77,33
$E_M = a + b \cdot \ln(\rho_{ap,12\%})$ [Logarítmico]	16713	10839	0,000	82,62
$E_M = a \cdot (\rho_{ap,12\%})^b$ [Geométrico]	16725	0,80	0,000	81,65

As Figuras 21, 22, 23 e 24, ilustram, respectivamente, os ajustes obtidos pelos modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, na estimativa do E_{10} em função da $\rho_{ap,12\%}$.

Figura 21: Ajuste obtido pelo modelo de regressão linear na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$.

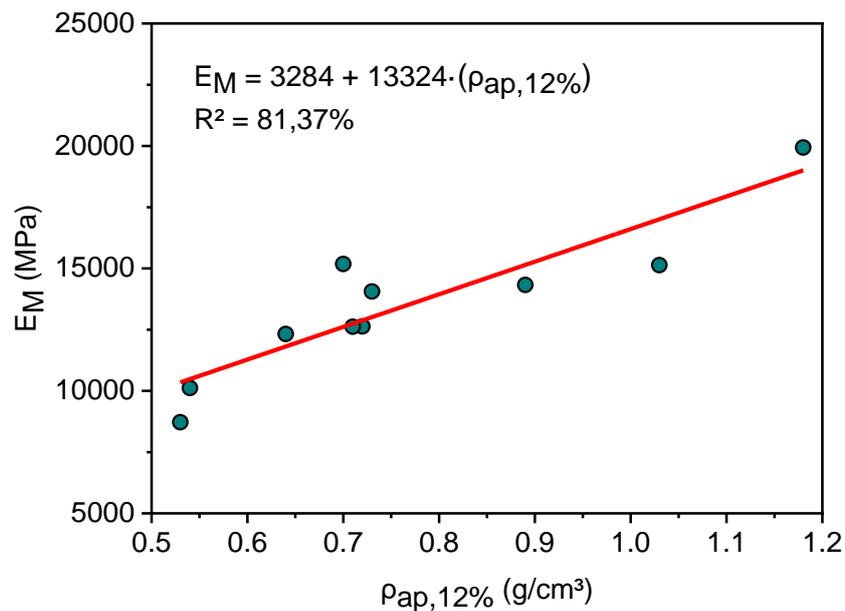


Figura 22: Ajuste obtido pelo modelo de regressão exponencial na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$.

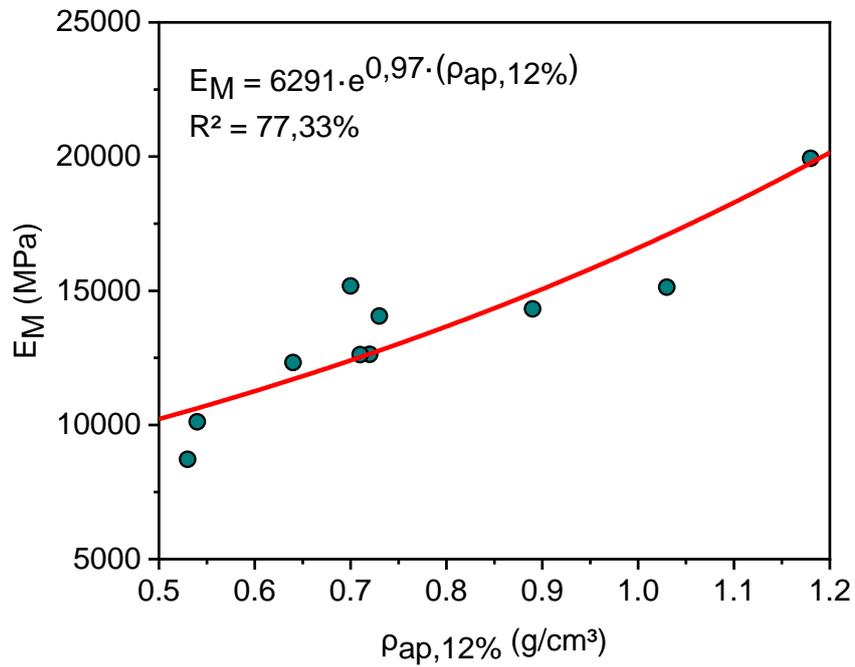


Figura 23: Ajuste obtido pelo modelo de regressão logarítmico na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$.

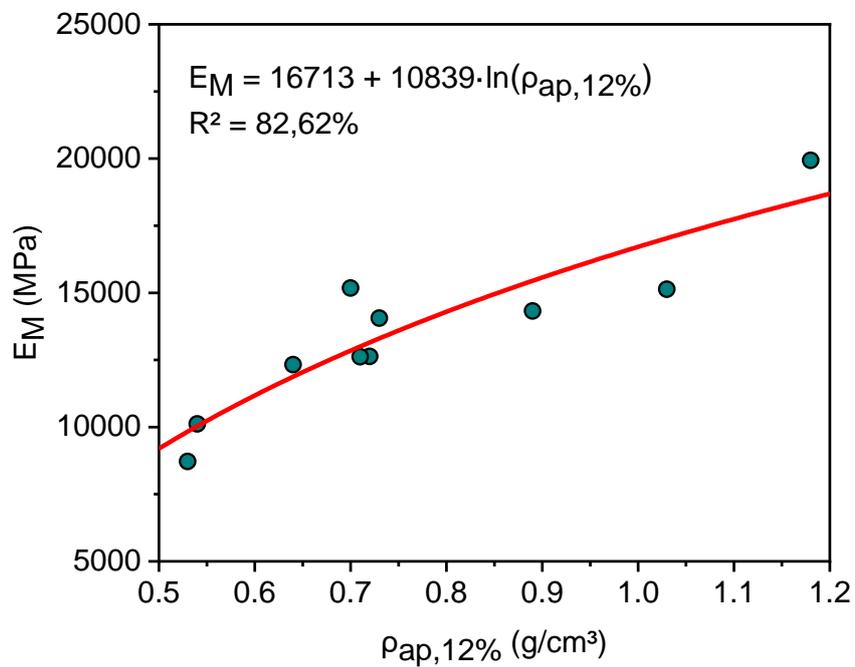
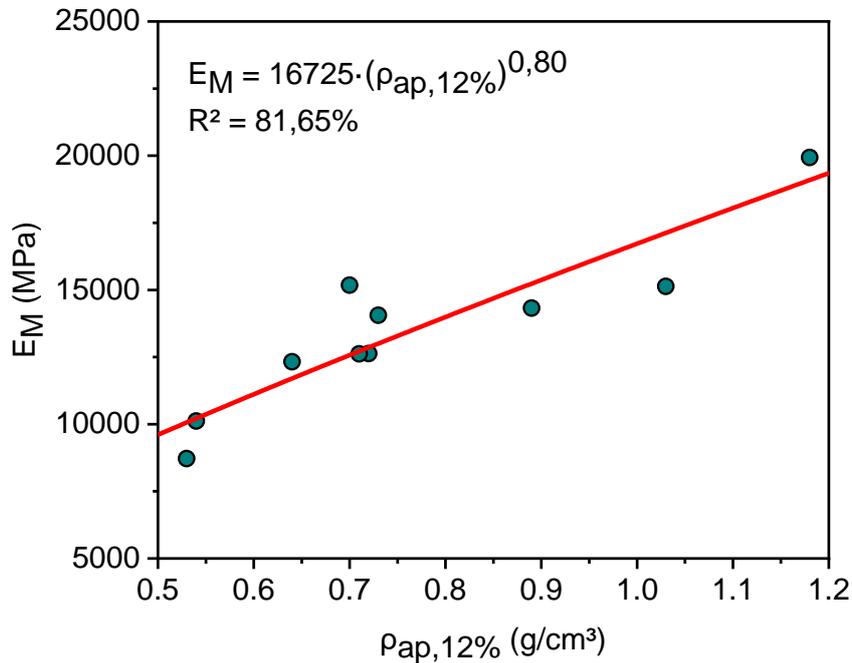


Figura 24: Ajuste obtido pelo modelo de regressão geométrico na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$.



Das Tabelas 38, 39 e 40, todos os ajustes testados foram significativos (P -valor $< 0,05$) e com boa precisão. Na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$ e do $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$ o modelo de regressão linear resultou no melhor ajuste (respectivamente: $R^2 = 80,71\%$ - Figura 13 e $R^2 = 84,95\%$ - Figura 17); enquanto, na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$ o modelo logarítmico mostrou-se o mais preciso ($R^2 = 82,62\%$ - Figura 23).

Alguns autores também obtiveram correlações significativas e precisas entre propriedades de rigidezes e a $\rho_{ap,12\%}$. Dentre os modelos de regressão testados por Dias e Lahr (2004)³⁶, o geométrico apresentou os melhores ajustes, com R^2 igual a 64,91%, 68,67% e 71,31% na estimativa do $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$, $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$ e $E_M(\rho_{ap,12\%})$, respectivamente.

Igartuá *et al.* (2015)³⁷ obtiveram, por meio do modelo de regressão linear, R^2 igual a 70,18% na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$. Christoforo *et al.* (2017)³⁸, em estudo sobre a caracterização completa da madeira de Castelo (*Calycophyllum multiflorum*), determinaram ajustes significativos para as relações: $E_{c0}(\rho_{ap,12\%})$, $E_{t0}(\rho_{ap,12\%})$ e $E_M(\rho_{ap,12\%})$. O melhor ajuste foi obtido na estimativa do $E_M(\rho_{ap,12\%})$ pelo modelo de regressão exponencial, com R^2 igual a 75,48%.

³⁶ Citado no item 2.2.

³⁷ Citado no item 2.2.

³⁸ Citado no item 2.2.

Por fim, nos estudos de Silva *et al.* (2018)³⁹ o modelo de regressão linear mostrou-se o mais preciso nas estimativas do E_{c0} , E_{t0} e E_M em função da $\rho_{ap,12\%}$, com R^2 igual a 75,69%, 75,65% e 74,62%, respectivamente.

³⁹ Citado no item 2.2.

5. CONCLUSÕES

Este estudo contribuiu para ampliar o conhecimento quanto às relações entre propriedades de rigidez das madeiras folhosas e quanto às estimativas de tais propriedades em função da densidade aparente, subsidiando a tomada de decisão sobre os parâmetros normativos a serem adotados. Considerando os resultados obtidos, pôde-se concluir:

- (a) A ANOVA acusou equivalência entre E_{c0} e E_{t0} , evidenciando a boa precisão da equação $E_{c0} = E_{t0}$. Cabe ressaltar que esta conclusão é pertinente apenas para as madeiras folhosas, haja vista que a equação entre E_{c0} e E_{t0} prescrita pela norma brasileira não faz distinção entre folhosas e coníferas.
- (b) Pela ANOVA, a média dos grupos E_M e $0,90 \cdot E_{c0}$ apresentaram diferença significativa, implicando que o coeficiente 0,90 da equação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$ não conduz a obtenção precisa do E_{c0} .
- (c) O valor do coeficiente ótimo obtido, neste estudo, para a relação entre E_M e E_{c0} mostrou-se superior ao estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997).
- (d) Os modelos de regressão, para a estimativa das propriedades de rigidez, foram significativos e apresentaram bons ajustes, evidenciando a possibilidade de estimar tais propriedades por meio da densidade aparente, a 12% de umidade.
- (e) Para a revisão desta normativa, sugere-se o ajuste do coeficiente da equação $E_M = 0,90 \cdot E_{c0}$ conforme apresentado na Equação 4.1, com o intuito de assegurar projetos estruturais mais precisos, visto a importância do módulo de elasticidade no dimensionamento de estruturas de madeira.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se avaliar, para madeiras coníferas, as relações entre E_{c0} com: E_{t0} e E_M (respectivamente: Equações 2.9 e 2.10). Em adição, tanto para folhosas como para coníferas, sugere-se avaliar, por classe de resistência, o coeficiente ótimo das relações entre as propriedades de rigidez aqui estudadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. S.; LANINI, T. L. S.; CAETANO, J. A.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Evaluation of Stiffness in Compression Perpendicular to Grain of Brazilian Tropical Wood Species. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v.28, n.5, p.1-7, 2018b.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 38, n.1, p. 203-207, 2014.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; ARAUJO, V. A.; SILVA, S. A. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. **BioResources**, v.12, n.3, p.6579-6590, 2017.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A, M. N.; LAHR, F. A. R. Density as Estimator of Strength in Compression Parallel to the Grain in Wood. **International Journal of Materials Engineering**. v. 6, n.3, p. 67-71, 2016.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; MARCOLIN, L. A.; GONÇALVES, D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Correlation between Dry Density and Volumetric Shrinkage Coefficient of Three Brazilian Tropical Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1-4, 2015.

ALMEIDA, T. H.; SOUSA, A. M.; MARTINS, A. S. M.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H.; LAHR, F. A. R. Effect of service temperature on shear strength of *Pinus* wood for roof structures. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 40, p. 2-6, 2018a.

AQUINO, F. R.; GONZÁLEZ-PEÑA, M. M.; VALDEZ-HERNÁNDEZ, J. I.; ROMERO-MANZANARES, A.; FUENTES-SALINAS, M. Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 1-9, 2017.

AQUINO, V. B. M.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical and Mechanical Characterization of *Cedrelinga catenaeformis* Ducke Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v.8, n.5, p.97-100, 2018b.

AQUINO, V. B. M.; ALMEIDA, J. P. B.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical and mechanical characterization of *Copaifera sp.* wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 3, p. 55-58, 2018a.

ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n. 3, set/dez. 2007.

ARAUJO, V. A.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; GARCIA, J. N.; SOUZA, A. J. D.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; MOLINA, J. C.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, vol. 11, n.3, p. 7889-7901, 2016.

ARAUJO, V.A.; VASCONCELOS, J.S.; MORALES, E. A. M.; SAVI, A. F.; HINDMAN, D. P.; O'BRIEN, M. J.; NEGRÃO, J. H. J. O.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. Difficulties of wooden housing production sector in Brazil. **Wood Material Science & Engineering**, p. 1-10, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-26 (NBR 6230): **Ensaio físicos e mecânicos de madeira**. Rio de Janeiro, 1940.

BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of Mechanical Properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.17, n.2, p.239-252, 2015.

BADER, T. K.; EBERHARDSTEINER, J.; BORST K. Shear Stiffness and its Relation the Microstructure of 10 European and Tropical Hardwood Species. **Wood Material Science & Engineering**, 2015.

BEECH, E.; RIVERS, M.; OLDFIELD, S.; SMITH, P. P. GlobalTreeSearch – the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 36, p. 454-489, 2017.

CALIL JÚNIOR., C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** – Campina Grande, v. 1, p. 71-77, 1997.

CARRILLO, A.; GARZA, M.; NAÑEZ, M. J.; GARZA, F.; FOUROUGHBAKHCH, R.; SANDOVAL, S. Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico. **Annals of Forest Science**, v. 68, p. 675-679, 2011.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Estimation of modulus of elasticity in static bending of wood in structural dimensions as function of longitudinal vibration and density. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 26, n. 1, p. 1-8, 2018.

CHEN, Y.; GUO, W. Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure. **BioResources**, v. 12, n. 2, p. 2310-2325, 2017.

CHRISTOFORO, A. L.; AFTIMUS, B. H. C.; PANZERA, T. H.; MACHADO, G. O.; LAHR, F. A. R. Physico-Mechanical Characterization of the *Anadenanthera colubrina* Wood Specie. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.27, n.2, p.376-384, 2017.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, A. S.; LANINI, T. L. S.; NOGUEIRA, R. S.; LAHR, F. A. R. Estimation of the Characteristic Value of Wood Strength. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.39, n.1, p.127-132, 2019.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; SANTOS, J. C.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.2, p.23-27, 2016.

CHRISTOFORO, A. L.; BLECHA, K. A.; CARVALHO, A. L. C.; REZENDE, L. F. S.; LAHR, F. A. R. Characterization of tropical wood species for use in civil constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 3, n.3, p. 98-103, 2013a.

CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; MORALES, E. A. M.; PANZERA, T. H.; BORGES, P. H. R. Numerical Evaluation of Longitudinal Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Timber Beams. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v.2, n.4, p.166-170, 2012.

CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, v. 43, n. 4, p. 610-615, 2013b.

CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Estimative of Wooden Toughness by Apparent Density and Beding Strength. **International Journal of Materials Engineering**, v.4, n.2, p.49-55, 2014.

DIAS, F. M.; ALMEIDA, T. H.; ARAUJO, V. A.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of the Apparent Density on the Shrinkage of 43 Tropical Wood Species. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, 2019.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Florestalis**, n. 65, p. 102-113, jun. 2004.

FARIA, O. B.; SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; CHAHUD, E.; VARANDA, L. D. Influence of wood moisture content on modulus of elasticity on tension parallel to the grain of Brazilian species. **European International Journal of Science and Technology**. v. 1, n.2, p. 11-22, 2012.

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influência da posição dos instrumentos de medida na determinação do módulo de elasticidade da madeira na compressão paralela às fibras (E_{c0}). **Revista Árvore**, v.39, n.4, p.743-749, 2015.

GONÇALEZ, J. C.; GONÇALVES, D. M. Valorização de Duas Espécies de Madeira Cedrelinga catenaeformis e Enterolobium shomburgkii Para a Indústria Madeireira. **Brasil Florestal**, n. 70, p. 69-74, junho. 2001.

GONZAGA, A. L. Madeira: Uso e Conservação. Brasília: IPHAN/MONUMENTA, 2006. 246 p (Cadernos Técnicos; n.6).

GROBÉRIO, M. P.; LAHR, F. A. R. Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil. **Revista Madeira: arquitetura e engenharia**, ano 3, n. 8, 2002.

HEIN, P. R. G.; BRANCHERIAU, L. Comparison Between Three-Point and Four-Point Flexural Tests to Determine Wood Strength of *Eucalyptus* Specimens. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.20, n.3, p.333-342, 2018.

HURMEKOSKI, E.; JONSSON, R.; NORD, T. Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 99, p. 181-196, 2015.

ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. L. Influence of Specimen Orientation on Determination of Elasticity in Static Bending. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 17, n.5, p. 229-238, 2015.

IGARTÚA, D. V.; MORENO, K.; PITER, J. C.; MONTEOLIVA, S. Densidad y Propiedades Mecánicas de La Madera de *Acacia melanoxylon* Implantada en Argentina. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.17, n.4, p.809-820, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras: Cambará. IPT, 2019a. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/9-cambara.htm>. Acessado em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras: Cedro. IPT, 2019b. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/29-cedro.htm>. Acessado em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras: Cedro. IPT, 2019c. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/31-copaiba.htm>. Acessado em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras: Cedro. IPT, 2019d. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/4-macaranduba.htm>. Acessado em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras: Cedro. IPT, 2019e. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/24-__racemosa.htm>. Acessado em: 15 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil**. Publicação IPT, 4371, 104 p., ISBN: 978-85-09-00175-9, 2013.

JESUS, J. M. H.; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Classes de resistência de algumas madeiras de Mato Grosso. **Engineering and Science**, v. 1, n. 3, 2015.

KIAEI, M. Effect of site and elevation on wood density and shrinkage and their relationships in *Carpinus betulus*. **Forestry Studies in China**, v.14, n.3, p.229-234, 2012.

KOLLMANN, F.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Germany: Springer Verlag, 1984.

KRAJEWSKI, A.; KOZAKIEWICZ, P.; WITOMSKI, P. Shear Strength of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) From the Historical Buildings. **Wood Research**, v.61, n.5 p.845-850, 2016.

LAHR, F. A. R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. São Carlos, 1983. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

LAHR, F. A. R.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA FILHO, F. M.; MENDES, I. S.; CHRISTOFORO, A. L. Full Characterization of *Erisma uncinatum* Warm Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n.5, p. 147-150, 2016.

LAHR, F. A. R.; CHAHUD, E.; FERNANDES, R. A.; TEIXEIRA, R. S. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais Brasileiras. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 38, n. 86, p. 153–158, 2010.

LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; CHAHUD, E.; ARAUJO, V. A.; BRANCO, L. A. M. N. Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n.4, p. 433-437, Oct.-Dec., 2017.

LOGSDON, N. B. Variação da densidade aparente da madeira com sua umidade, modelagem teórico experimental. **Revista Madeira: arquitetura e engenharia**, ano 4, n. 10, 2003.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 1ª ed. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 385 p.

LUKÁSEK, J.; ZEIDLER, A.; BARCÍK, S. Shrinkage of Grand Fir Wood and its Variability within the Stem. **Drvna Industrija**, v.63, n.2, p.121-128, 2012.

MACHADO, J. S.; LOUZADA, J. L.; SANTOS, A. J. A.; NUNES, L.; ANJOS, O.; RODRIGUES, J.; SIMÕES, R. M. S.; PEREIRA, H. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials and Design**, v.56, p.975-980, 2014.

MAHAPATRA, K.; GUSTAVSSON, L.; HEMSTRÖM, K. Multi-storey wood-frame buildings in Germany, Sweden and The UK. **Construction Innovation**, v.12, p. 62-85, 2012.

MARTINS, C. C.; MACHADO, C. G.; MARTINELLI-SENEME, A.; ZUCARELI, C. Método de colheita e superação de dormência na qualidade fisiológica de sementes de *Cassia ferruginea*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 491–498, 2012.

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.

MISSANJO, E.; MATSUMURA, J. Wood Density and Mechanical Properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. **Forest**, v.7, n.7, p.1-10, 2016.

MIYOSHI, Y.; KOJIRO, K.; FURATA, Y. Effects of Density and Anatomical Feature on Mechanical Properties of Various Wood Species in Lateral Tension. **Journal of Wood Science**, 2018.

MORALES, E. A. M.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Evaluation of the Number of Load Cycles to Determine Some Wood Stiffness Properties. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v.29, n.1, p.1-7, 2018.

MOREIRA, A. P.; SILVEIRA, E.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Toughness and impact strength in dynamic bending of wood as a function of the modulus of elasticity and the strength in compression to the grain. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 4, p. 61-67, 2017.

PEDRESCHI, R.; GOMES, F. C.; MENDES, L. M. Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. **Cerne**, v. 11, n. 3, p. 283-293, jul./set. 2005.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; WICHER-BUSSE, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the tress: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

REIS, P. C. M.; SOUZA, A. L.; REIS, L. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; MAZZEI, L.; RÊGO, L. J. S.; LEITE, H. G. Artificial Neural Networks to Estimate the Physical-Mechanical Properties of Amazon Second Cutting Cycle Wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.20, n.3, p.343-352, 2018.

REMADE. Madeiras brasileiras e exóticas: Louro preto. 2019 Disponível em: <<http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/201/madeiras-brasileiras-e-exoticas/lou>>. Acessado em: 15 fev. 2019.

SEGUNDINHO, P. G. A.; ZANGIÁCOMO, A. L.; CARREIRA M. R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SILVA, C. E. G.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. Influence of the Procurement Site on Physical and Mechanical Properties of Cupiúba Wood Species. **BioResources**, v.13, n.2, p.4118-4131, 2018.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, IP. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015.

WIERUSZEWSKI, M.; MAZELA, B. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. **Drvna industrija**, v. 68, n. 4, p. 359-367, 2017.