

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

**MODELOS PARA ESTIMATIVAS DE PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DE ESPÉCIES DE MADEIRAS TROPICAIS EM FUNÇÃO
DA DENSIDADE APARENTE E DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO
TRANSVERSAL**

LARISSA SORIANI ZANINI RIBEIRO SOARES SILVA

SÃO CARLOS

2022

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

**MODELOS PARA ESTIMATIVAS DE PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DE ESPÉCIES DE MADEIRAS TROPICAIS EM FUNÇÃO
DA DENSIDADE APARENTE E DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO
TRANSVERSAL**

LARISSA SORIANI ZANINI RIBEIRO SOARES SILVA

Defesa de tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. André Luís Christoforo

Coorientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

SÃO CARLOS

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Larissa Soriani Zanini Ribeiro Soares, realizada em 23/03/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Chahud (UFMG)

Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges (UNESP)

Profa. Dra. Cristiane Bueno (UFSCar)

Prof. Dr. Leandro José da Silva (UFSJ)

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese às pessoas mais importantes de minha vida: meu pai, Luiz; minha mãe, Zenilda; meus irmãos, Fabrício e Giovanna; meu esposo, Willian; e meus filhos, Pedro e Luísa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter segurado minha mão e conduzido meus passos até mais uma vitória.

Aos meus amados familiares, pelo carinho, pelo apoio, pela compreensão e pela paciência durante o período em que me fiz ausente para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Luís Christoforo, pela orientação deste trabalho, pelos valiosos ensinamentos transmitidos e pelo laço de irmandade.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pelo companheirismo, pelos ensinamentos de vida e pela amizade.

Aos técnicos do LaMEM, em especial ao Jaime, pelo auxílio durante a realização dos ensaios.

Aos colegas de serviço da Coordenação de Engenharia e Arquitetura do Instituto Federal do Triângulo Mineiro, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me e ajudando-me durante o período em que estivesse ausente.

Não posso deixar, aqui, de manifestar o quanto foi honroso e gratificante para mim realizar este trabalho. A todos, muito obrigada!

“A única forma de chegar ao impossível é acreditar que é possível. ”

(Lewis Carroll)

RESUMO

A madeira é um excelente material de aplicação construtiva, pouco inserido no mercado da construção nacional, mas com grande potencial de exploração. Tal fato se justifica não só por restrições de natureza histórico-social, mas também pelo desconhecimento das espécies e de suas propriedades. As dificuldades para a caracterização da madeira, dadas pela quantidade de ensaios requeridos e pela necessidade de maquinário específico e mão de obra especializada, contribuem ainda mais para a situação atual. Como alternativa para a simplificação do conhecimento das propriedades da madeira, este estudo tem como objetivo a adoção de nova solução tecnológica para estimar as propriedades físico-mecânicas do material, com a caracterização não destrutiva de madeiras tropicais por intermédio da combinação dos ensaios de densidade aparente e da frequência natural (primeiro modo) de vibração transversal a partir de modelos de regressão, haja vista a não existência de estudos, em nível nacional e mundial, que utilizem esses dois ensaios combinados como estimadores de todas as propriedades físico-mecânicas da madeira. Para tanto, foram consideradas cinco espécies de madeiras tropicais distribuídas nas classes de resistência (C20 a C60) do grupo das folhosas. Foram realizados 60 ensaios de vibração transversal em peças de dimensões estruturais de seção quadra (12 cm x 12 cm) e comprimento variável (2 m a 2,7 m), e mais 720 de caracterização da madeira em corpos de prova normatizados conforme a ABNT NBR 7190:1997, totalizando 780 ensaios. Para cada uma das espécies, e para o agrupamento, foram gerados modelos de regressão lineares em função da densidade aparente e da frequência de vibração transversal, bem como modelos de regressão multivariáveis quadráticos utilizando como variáveis independentes a densidade aparente e a frequência de vibração, de forma a estimar as propriedades físico-mecânicas das madeiras. Nos modelos de regressão para as espécies de forma isolada, com exceção da espécie de classe C40, foi notada pequena correlação entre a densidade e a frequência natural com as demais propriedades, resultando em estimativas de pouca precisão. Para o conjunto de espécies, os melhores coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) foram obtidos quando da análise dos modelos de regressão multivariáveis quadráticos, obtendo-se valores superiores a 70% para 13 modelos dos 16 avaliados. Destaca-se que, para principais propriedades mecânicas das madeiras, e de maior importância para o cálculo estrutural (f_{c0} , f_{v0} , f_M , E_{c0} e E_M), os coeficientes de determinação ajustados foram superiores a 80%, indicando modelos com excelentes ajustes para a previsão das propriedades.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira; Caracterização da Madeira; Densidade Aparente; Frequência Natural; Modelos de Regressão.

ABSTRACT

The wood is an excellent material of constructive application, little inserted to the market of the national construction, but with great potential of exploration. This fact is justified not only by restrictions of a social-historical nature, but also by the ignorance of the species and their properties. The difficulties in characterization the wood, given the amount of test required and the need for specific machinery and specialized labor, contribute even more to the current situation. As an alternative to simplify the knowledge of the properties of wood, this study aims to adopt a new technological solution to estimate the physical-mechanical properties, non-destructive characterization, of tropical wood through the combination of apparent density and the natural frequency (first mode) of the transverse vibration test, based on regression models, given the lack of studies, at national and global levels, that use these two tests combined as estimators of all the physical-mechanical properties of wood. For this, 05 species of tropical wood were distributed in the resistance classes (C20 to C60) of the hardwood group. Sixty transverse vibration tests were be carried out on pieces of structural dimensions of square section (12 cm x12 cm) and variable length (2 m to 2.7 m) and another 720 of wood characterization, in specimens standardized according to ABNT NBR 7190:1997, totaling 780 experiments. For each species, and for the grouping, linear regression models were generated as a function of bulk density and transverse vibration frequency, as well as multivariable quadratic regression models using bulk density and vibration frequency as independent variables in order to estimate the physical-mechanical properties of the woods. From the regression models for the species in isolation, with the exception of the class C40 species, little correlation was noted between density and natural frequency with the other properties, resulting in estimates of poor precision. For the set of species, the best adjusted coefficients of determination (R^2_{aj}) were obtained when analyzing the quadratic multivariable regression models, obtaining values greater than 70% for 13 models out of the 16 evaluated. It is noteworthy that, for the main mechanical properties of the woods, and of greater importance for the structural calculation (f_{c0} , f_{v0} , f_M , E_{c0} and E_M), the adjusted coefficients of determination were above 80%, indicating models with excellent fits for the prediction of properties.

Keyword: Wood Structures; Characterization of Wood; Apparently density; Natural frequency; Regression Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cobertura em madeira, nova sede da Swatch, Suíça.....	9
Figura 2. Corte do tronco da espécie Cedro-Doce.	14
Figura 3. Troncos da espécie Cajueiro.....	16
Figura 4. Árvore e tronco da espécie Angelim Pedra.	18
Figura 5. Árvore da espécie Castelo	20
Figura 6. Árvore e tronco da espécie Mandioqueira.....	21
Figura 7. Esquema do modelo de vibração transversal.	33
Figura 8. Ensaio de vibração transversal.....	35
Figura 9. Esquema de captação dos dados do ensaio de vibração transversal.	36
Figura 10. Esquema do ensaio de flexão estática não destrutivo	37
Figura 11. Direções principais da madeira.....	38
Figura 12. Ensaio de compressão paralela às fibras com uso de medidores.	40
Figura 13. Corpo de prova do ensaio de compressão normal às fibras.	40
Figura 14. Ensaio de compressão normal às fibras.....	41
Figura 15. Corpos de prova para ensaio de tração paralela.	42
Figura 16. Ensaio de tração paralela às fibras com uso de relógio comparador.	43
Figura 17. Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.	43
Figura 18. Corpo de prova e ensaio de tração normal às fibras.	44
Figura 19. Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	44
Figura 20. Ensaio de cisalhamento e corpo de prova rompido.....	45
Figura 21. Corpo de prova para ensaio de fendilhamento.	45
Figura 22. Corpo de prova e ensaio de fendilhamento paralelo às fibras.	46
Figura 23. Posicionamento do corpo de prova durante o ensaio de flexão estática.	47
Figura 24. Aferição dos deslocamentos no ensaio de flexão estática.....	47
Figura 25. Ensaio de dureza Janka – (a) paralelo às fibras; (b) perpendicular às fibras; (c) penetração da esfera.	49
Figura 26. Ensaio de tenacidade e impacto à flexão – (a) equipamento com pêndulo; (b) posicionamento do corpo de prova; (c) corpo de prova rompido.	50
Figura 27. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Cedro Doce obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.....	54
Figura 28. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Cedro Doce.....	57
Figura 29. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b)	

LISTA DE FIGURAS

da madeira Cajueiro obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.....	60
Figura 30. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Cajueiro.....	62
Figura 31. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Angelim Pedra obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.	67
Figura 32. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Angelim Pedra.	69
Figura 33. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Castelo obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.	73
Figura 34. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Castelo.....	75
Figura 35. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Mandioqueira obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.	78
Figura 36. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para a madeira Mandioqueira.	81
Figura 37. Comparativo dos módulos de elasticidade à compressão e tração paralelos às fibras para o agrupamento das espécies.....	83
Figura 38. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais do agrupamento das espécies.....	84
Figura 39. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o agrupamento de espécies em função da densidade aparente.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas do Cedro Doce.....	14
Tabela 2. Propriedades mecânicas do Cedro Doce.	14
Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas do Cedro Doce – ABNT NBR 7190 (1997).	15
Tabela 4. Propriedades físicas do Cajueiro	16
Tabela 5. Propriedades mecânicas do Cajueiro.....	16
Tabela 6. Propriedades físicas do Angelim Pedra.....	18
Tabela 7. Propriedades mecânicas do Angelim Pedra.	18
Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas do Angelim Pedra – ABNT NBR 7190 (1997).	19
Tabela 9. Propriedades físicas do Castelo.....	20
Tabela 10. Propriedades mecânicas do Castelo.	20
Tabela 11. Propriedades físicas da Mandioqueira.....	22
Tabela 12. Propriedades mecânicas da Mandioqueira	22
Tabela 13. Relação das espécies utilizadas no estudo.....	30
Tabela 14. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Cedro Doce.	53
Tabela 15. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Cedro Doce.....	55
Tabela 16. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Cedro Doce.	56
Tabela 17. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Cedro Doce.	58
Tabela 18. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Cajueiro.	59
Tabela 19. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Cajueiro.	61
Tabela 20. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Cajueiro.	62
Tabela 21. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Cajueiro.....	65
Tabela 22. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Angelim Pedra.	66
Tabela 23. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Angelim Pedra.....	68
Tabela 24. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Angelim Pedra.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 25. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Angelim Pedra.	70
Tabela 26. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Castelo.	71
Tabela 27. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Castelo.	73
Tabela 28. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Castelo.	74
Tabela 29. Modelos de regressão múltipla quadráticos para a madeira Castelo.	76
Tabela 30. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidos dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos da madeira Mandioqueira.	77
Tabela 31. Comparativo das propriedades físicas e mecânicas da pesquisa com a ABNT NBR 7190 (1997) e literatura correlata.	77
Tabela 32. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Mandioqueira.	79
Tabela 33. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Mandioqueira.	80
Tabela 34. Modelos de regressão múltipla quadráticos da madeira Mandioqueira.	82
Tabela 35. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para o agrupamento das espécies.	84
Tabela 36. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para o agrupamento das espécies.	87
Tabela 37. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o agrupamento das cinco espécies. ..	88
Tabela 38. Comparativo dos coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) dos modelos de regressão para as estimativas das propriedades físico-mecânicas das cinco espécies agrupadas.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
°C	Grau Celsius
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
CV	Coefficiente de Variação
DECIv	Departamento de Engenharia Civil
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	Norma Europeia
EUROCODE	European Committee for Standard
g	Gramma
IC	Intervalo de Confiança
Inf	Limite Inferior do Intervalo de Confiança
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITTO	International Tropical Timber Organization
kg	Quilograma
kPa	Quilopascal
LaMEM	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
m ³	Metro cúbico
Máx	Valor máximo por propriedade
min	Minuto
Mín	Valor mínimo por propriedade
MLC	Madeira Laminada Colada
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
nm	Nanômetro
NS	Não Significativo
NBR	Norma Brasileira Registrada
PPGECiv	Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
PSF	Ponto de Saturação das Fibras

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

REMADE	Revista da Madeira
RRT	Retração Radial Total
RS	Rio Grande do Sul
RTT	Retração Tangencial Total
RVT	Retração Volumétrica Total
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SET	Departamento de Engenharia de Estruturas
Sup	Limite Superior do Intervalo de Confiança
TU	Teor de Umidade
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
vs.	Versus

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do corpo de prova de compressão paralela às fibras
β_i	Coefficientes ajustados do método dos mínimos quadrados
b	Largura da seção transversal do corpo de prova de flexão estática
ε	Erro residual
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
F_{c0}	Máxima força de compressão paralela às fibras
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras
f_{c90}	Resistência à compressão normal às fibras
$f_{c90,k}$	Resistência característica à compressão normal às fibras
f_{e0}	Resistência ao embutimento paralelo às fibras
$f_{e0,k}$	Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras
f_{e90}	Resistência ao embutimento normal às fibras
$f_{e90,k}$	Resistência característica ao embutimento normal às fibras
f_k	Resistência característica
f_M	Módulo de ruptura na flexão estática
$F_{máx,p}$	Força necessária para produzir a penetração de uma semiesfera de aço na madeira
$F_{M10\%}$	Força correspondente a 10% da força de ruptura em esforços de flexão estática
$F_{M50\%}$	Força correspondente a 50% da força de ruptura em esforços de flexão estática
f_{s0}	Resistência ao fendilhamento paralelo às fibras
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{t0,k}$	Resistência característica à tração paralela às fibras
f_{t90}	Resistência à tração normal às fibras
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{v0,k}$	Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
f_H	Dureza
f_{H0}	Dureza paralela às fibras
f_{H90}	Dureza normal às fibras
E_{c0}	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras
E_{c90}	Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras
E_{dsw}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de stress wave
E_{dus}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de ultrassom
E_{dvl}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de vibração longitudinal
E_{dvt}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de vibração transversal
E_{t0}	Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras

LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{t0,m}$	Módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras
E_M	Módulo de elasticidade na flexão estática
h	Altura da seção transversal do corpo de prova de flexão estática
k_{90}	Parâmetro em função da densidade da madeira
L	Vão livre entre apoios no ensaio de flexão estática
m_{12}	Massa da madeira ao teor de umidade de 12%
$M_{máx}$	Máximo momento aplicado ao corpo de prova em ensaio de flexão estática
n	Corpo de prova n
ρ	Densidade da madeira
ρ_{ap}	Densidade aparente da madeira
$\rho_{ap,m}$	Densidade aparente média
$\rho_{ap,12}$	Densidade aparente da madeira ao teor de 12% de umidade
$\rho_{ap,15}$	Densidade aparente da madeira ao teor de 15% de umidade
ρ_{bas}	Densidade básica da madeira
$\rho_{bas,m}$	Densidade básica média da madeira
ρ_k	Densidade característica da madeira
ρ_v	Densidade acima do ponto de saturação das fibras
R	Coefficiente de correlação
R^2	Coefficiente de determinação
R^2_{Aj}	Coefficiente de determinação ajustado
T	Tenacidade da madeira
t	Tempo
V_{12}	Volume da madeira ao teor de umidade de 12%
$v_{10\%}$	Deslocamento correspondente a 10% da força e ruptura em esforços de flexão estática
$v_{50\%}$	Deslocamento correspondente a 50% da força de ruptura em esforços de flexão estática
W_e	Módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo de prova
Y	Valores das propriedades de resistência e de rigidez avaliadas
x_m	Valor médio

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos	11
1.2 Justificativas	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Características das espécies de madeira tropicais avaliadas	13
2.1.1 Cedro Doce (<i>Cedrella sp.</i>)	13
2.1.2 Cajueiro (<i>Anacardium sp.</i>).....	15
2.1.3 Angelim Pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>)	17
2.1.4 Castelo (<i>Calycophyllum multiflorum Rubiaceae</i>).....	19
2.1.5 Mandioqueira (<i>Qualea Paraensis</i>).....	21
2.2 Estimativas das propriedades da madeira.....	23
2.2.1 Estimativa das propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente	23
2.2.2 Estimativa das propriedades da madeira pelo método da vibração transversal	26
2.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 Materiais.....	30
3.2 Métodos.....	30
3.2.1 Confeção dos corpos de prova	30
3.2.2 Vibração transversal.....	33
3.2.3 Flexão estática não destrutiva	36
3.2.4 Densidade aparente	37
3.2.5 Retração da madeira.....	38
3.2.6 Compressão paralela às fibras.....	39
3.2.7 Compressão normal às fibras	40
3.2.8 Tração paralela às fibras	41
3.2.9 Tração normal às fibras.....	43
3.2.10 Cisalhamento paralelo às fibras	44
3.2.11 Fendilhamento paralelo às fibras	45
3.2.12 Flexão estática.....	46
3.2.13 Dureza Janka.....	48

3.2.14	Tenacidade e resistência ao impacto à flexão	49
3.2.15	Análise estatística e modelos de regressão	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Cedro Doce	53
4.2	Cajueiro	59
4.3	Angelim Pedra	65
4.4	Castelo	71
4.5	Mandioqueira	76
4.6	Modelos de regressão multivariáveis para o conjunto das espécies	83
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material compósito natural, renovável e de fácil obtenção, que desempenha papel fundamental na construção civil desde os seus primórdios. Se comparada aos demais materiais, como aço e concreto, ela apresenta alta relação entre resistência e densidade, baixo consumo de energia para processamento, boas características de isolamento térmico e elétrico, além da facilidade de processamento manual ou mecânico (ALMEIDA *et al.*, 2015; ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2016; LAHR *et al.*, 2016; NAHUZ, 2013; TAKESHITA *et al.*, 2011).

Contudo, a característica que distingue e ressalta o uso da madeira em relação aos demais materiais é a renovabilidade. O termo, que se refere à razão entre a quantidade de energia renovável e a energia total utilizada nas indústrias, possibilita o crescimento da viabilidade técnico-econômica do manejo florestal e de técnicas silviculturais de reflorestamento, que permitem obter madeira, sem necessariamente se eliminar a floresta, e a alteração da qualidade da matéria-prima em função de seu uso final (LIMA *et al.*, 2001; HAMAGUCHI; CARDOSO; VAKKILAINEN, 2012).

O fato de a madeira ser um material natural, criado para resistir aos esforços solicitantes em meio ao ambiente em que se encontra (como rajadas de vento em mata aberta, por exemplo), justifica as características de anisotropia, higroscopia e variabilidade do material. Acrescenta-se à variabilidade, além das condições edafoclimáticas, as diferentes espécies de árvores, cada qual com características anatômicas, físicas e mecânicas particulares (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2016).

Tratando-se do potencial e da disponibilidade desse material, entre 1707 e 2015, foram catalogadas 11.194 espécies de árvores, 1.225 gêneros e 140 famílias na Bacia Amazônica. Há uma estimativa de que a Floresta Amazônica, com 6.850.476 km², possui 16.000 espécies de árvores. Ressalta-se que o Brasil detém boa parte desta área (4.102.893 km²), com estimativa de 12.655 espécies, das quais 7.694 são catalogadas (STEEGE *et al.*, 2016).

Em países desenvolvidos como Estados Unidos, Canadá, Japão e em países europeus, a madeira é amplamente empregada em construções habitacionais, bem como em estruturas complexas (Figura 1). Tem-se que, em 2016, os EUA importaram 5,7 bilhões de dólares de madeira de construção canadense (ABIMCI, 2018; NSC, 2017).

Figura 1. Cobertura em madeira, nova sede da Swatch, Suíça.



Fonte: Arch Daily, 2021.

O emprego da madeira como material de construção teve aumento significativo até mesmo em locais pouco tradicionais. De 1998 a 2009, a Itália apresentou crescimento de 10% em construções residenciais à base de madeira. Por sua vez, a Inglaterra exibiu um aumento de 27%, considerando o período entre o final dos anos 1990 a 2014 (ABIMCI, 2018).

Contraditoriamente, o Brasil, que detém a segunda maior área florestal do mundo (incluindo florestas plantadas e nativas) e é tradicional exportador de produtos madeireiros, pouco utiliza a madeira como material de construção. Ainda que haja movimentação do setor madeireiro para o emprego do material na construção (principalmente em relação a soluções para o déficit habitacional brasileiro), tem-se dificuldades em razão da escassez de mão de obra qualificada e do desconhecimento das espécies de madeira e de suas propriedades (GONZAGA, 2006 LAHR *et al.*, 2016; PEDRESCHI; GOMES; MENDES, 2005; SOBRAL *et al.*, 2002).

Tais considerações se relacionam às dificuldades de caracterização das inúmeras espécies de madeira existentes, uma vez que, de acordo com a Norma Brasileira Registrada (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira” –, para a caracterização completa de uma espécie de madeira, é necessário o conhecimento de 16 propriedades distintas. Destaca-se que tais propriedades são obtidas com o uso de equipamentos diversos, disponíveis apenas em grandes centros de pesquisa (devido à necessidade de maquinário e de mão de obra especializada).

Todavia, considerando as dificuldades de realização dos ensaios requeridos, a normativa brasileira prevê relações entre algumas propriedades da madeira. Tais relações instigam estudos de correlação entre propriedades. Nesse contexto, pesquisas têm sido desenvolvidas considerando a densidade (propriedade física de fácil determinação) como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. Os resultados apresentados na literatura contemporânea indicam coeficientes de determinação (R^2) acima de 70%, portanto, satisfatórios

(ALMEIDA *et al.*, 2016; AQUINO *et al.*, 2018; CARVALHEIRO *et al.*, 2016; CHEN; GUO, 2017; CHEN; GUO, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; DICKIE *et al.*, 2011; HODOUSEK *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2016; MACHADO *et al.*, 2014; PERRÉ *et al.*, 2015; ROSSO *et al.*, 2013).

No intuito de facilitar a caracterização e de promover a inserção da madeira no mercado da construção, têm sido desenvolvidos métodos alternativos não destrutivos para a estimativa de propriedades da madeira. A utilização dessa metodologia agrega não somente à caracterização científica da madeira, mas também auxilia as empresas madeireiras que visam à certificação do material. (ALMEIDA *et al.*, 2016, CHRISTOFORO *et al.*, 2017).

Dentre as metodologias desenvolvidas, tem-se a vibração transversal como método de avaliação não destrutivo, em que o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) é obtido por meio da frequência natural de vibração de um exemplar de madeira. A técnica se destaca pela concepção simples e pelo grande potencial de aplicação, fundamentalmente pela precisão do modelo matemático, podendo ser empregada em peças de dimensões estruturais, viabilizando, portanto, a aplicação em empresas madeireiras. A frequência natural de vibração, associada ao primeiro modo, pode ser utilizada como variável independente na estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira, assim como a densidade aparente, entretanto, inexistem trabalhos que utilizam a frequência de vibração na predição das propriedades. O que tem sido avaliado na literatura correlata é a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático, obtida por meio do ensaio de flexão. Os estudos expostos na literatura recente resultaram em coeficiente de determinação superiores a 80% para a correlação entre os módulos de elasticidade, confirmando a efetividade do ensaio de vibração transversal (ALMEIDA *et al.*, 2016; ARRIAGA, *et al.*, 2013; CARREIRA; DIAS; SEGUNDINHO, 2017; CARREIRA *et al.*, 2013; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; EBRAHIMI; MOKHTAI, 2015; ESSEN, 2013; MEDEIROS NETO; PAES; SEGUNDINHO, 2016; SALES; CANDIAN; CARDIN, 2011; VIKRAM *et al.*, 2011).

Considerando-se os resultados encontrados na literatura, tem-se que ambos os métodos alternativos independentes são efetivos na estimativa de algumas propriedades da madeira. Entretanto, não há estudos, em nível nacional e mundial, que utilizem a densidade e a frequência natural de vibração do ensaio de vibração transversal combinados como estimadores de todas as propriedades físico-mecânicas da madeira necessárias para a caracterização completa do material. Aliás, não há metodologias alternativas não destrutivas que estimem todas as propriedades necessárias para a caracterização do material.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste estudo é estimar, por meio de modelos de regressão, todas as propriedades pertinentes à caracterização completa de cinco espécies de madeira (especificadas pela ABNT NBR 7190:1997) por intermédio da densidade aparente e da frequência natural de vibração (obtida pelo ensaio de vibração transversal), abrangendo todas as classes de resistência do grupo das folhosas. Para alcançar o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Determinar, com base no ensaio de vibração transversal, o valor médio da frequência natural de vibração (pico) de cada espécie.
- Realizar a caracterização completa de cinco espécies (Cedro Doce, Cajueiro, Angelim Pedra, Castelo e Mandioqueira), de classes de resistência distintas (classe C20 a C60), do grupo das folhosas por meio de suas propriedades físicas e mecânicas. Para tanto, serão realizados os seguintes ensaios: umidade, densidade, estabilidade dimensional, compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento, fendilhamento, flexão, dureza e resistência ao impacto na flexão. No total, serão 720 ensaios para a determinação das seguintes propriedades: teor de umidade, densidade aparente, retração radial total, retração tangencial total, resistência à compressão paralela às fibras, resistência à compressão normal às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência à tração normal às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, dureza paralela às fibras, dureza normal às fibras, módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na compressão normal às fibras, módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, módulo de elasticidade na flexão estática e tenacidade.
- Verificar a equivalência dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de vibração transversal com os módulos de elasticidade obtidos nos corpos de prova e nas vigas ensaiadas à flexão.
- Gerar modelos matemáticos (regressão linear e múltipla), com o auxílio do software Minitab®, para prever as propriedades físico-mecânicas a partir dos dados de densidade e da frequência natural de vibração.

1.2 Justificativas

Tem-se que a madeira é um excelente material de aplicação construtiva, pouco inserido no mercado da construção nacional, mas com grande potencial de exploração. Além de

restrições históricas, a dificuldade de implementação do material na engenharia, de modo geral, é intrínseca às dificuldades do processo de caracterização de uma espécie (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2016).

Como alternativa para a simplificação do processo de caracterização da madeira e, conseqüentemente, do conhecimento das propriedades desta, destaca-se a estimativa das propriedades desse material por intermédio da densidade aparente (ora de modo independente, ora em conjunto com as demais propriedades), com boas correlações. Tem-se, ainda, a relevância apontada pela literatura nacional e internacional para a técnica da vibração transversal na estimativa de propriedades de rigidez da madeira, com correlações muito satisfatórias (ALMEIDA *et al.*, 2016; CARVALHEIRO *et al.*, 2016; CHRISTOFORO CHRISTOFORO *et al.*, 2017; CHEN; GUO, 2017).

Dadas as boas correlações obtidas com o uso da densidade aparente como estimador, e visto que não há trabalhos que utilizem quaisquer outras propriedades para a estimativa de todas as 16 propriedades requeridas para a caracterização completa de uma espécie de madeira, este estudo propõe a união da técnica da vibração transversal, e, portanto, da frequência natural de vibração (primeiro modo), à da densidade aparente, para a estimativa de todas as propriedades requeridas pela normativa brasileira.

O resultado desta pesquisa tende a contribuir não somente com o caráter científico, mas também com as indústrias madeireiras certificadas (ou em busca de certificação) no atendimento aos requisitos técnicos e de qualidade do material fornecido. Ademais, há de se destacar o ganho de tempo e recurso com os benefícios deste trabalho, haja vista que o processo de determinação da densidade aparente e da frequência natural de vibração são mais simples e rápidos quando comparados aos procedimentos norteadores da ABNT NBR 7190:1997 para a caracterização de espécies.

Assim este trabalho trata da possibilidade do uso de modelos de regressão de significativa precisão (balizados pelo valor do coeficiente de determinação R^2) na estimativa das propriedades da madeira utilizando-se informações em função da densidade aparente e da frequência natural de vibração transversal se apresenta como uma excelente alternativa, pois a densidade aparente da madeira é de simples obtenção e o equipamento utilizado no ensaio de vibração transversal é de fácil manuseio e amplamente utilizado por empresas do ramo madeireiro na classificação mecânica das peças de madeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as pesquisas relacionadas às espécies de madeira utilizadas no presente estudo (origem, características e propriedades), como também os principais estudos desenvolvidos na literatura recente para a estimativa de propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente e do método da vibração transversal, respectivamente.

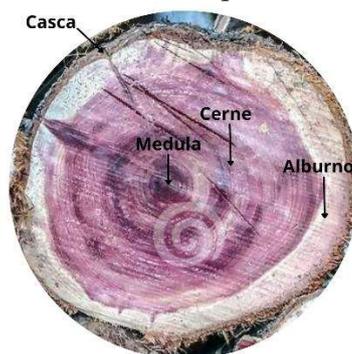
2.1 Características das espécies de madeira tropicais avaliadas

Nesta seção, serão apresentadas as principais características das espécies utilizadas nesta pesquisa: Cedro Doce (*Cedrella sp.*); Cajueiro (*Anacardium sp.*); Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*); Castelo (*Calycophyllum multiflorum Rubiaceae*); e Mandioqueira (*Ruizterania albiflora* (Warm.) Marc. -Berti, *Vochysiaceae*). A escolha das espécies foi dada em função da disponibilidade no laboratório do LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira), utilização na construção civil, bem como da avaliação do comportamento nas diferentes classes (C20 a C60) do grupo das folhosas.

A exposição da literatura nas seções 2.1.1 a 2.1.5 se baseia em estudos recentes das espécies analisadas, considerando a apresentação de dados quanto às propriedades físicas e mecânicas relevantes para cada espécie.

2.1.1 Cedro Doce (*Cedrella sp.*)

O Cedro Doce (*Cedrella sp.*) é uma espécie que pertence à família *Meliaceae*, com distribuição natural em matas do interior, com preferência por solos úmidos. No Brasil, tem ocorrência nos seguintes estados: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo. Ocorre, ainda, na América Central, na Argentina, na Bolívia, no Equador, na Guiana, na Guiana Francesa, no Paraguai, no Peru e em Suriname. Essa madeira tem como características cerne (parte mais interna do tronco) e alburno (parte externa do tronco recoberta pela casca) distintos pela cor, sendo o cerne bege rosado e o alburno branco e rosado, vide Figura 2. Possui superfície lustrosa, com reflexos dourados, cheiro perceptível característico agradável e densidade baixa (IPT, 2020; REMADE, 2020).

Figura 2. Corte do tronco da espécie Cedro-Doce.

Fonte: Autora, 2022.

A madeira de Cedro Doce possui pequena resistência natural contra a ação de fungos e insetos. A secagem da espécie ao ar e na estufa é rápida, com pouca ocorrência de defeitos. Possui fácil trabalhabilidade, o aplainamento produz uma superfície lisa e uniforme, com bom acabamento. Ademais, apresenta boa retenção de pregos e parafusos, como também excelente absorção de pigmentos e polimento. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cedro Doce (IPT,2020).

Tabela 1. Propriedades físicas do Cedro Doce.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,15}$	530
ρ_{bas}	440
Contração (%)	
Radial	4,0
Tangencial	6,2
Volumétrica	11,6

$\rho_{ap,15}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 15%; ρ_{bas} = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2020).

Tabela 2. Propriedades mecânicas do Cedro Doce.

Propriedades mecânicas	Densidade
	$\rho_{ap,15\%}$
f_{c0} (MPa)	39,1
f_M (MPa)	81,2
E_M (MPa)	11890
f_{v0} (MPa)	10,39
f_{t90} (MPa)	3,0

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de (IPT,2020); (ITTO,2020).

A madeira de Cedro Doce é utilizada na construção civil para confecção de portas, venezianas e caixilhos, como também em painéis decorativos, molduras e forros. Pode ser empregada como matéria-prima para mobiliários, além de ser usada ainda, por exemplo, em chapas compensadas, em embalagens e em embarcações leves (IPT, 2020).

A Tabela 3 apresenta os valores de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira Cedro Doce divulgadas pela normativa brasileira – ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas do Cedro Doce – ABNT NBR 7190 (1997).

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

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; 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).

Wolenski et al. (2019) avaliaram a estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos (Normal, LogNormal, Weibull e Exponencial) de 40 espécies distintas do grupo de folhosas, dentre elas o Cedro Doce. Nos ensaios realizados, em conformidade com as premissas e os métodos de cálculo da ABNT NBR 7190:1997, verificou-se o enquadramento da madeira na classe C20, ou seja, com resistência à compressão paralela às fibras na ordem de 20 MPa.

2.1.2 Cajueiro (*Anacardium sp.*)

O Cajueiro (*Anacardium sp.*) é uma espécie predominante na região tropical da América do Sul; no Brasil, tem ocorrência natural nos seguintes estados: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. Como características gerais, apresenta cerne em exposição ao ar com cor uniforme, de castanho-avermelhada a amarelada ou avermelhada. O albúrnio é mais claro, com tonalidade rósea variável, vide Figura 3

Essa espécie tem brilho médio a alto e é atrativamente marcada com desenhos formados pelos veios e grã intercruzada. A madeira é leve, possuindo propriedades mecânicas baixas e retratibilidade também baixa. Apresenta vulnerabilidade ao ataque de fungos e insetos.

Ademais, é moderadamente difícil de ser seca ao ar livre. A velocidade de secagem é variada, havendo o risco de empenamentos e rachaduras. Em relação à trabalhabilidade, possui aspectos insatisfatórios no aplainamento e lixamento. É boa para entalhe, torneamento, furação e é de fácil colagem. Superfície áspera e lascada são os defeitos mais comuns quando se trabalha com máquinas (REMADE 2020; ITTO 2020).

Figura 3. Troncos da espécie Cajueiro



Fonte: Autora, 2022.

As Tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cajueiro (REMADE, 2020).

Tabela 4. Propriedades físicas do Cajueiro

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,12}$	440
ρ_{bas}	410
Contração (%)	
Radial	2,8
Tangencial	5,2
Volumétrica	8,4

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_{bas} = densidade básica.

Fonte: Adaptado de REMADE (2020); ITTO (2020).

Tabela 5. Propriedades mecânicas do Cajueiro.

Propriedades mecânicas	Densidade $\rho_{ap,12\%}$
f_{c0} (MPa)	32,5
f_M (MPa)	56,5
E_M (MPa)	8384,7
f_{v0} (MPa)	6,2
f_{H0} (N/cm ²)	2638
f_{H90} (N/cm ²)	2059

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{H90} = dureza Janka normal às fibras.

Fonte: Adaptado de REMADE (2020); ITTO (2020).

Na construção civil, o Cajueiro pode ser utilizado em aplicações leves internas, tais como: acabamentos, guarnições, forros e molduras (IPT, 2020).

Duarte *et al.* (2020) avaliaram a correlação das propriedades físico-mecânicas da madeira com os parâmetros de porosidade, densidade aparente e componentes químicos (celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas) de dez espécies tropicais, dentre elas o Cajueiro. Ao final, os autores verificaram ótimos resultados, como, por exemplo, a equação que estima a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) com R^2 igual a 99,69%.

A resistência característica à compressão da espécie Cajueiro foi avaliada na pesquisa de Almeida (2017) por meio do ensaio prescrito na normativa brasileira, observando o valor de 34 MPa, classificando a espécie como C30 da classe das folhosas. No estudo do referido autor, avaliou-se a estimativa de propriedades de resistência e rigidez de cinco madeiras tropicais pela técnica de colorimetria.

2.1.3 Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*)

O Angelim Pedra (*Hymenolobium petraeum*) é uma espécie florestal pertencente à família *Leguminosae*. É uma árvore predominantemente encontrada nas matas de terra firme, nas florestas tropicais do norte da América do Sul. No Brasil, tem ocorrência nos seguintes estados: Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. A espécie pode ser encontrada também na Guiana, na Guiana Francesa e em Suriname. Como características gerais, apresenta cerne e alburno pouco distintos pela cor; cerne castanho-avermelhado claro ou escuro, com manchas castanhas mais escuras devido à exsudação de óleo-resina; alburno castanho-pálido (Figura 4); superfície lisa, sem brilho; textura média a grossa; odor indistinto; densidade média; e dura ao corte. É uma espécie resistente a fungos e insetos de madeira seca, durável em relação a fungos apodrecedores, entretanto apresenta moderada resistência a brocas marinhas. Em relação à tratabilidade, o alburno é permeável, mas o cerne é de difícil preservação. A secagem da madeira é muito rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento (IPT, 2021).

Figura 4. Árvore e tronco da espécie Angelim Pedra.

Fonte: IPT (2021).

Quanto à trabalhabilidade, ela é fácil de ser trabalhada com ferramentas mecânicas, apresentando alguma dificuldade para ser trabalhada manualmente, e moderadamente fácil de serrar e aplinar. É necessária uma furação prévia para evitar rachaduras na madeira ou entortamento de pregos e parafusos, permitindo acabamento satisfatório. As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Angelim Pedra (IPT, 2021; REMADE, 2021, ITTO 2021).

Tabela 6. Propriedades físicas do Angelim Pedra.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,12}$	710
ρ_v	1190
ρ_{bas}	590
Contração (%)	
Radial	4,1
Tangencial	6,3
Volumétrica	10,1

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_v = densidade acima do ponto de saturação das fibras; ρ_{bas} = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2021).

Tabela 7. Propriedades mecânicas do Angelim Pedra.

Propriedades mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12\%}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	52,3	38
f_{c90} (MPa)	11,3	6,4
f_M (MPa)	109,3	70,6
E_M (MPa)	11572	9414
f_{v0} (MPa)	12,3	10
f_{H0} (N/cm ²)	7659	5325
f_{H90} (N/cm ²)	5786	5050
f_{t90} (MPa)	4,2	3,8

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{H90} = dureza Janka normal às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2021).

A Tabela 8 apresenta os valores de algumas propriedades físico-mecânicas da madeira Angelim Pedra divulgadas pela normativa brasileira – ABNT NBR 7190:1997. Pelos valores, a espécie é classificada como C40 do grupo das dicotiledôneas (folhosas).

Tabela 8. Propriedades físico-mecânicas do Angelim Pedra – ABNT NBR 7190 (1997).

Propriedades	Valores
$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	694
f_{c0} (MPa)	59,8
f_{t0} (MPa)	75,5
f_{t90} (MPa)	3,5
f_{v0} (MPa)	8,8
E_{c0} (MPa)	12912

$\rho_{ap,12\%}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; 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).

Em função das características apresentadas, o Angelim Pedra pode ser utilizado na construção civil, na carpintaria, na marcenaria, nas molduras, em dormentes, em lambris, em forros etc. (REMADE, 2021).

2.1.4 Castelo (*Calycophyllum multiflorum Rubiaceae*)

O Castelo (*Calycophyllum multiflorum Rubiaceae*) é uma espécie que pertence à família *Rubiaceae*, com ocorrência, no Brasil, nos estados do Mato Grosso e em Mato Grosso do Sul. Pode ser encontrada ainda na Bolívia, no Paraguai e na Argentina. Tem como características coloração castanha muito pálida (Figura 5), textura fina e homogênea, com cheiro e gosto indistintos. Sua madeira é pesada, dura, muito resistente à flexão e de boa durabilidade natural quando não exposta às intempéries. Possui baixa resistência ao ataque de fungos, entretanto é resistente ao ataque de cupins. Apresenta tratabilidade média com relação às soluções preservantes, com baixa absorção de conservantes à base de óleo, mas boa absorção de sais de arseniato de cobre cromado. Quanto à trabalhabilidade, é uma madeira de fácil desdobro, torneamento e faqueamento. O acabamento é considerado de boa qualidade. A secagem é moderadamente fácil, mas apresenta defeitos (REMADE, 2021; ITTO 2021).

Figura 5. Árvore da espécie Castelo

Fonte: http://cremedemulateiro.xpg.uol.com.br/a_arvore.html.

As Tabelas 9 e 10 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da espécie Castelo.

Tabela 9. Propriedades físicas do Castelo.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,12}$	780
ρ_{bas}	690
Contração (%)	
Radial	4,0
Tangencial	7,4

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_{bas} = densidade básica.
Fonte: Adaptado de ITTO (2021).

Tabela 10. Propriedades mecânicas do Castelo.

Propriedades mecânicas	Densidade $\rho_{12\%}$
f_{c0} (MPa)	55,2
f_M (MPa)	94,7
f_{H0} (N/cm ²)	9120

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ITTO (2021).

A madeira Castelo é empregada para a confecção de peças flexíveis e vergadas, peças torneadas de precisão, adorno e cabos de ferramentas. Na construção civil, é utilizada em tacos, esquadrias, caixilhos de janela etc. (REMADE, 2021).

Christoforo *et al.* (2017) determinaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira Castelo utilizando modelos de regressão para estimar seus valores de resistência e rigidez em função da densidade aparente. Nos ensaios realizados, em conformidade com a ABNT NBR 7190:1997, verificou-se um valor de resistência característica à compressão paralela às fibras da ordem de 55 MPa, que classifica a madeira na classe de resistência C40. Entretanto, a classificação pode ser dada como classe C50 (D50) do grupo das madeiras folhosas, conforme projeto de revisão da normativa brasileira ABNT NBR 7190 (1997), tendo em vista a inexistência da classe C50 na norma vigente e como forma ainda de melhorar a distribuição das amostras.

2.1.5 Mandioqueira (*Qualea Paraensis*)

A Mandioqueira (*Qualea Paraensis*), Figura 6, é uma espécie predominante na Floresta Amazônica, com ocorrência no Brasil (Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Mato Grosso), na Guiana Francesa, no Peru e na Colômbia. Essa madeira tem como característica cerne bege claro amarelado ou levemente rosado, albarno amarelado bem demarcado do cerne, e brilho moderado. Apresenta linhas vasculares facilmente visíveis, um tanto retas e longas. Os raios no topo são finos e numerosos, visíveis sob lente, bem uniformes na largura, e, na face tangencial, apresentam-se curtos e irregularmente distribuídos. Na face radial são contrastados. A espécie é moderadamente resistente ao ataque de fungos e cupins. Apresenta moderada facilidade ao corte e ao aplainamento com ferramentas manuais ou mecânicas, um bom acabamento, boa colagem, é fácil de toronar e tem bom comportamento durante a aplicação de pregos (ITTO, 2020). As Tabelas 11 e 12 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Mandioqueira (NBR 7190:1997, ITTO,2020).

Figura 6. Árvore e tronco da espécie Mandioqueira



Fonte: <https://tropical.theferns.info/image.php?id=Qualea+paraensis>.

Tabela 11. Propriedades físicas da Mandioqueira

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,12}$	820
ρ_{bas}	640
Contração (%)	
Radial	6,1
Tangencial	10,9

$\rho_{ap,12}$ = densidade aparente ao teor de umidade de 12%; ρ_{bas} = densidade básica.

Fonte: Adaptado de ITTO (2020).

Tabela 12. Propriedades mecânicas da Mandioqueira

Propriedades mecânicas	Densidade $\rho_{ap,12\%}$
f_{c0} (MPa)	71,04
f_{c90} (MPa)	10,8
E_{c0}	18971
f_M (MPa)	117,8
E_M (MPa)	13739
f_{v0} (MPa)	10,6
f_{H0} (N/cm ²)	8522
f_{H90} (N/cm ²)	7433
f_{t90} (MPa)	2,7

f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_{c90} = resistência à compressão normal às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras; f_M = módulo de ruptura na flexão estática; E_M = módulo de elasticidade na flexão estática; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{H0} = dureza Janka paralela às fibras; f_{H90} = dureza Janka normal às fibras; f_{t90} = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997); ITTO (2020).

Pelos valores verificados na Tabela 12, a espécie é classificada como C60 do grupo das dicotiledôneas (folhosas), podendo ser empregada na construção civil em esquadrias e em uso estrutural. Também pode ser utilizada em compensados e laminados, caixas, embalagens, paletes, remos, canoas, artigos de esporte e brinquedos (ITTO, 2020).

Christoforo *et al.* (2016) avaliaram a estimativa da retratibilidade da madeira em função da densidade aparente de cinco espécies nativas brasileiras, dentre elas a Mandioqueira (*Qualea sp.*). Foram considerados quatro modelos de regressão (exponencial, linear, quadrático e cúbico) e, ao final, os autores concluíram que é possível estimar a retratibilidade volumétrica e tangencial pelo modelo de regressão quadrático ($R^2 > 70\%$).

2.2 Estimativas das propriedades da madeira

No Brasil, a obtenção das propriedades físicas e mecânicas da madeira é regulamentada pela norma ABNT NBR 7190:1997, que apresenta, em seu Anexo B, os métodos e ensaios em corpos de prova para caracterização completa da madeira à condição padrão de umidade de 12%.

A caracterização completa requer o conhecimento de 16 propriedades distintas da espécie avaliada, distribuídas entre propriedades físicas e mecânicas. Entende-se por propriedades físicas de caracterização da madeira: teor de umidade (TU), densidade básica (ρ_{bas}), densidade aparente (ρ_{ap}) e estabilidade dimensional.

Quanto às propriedades mecânicas de caracterização completa da madeira, tem-se: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à compressão normal às fibras (f_{c90}), resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}), resistência ao fendilhamento paralelo às fibras (f_{s0}), módulo de ruptura na flexão estática (f_M), módulo de elasticidade na flexão estática (E_M), dureza paralela às fibras (f_{H0}) e dureza normal às fibras (f_{H90}).

Ainda, para a realização da classificação completa da madeira, é necessário um lote homogêneo da espécie avaliada, com volume não superior a 12 m³.

Para tanto, a obtenção de tais propriedades requer maquinário e mão de obra especializados, dispostos apenas em grandes centros de pesquisa. Considerando as dificuldades impostas nesse processo, a normativa brasileira em questão prevê, na impossibilidade de todos os ensaios, equações de relação entre propriedades da madeira. Por sua vez, tais relações instigam estudos quanto à possibilidade de correlações entre propriedades da madeira.

2.2.1 Estimativa das propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente

Dentre as propriedades físico-mecânicas da madeira, a densidade aparente (ρ_{ap}) é a propriedade física de mais fácil determinação, dada pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova de madeira com teor de umidade na condição padrão de 12%, aferido pelo método de secagem em estufa ou por meio de medidores elétricos de umidade. Por essa razão, nos últimos anos, vários trabalhos foram desenvolvidos tomando-se a densidade como estimadora das demais propriedades físico-mecânicas, simplificando, assim, o processo de caracterização completa de uma espécie e, conseqüentemente, da aumentando a inserção da madeira no setor da construção civil.

Almeida *et al.* (2014) avaliaram estimativas da tenacidade da madeira em função da

densidade aparente. Para tanto, foram consideradas as madeiras *Tectona grandis*, *Schizolobium amazonicum*, *Pinus oocarpa* Shiede, *Corymbia citriodora*; *Hymenaea* sp. e *Anadenanthera falcata*, e modelos de regressão linear, quadrático e cúbico. Ao final, todos os modelos de regressão foram considerados significativos, com valores dos coeficientes de determinação (R^2) superiores a 70%, com valor máximo para o modelo de regressão geométrico com R^2 equivalente a 84,70%. Tal fato implica a viabilidade da estimativa da tenacidade de madeiras a partir da densidade aparente.

Christoforo *et al.* (2014) realizaram estimativas de tenacidade da madeira em função da densidade aparente e do módulo de ruptura na flexão estática, adotando-se modelos de regressão linear, quadrático e cúbico. Para a pesquisa, foram avaliadas 15 espécies de madeiras tropicais brasileiras, distribuídas nas classes de resistência prescritas pela normativa ABNT NBR 7190:1997. Os coeficientes de determinação para modelos de tenacidade em função da densidade aparente foram mais precisos, apresentando melhor valor de R^2 igual a 67,8%.

Machado *et al.* (2014) analisaram a variação da densidade aparente, ao teor de 12% de umidade, dos módulos de elasticidade e de ruptura em ensaios de flexão estática e da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Acacia melanoxylon* R. Br., considerando o local de extração da árvore, e locais de extração do corpo de prova na árvore. Foram considerados modelos de regressão linear para correlacionar a densidade aparente às propriedades mecânicas. Em primeira análise realizada com os resultados dos corpos de provas, os valores de coeficiente de determinação foram muito baixos para as correlações entre densidade aparente e módulo de elasticidade ($R^2 = 42\%$) e módulo de ruptura ($R^2 = 26\%$) na flexão estática e densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras ($R^2 = 21\%$). As correlações realizadas por intermédio das densidades aparentes das madeiras tiveram valores de coeficiente de determinação superiores, com correlações entre $\rho_{ap,12}$ e E_M ($R^2 = 53\%$); $\rho_{ap,12}$ e f_M ($R^2 = 64\%$); e $\rho_{ap,12}$ e f_{c0} ($R^2 = 45\%$).

Almeida *et al.* (2015) analisaram a correlação linear entre densidade da madeira seca e coeficiente de retratibilidade volumétrico de três espécies de madeiras tropicais: *Cedrella* sp., *Cassia ferruginea* e *Vataireopsis araroba*. De modo independente, nenhuma das espécies apresentou correlação linear. Contudo, tomando todas as espécies em um único grupo em modelo de ajuste linear, foi determinado p-valor $< 5\%$ e R^2 igual a 52%, considerado um valor razoável.

Almeida *et al.* (2016) analisaram estimativas da resistência da madeira à compressão paralela às fibras por intermédio da densidade aparente ao teor de 12% de umidade. Foram consideradas as espécies de madeiras tropicais brasileiras *Canafistula* (*Cassia ferruginea*),

Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.), e modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico. Ao nível de 5% de significância, foram realizadas análises de variância (ANOVA) nos modelos de regressão estudados, e, para as espécies Canafístula e Castelo, o modelo de regressão geométrico se mostrou mais efetivo, com coeficientes de determinação de 48,57% e 52,84%, respectivamente. Para o Angelim Araroba, os modelos não foram significativos, pois todos apresentaram p-valores superiores a 5%. Quando consideradas todas as espécies em apenas um grupo, o modelo de regressão mais efetivo foi o linear, com $R^2 = 17,88\%$; e p-valor = 0,01.

Cavalheiro *et al.* (2016) estimaram a retratibilidade e os coeficientes de anisotropia por intermédio da densidade básica e da densidade aparente como variáveis independentes. O estudo foi realizado considerando madeiras de coníferas (*Pinus* sp. e *Pinus oocarpa*) e dicotiledôneas (*Schizolobium amazonicum*, *Hymenaea* sp. e *Lyptus*®) e quatro modelos de regressão: linear, exponencial, logarítmico e geométrico. Ao final, as únicas relações significativas envolveram apenas as correlações entre a densidades básica e a aparente, com modelo de regressão linear (91,72% para as coníferas e 83,36% para as dicotiledôneas).

Christoforo *et al.* (2016) avaliaram estimativas de retratibilidade da madeira através da densidade aparente. Para tanto, foram consideradas cinco espécies nativas brasileiras: Doce (*Cedrela* sp.); Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), considerando ainda modelos de regressão exponencial, linear, quadrático e cúbico. Ao fim, o modelo de regressão quadrático se mostrou efetivo na estimativa das retratibilidades volumétrica e tangencial, com valor de R^2 superiores a 70%.

Lahr *et al.* (2016) realizaram, em conformidade com a ABNT NBR 7190:1997, a caracterização completa da madeira *Vatairea* sp., popular Angelim Saia. Com base nos resultados obtidos em modelos de regressão linear, quadrático, logarítmico e geométrico, estimaram as propriedades da madeira por meio da densidade aparente. As propriedades mecânicas de resistência à compressão paralela às fibras, e de dureza paralela e dureza normal às fibras apresentaram boa correlação, com coeficientes de determinação superiores a 60% em todos os modelos de regressão adotados.

Christoforo *et al.* (2017) realizaram, em conformidade com a ABNT NBR 7190:1997, a caracterização completa da espécie *Anadenanthera colubrina*, conhecida popularmente como Angico Branco. Com base nos resultados obtidos, e com auxílio dos modelos de regressão linear, exponencial, quadrático e geométrico, foi possível estimar correlações entre as propriedades determinadas e a densidade aparente da madeira. A melhor estimativa, com

coeficiente de determinação equivalente a 56,32%, foi obtida entre densidade aparente e módulo de elasticidade na direção paralela às fibras.

Aquino *et al.* (2018) avaliaram, para as madeiras de *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Quercus laurina* Humb. & Bonp., relações entre 27 propriedades mecânicas, densidade, teor de umidade, coeficientes de anisotropia e retratibilidade e ponto de saturação das fibras. A melhor correlação com uma única variável ocorreu entre o módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras e a retratibilidade tangencial, com regressão exponencial e $R^2 = 0,494$. Considerando mais variáveis (modelo multivariado linear), a melhor correlação, com $R^2 = 0,93$ (p -valor $< 0,001$), foi obtida para o módulo de elasticidade da madeira a 12% por intermédio dos seguintes parâmetros: coeficiente de anisotropia, densidade básica, retratibilidade radial tangencial e teor de umidade verde.

Pelo exposto, tem-se que a densidade aparente é uma propriedade utilizada amplamente para estimativas de propriedades da madeira.

2.2.2 Estimativa das propriedades da madeira pelo método da vibração transversal

O emprego de técnicas não destrutivas para a obtenção de propriedades da madeira é tema de vários estudos da literatura recente. Dentre tais técnicas, tem-se a vibração transversal como método de avaliação não destrutivo baseado na relação entre a frequência natural de vibração e a rigidez do elemento para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d). O ensaio consiste na aplicação de um impacto a uma peça de madeira biapoiada fazendo com que ela vibre na sua frequência natural, até que a vibração cesse em função do amortecimento. Os valores de vibração são captados por uma célula de carga que envia os dados para um computador que determina a frequência e o módulo de rigidez. A técnica se destaca pela concepção simples, pelo grande potencial de aplicação (fundamentalmente pelas indústrias madeireiras), pela precisão do modelo matemático associado e, ainda, pela possibilidade de emprego das peças em dimensões estruturais (CARREIRA *et al.*, 2017).

Sales, Candian e Cardin (2011) avaliaram a precisão das técnicas de ultrassom e vibração transversal em relação aos valores obtidos em ensaios estáticos em madeira com dimensões estruturais da espécie brasileira *Goupia glabra*. Foram aplicados os métodos de ultrassom e vibração transversal para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) concomitantemente aos testes de flexão estática, que determinaram o módulo de elasticidade estático (MOE). Os valores dos coeficientes de determinação foram equivalentes a 0,88 para

ambas as técnicas e, portanto, as metodologias foram consideradas efetivas para inferência não destrutiva do módulo de elasticidade da madeira.

Carreira *et al.* (2012) investigaram a aplicação das técnicas de vibração transversal e longitudinal na avaliação do módulo de elasticidade na flexão de vigas da espécie Teca (*Tectona grandis*), proveniente de reflorestamento, e da espécie tropical Guajará (*Micropholis venulosa*). Houve boa correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico. Contudo, atenta-se para o fato de que a precisão da técnica de vibração transversal teve redução significativa na avaliação de rigidez à flexão para a espécie Teca devido à presença de nós nas peças avaliadas.

Arriaga *et al.* (2013) compararam as propriedades de flexão determinadas por testes não destrutivos (vibração longitudinal e transversal) e mecânicos (módulo de elasticidade e módulo de ruptura) em 150 peças de madeira serrada de *Pinus radiata* D. Don. da Catalunha, Espanha. A frequência de vibração foi medida pela gravação do som produzido pelo impacto inserido às peças nas direções longitudinal e transversal, e o sinal processado pelo som de transformada rápida de Fourier. Ambos os métodos foram efetivos na estimativa de propriedades mecânicas, oferecendo melhores resultados se comparados às regras de classificação visual de peças.

Almeida *et al.* (2016) realizaram um estudo comparativo entre métodos de vibração transversal e flexão estática para determinação da rigidez de peças estruturais (2,5 cm x 15 cm x 250 cm) da espécie *Pinus elliottii*. Para tanto, foram obtidos os módulos de elasticidade (MOE), que se mostraram estatisticamente equivalentes para a condição padrão de umidade a 12%.

Medeiros Neto, Paes e Segundinho (2016) estudaram o emprego de técnicas não destrutivas (vibração transversal e longitudinal e *stress wave*) em comparação aos resultados obtidos no ensaio de flexão estática. Foram consideradas as espécies de Eucalipto (*Corymbia citriodora*), Louro Preto (*Cordia alliodora*), Massaranduba (*Manilkara* sp.) e Pau Brasil (*Caesalpinia echinata*), totalizando 20 amostras com dimensões nominais de 2 cm x 2 cm x 30 cm (relação vão livre por altura inferior à recomendada devido às dimensões do material disponível) a condição padrão de 12% de umidade. O ensaio de vibração transversal foi realizado através de corpos de prova sustentados sobre fios de elastômero, conectados a duas hastes de madeira apoiadas em pontos nodais (0,224 vezes o comprimento da amostra). Os impactos provenientes da batida do martelo foram captados por microfone e transformados em frequências pelo programa *Fast Fourier Vibration Analyzer* – FFT. Para efeitos comparativos, foram obtidos por métodos destrutivos (máquina universal de ensaios, com capacidade de 100 kN) os módulos de elasticidade e de ruptura à flexão (MOE e MOR, respectivamente). Valores significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$) tiveram médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise das relações entre técnicas não destrutivas e destrutivas foi feita pela regressão linear simples, o teste de Pearson. Ao final, constatou-se que a técnica de vibração transversal proporcionou os maiores coeficientes de correlações entre as técnicas testadas. As melhores correlações entre os MOEs foram obtidas para as madeiras de menores massas específicas.

Carreira, Dias e Segundinho (2017) avaliaram a efetividade do método não destrutivo de vibração transversal na determinação do módulo de elasticidade de toras de madeira da espécie *Corymbia citriodora*. Para tanto, foram confeccionadas 38 amostras com diâmetros de 13,6 cm a 20 cm e comprimento de 4 m a 4,4 metros. As peças foram submetidas à vibração transversal e ao ensaio de flexão estática, apontando correlação entre os resultados obtidos, com coeficiente de determinação de 0,92. Assim, tem-se que o método da vibração transversal é viável para a obtenção do módulo de elasticidade à flexão de troncos dessa espécie.

Em vista disso, tem-se que o ensaio não destrutivo de vibração transversal é um método prático e confiável para a determinação dos módulos de elasticidade da madeira.

2.3 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

A princípio, tem-se que a caracterização completa, em conformidade com a normativa brasileira, requer a obtenção de 16 propriedades físicas e mecânicas distintas de uma espécie de madeira, e, portanto, é condicionada a maquinário e mão de obra especializados existentes apenas em grandes centros de pesquisas.

Considerando tais dificuldades, a normativa prevê também equações de relações entre propriedades da madeira, as quais instigam pesquisas quanto a possíveis correlações entre tais propriedades.

A literatura citada apresenta que a estimativa das propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente (ora de modo independente, ora em conjunto com as demais propriedades) tem apresentado boas correlações. Salienta-se que a densidade aparente é uma propriedade física de fácil determinação, e a existência de correlações entre propriedades por intermédio dela é fundamental para a simplificação do processo de caracterização.

A literatura apresenta ainda a relevância de métodos não destrutivos para a obtenção de propriedades da madeira. Nacional e internacionalmente, a técnica da vibração transversal para a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico desse material tem revelado correlações muito satisfatórias.

Por se tratar de um tema recente e inovador no que se refere à madeira, no estado da arte inexistem trabalhos que utilizem quaisquer propriedades para a estimativa de todas as 16

propriedades requeridas para a caracterização completa de uma espécie de madeira. Assim sendo, não há trabalhos que unam a técnica da vibração transversal, e, portanto, a frequência natural de vibração, à densidade aparente para a estimativa de todas as propriedades requeridas pela normativa, evidenciando, assim, a relevância e a contribuição deste trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia empregada para a determinação das propriedades físicas e mecânicas das madeiras avaliadas e a elaboração de modelos de regressão que correlacionam as propriedades de caracterização requeridas pela normativa à densidade aparente e à frequência de vibração natural (primeiro modo) advinda do ensaio de vibração transversal.

3.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados cinco lotes de madeira de diferentes espécies tropicais brasileiras, relacionadas na Tabela 13. Essas espécies foram escolhidas visando abranger todas as classes de resistência apresentadas pelo grupo das folhosas (C20 a C60), conforme norma ABNT NBR 7190:1997.

Tabela 13. Relação das espécies utilizadas no estudo.

Nome popular	Nome científico	Classe de resistência
Cedro Doce	<i>Cedrella sp.</i>	C20
Cajueiro	<i>Anacardium sp.</i>	C30
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	C40
Castelo	<i>Calycophyllum multiflorum</i> <i>Rubiaceae</i>	C50
Mandioqueira	<i>Ruizterania albiflora (Warm.)</i> <i>Marc. -Berti, Vochysiaceae</i>	C60

Fonte: Autora

Tais espécies, com teor de umidade na condição padrão de 12% (aferidos por meio de medidor portátil de umidade), estavam devidamente estocadas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), da Universidade de São Paulo (USP).

3.2 Métodos

3.2.1 Confeção dos corpos de prova

Inicialmente, foram consideradas 12 peças com dimensões estruturais de seção

transversal quadrada (vigas de 12 cm x 12 cm) para os ensaios de vibração transversal e flexão estática não destrutiva para cada espécie estudada, totalizando 60 (12 x 5) peças com teor de umidade de 12%. Os corpos de provas estruturais (vigas) das espécies estudadas possuíam comprimento variando de 2 m a 2,7 m. Essa diferença se deu em função da disponibilidade das vigas que se encontravam serradas, haja vista que a primeira espécie ensaiada, a Mandioqueira, possuía comprimento de 2,7 m e, quando da realização do ensaio, não foi aferida a dimensão das demais espécies, as quais estavam confeccionadas com comprimentos inferiores, sendo o Cedro Doce e o Castelo com 2,2 m, e as demais, Cajueiro e Angelim Pedra, com 2 m.

Posteriormente aos ensaios de vibração transversal e flexão estática não destrutiva, de cada elemento estrutural foi retirado um corpo de prova pertinente ao ensaio requerido para caracterização das espécies. A caracterização completa da madeira é regulamentada pela normativa ABNT NBR 7190:1997, que apresenta em seu Anexo B os métodos e ensaios para a caracterização completa da madeira à condição padrão de umidade de 12%. Previamente à confecção dos corpos de prova, verificou-se o teor de umidade das peças estruturais com o auxílio do medidor portátil de umidade, de forma a assegurar a percentagem de 12% de umidade para os ensaios.

Na normativa brasileira, são especificados, para um lote homogêneo de madeira serrada, 12 métodos de ensaios necessários para a obtenção de propriedades para a caracterização completa da madeira, e também para a determinação de outras propriedades que servem exclusivamente como elementos comparativos da resistência entre diferentes espécies. São eles: umidade, densidade, estabilidade dimensional, compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento, fendilhamento, flexão, dureza e resistência ao impacto na flexão. Assim, ao final deste estudo, foram realizados, no total, 720 (60 x 12) ensaios para a determinação das propriedades listadas no Quadro 1. Os ensaios para determinação das propriedades mecânicas foram realizados na máquina universal de ensaios da marca AMSLER, que possui capacidade de carga de 25 toneladas e está instalada no LaMEM da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

Quadro 1. Propriedades físico-mecânicas a serem obtidas.

Propriedades	Abreviação
Teor de umidade	U
Densidade aparente	ρ_{12}
Retração radial total	RRt
Retração tangencial total	RTt
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}
Resistência à compressão normal às fibras	f_{c90}
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}
Resistência convencional à flexão estática	f_m
Dureza paralela às fibras	f_{H0}
Dureza normal às fibras	f_{H90}
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}
Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras	E_{c90}
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_M
Tenacidade	W

Fonte: Autora.

Foram calculados os valores característicos das propriedades físicas e mecânicas avaliadas em conformidade com a ABNT NBR 7190:1997, a qual estabelece o quantitativo mínimo de 12 corpos de prova para a caracterização de um lote de madeira homogêneo de espécies pouco conhecidas.

Segundo a referida normativa, após a determinação da resistência para n corpos de prova, os resultados devem ser ordenados de modo crescente ($f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$), desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos de prova for ímpar. Ainda, o valor da resistência característica da madeira (f_{wk}) (Equação 1) não pode ser inferior a f_1 , nem a 0,70 do valor médio.

$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2) - 1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,10 \quad (1)$$

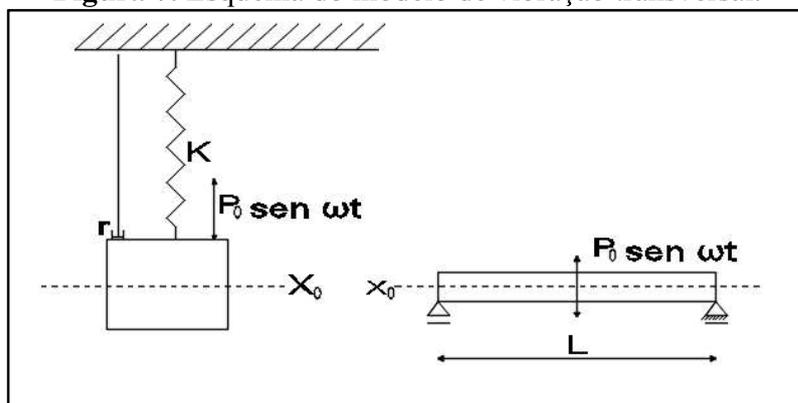
3.2.2 Vibração transversal

O ensaio de vibração transversal fundamenta-se na teoria de que todos os materiais possuem uma frequência natural na qual vibram quando sujeitos a forças dinâmicas. Para cada forma de vibrar, a estrutura apresenta uma frequência natural de vibração, sendo que a mais importante nos estudos dinâmicos é a primeira, menor entre todas, denominada frequência natural do primeiro modo ou frequência fundamental. Esses valores indicam a taxa de oscilação livre da estrutura após cessada a força que provocou o seu movimento, ou seja, quanto a estrutura vibrará quando não mais houver força aplicada sobre ela (BOLINA, 2015).

A técnica de vibração transversal, para estruturas de madeira, tem sido utilizada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico por meio de indução de movimento vibratório em peças estruturais. O valor obtido no ensaio fornece uma indicação da rigidez baseada na relação entre a frequência natural de uma peça de madeira que vibra livremente e o seu módulo de elasticidade (MORGADO, 2012).

Segundo Ross e Pellerin (1994), o ensaio de vibração é iniciado com a aplicação de um impacto transversal, análogo ao comportamento da vibração de uma viga biapoiada com a vibração de um sistema massa-mola amortecido, conforme Figura 7.

Figura 7. Esquema do modelo de vibração transversal.



Fonte: Adaptado de Ross e Pellerin (1994).

Dessa forma, considerando a situação da Figura 2, em que a massa é suportada por uma mola de rigidez K cuja fricção interna (amortecimento) é denotada por r, quando a massa M é

colocada em vibração, a equação de movimento pode ser expressa pela Equação 2, que pode ser resolvida em K ou em r.

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + r \left(\frac{dx}{dt} \right) + Kx = P_o \text{ sen}\omega t \quad (2)$$

Em que:

- m = massa
- x = posição;
- t = tempo
- ω = frequência angular da força (frequência de entrada);
- P_o = força
- K = Constante elástica da mola;

Considerando a mola livre e sem atuação de forças externas ou atrito, a solução da Equação 2 para K resulta numa expressão para o módulo de elasticidade (MOE) para uma viga simplesmente apoiada nas extremidades, conforme Equação 3.

$$E_{dvt} = \frac{f_r^2 \cdot P \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (3)$$

Na Equação 3, tem-se:

- E_{dvt} = módulo de elasticidade dinâmico
- f_r = frequência de vibração (Hz)
- P = peso da viga (N)
- L = distância entre os apoios (m)
- I = momento de inércia da seção transversal (m^4)
- g = aceleração da gravidade (9,80665 m/s^2)

Considerando que a massa da viga é dada em função do produto da densidade pelo volume da peça, a Equação 3 pode ser reescrita conforme expresso na Equação 4, podendo ser observado que a frequência natural de vibração da peça ensaiada é extremamente sensível à variação das dimensões da peça, principalmente no que tange à variação do comprimento. Para

o presente estudo, a razão entre o comprimento das peças e altura da seção transversal (L/h) variou de 16,67 a 22,50.

$$f_r = \sqrt{\frac{E_{dvt} \cdot 2,46 \cdot h^2}{\rho \cdot L^4 \cdot 12}} \quad (4)$$

Em que:

- h = altura da peça (m)
- ρ = densidade da viga (kg/m³)

Para o presente estudo, a avaliação não destrutiva de vibração transversal foi realizada com recurso do equipamento *Transverse Vibration E-Computer*, modelo 340, da Metriguard (Figura 8), de posse do LaMEM. Esse equipamento permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência natural de vibração.

Figura 8. Ensaio de vibração transversal



Fonte: Autora.

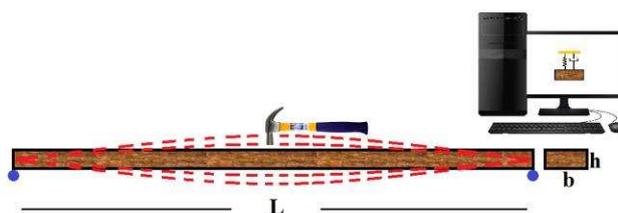
O equipamento é composto por: uma unidade de interface eletrônica, dois conjuntos de tripés, um peso de calibração, um módulo de software em disco, uma célula de carga e cabos de conexão necessários. Para que haja precisão nos resultados, o aparelho deve ser calibrado, utilizando para isso uma barra de alumínio com dimensões, massa e módulo de elasticidade conhecidos.

Como dados de entrada, o programa solicita as medidas de base, altura e comprimento da peça a ser avaliada, bem como a medida externa aos apoios. Ressalta-se que a localização da peça em análise deve ser precisamente correspondente à medida externa entre apoios informada. O peso do elemento é obtido automaticamente pela célula de carga existente. O início do ensaio se dá pela aplicação de uma força externa no meio do vão através de um

martelo, que provoca a vibração do elemento. Então, a célula de carga presente em um dos tripés capta a frequência de vibração e envia os dados ao computador, Figura 9.

Por fim, o programa computacional processa os cálculos pertinentes e armazena os dados e resultados prontos em arquivo de texto, incluindo a frequência de pico (frequência natural) a ser utilizada nos modelos de regressão para a estimativa das propriedades.

Figura 9. Esquema de captação dos dados do ensaio de vibração transversal.



Fonte: Autora.

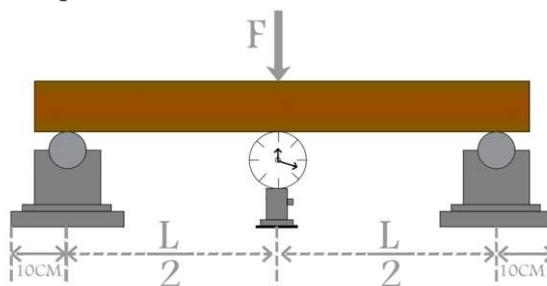
3.2.3 Flexão estática não destrutiva

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão estática não destrutivo com o objetivo de obter o módulo de elasticidade à flexão, baseado nas adaptações das normativas NBR 7190:1997 e ASTM D4761:1996, haja vista que a normativa brasileira não define a metodologia para a obtenção do módulo de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos para peças estruturais.

O ensaio foi realizado em três pontos nas peças de madeira e conduzido de forma não destrutiva, em conformidade com a ASTM D4761:1996. Para tanto respeitou-se o deslocamento máximo limitado ao comprimento do vão entre apoios (L) dividido por 200 ($L/200$) conforme ABNT NBR 7190:1997, garantindo linearidade física e geométrica para as peças ensaiadas.

Considerando-se a altura nominal de 12 cm, as peças foram flexionadas com uma relação L/h variando de 16,67 a 20,83, equivalente à relação L/h preconizada pela ASTM D4761:1996, que estabelece o intervalo situado entre 17 e 21. As peças estruturais de madeira foram colocadas sobre apoios de aço e aplicou-se uma força no centro da viga, a qual foi medida instantaneamente por um dinamômetro e o deslocamento aferido por meio de relógio comparador, resolução 0,01 mm, conforme esquema da Figura 10.

Figura 10. Esquema do ensaio de flexão estática não destrutivo



Fonte: Autora.

O módulo de elasticidade à flexão (E_{Est}) foi obtido pela Equação 5.

$$E_{Est} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (5)$$

Da Equação 5 tem-se:

- P = força aplicada no centro do vão (N);
- L = distância entre os apoios (mm);
- δ = deslocamento vertical máximo devido à imposição da força (mm);
- I = momento de inércia da seção transversal (mm^4).

3.2.4 Densidade aparente

A densidade aparente da madeira ($\rho_{ap,12\%}$) é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa ($m_{12\%}$) e o volume ($v_{12\%}$) do corpo de prova, com teor de umidade de 12%, sendo expressa pela Equação 6.

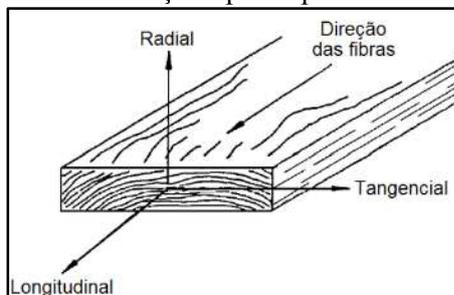
$$\rho_{ap,12\%} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \quad (6)$$

Os corpos de prova para a estimativa da densidade aparente foram confeccionados de forma prismática, com seção transversal nominal de 20 mm por 30 mm, e comprimento, ao longo das fibras, de 50 mm. As dimensões das seções transversais das amostras foram determinadas com paquímetro digital (precisão de 0,01 mm) e balança digital (sensibilidade de 0,001 gramas).

3.2.5 Retração da madeira

A estabilidade dimensional das espécies de madeira, material ortótropo (propriedades distintas em direções perpendiculares entre si), foi avaliada por meio das propriedades de retração e inchamento de um lote de madeira considerado homogêneo, obtidas em 12 amostras conforme normatizado pela ABNT NBR 7190:1997. Para a propriedade de retração (ϵ), os resultados foram obtidos nas direções preferenciais 1, 2 e 3 (vide Figura 11), correspondentes às direções axial, radial e tangencial; além do coeficiente de retração volumétrica (ΔV), expresso nas Equações 7 e 8, respectivamente.

Figura 11. Direções principais da madeira.



Fonte: GREEN; WINANDY; KRETSCHMANN (1999).

$$\epsilon_{r,n} = \left(\frac{L_{n,sat} - L_{n,seca}}{L_{n,seca}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

$$\Delta V = \left(\frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Na Equação 7, tem-se que:

- r: propriedade de retração
- n: direção de referência considerada – 1 (longitudinal), 2 (radial) ou 3 (tangencial)
- L: dimensão da amostra na direção axial (paralela às fibras)

Na Equação 8:

- V_{sat} : $L_{1,sat} \cdot L_{2,sat} \cdot L_{3,sat}$ é o volume da amostra saturada
- V_{seca} : $L_{1,seca} \cdot L_{2,seca} \cdot L_{3,seca}$ é o volume da amostra seca
- L: dimensão representativa dos três lados do corpo de prova

Para o estudo da retratibilidade, os corpos de prova devem conter umidade acima do ponto de saturação das fibras. Quando o teor de umidade for menor que o ponto de saturação das fibras, deve-se reumidificar os corpos de prova seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7190:1997, e para a determinação do inchamento, os corpos de prova devem estar secos.

3.2.6 Compressão paralela às fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras é normatizado pela ABNT NBR 7190:1997, sendo que a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima força de compressão ($F_{c0,máx}$), que pode atuar em um corpo de prova com área (A) de seção transversal nominal de 5 cm de lado e comprimento de 15 cm, com precisão dimensional exigida de 0,1mm, sendo expresso na Equação 9.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{Área} \quad (9)$$

A resistência foi determinada com carregamento monotônico crescente, em torno de 10 MPa por minuto, até a ruptura do corpo de prova.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras foi determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica. Para essa finalidade, o módulo de elasticidade foi obtido pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras medidas no terceiro ciclo de carregamento, sendo dado pela Equação 10.

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

Para a obtenção do módulo de elasticidade, a ABNT NBR 7190:1997 prevê a utilização de, no mínimo, dois medidores mecânicos de deformação, com sensibilidade de milésimo de milímetro (0,001 mm), devidamente fixados no corpo de prova em faces opostas a uma distância de 100 mm entre linhas de fixação e afastadas das extremidades de 25 mm, conforme a Figura 12.

Figura 12. Ensaio de compressão paralela às fibras com uso de medidores.



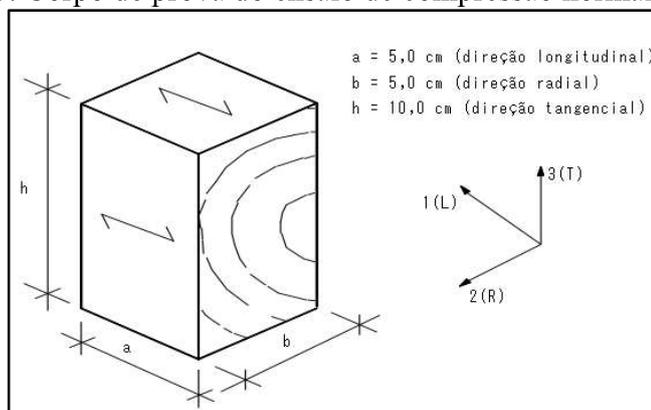
Fonte: Autora.

3.2.7 Compressão normal às fibras

A resistência à compressão normal às fibras (f_{c90}) foi obtida em função da razão entre a força máxima de compressão ($F_{c90,max}$) pela área (A) (Equação 11), adotando uma deformação específica residual de 2% em corpos de prova prismáticos de seção transversal quadrada, com dimensões nominais de 5 cm de lado e altura, na direção tangencial, de 10 cm, conforme a Figura 13. As deformações foram medidas com um relógio comparador aferido, de sensibilidade igual a 0,01 mm (Figura 14), e o carregamento monotônico crescente foi aplicado na ordem de 10 MPa/min.

$$f_{c90} = \frac{F_{c90,max}}{Área} \quad (11)$$

Figura 13. Corpo de prova do ensaio de compressão normal às fibras.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997).

Figura 14. Ensaio de compressão normal às fibras.



Fonte: Autora.

A rigidez da madeira na direção normal às fibras foi calculada em função do módulo de elasticidade (E_{c90}), obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, definida pelos pontos ($\sigma_{10\%}$; $\varepsilon_{10\%}$) e ($\sigma_{50\%}$; $\varepsilon_{50\%}$), correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da resistência convencional à compressão normal às fibras (f_{c90}), sendo expresso pela Equação 12.

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (12)$$

Para a obtenção da rigidez, a resistência da madeira foi estimada ($f_{c90,est}$) por meio de ruptura, ensaio destrutivo de um corpo de prova gêmeo, selecionado da mesma amostra investigada. Posteriormente à resistência conhecida, aplicaram-se dois ciclos de carga e descarga com a avaliação das tensões e deformações, correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c90} , seguindo o mesmo procedimento para a compressão paralela.

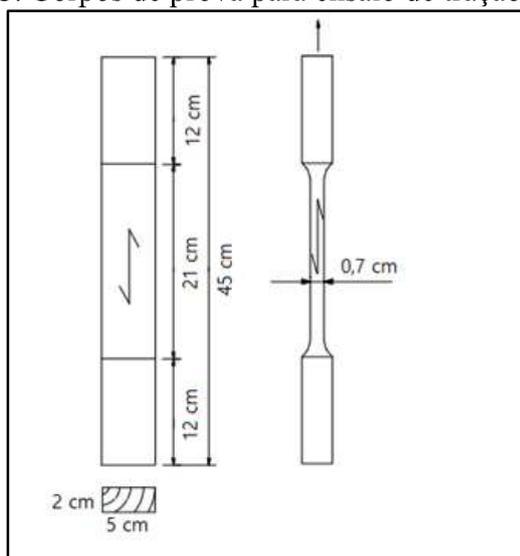
3.2.8 Tração paralela às fibras

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) é determinada em função da máxima força de tração ($F_{t0,máx}$) que atua em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área (A) e comprimento não menor que $8\sqrt{A}$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que possam garantir a ruptura no trecho central, sendo expresso pela Equação 13. O corpo de

prova utilizado no ensaio deste estudo foi o de seção transversal retangular, conforme a Figura 15, com dimensões de 5 cm x 2 cm de lado e de 15 cm de comprimento na direção paralela às fibras, com precisão dimensional de 0,1 mm, conforme preconizado pela norma brasileira.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,máx}}{Área} \quad (13)$$

Figura 15. Corpos de prova para ensaio de tração paralela.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997).

O módulo de elasticidade foi obtido do trecho linear do diagrama tensão versus deformação específica. Para tanto, o módulo de elasticidade foi determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \epsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \epsilon_{50\%})$, correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras medida no ensaio, sendo dado pela Equação 14.

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (14)$$

A medida das deformações no corpo de prova foi realizada nas faces opostas do lado, medindo 5 cm, utilizando-se relógio comparador com exatidão de $50\mu m/m$ (micrômetro por metro), e o carregamento aplicado pela máquina de ensaios sobre o corpo de prova obedeceu a uma taxa de $10 MPa/min$ (vide Figura 16).

Figura 16. Ensaio de tração paralela às fibras com uso de relógio comparador.



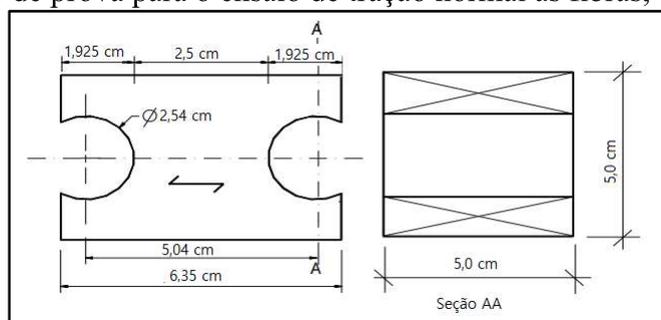
Fonte: Autora.

3.2.9 Tração normal às fibras

Segundo a norma brasileira, a resistência à tração normal às fibras da madeira (f_{t90}) é obtida em função da máxima força de tração (F_{t90}) que atua em um corpo de prova padrão (Figura 17) alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A_{t90} ($\approx 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) e comprimento não menor que $2,5 A$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que assegurem a ruptura no trecho central, conforme expresso na Equação 15.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,m\acute{a}x}}{A_{t90}} \quad (15)$$

Figura 17. Corpo de prova para o ensaio de tração normal às fibras, vista lateral e corte.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997).

O corpo de prova utilizado no ensaio foi confeccionado com precisão geométrica de 0,1 mm. No decorrer do ensaio, utilizou-se carregamento monotônico crescente correspondente a

uma taxa em torno de $2,5 \text{ MPa}/\text{min}$ e aplicado na direção tangencial. A Figura 18 apresenta o corpo de prova e o ensaio de tração normal às fibras.

Figura 18. Corpo de prova e ensaio de tração normal às fibras.



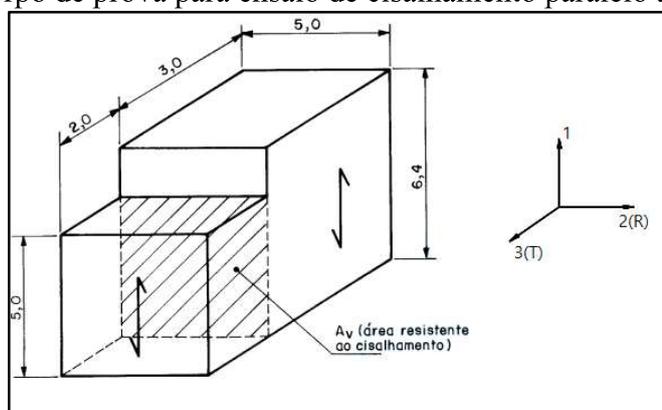
Fonte: Autora.

3.2.10 Cisalhamento paralelo às fibras

Esse ensaio consiste em determinar a resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras da madeira de um lote homogêneo. Segundo a ABNT NBR 7190:1997, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) é dada pela força máxima de cisalhamento ($F_{v0,max}$) que pode ser aplicada em um corpo de prova padrão (Figura 19) com área (A_{v0}), conforme a Equação 16.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (16)$$

Figura 19. Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997).

O corpo de prova foi confeccionado com precisão na dimensão de 0,1 mm e carregamento aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min. A Figura 20 apresenta o corpo de prova durante o ensaio e, posteriormente, rompido devido ao cisalhamento.

Figura 20. Ensaio de cisalhamento e corpo de prova rompido.



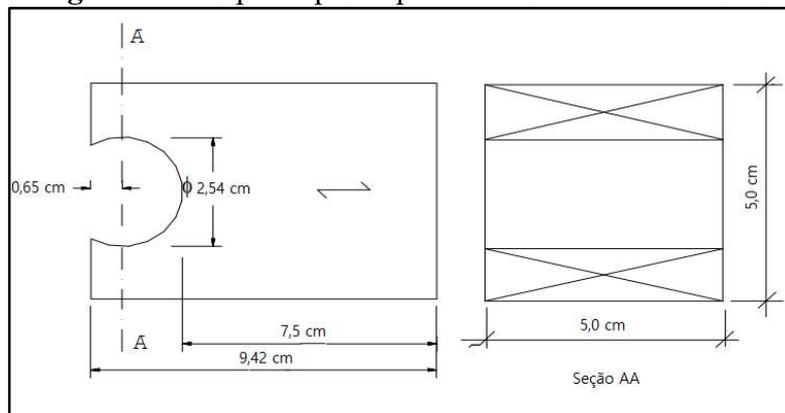
Fonte: Autora.

3.2.11 Fendilhamento paralelo às fibras

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, a resistência ao fendilhamento paralelo às fibras da madeira (f_{s0}) é dada pela razão entre a força máxima aplicada ($F_{s0,max}$) pela área da seção útil ($A_{s0} \approx 75\text{mm} \times 50\text{mm}$) (Equação 17) de um corpo de prova padrão (Figura 21).

$$f_{s0} = \frac{F_{s0,max}}{A_{s0}} \quad (17)$$

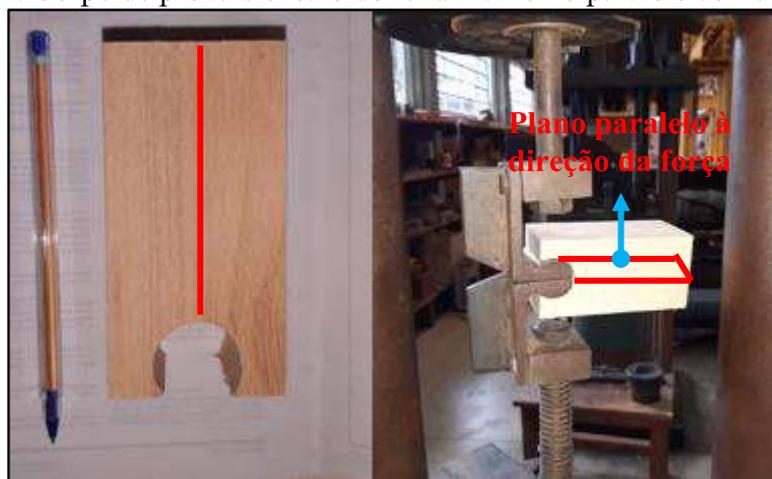
Figura 21. Corpo de prova para ensaio de fendilhamento.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997).

O corpo de prova para este estudo foi confeccionado com o plano da seção crítica perpendicular à direção radial da madeira, com precisão geométrica de 0,1 mm. Durante o ensaio, o carregamento aplicado foi monotônico crescente a uma taxa média de 2,5 MPa/min (vide Figura 22).

Figura 22. Corpo de prova e ensaio de fendilhamento paralelo às fibras.



Fonte: Autora.

3.2.12 Flexão estática

Segundo a ABNT NBR 7190:1997, o ensaio de flexão estática consiste em determinar a resistência e a rigidez da madeira à flexão de lote considerado homogêneo. A resistência da madeira à flexão (f_M) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que atua em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, determinado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo expressa pela Equação 18, sendo $M_{máx}$ o valor do momento fletor máximo aplicado ao corpo de prova e W_e o módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo de prova. Para determinação de W_e , considera-se que o corpo de prova apresenta seção transversal retangular com largura (b) e altura (h) (vide Equação 19).

$$f_{wM} = \frac{M_{MÁX}}{W_e} \quad (18)$$

$$W_e = \frac{b h^2}{6} \quad (19)$$

O ensaio de flexão simples (flexão a três pontos) foi realizado com a aplicação de um

carregamento concentrado no ponto médio de um corpo de prova padronizado de geometria prismática, com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e comprimento na direção das fibras de 115 cm, conforme prescrito pela ABNT NBR 7190:1997.

Durante o ensaio, o corpo de prova foi vinculado a dois apoios articulados com vão livre (L) igual a 105 cm de comprimento (Figura 23), conforme exigência da normativa brasileira que estabelece o vão livre do corpo de prova no ensaio de flexão estática igual a 21 vezes a largura do corpo de prova. Os ensaios de flexão estática ocorreram com carregamento concentrado no meio do vão de forma monotônica crescente a uma taxa de 10 MPa/min.

Figura 23. Posicionamento do corpo de prova durante o ensaio de flexão estática.



Fonte: Autora.

O módulo de elasticidade na flexão estática (E_M) (Equação 20) foi obtido no trecho linear do diagrama força x deslocamento. Foram realizados dois ciclos até 50% da força máxima estimada ($F_{M,est}$). No terceiro ciclo de carregamento, para as forças correspondentes a 10% ($F_{M10\%}$) e 50% ($F_{M50\%}$) da força de ruptura estimada, foram determinados os respectivos deslocamentos ($v_{10\%}$, $v_{50\%}$) no meio do vão com o uso de um relógio comparador (Figura 24). A força máxima estimada ($F_{M,est}$) foi obtida com o auxílio do ensaio destrutivo (ruptura) de um corpo de prova gêmeo, selecionado da mesma amostra a ser avaliada.

Figura 24. Aferição dos deslocamentos no ensaio de flexão estática.



Fonte: Autora.

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (20)$$

A Equação 20 pode ser reescrita conforme expresso na Equação 21.

$$E_M = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot h^3} \quad (21)$$

Na equação 21, tem-se:

- F = incremento de força (N)
- L = distância entre os apoios (mm)
- δ = deslocamento vertical devido à força aplicada (mm)

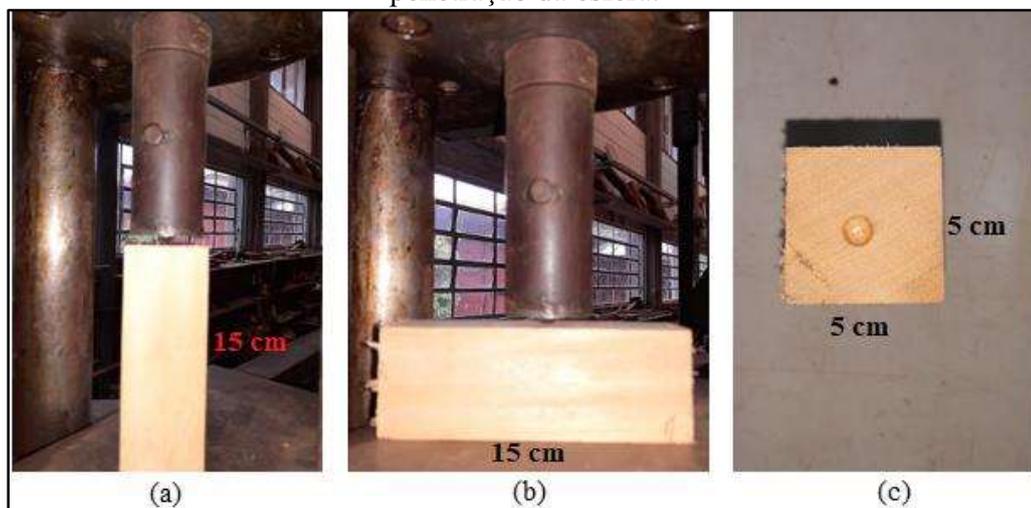
3.2.13 Dureza Janka

A ABNT NBR 7190:1997 estabelece o modelo proposto por Janka para determinar o grau de dureza de uma determinada espécie. A dureza (f_H) é obtida em função da tensão atuante em uma das faces do corpo de prova que produz a penetração de uma semiesfera de aço com área diametral de 1 cm², tensão essa dada pela razão entre a força máxima (F_{\max}) e a área da seção transversal ($A_{\text{seção transversal}} = 1 \text{ cm}^2$) (vide Equação 22). A dureza Janka é medida na direção paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras.

$$f_H = \frac{F_{\max}}{A_{\text{seção diametral}}} \quad (22)$$

Os ensaios de dureza normal às fibras foram realizados em corpos de prova padronizados pela norma ABNT NBR 7190:1997 com seção transversal quadrada de 5 cm de lado e comprimento na direção das fibras de 15 cm. O carregamento durante o ensaio foi monotônico crescente, aplicado até que a esfera penetrasse a uma profundidade igual ao seu raio, em um período de pelo menos 1 min. A Figura 25 apresenta o ensaio de dureza Janka nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Figura 25. Ensaio de dureza Janka – (a) paralelo às fibras; (b) perpendicular às fibras; (c) penetração da esfera.



Fonte: Autora.

3.2.14 Tenacidade e resistência ao impacto à flexão

A ABNT NBR 7190:1997 estabelece que a resistência ao impacto à flexão (f_{bw}) é definida pela razão entre a tenacidade da madeira (W), a energia necessária à fratura do corpo de prova e a área da seção transversal deste, conforme a Equação 23. O corpo de prova utilizado neste ensaio foi confeccionado com dimensões padronizadas, sendo b e h as medidas da seção transversal ($2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$) e o comprimento de 30 cm .

$$f_{bw} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (23)$$

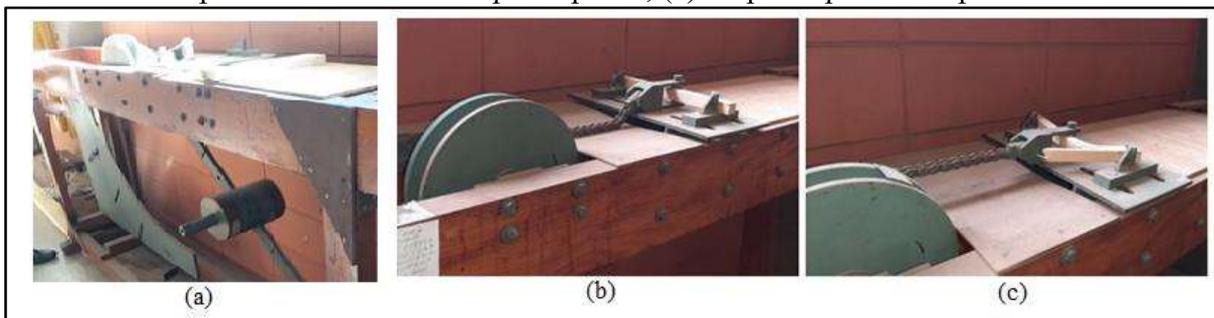
Para a determinação da tenacidade (W), foi utilizada a máquina de ensaios Modelo Forestry Products Laboratory – FPL. Essa máquina consiste de um sistema pendular interligado a uma corrente que aplica um impacto no centro do vão do corpo de prova apoiado em cilindros de 15 mm de raio, com 24 cm de distância entre os seus eixos. A tenacidade (W) foi dada em função da Equação 24.

$$W = P \cdot L \cdot (\cos\theta_1 - \cos\theta_0) \text{ [N}\cdot\text{m=J]} \quad (24)$$

Na Equação 24, tem-se que P é o peso do pêndulo (em N); sendo θ_1 o ângulo final depois da ruptura da amostra; θ_0 , o ângulo inicial antes de colocar o corpo de prova na máquina de

ensaio ao impacto; e L , a distância do centro de rotação do braço ao centro de gravidade do pêndulo. A Figura 26 demonstra a realização do ensaio.

Figura 26. Ensaio de tenacidade e impacto à flexão – (a) equipamento com pêndulo; (b) posicionamento do corpo de prova; (c) corpo de prova rompido.



Fonte: Autora.

3.2.15 Análise estatística e modelos de regressão

Após a determinação de todas as propriedades pertinentes ao estudo, foi realizada a análise estatística dos resultados experimentais com o auxílio do software Minitab® 19. Para tanto, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), considerada ao nível de 5% de significância.

De forma a validar os resultados obtidos, foi avaliada a normalidade nas distribuições dos dados (variáveis-resposta) com o auxílio dos testes de Anderson-Darling. Na sequência, foi empregado o teste de Tukey para a comparação dos valores médios do módulo de elasticidade à flexão e da densidade aparente obtidos nos corpos de prova e nas vigas (dimensões estruturais). Ambos os testes foram considerados ao nível de 5% de significância.

O teste de Anderson-Darling teve como hipótese nula (H_0) a normalidade nas distribuições, e a não normalidade como hipótese alternativa (H_1). P-valor superior ao nível de significância implica aceitar H_0 , refutando-a em caso contrário.

Para o teste Tukey, a hipótese nula consistiu em assumir a equivalência entre os valores médios dos módulos de elasticidade e densidade, e, para a hipótese alternativa, a não equivalência. Observe-se que p-valor superior ao nível de significância implica aceitar a hipótese nula, rejeitando-a em caso contrário.

Na sequência do estudo, modelos de regressão foram utilizados para estimar as propriedades de caracterização da madeira por intermédio da densidade aparente e da frequência natural de vibração (primeiro modo) do ensaio de vibração transversal.

Os modelos de regressão foram construídos e testados com auxílio do software

Minitab® 19 e avaliados pela ANOVA. A qualidade dos ajustes foi realizada pelo coeficiente de determinação (R^2); assim, quanto mais próximo de 1 (ou de 100%), melhor ou mais preciso é o ajuste obtido.

A densidade aparente (ρ_{12}) foi correlacionada com as demais propriedades (físicas e mecânicas), enquanto a frequência natural (f_r) do ensaio de vibração transversal foi correlacionada apenas com as propriedades mecânicas. A partir das correlações, modelos de regressão linear foram gerados (Equação 25).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X \quad (25)$$

Na Equação 25, Y denota a variável dependente, podendo ser a propriedade física ou mecânica; X consiste na variável independente, aqui definida como sendo a densidade aparente ou a frequência de natural de vibração; e β_i são os parâmetros dos modelos ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

As correlações foram aferidas pelo coeficiente R de Pearson ($-1 \leq R \leq 1$), e a significância desses coeficientes avaliada pela análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância. Pela ANOVA dos modelos de regressão, constituiu-se em hipótese nula (H_0) a não representatividade dos modelos testados (a densidade aparente e/ou frequência de vibração não são capazes de explicar as variâncias das propriedades estimadas), e em hipótese alternativa (H_1), a representatividade. Ou seja, pela formulação do teste, p-valor (probabilidade p) igual ou superior ao nível de significância adotado ($p\text{-valor} \geq 0,05$) implica não ser significativa a correlação linear testada (aceitar H_0); e significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) em caso contrário.

Em adição à ANOVA, obtiveram-se os valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), 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. Como parâmetro para interpretar e avaliar os modelos, o coeficiente de determinação ajustado terá como referência os estudos de Chin, W.W (1998); Montgomery (2005); Henseler, Ringle e Sinkovics (2009); Hair *et al.* (2011); Moore e Flinger (2013) em que segundos os autores coeficientes de determinação superiores a 70% são substanciais e implicam em bons ajustes.

Na sequência, como tentativa de gerar ajustes de melhor precisão, em função do desconhecimento da relação entre as propriedades avaliadas, modelos de regressão multivariável quadrática completa (Equação 26) dependentes da densidade aparente e da

frequência natural de vibração foram gerados para a estimativa das demais propriedades (físicas e mecânicas) para cada uma das espécies e para o conjunto das cinco espécies estudadas nesta pesquisa. Esse modelo permitiu contabilizar o efeito de cada variável, do produto entre elas e de ambas elevadas ao quadrado. Pela ANOVA dos modelos de regressão, p-valor inferior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) implica que o modelo e os termos do modelo são considerados significativos, e não significativos em caso contrário.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho_{12} + \beta_2 \cdot fr + \beta_3 \cdot \rho_{12}^2 + \beta_4 \cdot fr^2 + \beta_5 \cdot \rho_{12} \cdot fr + \varepsilon \quad (26)$$

Na Equação 26, Y denota as variáveis dependentes consideradas (propriedades físicas e mecânicas avaliadas); β_i consiste nos coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados; e ε é o erro aleatório (residual), sendo a qualidade dos ajustes também avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados e as discussões relativas às propriedades físico-mecânicas verificadas por meio dos ensaios para as madeiras estudadas nesta pesquisa. Além disso, também serão apresentadas as equações obtidas através dos modelos de regressão para a estimativa das propriedades de cada uma das espécies, bem como o resultado do conjunto, considerando a densidade aparente e a frequência natural de vibração das madeiras como variável independente.

4.1 Cedro Doce

Além da obtenção do valor médio (\bar{x}), do coeficiente de variação (CV), dos valores mínimos (Mín) e máximos (Máx) por propriedade e dos valores do intervalo de confiança (IC – 95% de confiabilidade) das propriedades físicas e mecânicas, também foram obtidos os valores característicos (f_{wk}) das propriedades de resistência das espécies. A Tabela 14 apresenta os resultados da espécie Cedro Doce.

Tabela 14. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Cedro Doce.

Propriedades	\bar{x}	CV (%)	Mín	Máx	IC (95%)	f_{wk}
ρ_{12} (g/cm ³)	0,51	8,07	0,43	0,58	(0,48;0,53)	---
RRt (%)	3,50	23,42	2,32	5,23	(2,98; 4,02)	---
RTt (%)	5,06	16,86	3,70	6,51	(4,52; 5,61)	---
f_{c0} (MPa)	31,83	16,83	26,04	43,07	(28,42; 35,23)	27,46
f_{c90} (MPa)	7,87	17,88	6,75	11,10	(6,98; 8,77)	7,50
f_{t0} (MPa)	68,39	25,41	40,85	107,47	(57,35; 79,43)	47,78
f_{t90} (MPa)	2,87	24,53	1,79	4,28	(2,42; 3,31)	2,00
f_{v0} (MPa)	9,33	24,30	6,39	13,58	(7,89; 10,77)	6,53
f_{s0} (MPa)	0,46	31,05	0,21	0,78	(0,37; 0,55)	0,32
f_M (MPa)	57,19	20,80	40,28	85,58	(49,63; 64,75)	43,98
f_{h0} (MPa)	49,31	38,04	28,62	95,59	(37,39; 61,22)	34,51
f_{h90} (MPa)	32,50	24,63	18,02	44,72	(27,41; 37,58)	22,75
W (daN·m)	0,54	37,98	0,18	0,93	(0,41; 0,67)	---
E_{c0} (MPa)	8553	13,44	6594	10588	(7823; 9284)	---
E_{c90} (MPa)	417,7	14,09	325,8	545,8	(380,3; 455,1)	---
E_{t0} (MPa)	9696	23,43	6203	14174	(8252; 11139)	---
E_M (MPa)	8808	18,89	6901	11641	(7750; 9865)	---

* f_{wk} – valores característicos da resistência

Fonte: Autora.

Em relação aos coeficientes de variação (CV), a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997, de forma a considerar a caracterização adequada, define como valores máximos as porcentagens de 18% para solicitações normais e de 28% para solicitações tangenciais. Às exceções das resistências à tração, a maioria das propriedades atendeu aos requisitos dispostos na referida normativa.

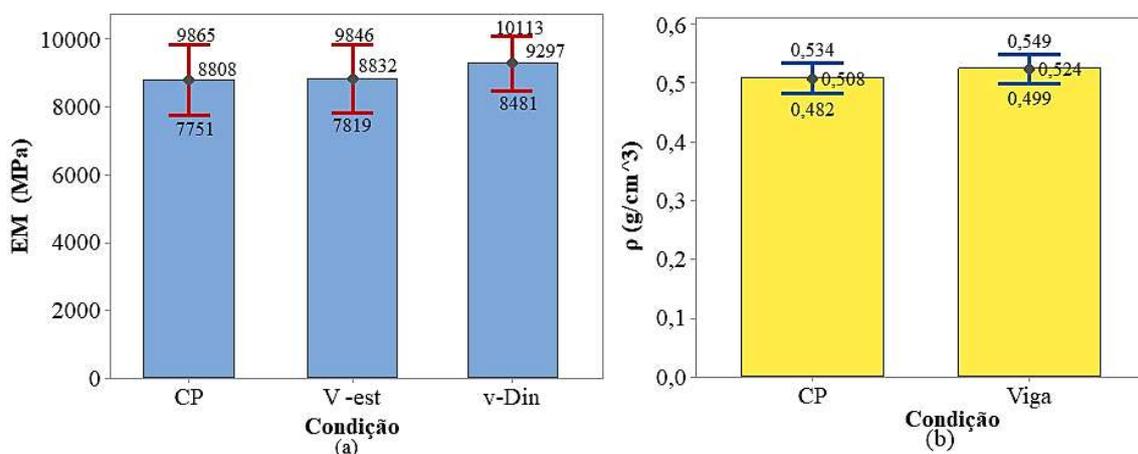
A determinação da resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{wk}) foi igual a 27,46 MPa, sendo categorizada na classe de resistência C20 das dicotiledôneas (folhosas).

O lote de madeira Cedro Doce estudado, com o teor de umidade de 12%, apresentou valores médios das propriedades mecânicas próximos aos divulgados na NBR 7190:1997 e citados na revisão bibliográfica (Tabela 3), à exceção da resistência ao cisalhamento, que foi superior.

A comparação entre os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de tração (E_{t0}) e de compressão (E_{c0}) na direção paralela às fibras pela ANOVA (5% de significância) evidenciou equivalência entre ambos (p -valor = 0,134), resultado esse em conformidade com o apresentado pela norma brasileira ABNT NBR 7190:1997, cabendo destacar que o p -valor do teste de normalidade de Anderson-Darling foi superior a 5%, o que valida os resultados obtidos da análise de variância.

Na Figura 27, são apresentados os resultados do teste de Tukey com o objetivo da comparação entre os valores médios dos módulos de elasticidade e das densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas (peças de dimensões estruturais).

Figura 27. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Cedro Doce obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Fonte: Autora.

Os p-valores superiores a 0,05 (5%) do teste de Anderson-Darling indicam a normalidade nas distribuições das propriedades apresentadas na Figura 20, validando assim os resultados do teste de Tukey.

Pela análise da Figura 20, observa-se que os módulos de elasticidade foram avaliados como equivalentes, assim como as densidades.

Em referência à equivalência dos módulos de elasticidade, comparando-os com a literatura correlata, os resultados obtidos corroboram os estudos de Segundinho *et al.* (2012) em que os autores avaliaram a aplicação de métodos de ensaios não destrutivos baseados nas frequências naturais de vibração dos modos longitudinal e transversal, comparando-os aos resultados encontrados na flexão estática para obtenção das propriedades elásticas em peças estruturais de madeira de reflorestamento (*Pinus oocarpa* e *Eucalyptus sp.*). Como resultado, foram obtidos valores bem próximos que apresentaram correlação significativa a 1% de probabilidade.

Nas Tabelas 15 e 16, são apresentados os resultados dos testes de correlação envolvendo a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas e entre a frequência (fr) obtida do ensaio de vibração transversal e as propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 12 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 46,90 Hz; 7,31%; e IC = (40,20; 52,21 Hz), respectivamente. O p-valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,880, e, por ser superior a 0,05, constata-se normalidade na distribuição, validando os resultados obtidos do intervalo de confiança da média.

Como se pode observar na Tabela 15, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em apenas duas (f_{t0} e E_{t0}) dentre as 16 demais variáveis confrontadas; e, com relação à frequência, conforme a Tabela 16, apenas duas (f_M e E_M) entre as 14 correlações testadas foram consideradas significativas pela análise de variância.

Tabela 15. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Cedro Doce.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	0,402	0,196	7,74	RRt = - 0,578 + 8,028 · p ₁₂
RTt (%)	0,181	0,574	0,00	RTt = 3,152 + 3,767 · p ₁₂
f _{c0} (MPa)	0,344	0,273	3,04	f _{c0} = 8,98 + 45,00 · p ₁₂
f _{c90} (MPa)	0,048	0,882	0,00	f _{c90} = 7,032 + 1,65 · p ₁₂
f _{t0} (MPa)	<u>0,708</u>	<u>0,010</u>	45,11	f _{t0} = - 83,97 + 300,1 · p ₁₂

Continua.

Cont.Tabela 15.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{t90} (MPa)	0,083	0,798	0,00	f _{t90} = 2,143 + 1,423 · ρ ₁₂
f _{v0} (MPa)	0,474	0,120	14,67	f _{v0} = - 3,974 + 26,21 · ρ ₁₂
f _{s0} (MPa)	-0,377	0,227	5,62	f _{s0} = 1,131- 1,318·ρ ₁₂
f _M (MPa)	0,519	0,084	19,67	f _M = -19,33 + 150,7 · ρ ₁₂
f _{h0} (MPa)	0,493	0,103	16,77	f _{h0} = - 65,31 + 225,8 · ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	0,456	0,137	12,84	f _{h90} = - 12,70 + 89,02 · ρ ₁₂
W (daN·m)	0,279	0,379	0,00	W = - 0,1701 + 1,398 · ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	0,323	0,305	1,50	E _{c0} = 3947 + 9073 · ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	0,080	0,804	0,00	E _{c90} = 359,1 + 115,4 · ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	<u>0,805</u>	<u>0,002</u>	61,40	E _{t0} = - 12976 + 44655 · ρ ₁₂
E _M (MPa)	0,460	0,133	13,26	E _M = - 671 + 18671 · ρ ₁₂

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Tabela 16. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Cedro Doce.

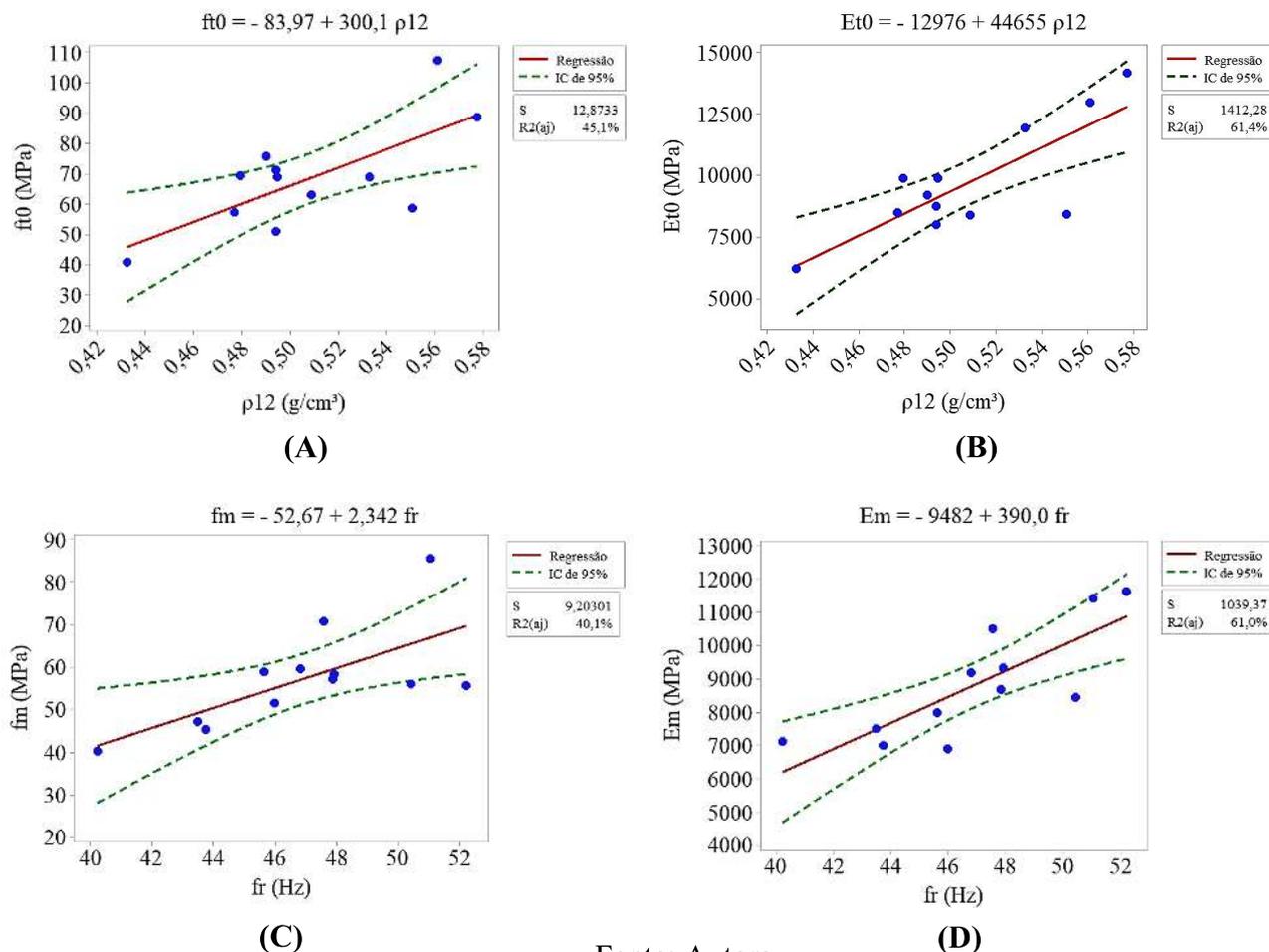
Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{c0} (MPa)	0,074	0,818	0,00	f _{c0} = 26,38 + 0,1162 · fr
f _{c90} (MPa)	0,176	0,585	0,00	f _{c90} = 4,486 + 0,0721 · fr
f _{t0} (MPa)	0,476	0,118	14,95	f _{t0} = - 44,84 + 2,414 · fr
f _{t90} (MPa)	-0,435	0,158	10,80	f _{t90} = 7,408 - 0,08917 · fr
f _{v0} (MPa)	0,258	0,419	0,00	f _{v0} = 1,335 + 0,1705 · fr
f _{s0} (MPa)	-0,490	0,106	16,40	f _{s0} = 1,422 - 0,02048 · fr
f _M (MPa)	<u>0,675</u>	<u>0,016</u>	40,12	f _M = - 52,67 + 2,342 · fr
f _{h0} (MPa)	0,121	0,707	0,00	f _{h0} = 18,18 + 0,664 · fr
f _{h90} (MPa)	0,262	0,411	0,00	f _{h90} = 3,83 + 0,6113 · fr
W (daN·m)	0,230	0,473	0,00	W = - 0,1043 + 0,01373 · fr
E _{c0} (MPa)	0,135	0,676	0,00	E _{c0} = 6434 + 45,2 · fr
E _{c90} (MPa)	0,253	0,428	0,00	E _{c90} = 214,0 + 4,343 · fr
E _{t0} (MPa)	0,487	0,108	16,09	E _{t0} = - 5447 + 322,9 · fr
E _M (MPa)	<u>0,803</u>	<u>0,002</u>	60,98	E _M = - 9482 + 390,0 · fr

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Na Figura 28, são ilustrados e apresentados os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R² aj) referentes às correlações significativas indicadas nas Tabelas 15 e 16.

Figura 28. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Cedro Doce.



Fonte: Autora.

Na Figura 28, tem-se o resultado do teste de Anderson-Darling sobre os resíduos da ANOVA dos modelos de regressão, que acusou normalidade em todos os casos (p – valor $> 0,05$), o que valida os resultados da análise de variância. Mesmo sendo as correlações significativas, o coeficiente de determinação ajustado variou de 40,12% a 61,36%, o que implica modelos pouco precisos para serem usados na estimativa das referidas propriedades. Tais resultados são visualizados pela notada dispersão dos pares de valores determinados experimentalmente com as curvas ajustadas.

Ainda de acordo com a Figura 28, no que se refere aos modelos de regressão em função da densidade aparente (28A e 28B), pode-se inferir que quanto maior a densidade, maior será a resistência à tração paralela às fibras e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, ratificando os estudos de Giordano (1951), em que ele concluiu que a resistência à tração paralela às fibras aumenta com a densidade da espécie. O valor do coeficiente de determinação ajustado referente à correlação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na tração

paralela às fibras (61,40%) é próximo ao apresentado por Dias e Lahr (2004), 68,72%. Em relação aos modelos de regressão em função da frequência natural de vibração (28C e 28D), observa-se que quanto maior a frequência, maior será a resistência à flexão e o módulo de elasticidade à flexão estática, corroborando, assim, a concepção da Equação 3, do ensaio de vibração transversal, apresentada na metodologia deste estudo, haja vista a equivalência dos módulos de elasticidade dinâmico e estático observada na Figura 27.

Na Tabela 17, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas, com o propósito melhorar a precisão alcançada dos modelos de regressão linear simples.

Tabela 17. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Cedro Doce.

Modelos	R² aj (%)	p-valor
$RR_t = -119 + 186 \cdot \rho_{12} + 3,14 \cdot fr - 134 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0296 \cdot fr^2 - 0,80 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	48,80	0,430
$RT_t = 13,0 + 171 \cdot \rho_{12} - 2,39 \cdot fr - 182 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0256 \cdot fr^2 + 0,35 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	70,41	0,117
$f_{c0} = 60 - 211 \cdot \rho_{12} + 0,7 \cdot fr - 293 \cdot \rho_{12}^2 - 0,073 \cdot fr^2 + 11,9 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	28,48	0,782
$f_{c90} = -3 - 46 \cdot \rho_{12} + 0,89 \cdot fr - 51 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0208 \cdot fr^2 + 2,15 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	14,89	0,946
$f_{i0} = -1812 + 1317 \cdot \rho_{12} + 59,9 \cdot fr + 516 \cdot \rho_{12}^2 - 0,441 \cdot fr^2 - 31,8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	77,87	0,054
$f_{i90} = -46,3 + 55 \cdot \rho_{12} + 1,58 \cdot fr - 58 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0188 \cdot fr^2 + 0,16 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	35,50	0,667
$f_{v0} = -73 + 17 \cdot \rho_{12} + 3,0 \cdot fr - 121 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0461 \cdot fr^2 + 2,90 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	43,56	0,524
$f_{s0} = -14,2 + 31,4 \cdot \rho_{12} + 0,314 \cdot fr - 22,9 \cdot \rho_{12}^2 - 0,00250 \cdot fr^2 - 0,194 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	55,39	0,318
$f_M = 255 - 2005 \cdot \rho_{12} + 9,8 \cdot fr + 1212 \cdot \rho_{12}^2 - 0,192 \cdot fr^2 + 19,8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>93,45</u>	<u>0,002</u>
$f_{h0} = -5057 + 2652 \cdot \rho_{12} + 184,7 \cdot fr + 2262 \cdot \rho_{12}^2 - 1,437 \cdot fr^2 - 97,2 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	77,55	0,056
$f_{h90} = -372 - 370 \cdot \rho_{12} + 19,3 \cdot fr + 1651 \cdot \rho_{12}^2 - 0,058 \cdot fr^2 - 25,8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	41,86	0,554
$W = -11,4 + 61,7 \cdot \rho_{12} - 0,194 \cdot fr - 49,3 \cdot \rho_{12}^2 + 0,00349 \cdot fr^2 - 0,219 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	49,45	0,419
$E_{c0} = 28427 + 168631 \cdot \rho_{12} - 2736 \cdot fr - 409523 \cdot \rho_{12}^2 - 0,5 \cdot fr^2 + 5464 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	60,46	0,240
$E_{c90} = 903 + 11329 \cdot \rho_{12} - 145 \cdot fr - 22955 \cdot \rho_{12}^2 + 0,18 \cdot fr^2 + 258 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	55,30	0,320
$E_{i0} = -929 - 57800 \cdot \rho_{12} + 329 \cdot fr - 13867 \cdot \rho_{12}^2 - 14,1 \cdot fr^2 + 2489 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>91,63</u>	<u>0,003</u>
$E_M = -38702 + 50410 \cdot \rho_{12} + 873 \cdot fr + 27994 \cdot \rho_{12}^2 + 2,0 \cdot fr^2 - 1287 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>85,88</u>	<u>0,016</u>

* *Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p-valor < 0,05).*

Fonte: Autora.

Os p-valores do teste de normalidade dos resíduos da ANOVA sobre todos os modelos de regressão múltipla da Tabela 17 foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância. Mesmo com a melhoria na precisão dos modelos de regressão múltipla quando comparados aos modelos de regressão simples apresentados na Figura 28, apenas três modelos (f_M , E_{i0} e E_M) foram considerados significativos (p-valor < 0,05), o que implica que variações nas variáveis independentes não explicam boa parte das variações sofridas pelas variáveis

dependentes. Destaca-se que os modelos significativos podem ser justificados devido à equivalência dos módulos de elasticidade e em função de que a resistência à flexão (f_M) e o módulo de elasticidade à flexão (E_M) são propriedades advindas do mesmo ensaio e relacionadas entre si.

4.2 Cajueiro

Na Tabela 18, são apresentados os valores médios (\bar{x}), os coeficientes de variação (CV), os menores (Mín.) e os maiores (Máx.) valores, assim como os intervalos (IC) de confiança da média (95% de confiabilidade) referentes às propriedades físicas e mecânicas obtidas das amostras isentas de defeitos da madeira de Cajueiro.

Tabela 18. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Cajueiro.

Propriedades	\bar{x}	CV (%)	Mín	Máx	IC (95%)	f_{wk}
ρ_{12} (g/cm ³)	0,55	9,40	0,50	0,68	(0,51; 0,58)	---
RRt (%)	4,39	22,56	2,99	6,17	(3,76; 5,02)	---
RTt (%)	6,39	32,23	2,99	10,71	(5,08; 7,69)	---
f_{c0} (MPa)	39,71	10,69	28,87	44,65	(37,01; 42,40)	35,20
f_{c90} (MPa)	8,12	12,73	6,88	10,47	(7,46; 8,77)	7,48
f_{t0} (MPa)	83,69	33,46	34,10	126,65	(65,90; 101,49)	58,62
f_{t90} (MPa)	2,81	18,61	1,86	3,90	(2,48; 3,14)	2,00
f_{v0} (MPa)	10,32	16,88	6,82	12,61	(9,21; 11,42)	7,92
f_{s0} (MPa)	0,57	23,40	0,40	0,84	(0,48; 0,65)	0,46
f_M (MPa)	72,29	9,88	55,40	81,53	(67,75; 76,83)	65,34
f_{h0} (MPa)	50,33	10,83	39,90	59,30	(46,87; 53,80)	44,90
f_{h90} (MPa)	27,95	12,46	20,00	33,40	(25,74; 30,16)	23,12
W (daN·m)	0,44	25,65	0,32	0,75	(0,37; 0,51)	---
E_{c0} (MPa)	11300	20,86	6970	14500	(9783; 12773)	---
E_{c90} (MPa)	896	14,23	664	1070	(814,8; 976,7)	---
E_{t0} (MPa)	12500	25,57	7520	19600	(10475; 14539)	---
E_M (MPa)	12000	10,96	9630	13900	(11205; 12882)	---

* f_{wk} – valores característicos da resistência

Fonte: Autora.

Como se pode constatar pela Tabela 18, por serem maiores do que 5% os p-valores do teste Anderson-Darling em todas as propriedades avaliadas, constata-se a normalidade na distribuição de todas as variáveis, validando os resultados obtidos dos intervalos de confiança da média. Observa-se que os valores das propriedades mecânicas encontradas neste estudo são

superiores aos apresentados na revisão bibliográfica (Tabela 5), possivelmente em função da homogeneidade do lote

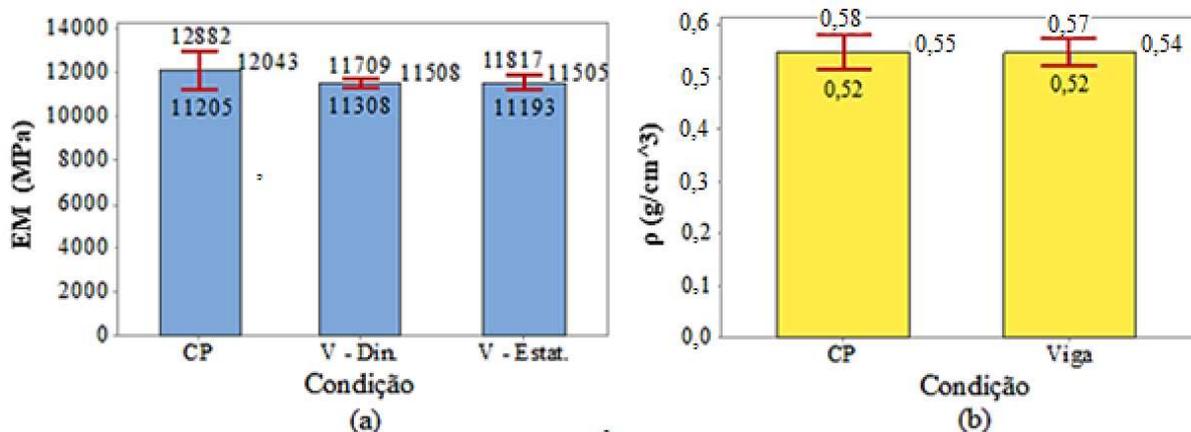
A resistência característica à compressão paralela às fibras (fwk) foi igual a 35,20 MPa, classificando o lote de madeira Cajueiro estudado como C30, da classe das dicotiledôneas (folhosas), de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, que define valores mínimos de resistência à compressão paralela às fibras de 30 MPa. Nesse contexto, diferentemente das aplicações sugeridas pelo IPT (2020), a espécie pode ser utilizada como elementos estruturais na construção civil, considerando o resultado obtido no estudo.

Com uma densidade aparente média de 0,55 g/cm³, a espécie é considerada madeira de média densidade por meio dos critérios apresentados nos estudos de Melo *et al.* (1990); Vale *et al.* (2002, 2005); Coradin *et al.* (2010); Silveira *et al.* (2013), em que se classificam madeiras de baixa densidade como aquelas que apresentam valores abaixo de 0,50 g/cm³; de média densidade aquelas com densidade da madeira entre 0,51 e 0,72 g/cm³; e madeiras pesadas ou de alta densidade aquelas com valores superiores a 0,73 g/cm³.

A comparação entre os módulos de elasticidade obtidos dos ensaios de tração (E_{t0}) e de compressão (E_{c0}) na direção paralela às fibras pela ANOVA (5% de significância) evidenciou equivalência entre ambos (p -valor = 0,295), em conformidade com os parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 7190:1997.

Na Figura 29, são apresentados os resultados do comparativo entre os valores médios dos módulos de elasticidade e das densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas (peças de dimensões estruturais), evidenciando a equivalência entre eles.

Figura 29. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Cajueiro obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Fonte: Autora.

Nas Tabelas 19 e 20, são apresentados os resultados dos testes de correlação envolvendo a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas, e entre a frequência (fr) obtida do ensaio de vibração transversal e as propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 12 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 62,58 Hz; 3,71%; e IC = (61,11; 64,06 Hz), respectivamente. O p-valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,952, e por ser superior a 0,05, constata-se normalidade na distribuição, validando os resultados obtidos do intervalo de confiança da média.

Conforme observado na Tabela 19, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em apenas três (RT_t, f_{c0} e f_{h0}) dentre as 16 demais variáveis confrontadas. Já em relação à frequência de vibração, segundo a Tabela 20, apenas duas (f_M e E_{c90}) entre as 14 correlações testadas foram consideradas significativas pela análise de variância.

Tabela 19. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Cajueiro.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	-0,050	0,876	0,00	RRt = - 4,923 - 0,969 ·ρ ₁₂
RTt (%)	<u>0,768</u>	<u>0,004</u>	54,80	RTt = - 10,44 + 30,64 ·ρ ₁₂
f _{c0} (MPa)	<u>-0,685</u>	<u>0,014</u>	41,63	f _{c0} = - 70,65 - 56,35 ·ρ ₁₂
f _{c90} (MPa)	0,448	0,144	12,11	f _{c90} = 3,188 + 8,975 ·ρ ₁₂
f _{t0} (MPa)	-0,415	0,180	8,94	f _{t0} = 207,4 - 225,2 ·ρ ₁₂
f _{t90} (MPa)	0,068	0,833	0,00	f _{t90} = 2,432 + 0,694 ·ρ ₁₂
f _{v0} (MPa)	0,125	0,698	0,00	f _{v0} = 7,998 + 4,23 ·ρ ₁₂
f _{s0} (MPa)	0,540	0,070	22,02	f _{s0} = -0,1951 + 1,389 ·ρ ₁₂
f _M (MPa)	-0,440	0,152	11,31	f _M = 105,8 - 60,95 ·ρ ₁₂
f _{h0} (MPa)	<u>0,588</u>	<u>0,044</u>	28,08	f _{h0} = 16,19 + 62,18 ·ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	-0,202	0,530	0,00	f _{h90} = 35,42 - 13,60 ·ρ ₁₂
W (daN·m)	0,284	0,371	0,00	W = 0,0996 + 0,6259 ·ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	-0,225	0,482	0,00	E _{c0} = 16906 - 10248 ·ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	-0,496	0,101	17,05	E _{c90} = 1568 - 1225 ·ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	-0,116	0,720	0,00	E _{t0} = 16452 - 7183 ·ρ ₁₂
E _M (MPa)	0,214	0,504	0,00	E _M = 9038 + 5472 ·ρ ₁₂

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Tabela 20. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Cajueiro.

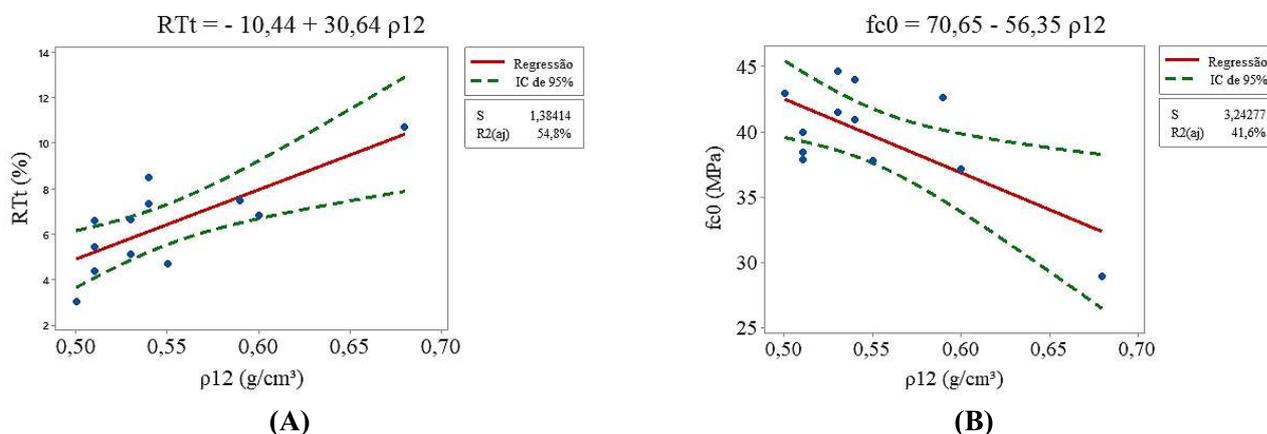
Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{c0} (MPa)	0,234	0,463	0,00	f _{c0} = - 12,87 + 0,4288 · fr
f _{c90} (MPa)	0,049	0,880	0,00	f _{c90} = 6,752 + 0,0218 · fr
f _{t0} (MPa)	0,265	0,404	0,00	f _{t0} = -116,8 + 3,204 · fr
f _{t90} (MPa)	0,286	0,367	0,00	f _{t90} = -1,228 + 0,06457 · fr
f _{v0} (MPa)	0,481	0,114	15,40	f _{v0} = -12,27 + 0,3609 · fr
f _{s0} (MPa)	0,348	0,268	3,32	f _{s0} = -0,679 + 0,01992 · fr
f _M (MPa)	<u>0,654</u>	<u>0,021</u>	37,02	f _M = - 53,72 + 2,013 · fr
f _{h0} (MPa)	-0,041	0,900	0,00	f _{h0} = 56,34 - 0,0960 · fr
f _{h90} (MPa)	-0,232	0,468	0,00	f _{h90} = 49,74 - 0,3482 · fr
W (daN·m)	0,413	0,182	8,76	W = -0,8235 + 0,02024 · fr
E _{c0} (MPa)	-0,134	0,677	0,00	E _{c0} = 19810 - 136,3 · fr
E _{c90} (MPa)	<u>0,627</u>	<u>0,029</u>	33,21	E _{c90} = - 1259 + 34,44 · fr
E _{t0} (MPa)	-0,100	0,757	0,00	E _{t0} = 21134 - 137,9 · fr
E _M (MPa)	0,399	0,199	7,49	E _M = - 2152 + 226,8 · fr

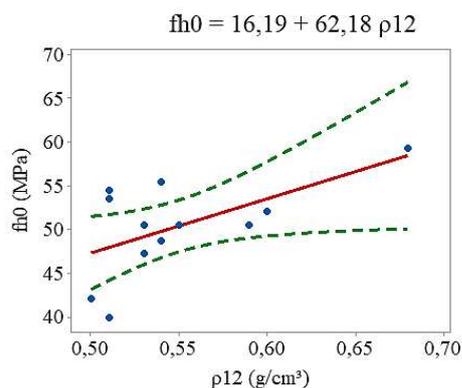
* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

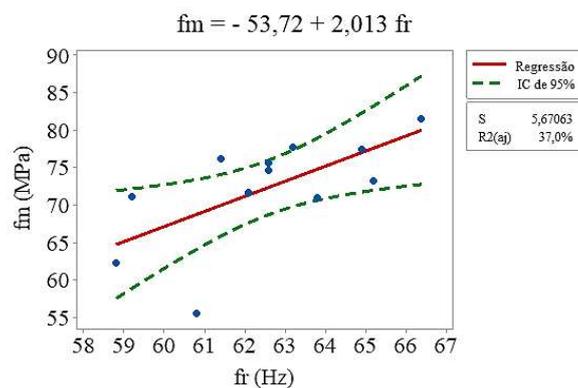
Na Figura 30, são ilustrados e apresentados os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R² aj) referentes às correlações significativas indicadas nas Tabelas 19 e 20.

Figura 30. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Cajueiro.

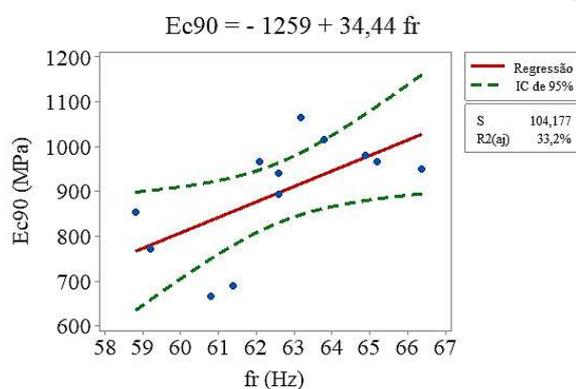




(C)



(D)



(E)

Fonte: Autora.

Conforme análise da Figura 30, o coeficiente de determinação ajustado variou de 28,10% a 54,80%, ou seja, modelos pouco precisos a serem usados na estimativa das referidas propriedades físico-mecânicas. A notada dispersão dos pares de valores determinados com as curvas ajustadas evidencia essa informação.

Na Figura 30A, que representa o modelo de regressão referente à correlação entre a densidade aparente e a retração tangencial total, é possível verificar a existência de uma relação entre densidade e retratibilidade: quanto maior a densidade, maior a retratibilidade. Essa relação se justifica em função de que as madeiras mais densas tendem a absorver mais água por unidade de volume, consequentemente tendem a se expandir ou a se contrair mais do que aquelas de menor densidade (KOLIN, JANEZIC, 1996).

Nas Figuras 30B e 30C, são apresentados os modelos de regressão em função da correlação entre a densidade aparente e a resistência à compressão e dureza, respectivamente, ambas paralelas às fibras. É notória e universal a relação existente entre a densidade aparente e as propriedades de resistência e dureza da madeira. Segundo Markwardt e Wilson (1935), a resistência mecânica aumenta proporcionalmente com o aumento da densidade. As espécies

mais densas são mais duras e apresentam valores mais altos de resistência (HELLMEISTER, 1983). Entretanto, ao avaliar a Figura 30B, verificou-se resultado incoerente com a literatura, haja vista que a interpretação da curva ajustada permitiu inferir que madeiras mais densas implicam menores valores de resistência à compressão paralela às fibras. A inconsistência pode ser justificada pela variabilidade da densidade em função de as amostras serem de pequenas dimensões e pela possibilidade de conter proporções distintas de alburno e cerne, o que implica comportamentos diferenciados das propriedades da madeira, tanto do ponto de vista físico como químico e morfológico (PEREIRA *et al.*, 2013). Esses fatores dificultam a relação direta com as propriedades obtidas dos corpos de prova, cabendo destacar que a madeira utilizada para a determinação da densidade não é retirada do corpo de prova da referida propriedade associada, o que aumenta ainda mais a variabilidade nos resultados. Em referência aos coeficientes de determinação ajustados (R^2 aj), apresentados nas Figuras 30B e 30C, estes se mostraram inferiores aos obtidos em estudos similares. Dias e Lahr (2004) realizaram estudo com o objetivo de estimar propriedades de resistência e rigidez de 40 espécies nativas brasileiras (folhosas) por meio da densidade aparente, obtendo a relação entre a densidade aparente e a compressão paralela às fibras da ordem de R^2 igual a 0,77104. Lahr *et al.* (2016) realizaram a caracterização completa da madeira de Angelim Saia (*Vatairea sp.*) de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 e, além disso, utilizando modelos de regressão, estimaram as propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente, com coeficientes de determinação superiores a 60% e 70%, respectivamente, para a resistência à compressão paralela às fibras e para a dureza paralela às fibras. As divergências dos valores dos estudos aqui citados em relação aos do presente trabalho se devem em função de que os autores trabalharam com mais de uma espécie, bem como com os valores médios das propriedades, possibilitando a redução da variabilidade e a melhoria dos ajustes.

Não foram observados na literatura estudos que avaliaram a correlação entre a frequência natural do ensaio de vibração transversal e as propriedades físico-mecânicas da madeira. Entretanto, pela análise das curvas das Figuras 30D e 30E, é possível inferir que existe uma relação em que valores mais altos de frequência implicam resultados superiores da resistência convencional no ensaio de flexão estática e aumento do módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras.

Na Tabela 21, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Os p-valores do teste de normalidade dos resíduos da ANOVA sobre os modelos de regressão múltipla da referida tabela foram

superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância.

Tabela 21. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Cajueiro.

Modelos	R ² aj (%)	p-valor
$RRt = -63 - 237 \cdot \rho_{12} + 4,12 \cdot fr + 101 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0401 \cdot fr^2 + 1,92 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	16,30	0,934
$RTt = -366 + 145 \cdot \rho_{12} + 10,1 \cdot fr + 23 \cdot \rho_{12}^2 - 0,069 \cdot fr^2 - 2,28 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	76,45	0,064
$f_{c0} = 201 - 1081 \cdot \rho_{12} + 4,2 \cdot fr - 375 \cdot \rho_{12}^2 - 0,137 \cdot fr^2 + 23,8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>80,34</u>	<u>0,039</u>
$f_{c90} = -203 - 131 \cdot \rho_{12} + 7,85 \cdot fr + 209,2 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0544 \cdot fr^2 - 1,70 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>80,11</u>	<u>0,041</u>
$f_{i0} = -6628 + 14842 \cdot \rho_{12} + 84 \cdot fr - 6979 \cdot \rho_{12}^2 - 0,18 \cdot fr^2 - 112 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	60,71	0,237
$f_{i90} = -98,7 + 491 \cdot \rho_{12} - 1,11 \cdot fr - 106,0 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0352 \cdot fr^2 - 5,96 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	61,50	0,226
$f_{v0} = 345 - 45 \cdot \rho_{12} - 10,7 \cdot fr + 18 \cdot \rho_{12}^2 + 0,087 \cdot fr^2 + 0,5 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	33,63	0,669
$f_{s0} = 22,6 - 33,5 \cdot \rho_{12} - 0,450 \cdot fr - 0,00032 \cdot \rho_{12}^2 + 0,00127 \cdot fr^2 + 0,568 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	60,61	0,238
$f_M = -1201 + 488 \cdot \rho_{12} + 34,8 \cdot fr - 1280 \cdot \rho_{12}^2 - 0,335 \cdot fr^2 + 15,5 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>88,55</u>	<u>0,009</u>
$f_{h0} = -1351 + 726 \cdot \rho_{12} + 38,1 \cdot fr - 227 \cdot \rho_{12}^2 - 0,277 \cdot fr^2 - 6,4 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	47,05	0,461
$f_{h90} = 521 - 766 \cdot \rho_{12} - 8,6 \cdot fr + 226 \cdot \rho_{12}^2 + 0,032 \cdot fr^2 + 7,9 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	15,30	0,943
$W = 42,7 - 61,6 \cdot \rho_{12} - 0,843 \cdot fr + 9,87 \cdot \rho_{12}^2 + 0,00332 \cdot fr^2 + 0,824 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	76,70	0,062
$E_{c0} = 200260 + 486663 \cdot \rho_{12} - 10182 \cdot fr - 599178 \cdot \rho_{12}^2 + 64 \cdot fr^2 + 3312 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	71,29	0,108
$E_{c90} = -6880 - 17920 \cdot \rho_{12} + 382 \cdot fr + 4079 \cdot \rho_{12}^2 - 3,63 \cdot fr^2 + 195 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	63,07	0,204
$E_{t0} = -545048 + 1270804 \cdot \rho_{12} + 6850 \cdot fr - 843401 \cdot \rho_{12}^2 - 38 \cdot fr^2 - 4735 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	45,18	0,494
$E_M = -448303 - 121785 \cdot \rho_{12} + 15481 \cdot fr - 179956 \cdot \rho_{12}^2 - 146,9 \cdot fr^2 + 5501 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	55,51	0,316

* Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p -valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Pela Tabela 21, verifica-se que os valores R²aj dos modelos de regressão múltipla são superiores aos dos modelos lineares apresentados nas Tabelas 19 e 20. Entretanto, mesmo com a melhoria na precisão dos modelos, apenas três (f_{c0} , f_{c90} e f_M) foram considerados significativos.

4.3 Angelim Pedra

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise estatística das propriedades estudadas para a madeira Angelim Pedra.

Tabela 22. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Angelim Pedra.

Propriedades	\bar{x}	CV (%)	Mín	Máx	IC (95%)	f_{wk}
ρ_{12} (g/cm ³)	0,64	3,98	0,61	0,69	(0,62; 0,65)	---
RRt (%)	3,68	12,37	3,13	4,41	(3,39; 3,97)	---
RTt (%)	5,63	18,91	4,23	7,51	(4,96; 6,31)	---
f_{c0} (MPa)	50,98	8,98	44,00	59,50	(48,08; 53,89)	45,61
f_{c90} (MPa)	12,48	8,43	10,90	14,40	(11,81; 13,14)	11,62
f_{t0} (MPa)	66,66	17,95	47,30	86,70	(59,06; 74,26)	59,27
f_{t90} (MPa)	3,20	20,69	2,30	4,10	(2,78; 3,62)	2,55
f_{v0} (MPa)	10,68	19,32	6,70	13,70	(9,37; 11,99)	7,48
f_{s0} (MPa)	0,64	10,42	0,60	0,80	(0,60; 0,68)	0,66
f_M (MPa)	74,87	13,73	50,70	90,00	(68,34; 81,40)	63,95
f_{h0} (MPa)	78,41	8,82	67,40	87,90	(74,01; 82,80)	72,25
f_{h90} (MPa)	48,04	9,50	42,00	54,90	(45,14; 50,94)	43,14
W (daN·m)	0,72	32,53	0,50	1,38	(0,60; 0,87)	---
E_{c0} (MPa)	11191	13,76	9368	14540	(10213; 12170)	---
E_{c90} (MPa)	545,6	14,00	456	702	(497,1; 594,1)	---
E_{t0} (MPa)	10840	15,57	8704	13981	(9768; 11913)	---
E_M (MPa)	10299	12,90	8624	12569	(9455; 11142)	---

* f_{wk} – valores característicos da resistência

Fonte: Autora.

Os valores médios determinados para as propriedades mecânicas e físicas, com o teor de umidade a 12% da madeira Angelim Pedra utilizado nesta pesquisa, foram próximos aos valores fornecidos pelo IPT:2021 e pela norma ABNT NBR 7190:1997, conforme apresentado nas Tabelas 7 e 8 da revisão bibliográfica deste trabalho.

A resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira Angelim Pedra estudada apresentou valor igual a 45,61 MPa, classificando-a como C40 na classe das dicotiledôneas (folhosas).

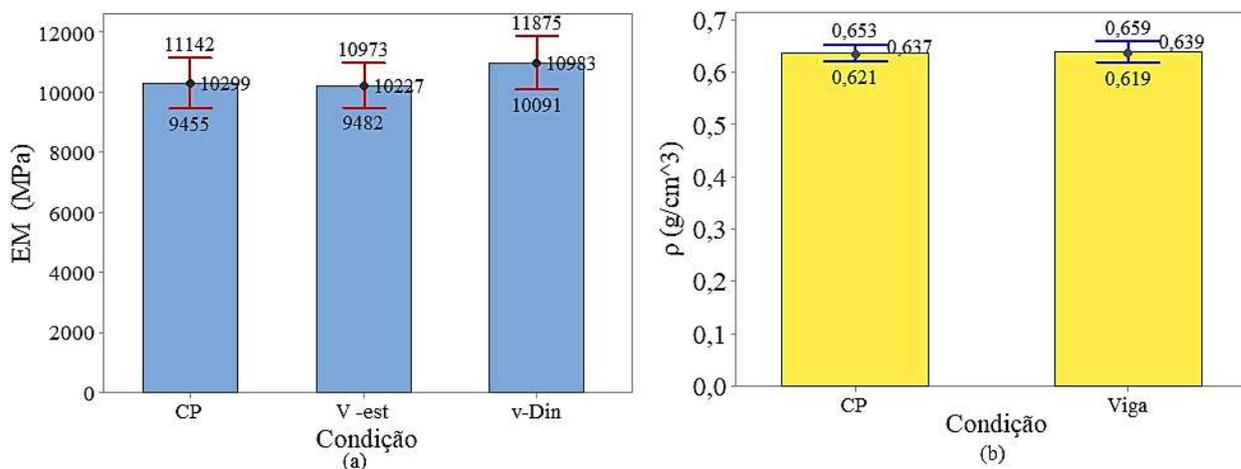
Os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas foram altos e os coeficientes de variação associados também para o lote de madeira Angelim Pedra, apesar do coeficiente de variação da densidade aparente ter sido baixo (3,98%). Essa situação evidencia a variabilidade das propriedades da madeira e a necessidade da sua caracterização para a correta utilização como material estrutural na construção civil.

Comparando-se os módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras (E_{c0}) e a

tração paralela às fibras (E_{t0}), foi verificada a equivalência dos valores obtidos (p -valor = 0,600) pela ANOVA (5% de significância).

A Figura 31 apresenta o comparativo e a equivalência entre os valores médios dos módulos de elasticidade e as densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas.

Figura 31. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Angelim Pedra obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Fonte: Autora.

As Tabelas 23 e 24 apresentam os resultados dos testes de correlação envolvendo a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas e da frequência (f_r) obtida do ensaio de vibração transversal e das propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 12 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 53,92 Hz; 4,81%; e IC = (49,80; 57,90 Hz), respectivamente. O p -valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,742, constatando-se normalidade na distribuição.

Conforme se constata na Tabela 23, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p -valor < 0,05) em apenas duas (f_{t90} e W) dentre as 16 demais variáveis confrontadas. Já em referência à frequência de vibração, apresentada na Tabela 24, apenas três (f_{c0} , f_{v0} e E_M) entre as 14 correlações testadas foram consideradas significativas pela análise de variância.

Tabela 23. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Angelim Pedra.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	0,546	0,066	22,81	RRt = - 2,562 + 9,797 · ρ ₁₂
RTt (%)	0,188	0,558	0,00	RTt = 0,592 + 7,92 · ρ ₁₂
f _{c0} (MPa)	0,057	0,859	0,00	f _{c0} = 44,38 + 10,38 · ρ ₁₂
f _{c90} (MPa)	0,082	0,800	0,00	f _{c90} = 10,31 + 3,40 · ρ ₁₂
f _{t0} (MPa)	-0,349	0,266	3,39	f _{t0} = 171,5 - 164,7 · ρ ₁₂
f _{t90} (MPa)	<u>-0,634</u>	<u>0,027</u>	34,21	f _{t90} = 13,74 - 16,56 · ρ ₁₂
f _{v0} (MPa)	0,447	0,145	12,00	f _{v0} = - 12,50 + 36,42 · ρ ₁₂
f _{s0} (MPa)	-0,232	0,467	0,00	f _{s0} = 1,032 - 0,6132 · ρ ₁₂
f _M (MPa)	0,277	0,384	0,00	f _M = 3,45 + 112,2 · ρ ₁₂
f _{h0} (MPa)	0,196	0,542	0,00	f _{h0} = 44,41 + 53,40 · ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	-0,144	0,655	0,00	f _{h90} = 64,56 - 25,94 · ρ ₁₂
W (daN·m)	<u>0,612</u>	<u>0,034</u>	31,18	W = - 2,873 + 5,642 · ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	-0,270	0,395	0,00	E _{c0} = 21650 - 16428 · ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	-0,226	0,480	0,00	E _{c90} = 978,6 - 680,2 · ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	-0,269	0,398	0,00	E _{t0} = 22242 - 17908 · ρ ₁₂
E _M (MPa)	-0,078	0,809	0,00	E _M = 12906 - 4096 · ρ ₁₂

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Tabela 24. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Angelim Pedra.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{c0} (MPa)	<u>0,615</u>	<u>0,033</u>	31,55	f _{c0} = - 7,45 + 1,084 · fr
f _{c90} (MPa)	0,463	0,130	13,53	f _{c90} = 2,372 + 0,1874 · fr
f _{t0} (MPa)	-0,026	0,935	0,00	f _{t0} = 73,18 - 0,121 · fr
f _{t90} (MPa)	-0,067	0,837	0,00	f _{t90} = 4,117 - 0,01700 · fr
f _{v0} (MPa)	<u>-0,662</u>	<u>0,019</u>	38,14	f _{v0} = 39,05 - 0,5260 · fr
f _{s0} (MPa)	0,056	0,862	0,00	f _{s0} = 0,5635 + 0,001450 · fr
f _M (MPa)	-0,291	0,358	0,00	f _M = 137,0 - 1,153 · fr
f _{h0} (MPa)	0,133	0,680	0,00	f _{h0} = 59,29 + 0,3545 · fr
f _{h90} (MPa)	0,297	0,348	0,00	f _{h90} = 19,87 + 0,5225 · fr
W (daN·m)	-0,210	0,513	0,00	W = 1,738 - 0,01890 · fr
E _{c0} (MPa)	0,027	0,932	0,00	E _{c0} = 10312 + 16,3 · fr
E _{c90} (MPa)	0,179	0,577	0,00	E _{c90} = 261,4 + 5,270 · fr
E _{t0} (MPa)	-0,015	0,962	0,00	E _{t0} = 11376 - 9,9 · fr
E _M (MPa)	<u>-0,743</u>	<u>0,006</u>	50,68	E _M = 30791 - 380,0 · fr

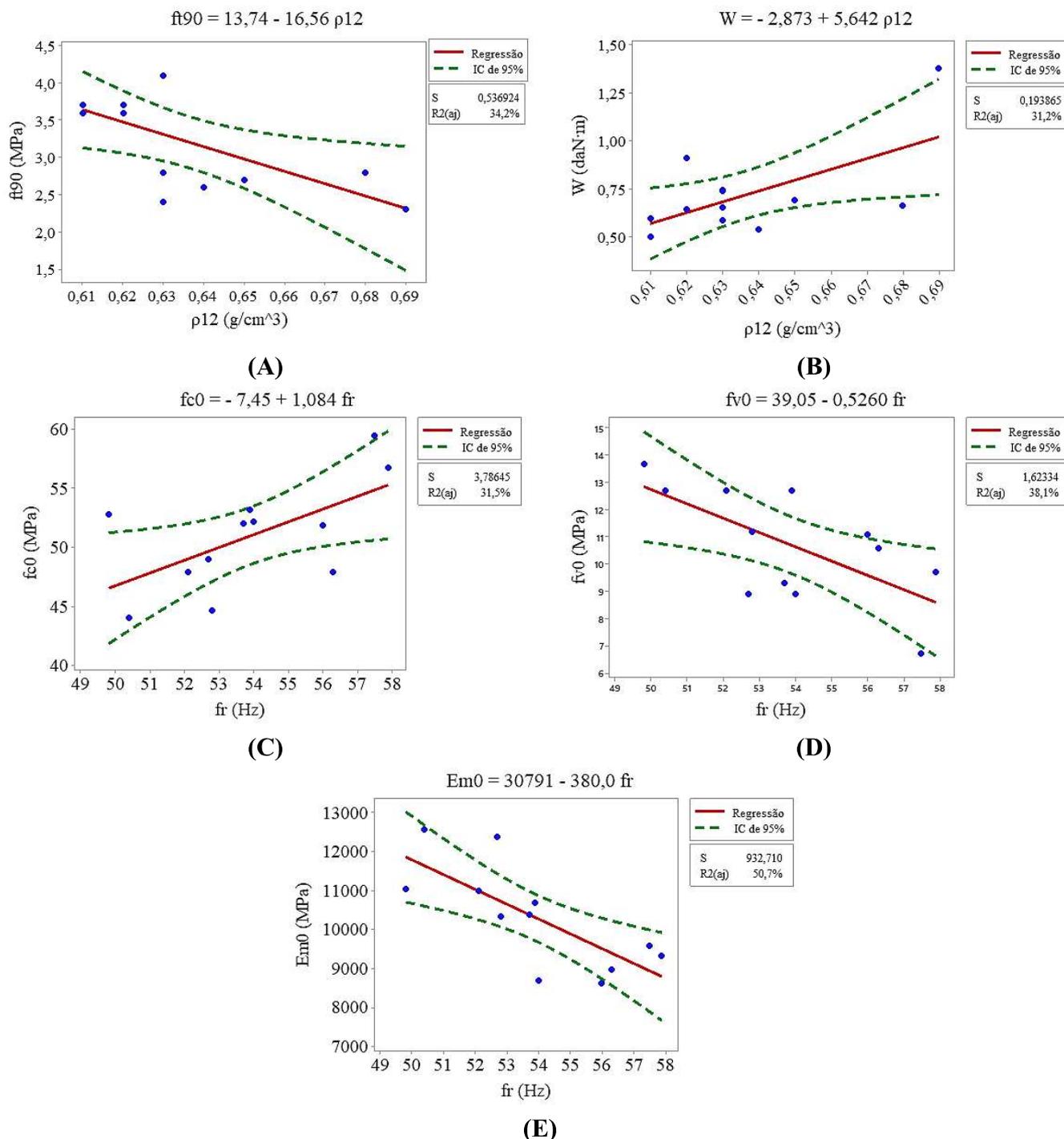
* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

A Figura 32 apresenta os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R² aj) referentes às correlações significativas indicadas nas Tabelas 23

e 24.

Figura 32. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Angelim Pedra.



Fonte: Autora

Na Figura 32A, que apresenta o modelo de regressão referente à correlação entre a densidade aparente e a resistência à tração normal às fibras, verifica-se uma relação inversamente proporcional, de modo que o aumento da densidade aparente ocasiona a redução

da resistência. Esse resultado, baseado na revisão da literatura clássica, é incoerente, uma vez que o aumento da densidade resulta em resistência maiores. Essa divergência pode ser explicada em função da variabilidade da densidade em função das amostras serem de pequenas dimensões, bem como pela possibilidade de proporções distintas de cerne e alborno, que ocasionam comportamentos diferenciados das propriedades físico-mecânicas da madeira, conforme discussão presente na Figura 32B deste estudo.

Em referência à Figura 32B, que representa a densidade aparente e a tenacidade, apesar de significativa a correlação, o coeficiente de determinação ajustado foi inferior ao obtido no estudo de Almeida *et al.* (2014) na ordem de 79,90% para o modelo de regressão linear.

As Figuras 32C, 32D e 32E apresentam resultados controversos em si. Pela análise da Figura 32C, verifica-se que a resistência à compressão paralela às fibras aumenta proporcionalmente com o aumento da frequência natural de vibração. Entretanto, ao observar as Figuras 32D e 32E constata-se o inverso, ou seja, à medida que a frequência natural aumenta, há uma redução da resistência ao cisalhamento e do módulo de elasticidade à flexão. Conforme a ABNT NBR 7190:1997, tem-se que o aumento da classe de resistência, em função da resistência característica à compressão paralela às fibras, é acompanhado pelo aumento da resistência ao cisalhamento e pelo módulo de elasticidade. Portanto, os resultados aqui apresentados, de forma isolada, contrariam a normativa e, também, o resultado apresentado para a espécie Cedro Doce na Figura 28D.

Na Tabela 25, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Os p-valores do teste de normalidade dos resíduos da ANOVA sobre os modelos de regressão múltipla foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância

Tabela 25. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o Angelim Pedra.

Modelos	R ² aj (%)	p-valor
$RR_t = 79 - 72 \cdot \rho_{12} - 1,97 \cdot fr + 200 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0382 \cdot fr^2 - 3,35 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	64,70	0,183
$RT_t = -327 + 1175 \cdot \rho_{12} - 1,88 \cdot fr - 595 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0624 \cdot fr^2 - 7,41 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	49,54	0,417
$f_{c0} = 1182 - 1367 \cdot \rho_{12} - 26,3 \cdot fr + 1561 \cdot \rho_{12}^2 + 0,330 \cdot fr^2 - 12,7 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	54,15	0,338
$f_{c90} = 406 - 477 \cdot \rho_{12} - 8,98 \cdot fr + 454 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0982 \cdot fr^2 - 2,23 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	47,50	0,453
$f_{i0} = 7941 - 13607 \cdot \rho_{12} - 125,0 \cdot fr + 10555 \cdot \rho_{12}^2 + 1,201 \cdot fr^2 - 7,4 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	49,37	0,420

Continua.

Cont.Tabela 25.

Modelos	R ² aj (%)	p-valor
$f_{i90} = 264 - 469 \cdot \rho_{12} - 3,81 \cdot fr + 273 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0245 \cdot fr^2 + 1,77 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	50,44	0,401
$f_{v0} = -998 + 2397 \cdot \rho_{12} + 8,55 \cdot fr - 1882 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0946 \cdot fr^2 + 1,77 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>89,33</u>	<u>0,007</u>
$f_{s0} = -23,9 + 52,9 \cdot \rho_{12} + 0,277 \cdot fr - 42,5 \cdot \rho_{12}^2 - 0,00277 \cdot fr^2 + 0,037 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	18,14	0,916
$f_M = 435 - 6 \cdot \rho_{12} - 13,1 \cdot fr + 1011 \cdot \rho_{12}^2 + 0,245 \cdot fr^2 - 22,5 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	19,47	0,902
$f_{h0} = 2399 - 7987 \cdot \rho_{12} + 8,8 \cdot fr + 4436 \cdot \rho_{12}^2 - 0,334 \cdot fr^2 + 42,7 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	45,65	0,486
$f_{h90} = -2099 + 5881 \cdot \rho_{12} + 8,7 \cdot fr - 3611 \cdot \rho_{12}^2 + 0,060 \cdot fr^2 - 22,6 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	43,08	0,532
$W = -45,9 - 27 \cdot \rho_{12} + 1,997 \cdot fr + 92,9 \cdot \rho_{12}^2 - 0,00902 \cdot fr^2 - 1,617 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>78,78</u>	<u>0,048</u>
$E_{c0} = 1354833 - 2939978 \cdot \rho_{12} - 14142 \cdot fr + 2194759 \cdot \rho_{12}^2 + 124,5 \cdot fr^2 + 1074 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	68,01	0,143
$E_{c90} = 63100 - 142766 \cdot \rho_{12} - 593 \cdot fr + 110628 \cdot \rho_{12}^2 + 5,79 \cdot fr^2 - 43 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	69,13	0,130
$E_{t0} = 1153106 - 2192073 \cdot \rho_{12} - 15614 \cdot fr + 1661106 \cdot \rho_{12}^2 + 144,4 \cdot fr^2 + 8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	42,71	0,539
$E_M = 708565 - 1354205 \cdot \rho_{12} - 9123 \cdot fr + 882014 \cdot \rho_{12}^2 + 58,9 \cdot fr^2 + 3674 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	73,19	0,090

* Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p -valor < 0,05).
Fonte: Autora.

Observa-se, na Tabela 25, que os valores dos coeficientes de determinação ajustados dos modelos de regressão múltipla são superiores aos modelos lineares apresentados nas Tabelas 23 e 24. Entretanto, mesmo com a melhoria na precisão dos modelos, apenas dois (f_{v0} e W) foram considerados de forma significativa. Ou seja, a variação nas variáveis independentes não explica boa parte das variações sofridas pelas variáveis dependentes.

4.4 Castelo

A Tabela 26 apresenta os resultados da análise estatística das propriedades físico-mecânicas estudadas para a madeira Castelo.

Tabela 26. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos para a madeira Castelo.

Propriedades	\bar{x}	CV (%)	Mín	Máx	IC (95%)	f_{wk}
ρ_{12} (g/cm ³)	0,78	9,41	0,69	0,89	(0,73; 0,82)	---
RRt (%)	4,07	14,21	2,98	4,74	(3,71; 4,44)	---
RTt (%)	6,69	10,18	5,72	7,74	(6,26; 7,12)	---
f_{c0} (MPa)	55,54	7,72	50,26	61,90	(52,82; 58,27)	52,76
f_{c90} (MPa)	12,59	20,00	8,94	16,13	(10,99; 14,19)	8,93

Continua.

Cont. Tabela 26.

Propriedades	\bar{x}	CV (%)	Mín	Máx	IC (95%)	f_{wk}
f_{t0} (MPa)	105,51	18,43	76,09	139,08	(93,16; 117,87)	83,16
f_{t90} (MPa)	3,06	25,79	3,71	9,22	(5,90; 8,22)	4,94
f_{v0} (MPa)	21,70	21,53	9,12	26,50	(18,73; 24,67)	15,19
f_{s0} (MPa)	1,40	28,15	0,95	2,21	(1,15; 1,65)	1,04
f_M (MPa)	104,67	10,95	82,06	124,21	(97,39; 111,95)	95,32
f_{h0} (MPa)	102,09	11,54	86,92	125,08	(94,60; 109,58)	91,54
f_{h90} (MPa)	66,29	10,34	55,67	79,14	(61,93; 70,64)	59,31
W (daN·m)	1,45	17,03	1,16	1,80	(1,29; 1,60)	---
E_{c0} (MPa)	11362	13,86	8832	13643	(10361; 12362)	---
E_{c90} (MPa)	652,7	18,93	477,2	867,1	(574,2; 731,2)	---
E_{t0} (MPa)	13106	16,21	10003	16004	(11757; 14456)	---
E_M (MPa)	11634	14,24	9809	14037	(10581; 12686)	---

* f_{wk} – valores característicos da resistência

Fonte: Autor.

A resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi igual a 52,76 MPa, classificando o lote de madeira Castelo estudado como C50 da classe das dicotiledôneas (folhosas), conforme projeto de revisão de normativa da NBR 7190.

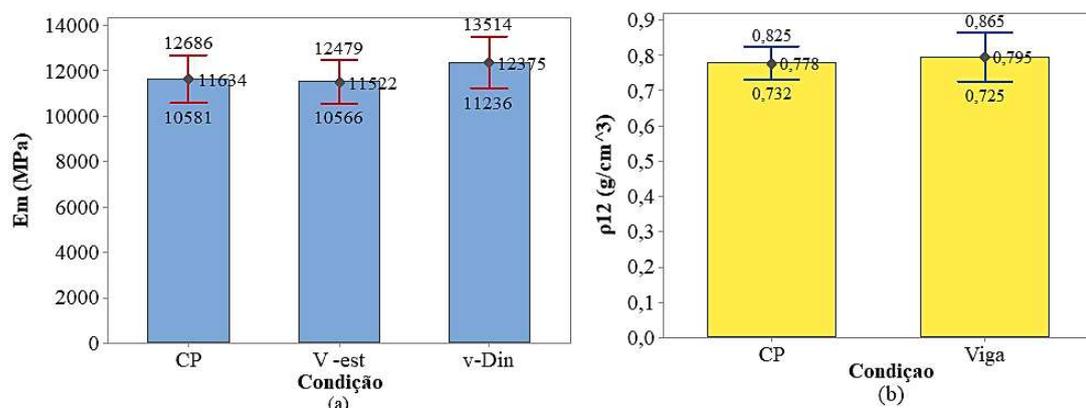
Em relação à resistência característica à tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$) obtida neste estudo, 83,16 MPa, o valor está próximo ao determinado por Wolenski *et al.* (2019): 86,42 MPa.

A densidade aparente da madeira Castelo apresentada pelo lote estudado nesta pesquisa ($\rho_{12} = 0,78 \text{ g/cm}^3$) é igual à publicada pelo IPT (2021). Já em relação à resistência à flexão (f_M) e à dureza normal às fibras (f_{h0}), os valores obtidos apresentaram um aumento médio de 10% quando comparados aos divulgados pelo IPT (2021) na Tabela 10 da revisão bibliográfica.

Os módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras (E_{c0}) e a tração paralela às fibras (E_{t0}) foram comparados pela análise de variância (5% de significância). Como resultado, foi verificada a não equivalência dos valores médios (p-valor = 0,032), ou seja, em desconformidade com os parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 7190:1997.

A Figura 33 apresenta o comparativo e a equivalência entre os valores médios dos módulos de elasticidade à flexão (E_M) e das densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas.

Figura 33. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Castelo obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Fonte: Autora.

As Tabelas 27 e 28 apresentam os resultados dos testes de correlação envolvendo a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas, e da frequência (f_r) obtida do ensaio de vibração transversal e das propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 12 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 44,45 Hz; 6,46 %; e IC = (39,19; 49,53 Hz), respectivamente. O p-valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,755, constatando-se normalidade na distribuição.

Conforme a Tabela 27, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em 12 (f_{c0} , f_{c90} , f_{t0} , f_{v0} , f_M , f_{h0} , f_{h90} , W , E_{c0} , E_{c90} , E_{t0} e E_M) dentre as 16 demais variáveis confrontadas, ou seja, em 75% das propriedades. Portanto, nesse caso, corroborando os estudos de Lima (1999) e de Dias e Lahr (2004), que concluíram o uso da densidade aparente como boa estimadora das propriedades de resistência e rigidez da madeira.

Tabela 27. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Castelo.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	0,691	0,013	42,50	RRt = - 0,174 + 5,459 · ρ_{12}
RTt (%)	0,476	0,118	14,88	RTt = 3,249 + 4,420 · ρ_{12}
f_{c0} (MPa)	<u>0,872</u>	<u>0,000</u>	<u>73,68</u>	f_{c0} = 15,83 + 51,04 · ρ_{12}
f_{c90} (MPa)	<u>0,833</u>	<u>0,001</u>	<u>66,35</u>	f_{c90} = -9,703 + 28,65 · ρ_{12}
f_{t0} (MPa)	<u>0,774</u>	<u>0,003</u>	<u>55,84</u>	f_{t0} = - 54,32 + 205,4 · ρ_{12}
f_{i90} (MPa)	-0,056	0,862	0,00	f_{i90} = 8,152 - 1,402 · ρ_{12}
f_{v0} (MPa)	<u>0,619</u>	<u>0,032</u>	<u>32,09</u>	f_{v0} = - 9,01 + 39,47 · ρ_{12}
f_{s0} (MPa)	0,152	0,636	0,00	f_{s0} = 0,762 + 0,821 · ρ_{12}
f_M (MPa)	<u>0,621</u>	<u>0,031</u>	<u>32,44</u>	f_M = 29,06 + 97,18 · ρ_{12}

Continua.

Cont. Tabela 27.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{h0} (MPa)	<u>0,636</u>	<u>0,026</u>	<u>34,46</u>	f _{h0} = 22,50 + 102,3 · ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	<u>0,788</u>	<u>0,002</u>	<u>58,27</u>	f _{h90} = 8,94 + 73,70 · ρ ₁₂
W (daN·m)	<u>0,705</u>	<u>0,010</u>	<u>44,68</u>	W = - 0,3991 + 2,372 · ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	<u>0,851</u>	<u>0,000</u>	<u>69,74</u>	E _{c0} = - 2884 + 18308 · ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	<u>0,814</u>	<u>0,001</u>	<u>62,92</u>	E _{c90} = - 416,1 + 1374 · ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	<u>0,805</u>	<u>0,002</u>	<u>61,26</u>	E _{t0} = - 5055 + 23341 · ρ ₁₂
E _M (MPa)	<u>0,933</u>	<u>0,000</u>	<u>85,83</u>	E _M = - 4798 + 21117 · ρ ₁₂

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

Já em referência à frequência de vibração, representada na Tabela 28, apenas uma (f_M) entre as 14 correlações testadas foi considerada significativa pela análise de variância, evidenciando, para esse caso, que a frequência natural de vibração não é uma boa preditora para as demais propriedades mecânicas.

Tabela 28. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Castelo.

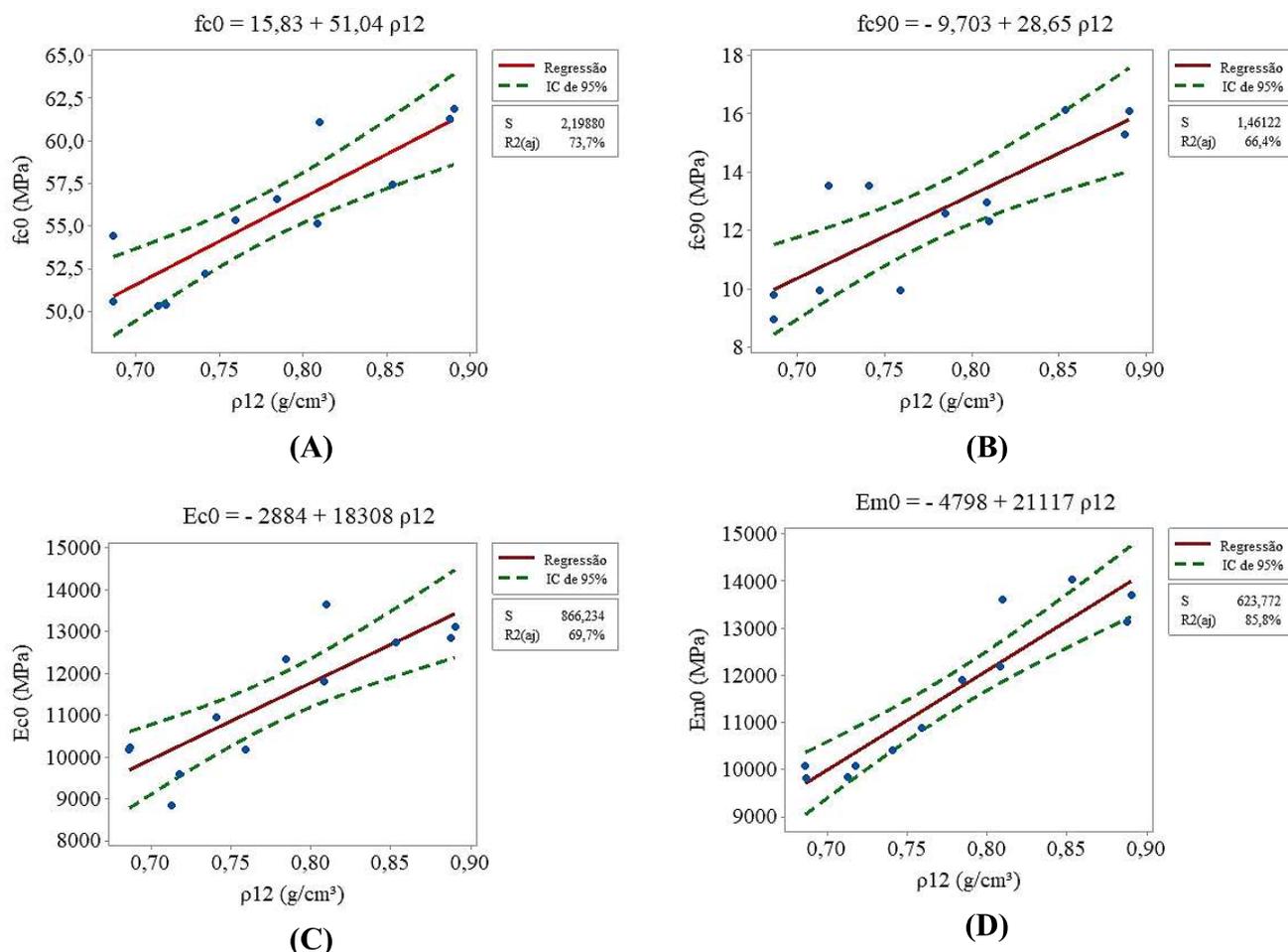
Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{c0} (MPa)	-0,279	0,380	0,00	f _{c0} = 74,03 - 0,4160 · fr
f _{c90} (MPa)	0,254	0,426	0,00	f _{c90} = 2,70 + 0,2226 · fr
f _{t0} (MPa)	-0,224	0,484	0,00	f _{t0} = 172,9 - 1,516 · fr
f _{h90} (MPa)	0,033	0,918	0,00	f _{h90} = 6,121 + 0,0211 · fr
f _{v0} (MPa)	-0,142	0,659	0,00	f _{v0} = 31,98 - 0,2314 · fr
f _{s0} (MPa)	-0,340	0,280	2,71	f _{s0} = 3,476 - 0,04668 · fr
f _M (MPa)	<u>-0,677</u>	<u>0,016</u>	40,37	f _M = 224,7 - 2,700 · fr
f _{h0} (MPa)	-0,440	0,153	11,26	f _{h0} = 182,3 - 1,804 · fr
f _{h90} (MPa)	-0,511	0,090	18,67	f _{h90} = 120,4 - 1,218 · fr
W (daN·m)	-0,142	0,659	0,00	W = 1,989 - 0,01221 · fr
E _{c0} (MPa)	-0,062	0,847	0,00	E _{c0} = 12881 - 34,20 · fr
E _{c90} (MPa)	0,189	0,556	0,00	E _{c90} = 290,6 + 8,15 · fr
E _{t0} (MPa)	0,140	0,664	0,00	E _{t0} = 8502 + 103,6 · fr
E _M (MPa)	0,014	0,965	0,00	E _M = 11273 + 8,1 · fr

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora.

A Figura 34 apresenta os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R² aj) para algumas correlações significativas indicadas na Tabela 27.

Figura 34. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o Castelo.



Fonte: Autora.

Nas Figuras 34A, 34B, 34C e 34D são apresentados os modelos de regressão em função da correlação entre a densidade aparente, a resistência à compressão paralela às fibras, a resistência à compressão normal às fibras, o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade à flexão, respectivamente. Todos esses modelos apresentam relação proporcional à densidade aparente, de forma que o aumento desta implica o acréscimo de resistência e rigidez da madeira. Christoforo, Arroyo e Lahr (2021) alcançaram resultados semelhantes ao presente estudo avaliando modelos de regressão em função da densidade aparente para estimar os valores de resistência e rigidez da espécie *Calycophyllum multiflorum* (Castelo). Os referidos autores chegaram aos seguintes coeficientes de determinação: 52,09%, 85,23%, 51,25% e 75,48% para f_{c0} , f_{c90} , E_{c0} e E_M , respectivamente.

Na Tabela 29, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Os p-valores do teste de normalidade

dos resíduos da ANOVA sobre todos os modelos de regressão múltipla da referida tabela foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância.

Tabela 29. Modelos de regressão múltipla quadráticos para a madeira Castelo.

Modelos	R ² aj (%)	p-valor
$RRt = -76,9 + 165,1 \cdot \rho_{12} + 0,531 \cdot fr - 61,3 \cdot \rho_{12}^2 + 0,00764 \cdot fr^2 - 1,413 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>87,85</u>	<u>0,010</u>
$RTt = 45,7 + 17,6 \cdot \rho_{12} - 2,24 \cdot fr + 14 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0334 \cdot fr^2 - 0,80 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	57,40	0,286
$f_{c0} = 56 - 237 \cdot \rho_{12} + 3,54 \cdot fr + 73 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0773 \cdot fr^2 + 3,90 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>82,27</u>	<u>0,030</u>
$f_{c90} = -112 + 213 \cdot \rho_{12} + 0,90 \cdot fr - 26,3 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0223 \cdot fr^2 - 3,17 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>88,61</u>	<u>0,008</u>
$f_{t0} = -753 + 1935 \cdot \rho_{12} + 1,6 \cdot fr - 840 \cdot \rho_{12}^2 + 0,058 \cdot fr^2 - 9,3 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	64,16	0,190
$f_{t90} = 86 + 82 \cdot \rho_{12} - 4,93 \cdot fr - 129 \cdot \rho_{12}^2 + 0,0315 \cdot fr^2 + 2,69 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	29,96	0,759
$f_{v0} = 48 + 280 \cdot \rho_{12} - 6,7 \cdot fr - 102 \cdot \rho_{12}^2 + 0,092 \cdot fr^2 - 1,88 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	43,10	0,532
$f_{s0} = -47,1 + 103,1 \cdot \rho_{12} + 0,40 \cdot fr - 61 \cdot \rho_{12}^2 - 0,0036 \cdot fr^2 - 0,143 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	53,36	0,352
$f_M = -697 + 1343 \cdot \rho_{12} + 13,3 \cdot fr - 822 \cdot \rho_{12}^2 - 0,184 \cdot fr^2 + 0,9 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>83,26</u>	<u>0,025</u>
$f_{h0} = -449 + 242 \cdot \rho_{12} + 20,3 \cdot fr - 233 \cdot \rho_{12}^2 - 0,291 \cdot fr^2 + 5,1 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	58,01	0,277
$f_{h90} = 154 - 257 \cdot \rho_{12} + 0,4 \cdot fr + 144 \cdot \rho_{12}^2 - 0,035 \cdot fr^2 + 2,22 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	78,41	0,051
$W = 45,8 - 56,1 \cdot \rho_{12} - 1,032 \cdot fr + 20,3 \cdot \rho_{12}^2 + 0,00627 \cdot fr^2 + 0,588 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>79,18</u>	<u>0,046</u>
$E_{c0} = -67204 + 3096 \cdot \rho_{12} + 3138 \cdot fr - 39449 \cdot \rho_{12}^2 - 50,8 \cdot fr^2 + 1781 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>84,42</u>	<u>0,021</u>
$E_{c90} = -4816 + 3224 \cdot \rho_{12} + 151 \cdot fr - 4172 \cdot \rho_{12}^2 - 2,53 \cdot fr^2 + 110 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>83,67</u>	<u>0,024</u>
$E_{t0} = 48520 + 43317 \cdot \rho_{12} - 2986 \cdot fr + 3540 \cdot \rho_{12}^2 + 41,0 \cdot fr^2 - 577 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	74,44	0,072
$E_M = 16259 - 38074 \cdot \rho_{12} + 25 \cdot fr - 17675 \cdot \rho_{12}^2 - 17,0 \cdot fr^2 + 1980 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	<u>94,45</u>	<u>0,001</u>

* *Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p-valor < 0,05).*

Fonte: Autora

Pela Tabela 29, observa-se que os coeficientes de determinação ajustados (R²aj) dos modelos de regressão múltipla são superiores aos modelos lineares apresentados nas Tabelas 27 e 28, evidenciando a melhoria na precisão dos modelos. Dos 16 modelos de regressão múltipla quadráticos, 50% (RRt, f_{c0}, f_{c90}, f_M, W, E_{c0}, E_{c90} e E_M) foram considerados de forma significativa (p-valor < 0,05) e com R²aj superiores a 70%, implicando boa qualidade dos ajustes.

4.5 Mandioqueira

Na Tabela 30, são apresentados os valores médios (\bar{x}), os coeficientes de variação (CV), os menores (Mín.) e os maiores (Máx.) valores, assim como os intervalos (IC) de confiança da média (95% de confiabilidade) referentes às propriedades físicas e mecânicas obtidas dos corpos de prova da madeira Mandioqueira.

Tabela 30. Resultados das propriedades físicas e mecânicas obtidos dos corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos da madeira Mandioqueira.

PROPRIEDADES	\bar{x}	CV (%)	Mín.	Máx.	IC (95%)	f_{wk}
ρ_{12} (g/cm ³)	0,87	4,66	0,82	0,96	(0,84; 0,89)	---
RRt (%)	4,64	9,98	3,97	5,61	(4,34; 4,93)	---
RTt (%)	9,24	10,36	7,34	10,94	(8,62; 9,84)	---
f_{c0} (MPa)	71,35	13,88	60,50	93,40	(65,06; 77,64)	63,80
f_{c90} (MPa)	17,52	11,80	15,13	21,35	(16,21; 18,84)	15,77
f_{t0} (MPa)	97,12	28,44	50,10	140,00	(79,57; 114,66)	67,96
f_{t90} (MPa)	2,56	43,48	1,40	5,50	(1,85; 3,26)	1,79
f_{v0} (MPa)	16,64	15,11	12,20	21,30	(15,04; 18,24)	14,52
f_{s0} (MPa)	0,54	24,21	0,40	0,70	(0,45; 0,62)	0,38
f_M (MPa)	117,63	21,45	87,10	184,20	(101,60; 133,65)	97,90
f_{h0} (MPa)	107,87	18,65	67,40	146,50	(95,09; 120,65)	79,64
f_{h90} (MPa)	67,73	14,41	45,50	84,60	(61,52; 73,93)	60,50
W (daN·m)	1,20	15,48	0,86	1,50	(1,07; 1,31)	---
E_{c0} (MPa)	19200	12,41	14200	23300	(17699; 20728)	---
E_{c90} (MPa)	956	11,00	708	1065	(889,6; 1023,2)	---
E_{t0} (MPa)	18800	11,07	15400	21900	(17432; 20070)	---
E_M (MPa)	18500	16,41	14700	25500	(16528; 20376)	---

* f_{wk} – valores característicos da resistência

Fonte: Autora.

A resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi igual a 63,80 MPa, classificando o lote de madeira Mandioqueira avaliada como C60, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997, a qual define valores mínimos de resistência à compressão paralela às fibras de 60 MPa.

Observa-se que os valores obtidos neste estudo são equivalentes ou superiores aos apresentados por Dias e Lahr (2004) e aos divulgados na ABNT NBR 7190:1997, vide comparativo na Tabela 31, fato que implica o potencial de uso da espécie Mandioqueira como elementos estruturais.

Tabela 31. Comparativo das propriedades físicas e mecânicas da pesquisa com a ABNT NBR 7190 (1997) e literatura correlata.

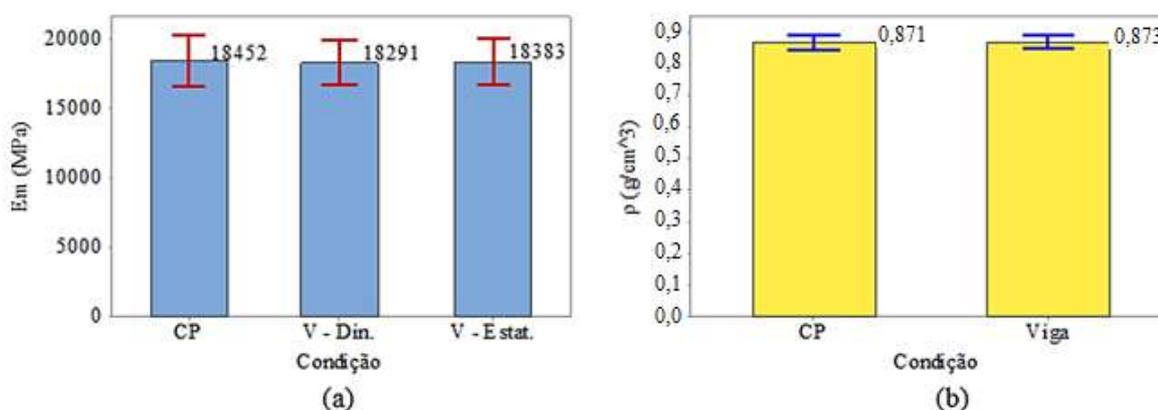
PROPRIEDADES	\bar{x} (estudo)	NBR 7190:1997	Dias e Lahr (2004)
ρ_{12} (g/cm ³)	0,87	0,86	0,86
f_{c0} (MPa)	71,35	71,40	71,00
f_{t0} (MPa)	97,12	89,10	93,00
f_{t90} (MPa)	2,56	2,70	2,80
f_{v0} (MPa)	16,64	10,60	17,20
E_{c0} (MPa)	19200	18971	19274

Fonte: Autora.

A comparação entre os módulos de elasticidade obtidos dos ensaios de tração (E_{t0}) e de compressão (E_{c0}) na direção paralela às fibras pela ANOVA (5% de significância) evidenciou equivalência entre ambos (p -valor = 0,617), resultado esse em conformidade com o apresentado pela ABNT NBR 7190:1997.

Na Figura 35, são apresentados os resultados do teste de Tukey com o objetivo da comparação entre os valores médios dos módulos de elasticidade e das densidades obtidos dos corpos de prova e das vigas (peças de dimensões estruturais).

Figura 35. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) da madeira Mandioqueira obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais.



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din.: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva

Fonte: Autora.

Os p -valores superiores a 0,05 (5%) do teste de Anderson-Darling indicam a normalidade nas distribuições das propriedades apresentadas na Figura 28, validando assim os resultados do teste de Tukey.

Como observado na Figura 35, os módulos de elasticidade foram considerados todos equivalentes, assim como as densidades. A equivalência estatística pode ser justificada em função de a madeira ensaiada ser proveniente de um lote homogêneo, pela não existência de defeitos nas peças e por ser advinda de floresta nativa, ou seja, com idade maior para o tempo de corte, se comparada com madeiras de reflorestamento.

Com relação à equivalência dos módulos de elasticidade, comparando-os com a literatura correlata, os resultados obtidos corroboram os estudos de Batista *et al.* (2000), em que a espécie Cambará (*Erismia uninatum Warm.*) não apresentou diferenças significativas entre os módulos de elasticidade obtidos a partir de peças estruturais e corpos de prova normatizados.

Nas Tabelas 32 e 33, são apresentados os resultados dos testes de correlação envolvendo

a densidade aparente e as demais variáveis físicas e mecânicas, e entre a frequência (fr) obtida do ensaio de vibração transversal e as propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 12 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 33,90 Hz; 4,54%; e IC = (32,93; 34,88 Hz), respectivamente. O p-valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,847, e por ser superior a 0,05, constata-se normalidade na distribuição, validando os resultados obtidos do intervalo de confiança da média.

Tabela 32. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para a madeira Mandioqueira.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	0,001	0,996	0,00	RRt = 4,626 + 0,017 · ρ ₁₂
RTt (%)	-0,119	0,712	0,00	RTt = 11,69 - 2,817 · ρ ₁₂
f _{c0} (MPa)	0,049	0,880	0,00	f _{c0} = 60,93 + 11,97 · ρ ₁₂
f _{c90} (MPa)	0,188	0,558	0,00	f _{c90} = 9,16 + 9,60 · ρ ₁₂
f _{t0} (MPa)	<u>0,595</u>	<u>0,041</u>	<u>28,95</u>	f _{t0} = - 255,8 + 405,3 · ρ ₁₂
f _{i90} (MPa)	0,049	0,879	0,00	f _{i90} = 1,383 + 1,350 · ρ ₁₂
f _{v0} (MPa)	0,293	0,356	0,00	f _{v0} = 0,83 + 18,16 · ρ ₁₂
f _{s0} (MPa)	-0,161	0,617	0,00	f _{s0} = 0,9949 - 0,520 · ρ ₁₂
f _M (MPa)	0,501	0,097	17,63	f _M = - 153,8 + 311,7 · ρ ₁₂
f _{h0} (MPa)	-0,332	0,291	2,15	f _{h0} = 251,4 - 164,9 · ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	-0,384	0,217	6,26	f _{h90} = 148,3 - 92,54 · ρ ₁₂
W (daN·m)	-0,160	0,619	0,00	W = 1,833 - 0,732 · ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	0,318	0,314	1,13	E _{c0} = 2929 + 18700 · ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	0,308	0,329	0,47	E _{c90} = 259,8 + 799,9 · ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	0,324	0,305	1,52	E _{t0} = 4324 + 16567 · ρ ₁₂
E _M (MPa)	<u>0,644</u>	<u>0,024</u>	<u>35,64</u>	E _M = - 23436 + 48102 · ρ ₁₂

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora

Conforme exposto na Tabela 32, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em apenas duas (f_{t0} e E_M) dentre as 16 demais variáveis confrontadas.

Como referência dos coeficientes de determinação obtidos para este estudo, Dias e Lahr (2004) estimaram as propriedades de resistência e rigidez da madeira (40 espécies das dicotiledôneas) por meio da densidade aparente, seguindo a determinação da ABNT NBR 7190:1997 para a caracterização mínima de espécies pouco conhecidas, com total de 12 corpos de prova para cada propriedade. Os autores obtiveram correlações significativas com

coeficientes de determinação da ordem de $R^2 = 0,63$ (relação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras) e $R^2 = 0,71$ (relação entre a densidade aparente e o módulo de elasticidade na flexão estática), ou seja, valores superiores ao obtido neste estudo.

Tabela 33. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para a madeira Mandioqueira.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f_{c0} (MPa)	0,070	0,828	0,00	$f_{c0} = 56,01 + 0,452 \cdot fr$
f_{c90} (MPa)	0,166	0,607	0,00	$f_{c90} = 9,97 + 0,2227 \cdot fr$
f_{t0} (MPa)	<u>0,696</u>	<u>0,012</u>	<u>43,35</u>	$f_{t0} = - 326,7 + 12,50 \cdot fr$
f_{t90} (MPa)	0,038	0,907	0,00	$f_{t90} = 1,628 + 0,0274 \cdot fr$
f_{v0} (MPa)	0,430	0,163	10,34	$f_{v0} = - 7,19 + 0,7030 \cdot fr$
f_{s0} (MPa)	-0,388	0,213	6,52	$f_{s0} = 1,662 - 0,03303 \cdot fr$
f_M (MPa)	<u>0,658</u>	<u>0,020</u>	<u>37,60</u>	$f_M = - 248,1 + 10,79 \cdot fr$
f_{h0} (MPa)	-0,475	0,119	14,77	$f_{h0} = 318,2 - 6,205 \cdot fr$
f_{h90} (MPa)	-0,516	0,086	19,29	$f_{h90} = 178,7 - 3,274 \cdot fr$
W (daN·m)	-0,019	0,953	0,00	$W = 1,274 - 0,00229 \cdot fr$
E_{c0} (MPa)	0,198	0,537	0,00	$E_{c0} = 8813 + 306,8 \cdot fr$
E_{c90} (MPa)	0,235	0,462	0,00	$E_{c90} = 411,4 + 16,08 \cdot fr$
E_{t0} (MPa)	0,489	0,107	16,31	$E_{t0} = - 3625 + 660,0 \cdot fr$
E_M (MPa)	<u>0,665</u>	<u>0,018</u>	<u>38,65</u>	$E_M = - 25929 + 1309 \cdot fr$

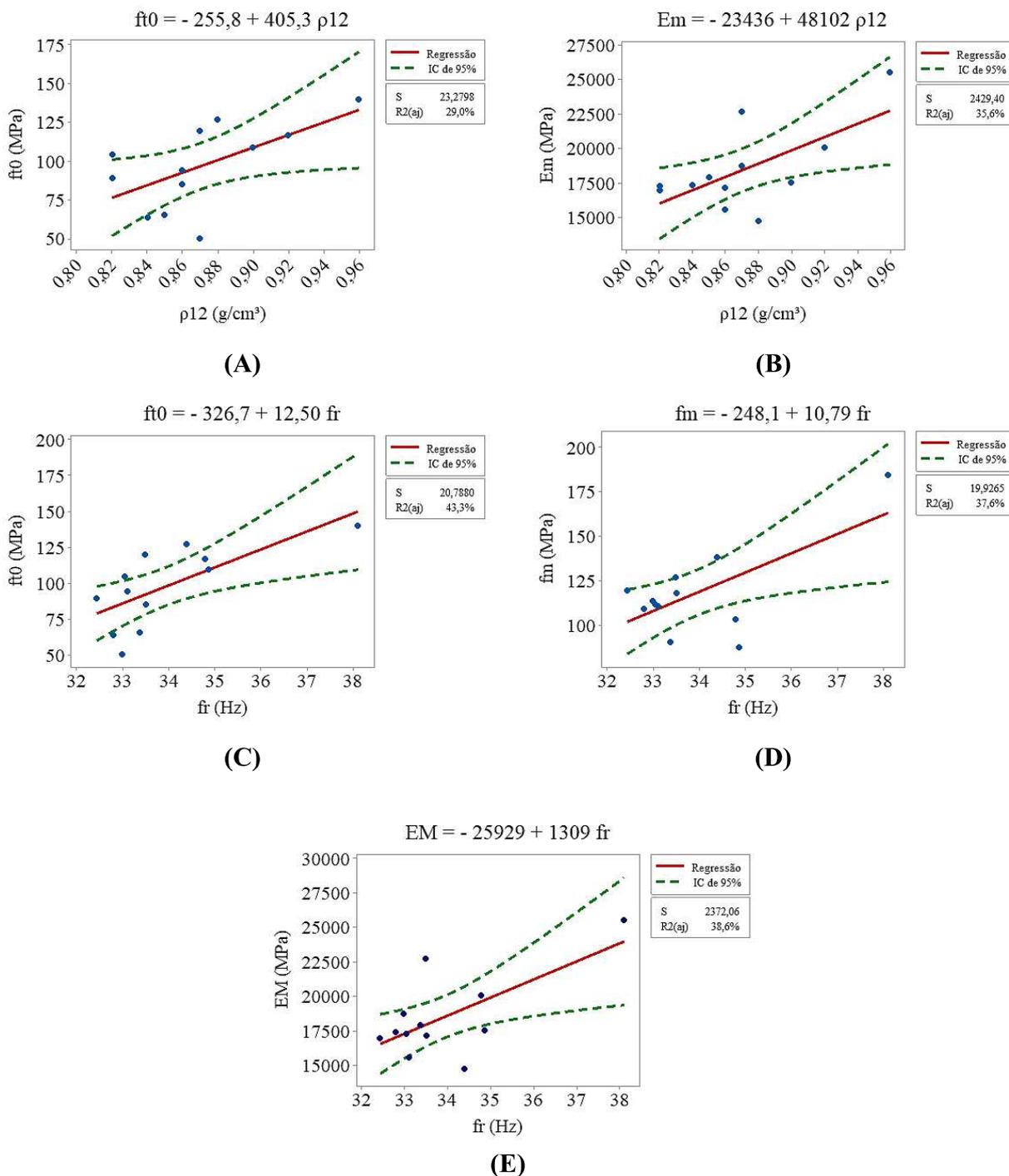
* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p -valor < 0,05).

Fonte: Autora

Conforme a Tabela 33, a frequência apresentou correlação significativa (p -valor < 0,05) em apenas três (f_{t0} , f_M e E_M) dentre as 14 correlações testadas pela análise de variância. As correlações significativas, obtidas com base na frequência natural de vibração, apresentaram coeficientes de determinação ajustados superiores quando comparados aos obtidos por intermédio da densidade aparente.

Na Figura 36, são ilustrados e apresentados os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R^2 aj) referentes às correlações significativas indicadas nas Tabelas 32 e 33.

Figura 36. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para a madeira Mandioqueira.



Fonte: Autora

Conforme se pode constatar pela Figura 36, o teste de Anderson-Darling sobre os resíduos da ANOVA dos modelos de regressão acusou normalidade em todos os casos (p – valor $> 0,05$), o que valida os resultados da análise de variância. Mesmo sendo as correlações significativas, os coeficientes de determinação ajustados variaram de 29,0% a 43,30%, e isso

implica modelos pouco precisos a serem usados na estimativa das referidas propriedades. Tais resultados são visualizados pela notada dispersão dos pares de valores determinados experimentalmente com as curvas ajustadas.

Verifica-se que tanto a densidade aparente quanto a frequência foram correlacionadas de forma significativa com a resistência à tração paralela às fibras (Figuras 36A e 36C) e ao módulo de elasticidade na flexão estática (Figuras 36B e 36E). Observou-se que, na literatura existente, pesquisas como as de Santos (2007), Calonego et al. (2013), Souza (2013) e Mascia, Krestchmann (2016), peças de diferentes espécies ensaiadas à flexão (f_M) sofreram ruptura por tração nas fibras inferiores, ou seja, evidenciando que os limites de resistência nesses tipos de esforços são dados em função das tensões de tração, que ocasionam a ruptura frágil da madeira com baixos valores de deformação. Nesse contexto, e com base nos resultados obtidos, pode-se inferir que elementos que estejam sujeitos a ações decorrentes de esforços de flexão irão colapsar em função da tensão de tração, sendo esse o fator limitante.

Na Tabela 34, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas. A análise da normalidade dos resíduos da ANOVA (p-valores) foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância.

Tabela 34. Modelos de regressão múltipla quadráticos da madeira Mandioqueira.

MODELOS	R ² aj (%)	p-valor
$RR_t = 2 + 137 \cdot \rho_{12} - 3,33 \cdot fr - 86 \cdot \rho_{12}^2 + 0,049 \cdot fr^2 + 0,2 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	9,41	0,981
$RT_t = 31 - 301 \cdot \rho_{12} + 6,5 \cdot fr + 406 \cdot \rho_{12}^2 + 0,06 \cdot fr^2 - 12,2 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	6,91	0,991
$f_{c0} = 1630 - 2345 \cdot \rho_{12} - 30 \cdot fr - 14813 \cdot \rho_{12}^2 - 10,3 \cdot fr^2 + 833 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	18,72	0,910
$f_{c90} = 231 + 303 \cdot \rho_{12} - 20,1 \cdot fr - 2125 \cdot \rho_{12}^2 - 1,02 \cdot fr^2 + 101 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	19,09	0,906
$f_{i0} = -1960 - 14452 \cdot \rho_{12} + 472 \cdot fr - 2215 \cdot \rho_{12}^2 - 13,4 \cdot fr^2 + 531 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	63,12	0,203
$f_{i90} = 28 + 722 \cdot \rho_{12} - 19,8 \cdot fr - 964 \cdot \rho_{12}^2 - 0,08 \cdot fr^2 + 28 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	25,70	0,823
$f_{v0} = 817 - 1475 \cdot \rho_{12} - 8,9 \cdot fr - 1731 \cdot \rho_{12}^2 - 1,59 \cdot fr^2 + 133 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	43,86	0,518
$f_{s0} = 32,9 - 51,3 \cdot \rho_{12} - 0,52 \cdot fr + 125 \cdot \rho_{12}^2 + 0,065 \cdot fr^2 - 4,74 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	64,62	0,184
$f_M = 2213 + 14093 \cdot \rho_{12} - 486 \cdot fr + 4753 \cdot \rho_{12}^2 + 15,8 \cdot fr^2 - 667 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	70,94	0,112
$f_{h0} = -5487 + 8467 \cdot \rho_{12} + 110 \cdot fr + 9508 \cdot \rho_{12}^2 + 8,0 \cdot fr^2 - 740 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	45,55	0,488
$f_{h90} = -3235 + 3186 \cdot \rho_{12} + 111 \cdot fr + 11163 \cdot \rho_{12}^2 + 7,05 \cdot fr^2 - 670 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	65,29	0,175
$W = 103,7 - 223 \cdot \rho_{12} - 0,19 \cdot fr - 237 \cdot \rho_{12}^2 - 0,242 \cdot fr^2 + 18,8 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	60,93	0,234
$E_{c0} = 160423 + 988224 \cdot \rho_{12} - 33435 \cdot fr + 3554288 \cdot \rho_{12}^2 + 3160 \cdot fr^2 - 209913 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	40,64	0,576
$E_{c90} = 20507 - 22300 \cdot \rho_{12} - 567 \cdot fr + 99050 \cdot \rho_{12}^2 + 63 \cdot fr^2 - 4344 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	30,89	0,744
$E_{t0} = -149077 - 541781 \cdot \rho_{12} + 22754 \cdot fr + 207439 \cdot \rho_{12}^2 - 349 \cdot fr^2 + 3794 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	40,32	0,582
$E_M = 590270 - 47784 \cdot \rho_{12} - 32649 \cdot fr + 1538512 \cdot \rho_{12}^2 + 1435 \cdot fr^2 - 75901 \cdot \rho_{12} \cdot fr$	62,70	0,209

* Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora

Mesmo com a melhoria na precisão dos modelos de regressão múltipla, conforme a Tabela 34, quando comparados aos modelos de regressão simples apresentados na Figura 36, nenhum deles foi considerado significativo (p -valor $< 0,05$), o que implica que variações nas variáveis independentes não explicam as variações sofridas pelas variáveis dependentes.

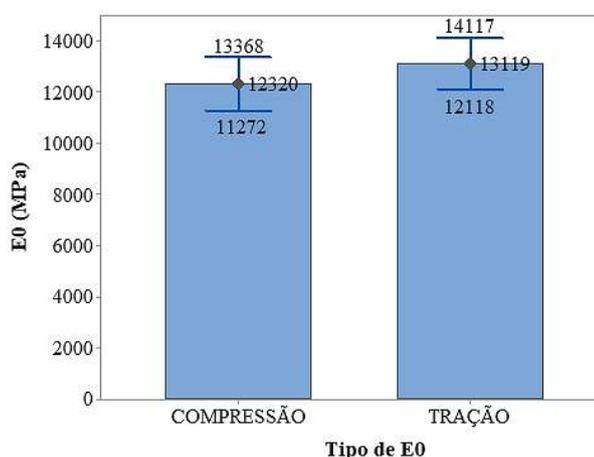
4.6 Modelos de regressão multivariáveis para o conjunto das espécies

Neste item, são apresentados os resultados da análise estatística efetuada com o objetivo de estabelecer modelos de regressão que relacionam a densidade aparente (teor de umidade de 12%) e a frequência natural de vibração (pico) com as propriedades físico-mecânicas do grupo das madeiras folhosas. Para tanto, utilizou-se o agrupamento das cinco espécies utilizadas no estudo, com classe de resistência de C20 à C60, totalizando 60 corpos de prova para a propriedade a ser estimada.

Os valores médios da densidade aparente, da resistência à compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras para o grupo de folhosas avaliadas foram $0,67\text{g/cm}^3$; 49,88 MPa; e 12320 MPa, respectivamente.

O valor médio do módulo de elasticidade obtido no ensaio à tração ($E_{t0} = 13119$ MPa) foi equivalente ao de compressão ($E_{c0} = 12320$), ambos na direção paralela às fibras. A comparação entre as médias pela ANOVA (5% de significância) constatou a equivalência (p -valor = 0,272), observada na Figura 37, em conformidade com os parâmetros da norma brasileira ABNT NBR 7190:1997, cabendo destacar que o p -valor do teste de normalidade de Anderson-Darling foi superior a 5%, o que valida os resultados obtidos da análise de variância.

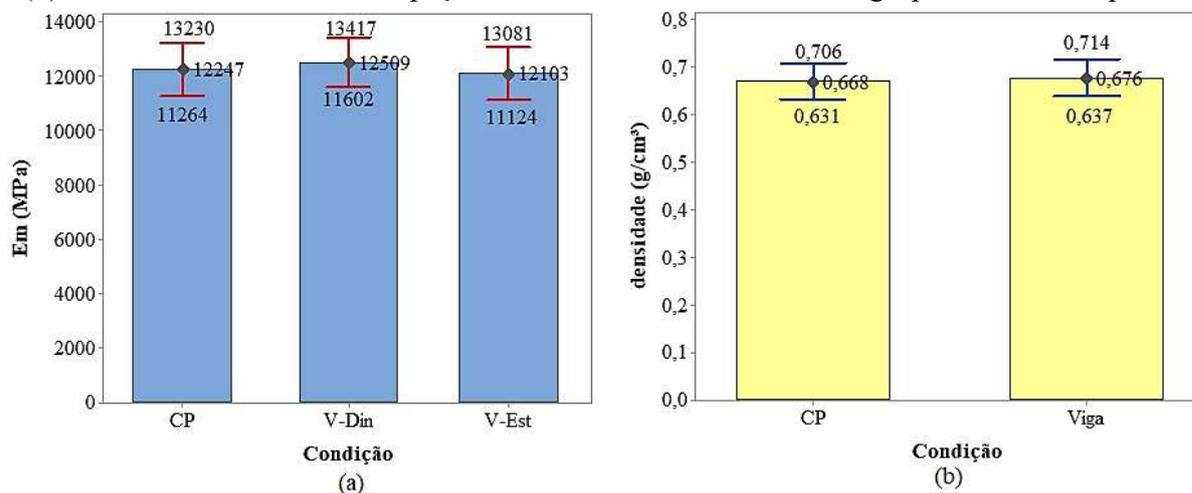
Figura 37. Comparativo dos módulos de elasticidade à compressão e tração paralelos às fibras para o agrupamento das espécies.



Fonte: Autora

A comparação entre os valores médios dos módulos de elasticidade e das densidades obtidos nos corpos de prova e nos elementos estruturais (vigas) são apresentados na Figura 38.

Figura 38. Resultados do teste de Tukey referentes aos valores de rigidez (a) e de densidade (b) obtidos em amostras e em peças de dimensões estruturais do agrupamento das espécies



* CP: corpo de prova de pequenas dimensões e isento de defeitos; V - Din: vigas ensaiadas via método de vibração transversal; V - Est.: vigas ensaiadas na flexão estática de forma não destrutiva.

Fonte: Autora

Os p-valores (condição a = 0,831 e condição b = 0,784) são superiores a 0,05 (5%) do teste de Anderson-Darling e indicam a normalidade nas distribuições das propriedades apresentadas na Figura 38, validando assim os resultados do teste de Tukey e, conseqüentemente, indicando a equivalência dos valores dos módulos de elasticidade e densidade.

A Tabela 35 exhibe os modelos de regressão linear para a estimativa das propriedades físico-mecânicas da madeira em função da densidade aparente.

Tabela 35. Resultados das análises de correlação em função da densidade aparente para o agrupamento das espécies.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
RRt (%)	0,393	<u>0,00192</u>	<u>13,95</u>	$RRt = 2,626 + 2,138 \cdot \rho_{12}$
RTt (%)	0,707	<u>0,00000</u>	<u>49,07</u>	$RTt = 0,5663 + 9,030 \cdot \rho_{12}$
f_{c0} (MPa)	0,864	<u>0,00000</u>	<u>74,17</u>	$f_{c0} = -9,000 + 88,08 \cdot \rho_{12}$
f_{c90} (MPa)	0,874	<u>0,00000</u>	<u>76,06</u>	$f_{c90} = -4,045 + 23,57 \cdot \rho_{12}$
f_{t0} (MPa)	0,509	<u>0,00003</u>	<u>24,61</u>	$f_{t0} = 23,53 + 90,87 \cdot \rho_{12}$
f_{t90} (MPa)	0,267	<u>0,03956</u>	<u>5,50</u>	$f_{t90} = 1,266 + 3,641 \cdot \rho_{12}$
f_{v0} (MPa)	0,749	<u>0,00000</u>	<u>55,32</u>	$f_{v0} = -5,146 + 28,24 \cdot \rho_{12}$

Continua.

Cont.Tabela 35.

Propriedade	R de Pearson	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{s0} (MPa)	0,365	<u>0,00415</u>	<u>11,82</u>	f _{s0} = 0,0541 + 1,000 · ρ ₁₂
f _M (MPa)	0,847	<u>0,00000</u>	<u>71,30</u>	f _M = -17,54 + 153,9 · ρ ₁₂
f _{h0} (MPa)	0,853	<u>0,00000</u>	<u>72,21</u>	f _{h0} = -32,93 + 165,3 · ρ ₁₂
f _{h90} (MPa)	0,868	<u>0,00000</u>	<u>74,83</u>	f _{h90} = -22,71 + 106,5 · ρ ₁₂
W (daN·m)	0,813	<u>0,00000</u>	<u>65,54</u>	W = - 0,7572 + 2,432 · ρ ₁₂
E _{c0} (MPa)	0,738	<u>0,00000</u>	<u>53,74</u>	E _{c0} = - 1382 + 20496 · ρ ₁₂
E _{c90} (MPa)	0,477	<u>0,00012</u>	<u>21,42</u>	E _{c90} = 194,8 + 746,3 · ρ ₁₂
E _{t0} (MPa)	0,724	<u>0,00000</u>	<u>51,59</u>	E _{t0} = 161 + 19176 · ρ ₁₂
E _M (MPa)	0,747	<u>0,00000</u>	<u>55,06</u>	E _M = - 758 + 19454 · ρ ₁₂

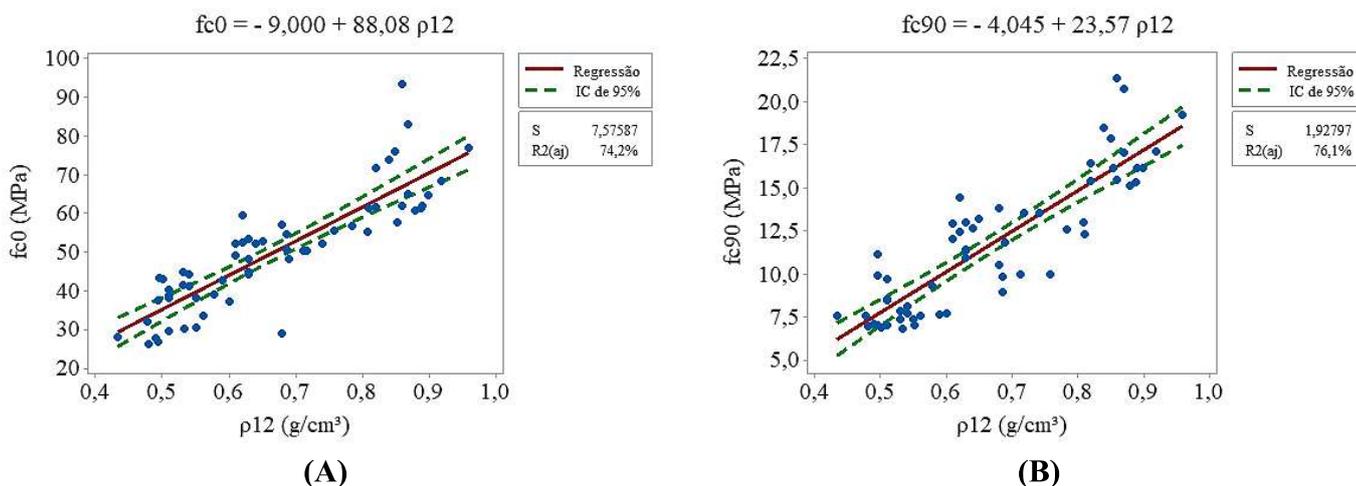
* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

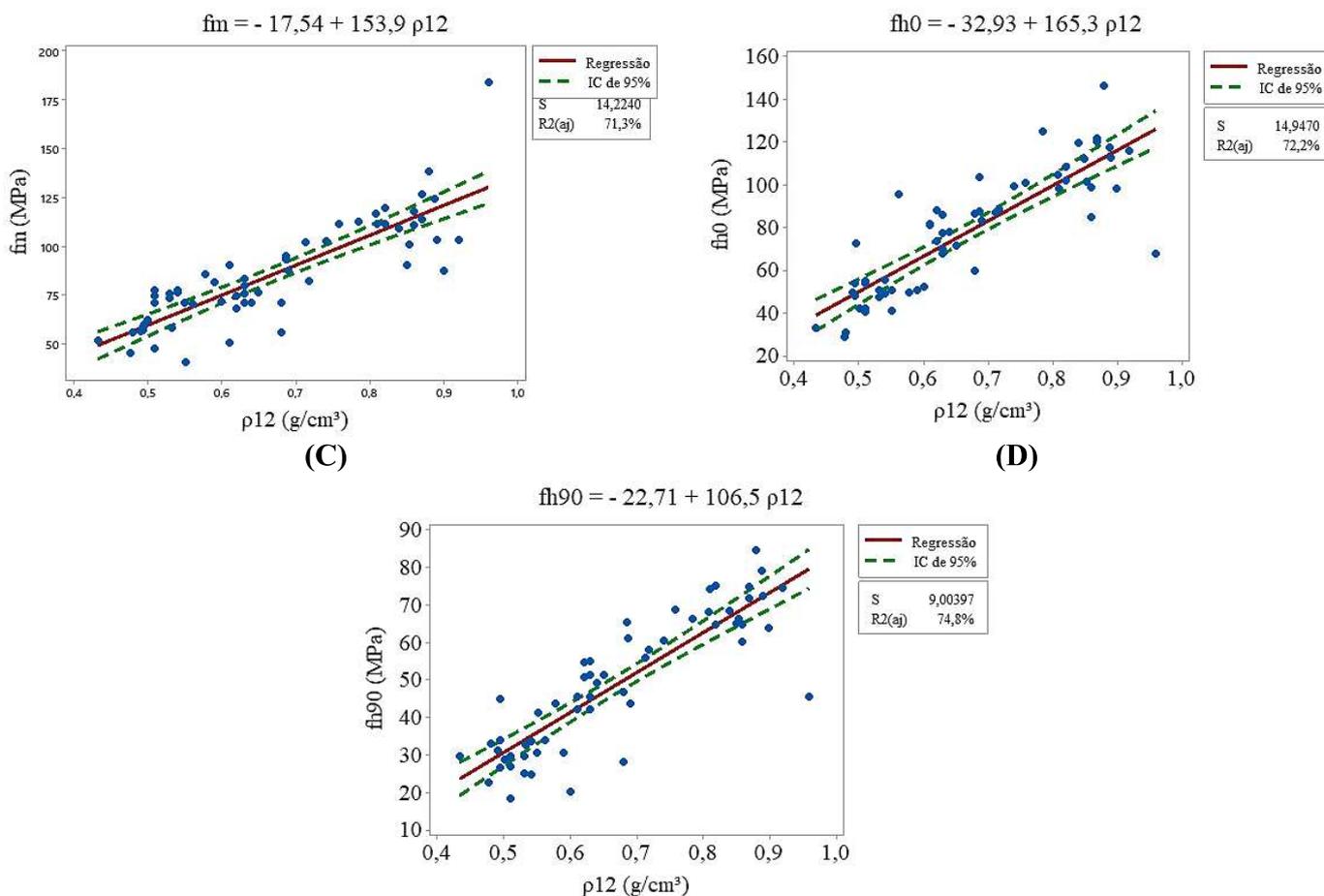
Fonte: Autora

Conforme exposto na Tabela 35, a densidade aparente apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em todas as propriedades testadas, sendo que em cinco (f_{c0}, f_{c90}, f_m, f_{h0} e f_{h90}) os valores dos coeficientes de determinação ajustados (R²aj) foram superiores a 70%, implicando boa qualidade dos ajustes obtidos (MONTGOMERY, 2005).

A Figura 39 apresenta os modelos de regressão, assim como os coeficientes de determinação ajustados (R² aj) para algumas correlações significativas indicadas na Tabela 35.

Figura 39. Modelos de regressão linear referentes às correlações consideradas significativas pela ANOVA para o agrupamento de espécies em função da densidade aparente.





Fonte: Autora

Na Figura 39, verifica-se a existência de relação linear da densidade aparente com as propriedades de resistência da madeira. Os valores obtidos neste estudo para as correlações da densidade aparente (conjunto das espécies) com a resistência à compressão paralela às fibras e a resistência à flexão são equivalentes aos resultados apresentados por Dias e Lahr (2004). Os autores apresentaram coeficiente de determinação de 77,10% e 75,75%, respectivamente, para as referidas propriedades.

A Tabela 36 apresenta os resultados dos testes de correlação envolvendo a frequência (f_r) obtida do ensaio de vibração transversal e as propriedades mecânicas, cabendo destacar que a média, o coeficiente de variação e o intervalo de confiança da média (95% de confiabilidade) dos valores da frequência obtidos para as 70 peças de madeira de dimensões estruturais foram iguais a 48,35 Hz; 20,07 %; e IC = (32,43; 66,40 Hz), respectivamente. O p-valor do teste de normalidade para a frequência foi igual a 0,117, constatando-se normalidade na distribuição.

Devido à diferença dos comprimentos das peças ensaiadas no ensaio de vibração transversal, bem como à sensibilidade da Equação 4 quando da variação do comprimento da

peça e da resposta da frequência transversal, na correlação do agrupamento das madeiras em função da frequência, acrescentou-se a variável (L/h), representando a razão do comprimento pela altura da peça ensaiada. No presente estudo, essa razão variou de 16,67 a 21,67 e os modelos de regressão foram melhorados quando de sua inserção.

Tabela 36. Resultados das análises de correlação em função da frequência de vibração natural para o agrupamento das espécies.

Propriedade	p-valor ANOVA	R ² aj (%)	Modelo
f _{c0} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>42,10</u>	f _{c0} = -25,2 - 0,080 · fr + 4,27 · L/h
f _{c90} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>46,80</u>	f _{c90} = -4,9 - 0,0557 · fr + 1,043 · L/h
f _{t0} (MPa)	0,05359	6,65	f _{t0} = -37,4 + 0,432 · fr + 5,45 · L/h
f _{t90} (MPa)	<u>0,00068</u>	<u>19,86</u>	f _{t90} = 29,80 - 0,1943 · fr - 0,903 · L/h
f _{v0} (MPa)	<u>0,00034</u>	<u>21,77</u>	f _{v0} = 38,7 - 0,351 · fr - 0,430 · L/h
f _{s0} (MPa)	<u>0,00074</u>	<u>19,64</u>	f _{s0} = 5,90 - 0,03935 · fr - 0,1770 · L/h
f _M (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>36,09</u>	f _M = -52,0 - 0,031 · fr + 7,51 · L/h
f _{h0} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>39,07</u>	f _{h0} = 161,5 - 1,791 · fr + 0,15 · L/h
f _{h90} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>49,01</u>	f _{h90} = 131,1 - 1,420 · fr - 0,75 · L/h
W (daN·m)	<u>0,00000</u>	<u>37,51</u>	W = 3,34 - 0,03511 · fr - 0,0417 · L/h
E _{c0} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>60,53</u>	E _{c0} = -37846 + 192,4 · fr + 2209 · L/h
E _{c90} (MPa)	<u>0,00081</u>	<u>53,62</u>	E _{c90} = -3814 + 29,74 · fr + 165,9 · L/h
E _{t0} (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>53,26</u>	E _{t0} = -36470 + 212,5 · fr + 2118 · L/h
E _M (MPa)	<u>0,00000</u>	<u>64,03</u>	E _M = -45869 + 275,5 · fr + 2421 · L/h

* Termos sublinhados apresentam correlação significativa pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora

Dentre as 14 correlações testadas por meio da análise de variância, a frequência apresentou correlação significativa (p-valor < 0,05) em 13 propriedades, à exceção da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), conforme apresentado na Tabela 36. Apesar de significativas as correlações, os coeficientes de determinação ajustado não são representativos, haja vista serem inferiores a 70%.

Na Tabela 37, são apresentados os modelos de regressão múltipla considerando a densidade aparente e a frequência natural do ensaio de vibração transversal como estimadores das demais propriedades físicas e mecânicas avaliadas do agrupamento das cinco espécies, com o propósito de melhorar a precisão alcançada dos modelos de regressão linear simples.

Tabela 37. Modelos de regressão múltipla quadráticos para o agrupamento das cinco espécies.

Modelos	R ² aj (%)	p-valor
RRt = -19 - 3,7 · ρ ₁₂ - 0,08 · fr + 2,62 · L/h + 2,46 · ρ ₁₂ ² + 0,00265 · fr ² - 0,061 · (L/h) ² - 0,005 · ρ ₁₂ · fr + 0,18 · ρ ₁₂ · L/h - 0,0080 · fr · L/h	34,20	<u>0,00793</u>
RTt = 245 + 114,2 · ρ ₁₂ - 3,82 · fr - 22,3 · L/h - 2,4 · ρ ₁₂ ² + 0,01440 · fr ² + 0,570 · (L/h) ² + 0,152 · ρ ₁₂ · fr - 6,04 · ρ ₁₂ · L/h + 0,1384 · fr · L/h	75,18	<u>0,00000</u>
fc0 = -1034 + 198 · ρ ₁₂ + 20,2 · fr + 60,3 · L/h - 88,6 · ρ ₁₂ ² - 0,0683 · fr ² - 1,04 · (L/h) ² - 3,30 · ρ ₁₂ · fr + 8,0 · ρ ₁₂ · L/h - 0,648 · fr · L/h	82,51	<u>0,00000</u>
f _{c90} = -114 + 86,3 · ρ ₁₂ + 4,82 · fr - 2,4 · L/h + 39,9 · ρ ₁₂ ² - 0,0224 · fr ² + 0,347 · (L/h) ² - 0,098 · ρ ₁₂ · fr - 6,30 · ρ ₁₂ · L/h - 0,140 · fr · L/h	86,47	<u>0,00000</u>
f ₀ = 981 + 541 · ρ ₁₂ - 29,6 · fr - 57 · L/h - 203 · ρ ₁₂ ² + 0,085 · fr ² - 1,17 · (L/h) ² - 16,27 · ρ ₁₂ · fr + 33,7 · ρ ₁₂ · L/h + 1,83 · fr · L/h	58,13	<u>0,00000</u>
f ₉₀ = -404 - 75,6 · ρ ₁₂ + 2,55 · fr + 40,6 · L/h - 39,2 · ρ ₁₂ ² - 0,00392 · fr ² - 1,079 · (L/h) ² + 0,025 · ρ ₁₂ · fr + 7,52 · ρ ₁₂ · L/h - 0,125 · fr · L/h	68,38	<u>0,00000</u>
f _{v0} = -27 + 244 · ρ ₁₂ - 4,22 · fr + 4,2 · L/h - 15,6 · ρ ₁₂ ² + 0,0180 · fr ² - 0,265 · (L/h) ² - 2,015 · ρ ₁₂ · fr - 4,91 · ρ ₁₂ · L/h + 0,209 · fr · L/h	80,11	<u>0,00000</u>
f _{s0} = -73,7 - 4,1 · ρ ₁₂ + 0,449 · fr + 7,22 · L/h - 5,01 · ρ ₁₂ ² - 0,00010 · fr ² - 0,1834 · (L/h) ² - 0,0520 · ρ ₁₂ · fr + 0,863 · ρ ₁₂ · L/h - 0,0240 · fr · L/h	73,76	<u>0,00000</u>
f _M = 4173 + 1256 · ρ ₁₂ - 57,1 · fr - 356 · L/h - 265 · ρ ₁₂ ² + 0,1464 · fr ² + 6,32 · (L/h) ² - 12,75 · ρ ₁₂ · fr - 8,9 · ρ ₁₂ · L/h + 2,86 · fr · L/h	81,54	<u>0,00000</u>
f _{h0} = -5790 + 1233 · ρ ₁₂ + 78,0 · fr + 395 · L/h - 365 · ρ ₁₂ ² - 0,2513 · fr ² - 7,34 · (L/h) ² - 10,29 · ρ ₁₂ · fr - 5,4 · ρ ₁₂ · L/h - 2,65 · fr · L/h	84,70	<u>0,00000</u>
f _{h90} = -2507 + 1070 · ρ ₁₂ + 34,2 · fr + 152,3 · L/h - 170,0 · ρ ₁₂ ² - 0,1207 · fr ² - 2,57 · (L/h) ² - 8,42 · ρ ₁₂ · fr - 19,0 · ρ ₁₂ · L/h - 0,986 · fr · L/h	88,11	<u>0,00000</u>
W = 10,6 + 31,0 · ρ ₁₂ - 0,363 · fr - 1,42 · L/h - 1,25 · ρ ₁₂ ² + 0,00111 · fr ² + 0,0361 · (L/h) ² - 0,1441 · ρ ₁₂ · fr - 1,079 · ρ ₁₂ · L/h + 0,0192 · fr · L/h	83,03	<u>0,00000</u>
E _{c0} = -303009 - 115579 · ρ ₁₂ + 6005 · fr + 23315 · L/h + 7756 · ρ ₁₂ ² - 17,1 · fr ² - 479 · (L/h) ² - 271 · ρ ₁₂ · fr + 7001 · ρ ₁₂ · L/h - 234 · fr · L/h	83,37	<u>0,00000</u>
E _{c90} = -29675 - 8220 · ρ ₁₂ + 316 · fr + 2753 · L/h + 1513 · ρ ₁₂ ² + 0,001 · fr ² - 63,7 · (L/h) ² - 36,5 · ρ ₁₂ · fr + 476 · ρ ₁₂ · L/h - 15,77 · fr · L/h	86,47	<u>0,00000</u>
E _{t0} = -89508 + 70007 · ρ ₁₂ + 1578 · fr + 2265 · L/h - 20854 · ρ ₁₂ ² - 6,6 · fr ² - 57 · (L/h) ² - 1180 · ρ ₁₂ · fr + 1456 · ρ ₁₂ · L/h + 2 · fr · L/h	72,63	<u>0,00000</u>
E _M = 625670 + 79365 · ρ ₁₂ - 6964 · fr - 54037 · L/h + 9303 · ρ ₁₂ ² + 18,60 · fr ² + 1108 · (L/h) ² - 919 · ρ ₁₂ · fr - 2003 · ρ ₁₂ · L/h + 331 · fr · L/h	87,44	<u>0,00000</u>

* Termos sublinhados referem-se a modelos de regressão significativos pela ANOVA (p-valor < 0,05).

Fonte: Autora

Os p-valores do teste de normalidade dos resíduos da ANOVA em todos os modelos de regressão múltipla da Tabela 37 foram superiores a 0,05, validando os resultados da análise de variância. Os 16 modelos de regressão múltipla, em função da densidade aparente e da frequência de vibração como estimadores das demais propriedades físico-mecânicas, apresentaram correlações significativas (p -valor $< 0,05$), e os coeficientes de determinação ajustados (R^2 aj) variaram de 34,20% (R_{Rt}) a 88,11% (f_{h90}), sendo que 13 modelos obtiveram valores superiores a 70%. Dessa forma, pode-se inferir a boa previsão do ajuste na estimativa da maioria das propriedades físico-mecânicas da madeira em função da densidade aparente e da frequência natural de vibração como variáveis independentes nos modelos de regressão.

A Tabela 38 apresenta o comparativo dos coeficientes de determinação ajustados para os modelos de regressão lineares e para os modelos de regressão múltipla quadráticos, considerando o agrupamento das cinco espécies de madeira avaliadas neste estudo.

Tabela 38. Comparativo dos coeficientes de determinação ajustados (R^2 aj) dos modelos de regressão para as estimativas das propriedades físico-mecânicas das cinco espécies agrupadas.

Propriedades	Modelos		
	Linear em função da densidade aparente	Linear em função da frequência natural, do comprimento e da altura	Regressão múltipla quadráticos em função da densidade aparente e da frequência natural
R_{Rt}	13,95	---	34,20
R_{Tt}	49,07	---	75,18
f_{c0}	74,17	42,10	82,51
f_{c90}	76,06	46,80	86,47
f_{t0}	24,61	6,65	58,13
f_{t90}	5,50	19,86	68,38
f_{v0}	55,32	21,77	80,11
f_{s0}	11,82	19,64	73,76
f_M	71,30	36,09	81,54
f_{h0}	72,21	39,07	84,70
f_{h90}	74,83	49,01	88,11
W	65,54	37,51	83,03
E_{c0}	53,74	60,53	83,37
E_{c90}	21,42	53,62	86,47
E_{t0}	51,59	53,26	72,63
E_M	55,06	64,03	87,44

Fonte: Autora

Considerando o comparativo da Tabela 38, são notórios melhores ajustes quando do uso dos modelos de regressão múltipla quadráticos como forma de estimar as propriedades físico-mecânicas por meio da densidade aparente e frequência natural de vibração, evidenciando a possibilidade do uso dos modelos apresentados no estudo.

Os modelos de regressão múltipla quadráticos propostos para o conjunto de espécies são importantes, pois possibilitam estimar algumas propriedades físico-mecânicas do grupo de madeiras folhosas utilizando a frequência natural de vibração (facilmente obtida no ensaio de vibração transversal) e o valor de sua densidade aparente, com teor de umidade da ordem de 12%. Destaca-se que, para principais propriedades mecânicas das madeiras, e de maior importância para o cálculo estrutural (f_{c0} , f_{v0} , f_M , E_{c0} e E_M), os valores dos coeficientes de determinação ajustados foram superiores a 80%, indicando modelos com excelentes ajustes para a previsão das propriedades.

Outro ponto a se destacar é a praticidade e economia do uso dos modelos, haja vista que os ensaios para obtenção da densidade aparente e vibração transversal são realizados pelo método não destrutivo (corpo de prova não é destruído) e utilização de poucos equipamentos, bem como da possibilidade do ensaio em peças estruturais e em estruturas localizadas no canteiro (avaliação *in loco*).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo contribuiu para ampliar o conhecimento quanto à caracterização e obtenção das propriedades físico-mecânicas da madeira e quanto às estimativas de tais propriedades em função da densidade aparente e da frequência de vibração transversal, possibilitando a caracterização das espécies de folhosas (dicotiledôneas) por meio de modelos de regressão. Considerando os resultados obtidos, pôde-se concluir:

- (a) Os modelos de regressão múltipla para cada espécie não foram considerados significativos pela análise de variância. Entretanto, para o agrupamento das espécies, foram significativos e apresentaram bons ajustes, com coeficientes de determinação ajustados superiores a 70% para 13 modelos, dentre os 16 avaliados. Evidenciando, portanto, a possibilidade de estimar as propriedades físico-mecânicas da madeira por meio da densidade aparente e da frequência natural de vibração transversal, de forma conjunta;
- (b) as espécies estudadas foram caracterizadas e agrupadas nas classes de resistência C20 a C60;
- (c) os valores médios da frequência natural de vibração para as espécies avaliadas foram distintos, em função da diferença dos módulos de elasticidade dinâmicos e, sobretudo, da variação das dimensões (altura e comprimento) das vigas ensaiadas;
- (d) o estudo acusou equivalência entre os valores dos módulos de elasticidade à compressão e tração, ambos na direção paralela às fibras;
- (e) os módulos de elasticidade, obtidos por meio do método de vibração transversal, foram equivalentes aos módulos de elasticidade obtidos nos corpos de prova e nas vigas ensaiadas à flexão estática de forma não destrutiva;
- (f) o ensaio de vibração transversal mostrou-se uma técnica precisa e confiável para avaliar a propriedade mecânica de rigidez em peças estruturais;
- (g) as densidades aparentes obtidas nos corpos de prova são equivalentes às obtidas nas peças de dimensões estruturais, conforme constatado pelo estudo;
- (h) os resultados das análises de correlação para cada espécie, de forma individualizada, não foram satisfatórios, possivelmente, em função da quantidade de amostras ensaiadas (12 em cada caso), o que resultou em modelos de regressão lineares significativos, entretanto de pequena precisão;

- (i) a madeira Castelo, classe 50 de resistência, de forma individualizada, foi a que apresentou melhores correlações lineares e múltiplas quadráticas significativas e com coeficientes de determinação ajustados superiores a 70% para oito das 16 correlações testadas;
- (j) as correlações lineares foram melhoradas com o agrupamento das espécies e, conseqüentemente, com o aumento do número amostral (N=60), possibilitando a redução da variabilidade e a melhoria dos ajustes.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a avaliação da estimativa das propriedades físico-mecânicas da madeira em função da densidade e da vibração transversal para mais de uma espécie por classe de resistência das dicotiledôneas (folhosas), de forma a obter resultados agrupados por classe e compará-los com o agrupamento de todas as espécies. Recomenda-se também a avaliação, com a mesma metodologia, para as madeiras coníferas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Diego Henrique de. **Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. 2017. 100 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 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. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.01

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. DOI: 10.5923/j.ijme.20150501.01

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. DOI: 10.1590/S0100-67622014000100020

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material*. **ASTM D 4761-96**. Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, Philadelphia, 1996.

ANDRADE JUNIOR, J. R.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; STAMATO, G. C.; LAHR, F. A. R. Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoques de produtos químicos. **Ambiente Construído**, v.14, n.3, p. 75-85, 2014.

AQUINO, F. R.; PENA, M. M. G.; HERNÁNDEZ, J. I. V.; MANZANARES, A. R. Mechanical properties of wood of two Mexican oaks: relationship to selected physical properties. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 76, n. 1, p. 69-77, 2018. DOI: 10.1007/s00107-017-1168-9.

ARCHDAILY. **Revista de Arquitetura** - Didier Boy de Tour. Disponível em: <https://tinyurl.com/mtdjfavv> . Data de acesso: 01 fev.2022.

ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **FLORESTA**, [S.l.], dec. 2007. ISSN 1982-4688. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/9937>>. Acesso em: 05 jun. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v37i3.9937>

ARRIAGA, F.; MONTON, J.; SEGUES, E.; GONZALEZ, G. I. Determination of the mechanical properties of radiata pine timber by means of longitudinal and transverse vibration methods. **Holzforschung**, v. 68, n. 3, p. 299-305, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0087>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA

MECANICAMENTE. **Construção sustentável: a ver da madeira**. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/construcao-sustentavel-a-vez-da-madeira/>> Acesso em: 13 de junho de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02: 126.10-001-1**. (ABNT NBR 7190): Projeto de estruturas de madeira – revisão. Rio de Janeiro: ABNT. 2013.

. **ABNT NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BATISTA, A. M.; ROSSI, N.; MASCIA, N. T.; FURLANI, J. E. **Estudo da flexão estática: relação entre peças de madeira com dimensões estruturais e dimensões reduzidas**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. São Carlos, 2000.

BOLINA, C.C.; PALECHOR, E. U. L.; VÁSQUEZ, M. P. R.; "VIBRAÇÕES: AS FREQUÊNCIAS NATURAIS ESTIMADA E EXPERIMENTAL DE UMA ESTRUTURA", p. 186-194. In: **Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria [= Blucher Mathematical Proceedings, v.1, n.1]**. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN em b-reve, DOI 10.5151/mathpro-cnmai-0038

BRAUN JUNIOR, W.; SANTOS, L. L. Correlação das propriedades elásticas estáticas e dinâmicas de três espécies nativas de madeira. **Revista Científica Faesa**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 52-70, 22 jul. 2019. Associação Educacional de Vitória. <http://dx.doi.org/10.5008/1809.7367.157>.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BRITO, A. F. Tipos de Ruptura em Madeira de *Eucalyptus grandis* Modificada Termicamente. **Silva Lusitana**. [online]. 2013, vol.21, n Especial, pp.153-161. ISSN 0870-6352.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente construído**, Porto Alegre - RS, v. 9, n. 4, p. 83-98, 2009.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; SEGUNDINHO, P. G. A. Nondestructive Evaluation of *Corymbia citriodora* Logs by Means of the Free Transverse Vibration Test. **Journal of Nondestruct Evaluation**, v. 36, n. 26, 2017.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, C. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum**, v. 34, n. 1, p. 27-32, 2012. DOI: 10.4025/actascitechnol.v34i1.10728

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Density as estimator of shrinkage for some Brazilian Wood species. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.3, p. 107-112, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.08

CHIN, W. W. The partial least squares approach to structural equation modeling. **Modern methods for business research**, 295(2), p.295-336,1998.

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. 37, n. 2, p.376-384, 2017.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; SANTOS, J. C.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Shrinkage for some wood specie estimated by density. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.2, p. 23-27, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160602.01

CHRISTOFORO, André L.; ARROYO, Felipe N.; SILVA, Diogo A. Lopes; PANZERA, Tulio H.; LAHR, Francisco A. R.. Full Characterization Of Calycophyllum Multiflorum Wood Specie. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 637-643, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p637-643/2017>.

CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, S. A. M.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Estimative of wooden toughness by the apparent density and bending strength. **International Journal of Materials Engineering**, v.4, n.2, p. 49-55, 2014. DOI: 10.5923/j.ijme.20140402.01

CHRISTOFORO, André Luis; ARROYO, Felipe Nascimento; LAHR, Francisco Antonio Rocco. CASTELO WOOD SPECIES: physical and mechanical properties. **Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades**, [S.L.], p. 99-110, 2021. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/210303605>.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. **Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos**. 2010. Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais: Brasília, 2010. CD-ROM.

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

DICKIE, I. A.; FUKAMI, T. WILKIE, J. P.; ALLEN, R. B.; BUCHANAN, P. K. Do assembly history effects attenuate from species to ecosystem properties? A field test with wood-inhabiting fungi. **Ecology Letters**, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2011. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01722.x

DUARTE, BÁRBARA BRANQUINHO; LAHR, FRANCISCO ANTONIO ROCCO; CURVELO, ANTONIO APRIGIO DA SILVA ; CHRISTOFORO, ANDRÉ LUIS . Influence of Physical and Chemical Components on the Physical-Mechanical Properties of Ten Brazilian Wood Species. **MATERIALS RESEARCH**, v. 23, p. 1-10, 2020

EBRAHIMI, F.; MOKHTARI, M. Transverse vibration analysis of rotating porous beam with functionally graded microstructure using the differential transform method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 4, p. 1435-1444, 2015.

ESSEN, I. A new finite element for transverse vibration of rectangular thin plates under a

moving mass. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 66, p. 26-35, 2013. DOI: 10.1016/j.finel.2012.11.005

GIORDANO, G. Il legno e le sue caratteristiche: Transformazioni meccaniche e miglioramenti. Milão, **Editore Ulrico**. 1951.

GONZAGA, A. L. Madeira: Uso e Conservação. **Cadernos Técnicos**, Brasília: IPHAN/MONUMENTA, n. 6, 2006.

HAIR, J. F., RINGLE, C. M., & SARSTEDT, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a silver bullet. **Journal of Marketing theory and Practice**, 19(2), 139-152.

HAMAGUCHI, M.; CARDOSO, M.; VAKKILAINEN, E. Review. Alternative technologies for biofuels production in kraft pulp mills - Potential and Prospects. **Energies**, v. 5, p. 2288-2309, 2012.

HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1. São Carlos, SP. 1983. **Anais**. São Carlos, 1983. USP, EESC, SET, LaMEM, v.1, p.1-37. Características.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (**IPT**). Informações sobre madeiras. IPT, 2020. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/5.htm . Data de acesso: 20. nov. 2020.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (**ITTO**). Informações sobre espécie da madeira. ITTO, 2020. Disponível em <http://www.tropicaltimber.info/pt-br/>. Data de acesso: 02.nov.2020.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (Ed.). **Wood hand-book**. Wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. p. 4.1-4.46.

GROBÉRIO, M. P. **Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Doi:10.11606/D.88.2016.tde-16092016-161856. Acesso em: 2020-06-01.

HENSELER, J., RINGLE, C.M. and SINKOVICS, R.R. (2009), “The use of partial least squares path modeling in international marketing”, **Advances in International Marketing**, Vol. 20, pp. 277-320.

JORNAL DE SANTA CATARINA. **Canadá leva litígio com EUA por madeira de construção à OMC**. Disponível em:< <http://jornaldesantacatarina.clicrbs.com.br/sc/mundo/noticia/2017/11/canada-leva-litigio-com-eua-por-madeira-de-construcao-a-omc-10047700.html>> Acesso em: 13 de junho de 2020.

KOLIN, B.; JANEZIC, T.S. **The effect of temperature, density and chemical composition upon the limit of hygroscopicity of wood**. v.50, n.3 1996. p.263-68.

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. DOI: 10.5923/j.ijme.20160605.01

LAHR, F. A. R.; AFTIMUS, B. H. C.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N. Full characterization of *Vatairea* sp. wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.3, p. 92- 96, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.05

LIMA, J.T. **Clonal variation in the solid wood properties of Eucalyptus. Bangor**; University of Wales, 1999. 276p. (Tese - Doutorado em Ciência e Tecnologia da madeira).

LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. **Processos fermentativos e enzimáticos**: Biotecnologia Industrial. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

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.12, n.2, p. 975-980, 2014. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016

MARKWARDT, L. J.; WILSON, T. R. C. **Strength and related properties of woods grown in the United States**. U. S. Dep. Agr. Tech. Bull. Washington, D.C., No. 479, 67 p. 1935.

MASCIA, Nilson T.; KRESTCHMANN, David. Flexão estática: módulos de elasticidade e de ruptura nas direções radial e tangencial da madeira. In: XV EBRAMEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 15., 2015, Curitiba. **CONGRESSO**. Curitiba: EBRAMEM, 2015.

MEDEIROS NETO, P. N.; PAES, J. B.; SEGUNDINHO, P. G. A. Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutivas e destrutiva. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 111, p. 683-690, 2016.

MELO, J. E.; CORADIN, V. R.; MENDES, J. C. **Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira**. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão, 1990. v. 3. p. 695-705.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Arizona: John Wiley & Sons, 2005, 730 p.

MOORE, David S.; KIRKLAND, Stephane. **The basic practice of statistics**. New York: WH Freeman, 2007.

MORGADO, T. **Classificação e Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo**. 2012. 275 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2012.

NAHUZ, A. R. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT, 2013.

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, 2005.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA A. C.; CARVALHO A. M. L.; CARNEIRO A. C. O.; VITAL B. R.; SANTOS L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

PERRÉ, P.; ALMEIDA, G.; AYOUB, M.; FRANK, X. New modelling approaches to predict wood properties from its cellular structure: image-based representation and meshless methods. **Forest Science**, v. 73, n. 1, p. 147-162, 2016.

REMADE. **Revista da Madeira**. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/148/madeiras-brasileiras-e-exoticas/caju>>. Acesso em: 02 jul. 2020.

ROSS, R. J. e PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures. **Research Paper FPL-GTR-70**. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, U.S. 1994.

ROSSO, S.; de MUNIZ, G. I. B.; de MATOS, J. L. M.; HASELEIN, C. R.; HEIN, P. R. G.; LOPES, M. C. Estimate of the density of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, v.19, n. 4, 2013. DOI: 10.1590/S0104 77602013000400015

SALES, A.; CANDIAN, M.; CARDIN, V. S. Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Goupia glabra*) by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1450-1454, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.020

SANTOS, J. A. **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. 2007. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

SEGUNDINHO, P. G. de A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622012000600016>.

SOUZA, T. M. **Análise do mecanismo de ruptura de flexão estática em madeira por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas**. 2013. 85 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, UFLA, Lavras, 2013.

STEEGE, H.; VAESSEN, R. W.; LÓPEZ, D. C.; SABATIER, D.; ANTONELLI, A.; OLIVEIRA, S. M.; PITMAN, N. C. A.; JORGENSEN, P. M.; SALOMÃO, R. P. The discovery of the Amazonian tree flora with an update checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports**, v.6, n.29549, p. 1-15, 2016. DOI: 10.1038/srep29549

TAKESHITA, S.; ANDRADE, A.; JANKOWSKY, I. P. Planejamento estratégico para o setor de pisos de madeira. **Floresta e Ambiente**, v.18, n.3, p. 237-242, 2011. DOI: 10.4322/loram.2011.043

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

VIKRAM, V.; CHERRY, M. L.; BRIGGS, D.; CRESS, D. W.; EVANS, R.; HOWE, G. T. Stiffness of Douglas-fir lumber: effects of wood properties and genetics. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 41, n. 6, p. 1160-1173, 2011. DOI: 10.1139/x11-039

WOLENSKI, Anderson Renato Vobornik et al. Estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, p.319-327, 2019. DOI: 10.1590/S1517-707620190004.0856.