

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

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

**ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E
DE RIGIDEZ DE MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS
PELA TÉCNICA DE COLORIMETRIA**

São Carlos

2017

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

DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA

**ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E
DE RIGIDEZ DE MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS
PELA TÉCNICA DE COLORIMETRIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos

2017

Almeida, Diego Henrique de

Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria / Diego Henrique de Almeida. -- 2017.

98 f. : 30 cm.

Tese (doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: André Luis Christoforo

Banca examinadora: Francisco Antonio Rocco Lahr, Eduardo Chahud, Julio Cesar Molina, Luciano Donizeti Varanda

Bibliografia

I. Colorimetria. 2. Estruturas de Madeira. 3. Madeira. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Diego Henrique de Almeida, realizada em 27/10/2017:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
USP

Prof. Dr. Eduardo Chahud
UFMG

Prof. Dr. Julio Cesar Molina
UNESP

Prof. Dr. Luciano Donizeti Varanda
UFSCar

DEDICATÓRIA

*Dedico esta tese ao meu pai Salomão, à
minha mãe Terezinha, ao meu irmão Tiago
e à minha irmã Ingrid.*

AGRADECIMENTOS

A Deus que me proporciona muitas oportunidades e me ampara em todos os momentos desta vida.

Aos meus amados pais Salomão e Terezinha, e aos meus irmãos Tiago e Ingrid.

Ao Prof. Dr. André Luis Christoforo, pela orientação deste trabalho, pelos valiosos ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr pelo companheirismo e amizade.

Aos técnicos do LaMEM pelas ajudas nos ensaios: Arnaldo, Jaime, Sílvio, Roberto, Cido e Samuel.

Ao Bragatto pela amizade e ajuda com a base de dados do LaMEM e do IBRAMEM.

À Empresa Partículas Tecnologia e Desenvolvimento em Materiais Lignocelulósicos LTDA pela disponibilização do colorímetro portátil *Konica Minolta*.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

À Faculdade Pitágoras, *Campus* Poços de Caldas (MG), pelas oportunidades concedidas durante a realização do doutorado.

A todos os que de uma maneira ou de outra me ajudaram a vencer mais esta importante etapa da minha vida!

RESUMO

ALMEIDA, D. H. **Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. 2017. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

Não há um consenso na estimativa do número de espécies nativas provenientes da Floresta Amazônica, sendo necessários estudos das propriedades tecnológicas de madeiras tropicais para utilização racional deste material. As regiões Sul e Sudeste são os principais centros consumidores da madeira tropical da Floresta Amazônica, para seu emprego na construção civil de forma definitiva (estruturas, coberturas, esquadrias e pisos) ou temporária (fôrmas, andaimes e escoramentos). O objetivo desta pesquisa foi gerar modelos de regressão para estimativa das propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função de parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Para este trabalho foram utilizadas madeiras de espécies tropicais, que atendem as classes de resistência previstas pela norma ABNT NBR 7190:1997 para dicotiledôneas, de acordo com suas resistências características, entre elas: Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), Cambará (*Erisma uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) e Roxinho (*Peltogyne* sp.). Foram estimadas a densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{ap,12}$) e as seguintes propriedades de resistência e de rigidez: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), dureza normal às fibras (f_{H90}), módulo de ruptura (f_M) e módulo de elasticidade na flexão estática (E_M). De acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$ foram estimados os seguintes parâmetros colorimétricos utilizando um colorímetro *Konica Minolta*: luminosidade (L^*) e tonalidade nos eixos vermelho/verde (a^*) e amarelo/azul (b^*). Foram fabricados 18 corpos de prova para cada uma das propriedades mecânicas estudadas, para as 5 espécies de madeira utilizadas. Foram utilizados modelos de regressão multivariáveis quadráticos completos para estimativa das propriedades mecânicas da madeira. Para cada uma das espécies os modelos de regressão foram testados utilizando os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* . Para o conjunto envolvendo todas as espécies, foi adicionada a densidade aparente da madeira como variável independente nos modelos de regressão. O intervalo dos valores do coeficiente de determinação (R^2) para estimativa das propriedades de cada espécie variou entre 45,50% (f_{H90} para madeira de Roxinho) e 85,30% (f_M para madeira de Tatajuba). Os modelos de regressão propostos para o conjunto de espécies considerando também a densidade aparente foram excelentes, pois, os valores de R^2 foram iguais a 94,63, 87,62, 94,14 e 96,08 para as estimativas de E_M , f_M , f_{c0} e f_{H90} , respectivamente.

Palavras chaves: Colorimetria; Estruturas de Madeira; Madeira Tropical; Modelos de Regressão; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

ALMEIDA, D. H. **Estimative of strength and stiffness properties of Brazilian tropical wood species by colorimetry technique.** 2017. 98 f. Doctoral's Thesis (PhD in Structural Engineering and Civil Construction) – Civil Engineering Department, Federal University of São Carlos, São Carlos, 2017.

There is no consensus in the estimation of the number of native species coming from the Amazon Forest, and it is necessary to study the technological properties of tropical wood species for the rational use of this material. Southern and southeastern Brazilian regions are the main consuming centers of the Brazilian tropical wood species from Amazon Forest, for permanent (structures, roofs and floors) or temporary constructions. The aim of this research is to generate regression models to estimate the strength and stiffness properties of wood via colorimetric parameters and density. For this research were used Brazilian tropical wood species, which meet the strength classes established by the ABNT NBR 7190:1997 Standard Code for dicotyledons, according to their characteristic strengths, between them: Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) and Roxinho (*Peltogyne* sp.). Density at 12% moisture content ($\rho_{ap,12}$) strength and stiffness properties were estimated: compression parallel to the grain strength (f_{c0}), hardness normal to the grain (f_{H90}), modulus of rupture (f_M) and elasticity (E_M) in static bending. The following colorimetric parameters were estimated according to the CIE $L^*a^*b^*$ system using a *Konica Minolta* colorimeter: brightness (L^*) and shades on the red/green (a^*) and yellow/blue (b^*) axes. Eighteen specimens were fabricated for each mechanical properties studied for the five Brazilian tropical wood species used. Quadratic multivariable regression models were used to estimate the mechanical properties of wood. For each of the species the regression models were tested using the colorimetric parameters L^* , a^* and b^* . For all species, density of wood was also considered as an independent variable. The coefficient of determination (R^2) for each wood specie varied between 45.50% (f_{H90} for Roxinho) and 85.30% (f_M for Tatajuba). Proposed regression models to group involving all species using density as independent variable were excellent, because, R^2 values were equal to 94.63, 87.62, 94.14 and 96.08% for estimating E_M , f_M , f_{c0} and f_{H90} , respectively.

Keywords: Colorimetry; Mechanical Properties; Regression Models; Timber Structures; Tropical Wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de cores da madeira: (a) amarelada de Vinhático (<i>Plathymenia foliolosa</i> Benth.); (b) castanho de Fava-orelha-de-negro (<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.); (c) bege-rosada de Cedrorana (<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke).	26
Figura 2. Sistema CIE L*a*b*.....	27
Figura 3. Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira de cerne de Teca: (a) densidade e parâmetros b* na direção radial e (b) L* na direção tangencial.	46
Figura 4. Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira de alburno de Teca: (a) densidade e parâmetros L* na direção radial e (b) a* na direção radial.....	46
Figura 5. Correlações entre teor de extrativos e parâmetros colorimétricos: (a) L* e (b) a* na direção radial e (c) L* e (d) a* na direção tangencial.	47
Figura 6. Regressão linear entre densidade da madeira de <i>Pinus caribaea</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> e os parâmetros colorimétricos: (a) luminosidade (L*) e (b) tonalidade a*.....	52
Figura 7. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de flexão estática.	58
Figura 8. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de compressão paralela às fibras.	60
Figura 9. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de dureza normal às fibras.	61
Figura 10. Colorímetro portátil <i>Konica Minolta</i>	62
Figura 11. Valores médios do módulo de elasticidade na flexão estática para cada espécie.	75
Figura 12. Valores médios do módulo de ruptura na flexão estática para cada espécie....	76
Figura 13. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras para cada espécie.	76
Figura 14. Valores médios da dureza normal às fibras para cada espécie.....	77
Figura 15. Valores médios de densidade aparente para cada espécie.....	77
Figura 16. Valores médios do parâmetro colorimétrico L* para cada espécie.....	78
Figura 17. Valores médios do parâmetro colorimétrico a* para cada espécie.....	79
Figura 18. Valores médios do parâmetro colorimétrico b* para cada espécie.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns exemplos de aplicações das madeiras tropicais na construção civil.....	23
Tabela 2. Classes de resistência de dicotiledôneas (folhosas).	25
Tabela 3. Propriedades físicas da Caixeta.....	28
Tabela 4. Propriedades mecânicas da Caixeta.	28
Tabela 5. Propriedades físicas do Cajueiro.....	30
Tabela 6. Propriedades mecânicas do Cajueiro.	30
Tabela 7. Propriedades físicas do Cambará.	31
Tabela 8. Propriedades mecânicas do Cambará.....	31
Tabela 9. Valores médios de propriedades de <i>Erisma uncinatum</i>	32
Tabela 10. Valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de <i>Erisma uncinatum</i>	33
Tabela 11. Valores médios de algumas propriedades mecânicas de <i>Erisma uncinatum</i> ...33	
Tabela 12. Propriedades físicas da Tatajuba.....	34
Tabela 13. Propriedades mecânicas de Tatajuba.	35
Tabela 14. Valores médios de propriedades da Tatajuba.	35
Tabela 15. Propriedades físicas do Roxinho.....	36
Tabela 16. Propriedades mecânicas da madeira de Roxinho.....	36
Tabela 17. Regressão linear entre propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos da madeira de <i>Abies fabri</i> (Mast.) Craib.	39
Tabela 18. Correlação linear entre módulos de elasticidade estático e dinâmicos para madeiras de <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Populus x canadensis</i>	40
Tabela 19. Regressão linear entre propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos da madeira de duas espécies.....	41
Tabela 20. Valores da correlação de <i>Pearson</i> entre parâmetros colorimétricos e densidade aparente de madeiras do Rio Grande do Sul.....	48
Tabela 21. Correlações entre a diferença de coloração e tempo de intemperismo para madeiras de espécies Amazônicas com e sem tratamento químico com CCA.....	51
Tabela 22. Valores dos coeficientes de correlação entre as propriedades das madeiras de <i>Pinus caribaea</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> e os parâmetros colorimétricos.	52
Tabela 23. Modelos de regressão entre parâmetros colorimétricos da madeira biodeteriorada e a perda de massa.	54

Tabela 24. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Caixeta.	64
Tabela 25. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Cajueiro.	67
Tabela 26. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Cambará.....	69
Tabela 27. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Tatajuba.	71
Tabela 28. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Roxinho.	73
Tabela 29. Coeficientes de determinação (R^2) das correlações propostas para a estimativa das propriedades da madeira em função dos parâmetros colorimétricos.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standard for Wood Products</i>
AFPA	<i>American Forest and Paper Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
°C	Grau Celsius
CCA	Arseniato de Cobre Cromatado
CIE	Comissão Internacional de Iluminantes
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
COPANT	<i>Comisión Panamericana de Normas Técnicas</i>
CV	Coeficiente de Variação
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
DECIv	Departamento de Engenharia Civil
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	Norma Europeia
EUROCODE	<i>European Committee for Standard</i>
g	Gramma
IC	Intervalo de Confiança
Inf	Limite Inferior do Intervalo de Confiança
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
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
MTG	Método <i>Timber Grader</i>

N	Newton
nm	Nanômetro
NS	Não Significativo
NDS	<i>American National Desing and Specification for Wood Construction</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
PPGECiv	Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
RRT	Retração Radial Total
RS	Rio Grande do Sul
RTT	Retração Tangencial 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.	<i>Versus</i>
x_m	Valor médio

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do corpo de prova de compressão paralela às fibras
A_{sd}	Área diametral de uma semi-esfera de aço
α_i	Coefficientes ajustados do método dos mínimos quadrados
α_e	Parâmetro em função do diâmetro do pino metálico utilizado na ligação
a^*	Parâmetro colorimétrico do eixo vermelho/verde
b^*	Parâmetro colorimétrico do eixo amarelo/azul
b	Largura da seção transversal do corpo de prova de flexão estática
d	Diâmetro do pino metálico utilizado na ligação
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 semi-esfera de aço na madeira
$F_{M10\%}$	Força correspondente à 10% da força de ruptura em esforços de flexão estática
$F_{M50\%}$	Força correspondente à 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_{dac}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de acelerômetro
E_{dMTG}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de MTG
E_{dsw}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de <i>stress wave</i>
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
$E_{t0,m}$	Módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras
E_M	Módulo de elasticidade na flexão estática
F	Parâmetro não destrutivo do resistógrafo
h	Altura da seção transversal do corpo de prova de flexão estática
H_R	Dureza <i>Rockwell</i>
k_{90}	Parâmetro em função da densidade da madeira
L^*	Parâmetro colorimétrico luminosidade
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
P_M	Perda de massa da madeira biodeteriorada
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	Coeficiente de correlação
R ²	Coeficiente de determinação
R ² Aj	Coeficiente 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
ΔE	Diferença de coloração da madeira
ΔL*	Diferença da luminosidade da madeira
W _e	Módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo de prova
Y	Valores das propriedades de resistência e de rigidez avaliadas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos.....	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
1.2	Justificativas.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Madeiras Tropicais e suas Aplicações na Construção Civil.....	22
2.2	Estimativa das Propriedades da Madeira.....	24
2.3	Cor da Madeira.....	25
2.4	Sistema CIE L*a*b.....	26
2.5	Características das Madeiras Tropicais Pesquisadas.....	27
2.5.1	Caixeta (<i>Simarouba amara</i> Aubl.).....	27
2.5.2	Cajueiro (<i>Anarcadium giganteum</i> W. Hancock).....	29
2.5.3	Cambará (<i>Erismia uncinatum</i> Warm).....	30
2.5.4	Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.).....	34
2.5.5	Roxinho (<i>Peltogyne</i> sp.).....	36
2.6	Estimativa de Propriedades da Madeira.....	37
2.7	Aplicações da Técnica de Colorimetria na Madeira.....	44
2.8	Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3.1	Materiais.....	57
3.2	Métodos.....	57
3.2.1	Confecção dos corpos de prova.....	57
3.2.2	Determinação da resistência característica da madeira.....	58
3.2.3	Ensaio de flexão estática.....	58
3.2.4	Ensaio de compressão paralela às fibras.....	59
3.2.5	Ensaio de dureza normal às fibras.....	60
3.2.6	Determinação da densidade aparente.....	61
3.2.7	Determinação dos parâmetros colorimétricos.....	62
3.2.8	Modelos de regressão.....	63
4	RESULTADOS E DISCUSÃO.....	64

4.1	Resultados Obtidos para Caixeta	64
4.2	Resultados Obtidos para Cajueiro.....	67
4.3	Resultados Obtidos para Cambará.....	69
4.4	Resultados Obtidos para Tatajuba	71
4.5	Resultados Obtidos para Roxinho.....	73
4.6	Comparação entre Valores das Propriedades das Espécies	74
4.7	Modelos de Regressão Multivariáveis para o Conjunto de Espécies	80
5	CONCLUSÕES	82
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS.....	84
	REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES.....	95

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos principais materiais utilizados na construção civil, podendo ser empregada como elementos estruturais (vigas, pilares, treliças, entre outros) (ANDRADE JUNIOR *et al.*, 2014; CALIL JUNIOR *et al.*, 2003; CALIL JUNIOR; MOLINA, 2010; SCALIANTE, 2014), elementos que constituem a edificação (guarnições, pisos, portas, esquadrias, entre outros) (ANDRADE, 2015; ANDRADE, 2014; TAKESHITA *et al.*, 2011) e como material de suporte durante a realização da obra (fôrmas e escoras) (COSTA, 2014; MARANHÃO, 2000; NAHUZ, 2013).

A diversidade de possibilidades de utilizações da madeira na construção civil é devida a alguns fatores, tais como, sua facilidade de obtenção, sua origem de fontes renováveis (desde que a madeira tenha procedência legal). Além disso, a madeira apresenta alta relação entre valores médios de resistência e densidade, quando comparada a outros materiais (aço e concreto, por exemplo) (ALMEIDA, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2013a; LAHR, 1983; PFEIL; PFEIL, 2004).

No Brasil, 6,28 milhões de hectares de florestas de diferentes biomas são certificadas (FSC, 2017). Em relação à Floresta Amazônica, não existe consenso com relação ao número de espécies de árvores que ela possui, sendo a estimativa mais recente, da ordem de 16 mil espécies. Além disso, no ritmo atual, estima-se que o tempo necessário para catalogação e caracterização das propriedades destas árvores, seja de aproximadamente 300 anos (CARDOSO *et al.*, 2017; DUARTE, 2017; LEWINSOHN; PRADO, 2005; STEEGE *et al.*, 2016;).

Estes dados mostram a importância do Brasil em relação ao potencial florestal e, além disso, evidenciam a importância de estudos para identificação e caracterização tecnológica de espécies provenientes da Floresta Amazônica, principalmente, utilizando métodos não destrutivos como técnicas de vibração (transversal ou longitudinal) ou pela determinação de parâmetros colorimétricos.

Para a utilização racional da madeira como elemento estrutural é importante o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas (ALMEIDA *et al.*, 2015A; ALMEIDA *et al.*, 2014a; ALMEIDA *et al.*, 2013b; CALIL JUNIOR; MOLINA, 2010; CALIL JUNIOR *et al.*, 2003; MOLITERNO, 2009). O projeto de estruturas de madeira abrange o dimensionamento dos elementos estruturais e, além disso, requer o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira a ser utilizada. No Brasil, o projeto de estruturas e os métodos de ensaios para caracterização da madeira são realizados de acordo com a Norma Brasileira Registrada

(NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira”.

As árvores são classificadas em dois grandes grupos: coníferas e dicotiledôneas (folhosas). As madeiras provenientes de árvores de espécies nativas Tropicais, tais como o Ipê (*Tabebuia* spp.), a Maçaranduba (*Manilkara* spp.) e a Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) são exemplos de dicotiledôneas (ALMEIDA *et al.*, 2017a).

Dentre as propriedades mecânicas da madeira destaca-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), cujos os resultados individuais das resistências dos corpos de prova ensaiados possibilitam calcular a resistência característica na compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) e o posterior enquadramento da madeira nas classes de resistência estabelecidas pela ABNT NBR 7190:1997 (BERTOLINI *et al.*, 2012; FERRO *et al.*, 2015; FERRO *et al.*, 2013a).

No caso da utilização da madeira como pisos, batentes, portas, entre outros elementos de edificação não classificados como elementos estruturais, a dureza (f_H) é uma importante propriedade (ALMEIDA *et al.*, 2014b; CADEMARTORI *et al.*, 2016; HANSSON; ANTTI, 2006).

O ensaio de flexão estática também apresenta importantes propriedades da madeira, tais como o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura (f_M) (CHRISTOFORO *et al.*, 2013; ICIMOTO *et al.*, 2013; ICIMOTO *et al.*, 2015; CHEN; GUO, 2017). Além disso, o Comitê Europeu de Normalização em sua norma EUROCODE 5:2004 “*Design of Timber Structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings*”, adota os valores de E_M e f_M como referência para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Para a estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de interesse no projeto estrutural, é necessária a utilização de equipamentos de grande porte, geralmente encontrados em grandes centros de pesquisa (FERRO *et al.*, 2013b). Na impossibilidade da realização dos ensaios em corpos de prova, a norma ABNT NBR 7190:1997 estabelece relações entre propriedades de resistência com base no conhecimento da resistência na compressão paralela às fibras.

Além disso, pesquisas com métodos não destrutivos para a estimativa das propriedades da madeira estão sendo desenvolvidas.

Com o objetivo de estimar propriedades de rigidez (módulo de elasticidade), métodos alternativos baseados em vibração (transversal ou longitudinal) e ultrassom têm sido utilizados, como notado nas pesquisas desenvolvidas por Almeida *et al.* (2016A), Baar *et al.* (2015), Calil

Junior e Miná (2003), Carvalho *et al.* (2017), Chauhan e Sethy (2016), Gütenkin *et al.* (2016), e Oliveira *et al.* (2002). Nessas pesquisas, foram constatadas boas correlações (de acordo com a análise do coeficiente de determinação – R^2) entre o módulo de elasticidade dinâmico proveniente dos ensaios com ultrassom e vibração e o módulo de elasticidade na flexão estática, evidenciando ser possível estimar o módulo de elasticidade pelos parâmetros de ensaios não destrutivos.

Por ser a densidade uma propriedade física de fácil determinação, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo da sua utilização na estimativa de propriedades de resistência e de rigidez da madeira (ALMEIDA *et al.*, 2017b; ALMEIDA *et al.*, 2016B; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2014; DIAS; LAHR, 2004).

As propriedades organolépticas, entre elas a cor, são características importantes da madeira. A partir da cor da madeira é possível, entre outros exemplos, distinguir cerne e alborno no lenho; nomear um grupo de espécies de acordo com a cor da madeira (por exemplo, a madeira Roxinho, alusão à cor roxa da madeira) e; verificar o ataque de organismos xilófagos na madeira. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) apresenta em sua xiloteca *online* (IPT, 2017), características de muitas espécies nativas brasileiras, entre elas, as suas cores.

Sendo a cor uma característica importante dos materiais, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) apresenta a norma ASTM D2244:2011 “*Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates*”, baseado no sistema CIE (Comissão Internacional de Iluminantes), método que define a cor de acordo com três parâmetros mensurados por colorímetro: L^* (escala entre as cores branco e preto), a^* (escala entre as cores verde e vermelho) e b^* (escala entre as cores amarelo e azul), sendo assim chamado de sistema CIE $L^*a^*b^*$.

De forma alternativa, a técnica de colorimetria, que consiste na determinação da cor de uma superfície, vem sendo aplicada à madeira com algumas finalidades, tais como: caracterização de seus parâmetros colorimétricos; avaliação do efeito de tratamentos termomecânicos e químicos na coloração da madeira; avaliação de infestações patológicas e intemperismo natural ou artificial (BARCÍK *et al.*, 2015; GARAY *et al.*, 2017; KERBER *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2015; MEINTS *et al.*, 2016; TORRES *et al.*, 2016; ZBOROWSKA *et al.*, 2015).

Uma espécie de madeira pode ser diferenciada de outras por diversos fatores anatômicos e a cor pode ter uma relação intrínseca com a espécie e, conseqüentemente, com as suas

propriedades físicas e mecânicas, não sendo encontradas até o presente momento trabalhos com esse propósito. Cabe destacar que a procura dos trabalhos componentes da revisão da literatura foi realizada em bases de dados como *Web of Science*, Portal Capes Periódicos, *Scopus*, *Engineering Village*, *Google Scholar* e em várias páginas de revistas nacionais associadas à madeira, produtos derivados e estruturas de madeira.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi gerar modelos de regressão multivariáveis para a estimativa de propriedades mecânicas de madeiras brasileiras da Floresta Amazônica em função de seus parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) e densidade aparente.

1.1.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos que foram alcançados para realização desta pesquisa:

- Estimar a densidade aparente a 12% de teor de umidade e as seguintes propriedades mecânicas para cada espécie: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}); módulo de ruptura (f_M) e módulo de elasticidade (E_M) na flexão estática; e dureza normal às fibras (f_{H90});
- Estimar os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) das madeiras de cada uma das espécies com um colorímetro portátil;
- Testar os modelos de regressão para cada espécie individualmente, utilizando como variáveis independentes apenas os parâmetros colorimétricos;
- Para o conjunto envolvendo todas as espécies, testar os modelos de regressão, considerando também a densidade aparente como variável independente.

1.2 Justificativas

A possibilidade do uso de modelos de regressão de significativa precisão (balizados pelo valor do coeficiente de determinação R^2) na estimativa de propriedades de resistência e de rigidez da madeira utilizando-se informações da leitura do equipamento colorímetro (parâmetros L^* , a^* e b^*), em conjunto com o conhecimento da densidade aparente da madeira se apresenta como uma excelente alternativa, pois o colorímetro é um equipamento de fácil manuseio e a densidade aparente da madeira também é de simples obtenção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as pesquisas relacionadas às espécies de madeira utilizadas no presente estudo (origem, características e propriedades), como também os trabalhos em que foram investigadas as relações entre propriedades da madeira (estimativas) e os estudos que envolveram o uso do colorímetro em madeiras.

2.1 Madeiras Tropicais e suas Aplicações na Construção Civil

A madeira é um dos produtos das árvores, sendo sua extração proveniente do seu material lenhoso. As árvores podem ser classificadas em dois grandes grupos: Gimnospermas (coníferas) e Angiospermas (dicotiledôneas). No Brasil, as dicotiledôneas são representadas pelas espécies nativas Tropicais (provenientes da Floresta Amazônica) e pelas exóticas dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* (ABNT NBR 7190:1997).

De acordo com Steege *et al.* (2016), entre 1707 e 2015, 11194 espécies de árvores, de 1225 gêneros e 140 famílias foram catalogadas na Bacia Amazônica. A Floresta Amazônica apresenta 6850476 km², com uma estimativa que possua 16000 espécies de árvores, sendo o Brasil detentor de boa parte desta área (4102893 km²) e com 7694 espécies catalogadas (com estimativa de 12655 espécies).

Diante dos números expostos por Steege *et al.* (2016), as pesquisas para determinação das propriedades das madeiras provenientes das espécies de árvores tropicais, são importantes e necessárias para o setor, pois permitem a utilização racional deste importante material, subsidiando a sua sustentabilidade (ALMEIDA, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2017a;). De acordo com o *Forest Stewardship Council* (FSC), o Brasil possui 114 regiões florestais certificadas (equivalente em área a 6285838 hectares) (FSC, 2017).

Na construção civil a madeira tropical pode ser utilizada de diversas maneiras (Tabela 1), desde a construção civil pesada externa (madeira serrada usada em estacas marítimas, trapiches, pontes, obras imersas, postes, cruzetas, estacas, escoras e dormentes ferroviários e estruturas pesadas) até assoalhos domésticos (compreende os diversos tipos de peças de madeira serrada e beneficiada usada em pisos: tábuas corridas, tacos, tacões e parquetes) (NAHUZ, 2013).

Tabela 1. Alguns exemplos de aplicações das madeiras tropicais na construção civil.

Tipos de Construção Civil	Nome Popular	Nome Científico
Construção Civil Pesada Externa	Angelim-amargoso	<i>Vatairea</i> sp.
	Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>
	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>
	Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>
Construção Civil Pesada Interna	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>
	Cedrorana	<i>Cedrelinga cateniformis</i>
	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>
	Curupixá	<i>Micropholis venulosa</i>
	Quaruba	<i>Vochysia</i> spp.
Construção Civil Leve e Externa e Uso Temporário	Mandioqueira	<i>Ruizterania albiflora</i>
	Tauari-Vermelho	<i>Cariniana micrantha</i>
	Mandioqueira	<i>Ruizterania albiflora</i>
	Cedrorana	<i>Cedrelinga cateniformis</i>
	Quaruba	<i>Vochysia</i> spp.
Construção Civil Leve Interna, Decorativa	Tachi	<i>Tachigali myrmecophilla</i>
	Pau-roxo	<i>Peltogyne</i> spp.
	Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>
	Jatobá	<i>Hymenaea</i> spp.
	Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
Construção Civil Leve Interna, de Utilidade Geral	Oiticica-amarela	<i>Clarisia racemosa</i>
	Cedrorana	<i>Cedrelinga cateniformis</i>
	Mandioqueira	<i>Ruizterania albiflora</i>
	Quaruba	<i>Vochysia</i> spp.
	Tachi	<i>Tachigali myrmecophilla</i>
Construção Civil Leve e Esquadrias	Tauari-vermelho	<i>Cariniana micrantha</i>
	Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>
	Tauari	<i>Couratari</i> spp.
	Oiticica-amarela	<i>Clarisia racemosa</i>
	Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>
Construção Civil (Assoalhos Domésticos)	Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i>
	Cumarú	<i>Dipteryx odorata</i>
	Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>
	Pau-roxo	<i>Peltogyne</i> spp.
	Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i>

Fonte: Adaptado de NAHUZ (2013).

Para utilização da madeira na construção civil, mais precisamente como elemento estrutural, é necessário o dimensionamento de acordo com normas. A norma ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira” apresenta os parâmetros para dimensionamento

de estruturas de madeira, os métodos de ensaios para caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira e alguns valores médios de propriedades para algumas espécies tropicais brasileiras.

2.2 Estimativa das Propriedades da Madeira

Para a utilização da madeira na construção civil e dimensionamento de elementos estruturais de madeira, é necessário o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas determinadas a partir de ensaios em corpos de prova em laboratórios (CALIL JUNIOR *et al.*, 2003), entre eles:

- **Para caracterização das propriedades físicas:** teor de umidade (TU), densidade básica (ρ_{bas}), densidade aparente (ρ_{ap}) e estabilidade dimensional.
- **Para a caracterização das propriedades mecânicas:** 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}), dureza normal às fibras (f_{H90}), resistência ao embutimento paralelo às fibra (f_{e0}) e resistência ao embutimento normal às fibras (f_{e90}).

Os lotes de madeira para emprego estrutural são classificados em classes de resistência. As Coníferas são classificadas em C20, C25 e C30, enquanto que as madeiras tropicais, são classificadas em D20, D30, D40, D50 e D60 classificadas como dicotiledôneas (folhosas). É importante citar que a classificação é realizada com base no valor da resistência característica à compressão paralela às fibras. As classes de resistência estabelecidas pelo projeto de norma PN02:126.10-001-1:2013 (ABNT NBR 7190) para dicotiledôneas (folhosas) são apresentadas na Tabela 2 (valores na condição padrão de referência de teor de umidade igual a 12%). A norma ABNT NBR 7190:1997 atualmente (outubro/2017) passa por processo de atualização, revisão e consulta pública nacional, por este motivo, foi utilizada a classificação das dicotiledôneas pelo projeto de norma PN02:126.10-001-1:2013 (ABNT NBR 7190).

Tabela 2. Classes de resistência de dicotiledôneas (folhosas).

CLASSES	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	$\rho_{ap,m}$ (kg/m ³)
D 20	20	4	9500	500	650
D 30	30	5	14500	650	800
D 40	40	6	19500	750	950
D 50	50	7	22000	775	970
D 60	60	8	24500	800	1000

$f_{c0,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras; $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras; $\rho_{bas,m}$ = densidade básica média; $\rho_{ap,m}$ = densidade aparente média.

Fonte: Adaptado de PN02: 126.10-001-1 (2013)

2.3 Cor da Madeira

As propriedades organolépticas da madeira são aquelas percebidas pelos sentidos humanos, entre elas: cheiro, gosto, disposição da grã, textura, brilho, figuras e coloração. Estas características permitem a caracterização macroscópica da madeira, sem a utilização de aparatos laboratoriais. É importante ressaltar a subjetividade das propriedades organolépticas dos materiais, devido às diferentes sensibilidades dos observadores (ZENID; CECCANTINI, 2007).

A cor é uma das principais propriedades da madeira, pois é uma das primeiras características indicadas para madeira por intermédio de uma análise visual. As cores são tão importantes que, para algumas espécies, seu nome popular faz menção à sua cor, por exemplo, as madeiras do gênero *Peltogyne* possuem lenho com cor arroxeadada, sendo conhecidas popularmente como Roxinho ou Pau-roxo (IPT, 2017).

As categorias de cores da madeira normalmente observadas são: esbranquiçada, amarelada, avermelhada, acastanhada, parda, enegrecida, esverdeada, arroxeadada e, em alguns casos podem ser encontrados padrões rajados em cores diferentes para a mesma face da madeira (ZENID; CECCANTINI, 2007). A Figura 1 apresenta a coloração da madeira de algumas espécies tropicais brasileiras.



Figura 1. Exemplos de cores da madeira: (a) amarelada de Vinhático (*Plathymenia foliolosa* Benth.); (b) castanho de Fava-orelha-de-negro (*Enterolobium schomburgkii* (Benth.) Benth.); (c) bege-rosada de Cedrorana (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke).

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

A cor da madeira é influenciada por alguns fatores, dentre eles: o ataque de organismos xilófagos, como, por exemplo, fungos de podridão parda e podridão branca (BRITO, 2014; SANTOS, 1992); o tratamento químico com preservantes ao ataque de organismos xilófagos (CAVALHEIRO, 2014); tratamentos termomecânicos (FREITAS *et al.*, 2016); intemperismo (SOUZA *et al.*, 2010; TELES; COSTA, 2014); composição química, principalmente os relacionados com o teor de extrativos (MORI *et al.*, 2004; OLIVEIRA, 2005) e, anatomia da madeira (seções radial e tangencial; cerne e alburno) (GARCIA; MARINONIO, 2016).

2.4 Sistema CIE L*a*b

Como descrito na seção 2.3, a cor é uma propriedade sensorial subjetiva e a maneira encontrada para padronizar esta propriedade foi transformá-la em números, possibilitando estudar a cor e suas variações nos diversos materiais. Em 1976, a Comissão Internacional de Iluminantes (CIE) (CIE, 2017) recomendou o sistema CIE L*a*b* para padronizar a sensação de cor baseada nos parâmetros colorimétricos luminosidade e tonalidade (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001; JANIN *et al.*, 2001).

A luminosidade (L^*) é um parâmetro definido pela escala cinza variando entre os valores 0 (cor preta) e 100 (cor branca). A tonalidade é apresentada de acordo com as cores azul, amarelo, verde e vermelho. Para determinação da tonalidade, os parâmetros colorimétricos a^* (escala entre as cores vermelho ($+a^*$) e verde ($-a^*$)) e b^* (escala entre as cores amarelo ($+b^*$) e azul ($-b^*$)), são adotados, sendo que os valores numéricos para cada um deles variam entre 0 e 60. A Figura 2 apresenta as escalas e os eixos para determinação dos parâmetros colorimétricos de acordo com o sistema CIE L*a*b* (CIE, 2017).

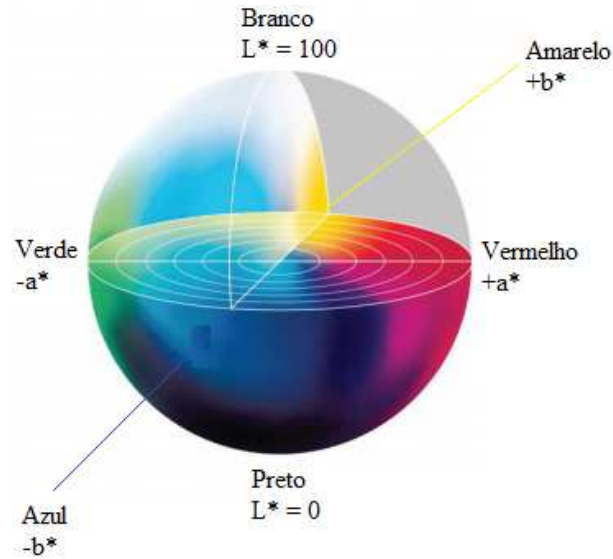


Figura 2. Sistema CIE L*a*b*.

Fonte: Adaptado de BARCÍK (2015).

Baseada no sistema CIE L*a*b*, a norma ASTM D2244:2011 “*Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates*” padroniza os métodos para realização das medidas dos parâmetros colorimétricos utilizando instrumentos, tais como os colorímetros.

2.5 Características das Madeiras Tropicais Pesquisadas

Nesta seção serão apresentadas as principais características das espécies utilizadas nesta pesquisa: a Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), o Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), o Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), a Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) e o Roxinho (*Peltogyne* sp.).

2.5.1 Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.)

A Caixeta ou Marupá (*Simarouba amara* Aubl.) é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. A Caixeta apresenta cerne, alborno e anéis de crescimento indistintos pela cor, esbranquiçado a levemente amarelado e brilho moderado. Além de parênquima axial, raios e vasos visíveis a olho nu. Quanto à trabalhabilidade, ela é fácil de ser serrada, aplainada e permite bom acabamento superficial. Quanto à secagem, se bem realizada, pode ser rápida, sem a

ocorrência de defeitos. As Tabelas 3 e 4 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Caixeta (ELEOTÉRIO; SILVA, 2014; IPT, 2017).

Tabela 3. Propriedades físicas da Caixeta.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,12}$	440
ρ_v	1120
ρ_{bas}	370
Contração (%)	
Radial	4,8
Tangencial	6,8
Volumétrica	11,8

$\rho_{ap,12}$ = 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 (2017).

Tabela 4. Propriedades mecânicas da Caixeta.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	33	19,5
f_{c90} (MPa)	4,4	2,8
f_M (MPa)	64	43,6
E_M (MPa)	7257	6570
f_{v0} (MPa)	7	6
f_{H0} (N/cm ²)	2707	1343
f_{H90} (N/cm ²)	1402	1206
f_{t90} (MPa)	-	3,6

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; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

A Caixeta pode ser utilizada na construção civil em aplicações leves internas, tais como: guarnições, rodapés, forros e lambris. Também pode ser utilizada em mobiliários e artefatos diversos (IPT, 2017).

Freitas (2015) avaliou o efeito do tratamento termomecânico, técnica que combina tratamento térmico e compressão mecânica em apenas uma das superfícies, nas propriedades físicas, mecânicas e superficiais da Caixeta. O tratamento foi realizado com prensa hidráulica dotada de resistência elétrica nas temperaturas de 180 e 200°C, pressão de 7,94 e 11,90 MPa e tempo de 30 minutos. O tratamento termomecânico aumentou a densidade da madeira. Nas

propriedades superficiais houve aumento do escurecimento e diminuição da molhabilidade. Em relação às propriedades mecânicas, houve aumento nos valores de dureza e resistência à compressão paralela às fibras.

Stangerlin *et al.* (2013) determinaram a dureza *Rockwell* da Caixeta submetida ao apodrecimento acelerado ocasionado pelo ataque de fungos de podridão parda e podridão branca. Segundo os autores, a Caixeta apresentou baixa durabilidade ao ataque destes tipos de fungos quando comparada com a madeira de Jequitibá (*Cariniana micrantha*) e Cumaru (*Dipterix odorata*). Os autores ressaltam que a dureza é uma propriedade que pode ser estudada para os casos de madeiras submetidas à biodeterioração. Além disso, a Caixeta é mais susceptível ao ataque de fungos de podridão branca.

Santos e Del Menezzi (2010) avaliaram a possibilidade de utilização da Caixeta na confecção de Madeira Laminada Colada (MLC). Os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola e eficiência de colagem credenciam a utilização da Caixeta na confecção de MLC.

Teles (2014) estudou a densidade aparente da Caixeta com e sem tratamento químico com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) em 6 diferentes tempos de exposição ao intemperismo acelerado (variando de zero a 1200 horas), encontrando valores da ordem de 0,4 g/cm³.

2.5.2 Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock)

O Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock) é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. A madeira de Cajueiro apresenta cerne e alburno indistintos pela cor, cerne branco-amarelado-claro a branco-amarelado-rosado. Além de parênquima axial e raios visíveis sob lente e vasos visíveis a olho nu. Quanto à trabalhabilidade, apresenta facilidade em ser serrada, aplainada, faqueada, torneada e parafusada, além disso, apresenta bom acabamento. Quanto à secagem, é classificada como fácil, quando realizada moderadamente lenta, com pequena tendência a ocorrência de rachaduras e empenamentos. As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cajueiro (IPT, 2017).

Tabela 5. Propriedades físicas do Cajueiro.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,15}$	520
ρ_v	1040
ρ_{bas}	430
Contração (%)	
Radial	3,4
Tangencial	6,3
Volumétrica	10,3

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

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 6. Propriedades mecânicas do Cajueiro.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	-	29,3
f_M (MPa)	68,9*	-
f_{v0} (MPa)	7,7	6
f_{H0} (N/cm ²)	3667	2402
f_{H90} (N/cm ²)	2246	1922
f_{i90} (MPa)	-	2,4
f_{s0} (MPa)	-	3,1

*propriedade determinada com densidade aparente da madeira a 15%.

f_{s0} = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

O Cajueiro pode ser utilizado na construção civil em aplicações leves internas, tais como: guarnições, forros e molduras. Também pode ser utilizada em artigos esportivos, brinquedos, compensados e embalagens (IPT, 2017).

2.5.3 Cambará (*Erismia uncinatum* Warm)

O Cambará (Cedrinho ou Quarubarana) (*Erismia uncinatum* Warm) é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia. A madeira de Cambará apresenta cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado e sem brilho e grã direita. Apresenta também parênquima axial e vasos visíveis a olho nu e os raios visíveis apenas sob lente. Quanto à trabalhabilidade, a madeira de Cambará apresenta facilidade em aplainar, serrar e lixar, mas

apresenta superfície de acabamento felpuda (não é de fácil acabamento). Quanto à secagem não apresenta ocorrência significativa de defeitos na secagem ao ar; em relação à secagem em estufa, é rápida, porém, se for realizada de maneira drástica podem ocorrer empenamentos e rachaduras. As Tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cambará (IPT, 2017).

Tabela 7. Propriedades físicas do Cambará.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,15}$	590
ρ_v	1110
ρ_{bas}	480
Contração (%)	
Radial	3,3
Tangencial	7,7
Volumétrica	12,5

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 8. Propriedades mecânicas do Cambará

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	42,2*	33,7
f_M (MPa)	80,2*	72,5
E_M (MPa)	10395	9365
f_{v0} (MPa)	-	7,4
f_{H0} (N/cm ²)	-	3844
f_{t90} (MPa)	-	4,2
f_{s0} (MPa)	-	0,5

*propriedade determinada com densidade aparente da madeira a 15%.

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

A ABNT NBR 7190:1997, em seu Anexo E “Valores Médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento”, como também os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas a *Erismia uncinatum* (Tabela 9).

Tabela 9. Valores médios de propriedades de *Erismia uncinatum*.

Propriedades	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m ³)	544
f_{c0} (MPa)	37,8
f_{t0} (MPa)	58,1
f_{t90} (MPa)	2,6
f_{v0} (MPa)	5,8
E_{c0} (MPa)	9067

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

O Cambará pode ser utilizado na construção civil em aplicações leves em esquadrias (portas, venezianas e caixilhos), interna estrutural (ripas), interna de utilidade geral (lambris, molduras, guarnições e forros) e como uso temporário (andaimes, fôrmas para concreto e pontaletes). Também pode ser utilizado em mobiliários, artigos esportivos, brinquedos, compensados e embalagens (IPT, 2017).

Ribeiro *et al.* (2016) determinaram o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura na flexão estática (f_M) de *Erismia uncinatum* Warm em ensaios de flexão estática. Os autores utilizaram 20 corpos de prova nas dimensões 2 x 2 x 30 cm de acordo com a norma COPANT 30:1-006:1972. O valor médio determinado para E_M foi de 8103,68 MPa com coeficiente de variação de 16,28%. Para f_M foi determinado um valor médio de 68,9 MPa com coeficiente de variação de 15,18%.

Lahr *et al.* (2016) realizaram a caracterização completa de um lote de *Erismia uncinatum* Warm de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997. Segundo os autores, a densidade aparente à 12% de umidade é igual a 680 kg/m³, a retratibilidade radial total (RRT) e a retratibilidade tangencial total (RTT) foram iguais a 5,83 e 10,55%, respectivamente. Os valores médios das propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Erismia uncinatum*.

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

E_{c0} = módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras; E_{c90} = módulo de elasticidade na compressão normal às fibras; E_{t0} = módulo de elasticidade em esforços de tração paralela às fibras; T = tenacidade da madeira.

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

Arruda *et al.* (2015) estudaram a madeira de *Erismia uncinatum* termomecanicamente tratada com o objetivo de sua utilização na construção civil como piso. Foram realizados ensaios de flexão estática, dureza normal às fibras e compressão paralela às fibras. Para efeito de comparação entre propriedades das madeiras tratadas e sem tratamento, os autores utilizaram os dados para a *Erismia uncinatum* do Serviço Florestal Brasileiro (SFB). Para todas as propriedades mecânicas estudadas, os valores obtidos para as madeiras termomecanicamente estudadas foram inferiores que os determinados pelo SFB (Tabela 11).

Tabela 11. Valores médios de algumas propriedades mecânicas de *Erismia uncinatum*.

Propriedades Mecânicas	Arruda <i>et al.</i> (2015)*	SFB**
E_M (MPa)	10483	10795
f_M (MPa)	62,24	87,54
f_{H90} (N)	2613	3864
f_{c0} (MPa)	44,91	49,75

*Resultados para madeira termomecanicamente tratada; ** Valores de referência, sem tratamento térmico.

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

Segundinho *et al.* (2013) constataram que o Cambará pode ser utilizado como matéria-prima para MLC. As vigas de MLC foram produzidas com peças de madeira classificadas, coladas por adesivos à base de resorcina fenol formaldeído e poliuretano.

Morales e Lahr (2002) determinaram o módulo de elasticidade do Cambará Rosa (*Erismia* sp.) com densidade 0,67 g/cm³ inserida na classe de resistência C20 das dicotiledôneas em quatro tipos de solicitações. Os valores médios determinados foram: 891 MPa para solicitações de compressão normal às fibras; 12708 MPa para solicitações de compressão paralela às fibras, 11406 MPa na flexão estática e 12509 MPa em solicitações de tração paralela às fibras.

Zangiácomo e Lahr (2002) determinaram a resistência à tração paralela às fibras (40,60 MPa), a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (8,37 MPa) e a resistência à tração normal às fibras (2,57 MPa) da madeira de Cedrinho. Segundo os autores, o Cedrinho apresenta potencial para ser utilizado na construção civil como MLC, sempre considerando o adesivo.

2.5.4 Tatajuba (*Bagassa guianensis* Aubl.)

A Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Ela apresenta cerne e alborno distintos pela cor, cerne amarelo-dourado, escurecendo para castanho-amarelado e brilho moderado. Apresenta vasos e raios visíveis a olho nu e parênquima axial invisível mesmo sob lente. Apresenta cerne resistente ao ataque de fungos de podridão branca e parda. Quanto à trabalhabilidade, a Tatajuba produz ótimo acabamento, porém, é recomendável pré-furação para fabricação de ligações para estruturas. Quanto à secagem, é classificada como lenta ao ar livre; na secagem em estufa é recomendável um controle rigoroso do processo, pois a Tatajuba apresenta tendência aos defeitos de secagem, tais como, empenamentos e encanoamentos. As Tabelas 12 e 13 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Tatajuba (IPT, 2017).

Tabela 12. Propriedades físicas da Tatajuba.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,15}$	820
ρ_{bas}	683
Contração (%)	
Radial	5,5
Tangencial	7,1
Volumétrica	11,4

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 13. Propriedades mecânicas de Tatajuba.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,12}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	79,7*	54,4
f_M (MPa)	138,2*	100
E_M (MPa)	-	15857
f_{v0} (MPa)	-	11,5
f_{H0} (N/cm ²)	-	7208
f_{t90} (MPa)	0,8	4,5

*Propriedade determinada com densidade aparente da madeira a 15%.

Fonte: Adaptado IPT (2017).

A ABNT NBR 7190:1997, em seu Anexo E “Valores Médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento” apresenta valores médios de algumas propriedades Tatajuba (Tabela 14).

Tabela 14. Valores médios de propriedades da Tatajuba.

Propriedades	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m ³)	940
f_{c0} (MPa)	79,5
f_{t0} (MPa)	78,8
f_{t90} (MPa)	3,9
f_{v0} (MPa)	12,2
E_{c0} (MPa)	19583

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997.

A Tatajuba pode ser utilizada na construção civil em aplicações pesadas externas (dormentes ferroviários, cruzetas, estacas e defensas), pesadas internas (tesouras, vigas e caibros), leves e esquadrias (batentes e janelas), leves e internas (painéis, lambris e forros) e em assoalhos (tábuas, tacos e parquetes). Também pode ser empregada em mobiliários, peças torneadas e embarcações (IPT, 2017).

Carvalho e Carvalho (2001) avaliaram a influência do espaçamento entre árvores na densidade básica da madeira de Tatajuba. Foram realizados ensaios em corpos de prova provenientes de madeira de Campo Experimental no estado do Pará. Segundo os autores, a densidade básica da Tatajuba é da ordem de 0,57 g/cm³. Além disso, os espaçamentos entre as árvores não influenciaram os valores de densidade básica.

2.5.5 Roxinho (*Peltogyne* sp.)

O Roxinho ou Pau-roxo (*Peltogyne* sp.) é uma espécie tropical da Amazônia com ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará e Rondônia. Esta madeira apresenta cerne e alburno distintos pela cor, cerne roxo podendo escurecer com o tempo, alburno bege claro e brilho moderado e acentuado. Apresenta vasos e parênquima axial visíveis a olho nu e raios visíveis apenas sob lente. Apresenta alta resistência ao ataque de organismos xilófagos. Quanto à trabalhabilidade, é moderadamente difícil de ser trabalhada manualmente ou com máquinas, devido à dureza e exsudação de resinas quando aquecidas pelas ferramentas de corte; apresenta bom acabamento (regular na plaina e excelente na lixa, torno e broca) apresentando um polimento lustroso; é recomendada a pré-furação da madeira para confecção de ligações. As Tabelas 15 e 16 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Roxinho (IPT, 2017).

Tabela 15. Propriedades físicas do Roxinho.

Densidade (kg/m³)	
$\rho_{ap,15}$	890
ρ_v	-
ρ_{bas}	740
Contração (%)	
Radial	3,5
Tangencial	6,5
Volumétrica	10,7

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

Tabela 16. Propriedades mecânicas da madeira de Roxinho.

Propriedades Mecânicas	Densidade	
	$\rho_{ap,15}$	ρ_v
f_{c0} (MPa)	84,1	64
E_{c0} (MPa)	-	20565
f_M (MPa)	184,5	144,8
E_M (MPa)	-	17721
f_{v0} (MPa)	-	14,9
f_{H0} (N/cm ²)	-	9728
f_{t90} (MPa)	-	8,3
f_{s0} (MPa)	-	1,1

Fonte: Adaptado de IPT (2017).

O Roxinho pode ser utilizado na construção civil em aplicações pesadas externas (dormentes ferroviários, cruzetas, esteios e estacas), pesadas internas (tesouras, vigas e caibros), leves e esquadrias (porta, batentes e janelas), leves internas (painéis, lambris e forros) e em assoalhos (tábuas, tacos e parquetes). Também pode ser empregada em mobiliários de alta qualidade, peças torneadas e embarcações (IPT, 2017).

2.6 Estimativa de Propriedades da Madeira

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos desenvolvidos para estimativa de propriedades da madeira por intermédio de modelos de regressão encontrados na revisão bibliográfica desenvolvida até o momento. Na seção Referências Complementares são apresentadas outras fontes de interesse a respeito da estimativa de propriedades da madeira.

Para o projeto de estruturas de madeira é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas e físicas da madeira (CALIL JUNIOR *et al.*, 2003; CALIL JUNIOR; MOLINA, 2011; HERMOSO *et al.*, 2016; LOBÃO *et al.*, 2004). A norma ABNT NBR 7190:1997 apresenta em seu Anexo B os ensaios, bem como seus métodos, para a caracterização completa da madeira.

Na impossibilidade da realização de todos os ensaios para caracterização de alguma espécie de madeira, a ABNT NBR 7190:1997 apresenta relações entre os valores característicos de resistência (Equações 1 a 7).

$$f_{c0,k}/f_{t0,k} = 0,77 \quad (1)$$

$$f_{tM,k}/f_{t0,k} = 1 \quad (2)$$

$$f_{c90,k}/f_{c0,k} = 0,25 \quad (3)$$

$$f_{e0,k}/f_{c0,k} = 1 \quad (4)$$

$$f_{e90,k}/f_{c0,k} = 0,25 \quad (5)$$

$$f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,15 \text{ (para coníferas)} \quad (6)$$

$$f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,12 \text{ (para dicotiledôneas)} \quad (7)$$

Nas Equações 1 a 7, $f_{c0,k}$ é resistência característica à compressão paralela às fibras, $f_{t0,k}$ é resistência característica à tração paralela às fibras, $f_{tM,k}$ é a resistência característica à tração na flexão, $f_{c90,k}$ é resistência característica à compressão normal às fibras, $f_{e0,k}$ é resistência característica ao embutimento paralelo às fibras, $f_{e90,k}$ é resistência característica ao

embutimento normal às fibras e $f_{v0,k}$ é resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras. A ABNT NBR 7190:1997 também apresenta relações entre valores médios das propriedades de rigidez da madeira (Equações 8 a 11).

$$E_{c0,m} = E_{t0,m} \quad (8)$$

$$E_M = 0,85 \cdot E_{c0} \text{ (para coníferas)} \quad (9)$$

$$E_M = 0,90 \cdot E_{c0} \text{ (para dicotiledôneas)} \quad (10)$$

$$E_{c90} = E_{c0}/20 \quad (11)$$

Nas Equações 8 a 11, $E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras; $E_{t0,m}$ = módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras.

Almeida e Dias (2016) estudaram a resistência da madeira ao embutimento na direção paralela às fibras de acordo com as normas brasileira (ABNT NBR 7190:1997), europeia (EN 383:2007) e americana (ASTM D5764:2007). Além disso, também determinaram a resistência ao embutimento utilizando as Equações 12, 13 e 14 recomendadas pelas normas brasileira (ABNT NBR 7190:1997), europeia (EUROCODE 5:2004) e americana (NDS:2001), respectivamente.

$$f_{e0} = f_{c0} \quad (12)$$

$$f_{e0} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (13)$$

$$f_{e0} = 0,07725 \cdot \rho_{ap} \quad (14)$$

Nas Equações 12, 13 e 14, f_{e0} é resistência ao embutimento paralelo às fibras, d é diâmetro do pino metálico utilizado na ligação e ρ_k é densidade característica da madeira; ρ_{ap} = densidade aparente da madeira.

Almeida (2014) utilizou as Equações 15, 16 e 17 para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento na direção normal às fibras (f_{e90}) baseado nas normas brasileira (ABNT NBR 7190:1997), europeia (EUROCODE 5:2004) e americana (NDS:2001), respectivamente. O parâmetro k_{90} utilizado na Equação 16 é calculado considerando a densidade da madeira. Na Equação 15 o parâmetro α_e é determinado de acordo com o diâmetro do pino metálico utilizado.

$$f_{e90} = 0,25 \cdot f_{c0} \cdot \alpha_e \quad (15)$$

$$f_{e90} = (0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k) / k_{90} \quad (16)$$

$$f_{e90} = 212 \cdot (0,001 \cdot \rho_{ap})^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (17)$$

Almeida *et al.* (2014c), Lederer *et al.* (2016) e Molina *et al.* (2017) também determinaram a resistência da madeira ao embutimento utilizando as equações recomendadas pelas normas. Vale ressaltar que as normas europeia e estadunidense utilizam como um dos parâmetros para o cálculo da resistência da madeira ao embutimento a densidade da madeira, diferentemente da norma brasileira que utiliza somente a resistência à compressão paralela às fibras.

Aquino *et al.* (2017) desenvolveram as relações entre 27 propriedades mecânicas, densidade, coeficientes de retratibilidade, teor de umidade, coeficientes de anisotropia e ponto de saturação das fibras para as madeiras de *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. A melhor correlação com uma única variável foi entre o módulo de elasticidade em solitações de compressão paralela às fibras e a retratibilidade tangencial ($R^2 = 0,494$), adotando uma regressão exponencial; o menor valor do coeficiente de determinação encontrado foi para correlação com uma única variável entre a força no limite de proporcionalidade em esforços de flexão estática e a retratibilidade tangencial ($R^2 = 0,104$). A melhor correlação encontrada apresentou $R^2 = 0,93$ (p-valor < 0,001), onde os autores adotaram um modelo multivariado linear para estimar o módulo de elasticidade da madeira a 12% de umidade por intermédios dos seguintes parâmetros: coeficiente de anisotropia, densidade básica, teor de umidade verde, retratibilidade tangencial, retratibilidade radial e densidade anidra.

Chen e Guo (2017) avaliaram a densidade e as propriedades mecânicas da madeira de *Abies fabri* (Mast.) Craib em testes não destrutivos, flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras. Os autores utilizaram modelos de regressão lineares (p-valor < 5%) (Tabela 17) para correlacionar os parâmetros não destrutivos com propriedades mecânicas da madeira e a densidade.

Tabela 17. Regressão linear entre propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos da madeira de *Abies fabri* (Mast.) Craib.

Propriedades	Equação	R ² (%)
ρ (g/cm ³)	$\rho = 0,006 \cdot F + 0,293$	56,2
E_M (GPa)	$E_M = 2,731 \cdot E_{dsw} + 2,011$	63,5
f_M (MPa)	$f_M = 9,546 \cdot E_{dsw} + 37,109$	59,7
f_{c0} (MPa)	$f_{c0} = 3,535 \cdot E_{dsw} + 24,012$	62,9

ρ = densidade da madeira; E_{dsw} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de *stress wave*; F = parâmetro não destrutivo do resistógrafo; R^2 = coeficiente de determinação.

Fonte: Adaptado de CHEN; GUO (2017).

Hodousek *et al.* (2017) determinaram o módulo de elasticidade das madeiras *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis*. Para cada uma das espécies foram determinados o módulo de elasticidade dinâmico (utilizando duas técnicas: com *Timber Grader* (MTG) e com acelerômetro, ambas vibrações longitudinais) e o módulo de elasticidade em ensaios de flexão estática. Para cada uma das espécies, foram realizadas correlações lineares entre os módulos de elasticidade. Os valores dos coeficientes de regressão (R^2), bem como as equações obtidas dos modelos de regressão lineares, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Correlação linear entre módulos de elasticidade estático e dinâmicos para madeiras de *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis*.

Espécies	Equação*	R ² (%)
<i>Cupressus lusitanica</i>	$E_M = 1,17 \cdot E_{dMTG} - 103,22$	87
	$E_M = 1,17 \cdot E_{dac} - 242,38$	88
<i>Populus x canadensis</i>	$E_M = 0,94 \cdot E_{dMTG} + 397,77$	81
	$E_M = 0,78 \cdot E_{dac} + 2277,57$	82

*Resultados obtidos em MPa.

E_{dsMTG} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de MTG; E_{dac} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de acelerômetro.

Fonte: Adaptado de HODOUSEK *et al.*, (2017).

Christoforo *et al.* (2017) realizaram a caracterização completa da madeira de Angico Branco (*Anadenanthera colubrina*) de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997. Por intermédio da caracterização completa, foi possível realizar correlações entre as propriedades determinadas e a densidade aparente da madeira (de acordo com os autores, por causa da facilidade da obtenção desta propriedade) utilizando modelos de regressão linear, exponencial, quadrático e geométrico. A melhor estimativa determinada foi para o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras por meio de correlação linear, com coeficiente de determinação de 56,32%.

Chen e Guo (2016) avaliaram a densidade e as propriedades mecânicas das madeiras de *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra* em ensaios não destrutivos (módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de *stress wave*; e a amplitude de resistência à penetração da broca em análise realizada com resistógrafo) e em ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras. Os autores utilizaram modelos de regressão lineares (p-valor < 5%) (Tabela

19) para correlacionar a densidade e as propriedades mecânicas das madeiras com os resultados obtidos dos ensaios não destrutivos.

Tabela 19. Regressão linear entre propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos da madeira de duas espécies.

Espécies	Propriedades	Equação	R ² (%)
<i>Cunninghamia lanceolata</i> Lamb. Hook	ρ (g/cm ³)	$\rho = 0,005 \cdot F + 0,261$	74,5
	E _M (GPa)	$E_M = 0,897 \cdot E_{dsw} + 7,252$	50,2
	f _M (MPa)	$f_M = 9,966 \cdot E_{dsw} + 33,44$	54,9
	f _{c0} (MPa)	$f_{c0} = 3,154 \cdot E_{dsw} + 21,34$	42,5
<i>Ulmus rubra</i>	ρ (g/cm ³)	$\rho = 0,005 \cdot F + 0,350$	57,5
	E _M (GPa)	$E_M = 1,001 \cdot E_{dsw} + 3,589$	63,3
	f _M (MPa)	$f_M = 5,406 \cdot E_{dsw} + 50,95$	55,3
	f _{c0} (MPa)	$f_{c0} = 2,550 \cdot E_{dsw} + 18,95$	43,6

Fonte: Adaptado de CHEN; GUO (2017).

Almeida *et al.* (2016B) realizaram pesquisa com o objetivo de estimar a resistência da madeira à compressão paralela às fibras a partir da densidade aparente a 12% de teor de umidade das seguintes madeiras tropicais brasileiras: Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.). Os modelos de regressão utilizados foram linear, exponencial, logarítmico e geométrico. Foram realizadas análises de variância (ANOVA) nos modelos de regressão estudados, com nível de significância de 5%. Para Canafístula e Castelo, o melhor modelo de regressão foi o geométrico com coeficientes de determinação 48,57% e 52,84%, respectivamente. Para madeira de Angelim Araroba, todos os modelos apresentaram p-valores superiores a 5%, ou seja, os modelos não eram significativos. Realizando os modelos de regressão para todas as espécies em apenas um grupo, o melhor modelo de regressão foi o linear (R² = 17,88%; p-valor = 0,01).

Cavalheiro *et al.* (2016) utilizaram madeiras de coníferas (*Pinus* sp. e *Pinus oocarpa*) e dicotiledôneas (*Schizolobium amazonicum*, *Hymenaea* sp. e *Lyptus*®) objetivando estimar a retratibilidade e os coeficiente de anisotropia das espécies utilizando a densidade básica e a densidade aparente como variáveis independentes. Para a finalidade do estudo, os autores adotaram quatro modelos de regressão: linear, exponencial, logarítmico e geométrico. De todas as relações estudadas, as únicas significativas foram as que envolveram apenas as densidades básica e aparente (91,72% para as coníferas e 83,36% para as dicotiledôneas; ambas com

modelo de regressão linear), sendo impossível estimar a retratibilidade e o coeficiente de anisotropia para as madeiras estudadas neste trabalho.

Christoforo *et al.* (2016) estudaram a possibilidade de estimar a retratibilidade da madeira em função da densidade aparente. As cinco espécies nativas brasileiras estudadas foram: Cedro Doce (*Cedrela* sp.); Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*). Foram estudados quatro modelos de regressão (exponencial, linear, quadrático e cúbico). Segundo os autores, foi possível estimar a retratibilidade volumétrica e tangencial pelo modelo de regressão quadrático, que apresentou valores de R^2 superiores a 70%.

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 linear, quadrático, logarítmico e geométrico estimaram as propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente. Três propriedades mecânicas determinadas apresentaram boa correlação (coeficientes de determinação superiores a 60% para todos os modelos de regressão adotados): resistência à compressão paralela às fibras, dureza paralela às fibras e dureza normal às fibras.

Almeida *et al.* (2015B) estudaram a correlação linear entre a densidade da madeira seca e o coeficiente de retratibilidade volumétrico de três espécies tropicais: *Cedrella* sp., *Cassia ferruginea* e *Vataireopsis araroba*. Separadamente, nenhuma das espécies apresentou relação linear entre o coeficiente de retratibilidade volumétrico e a densidade da madeira seca. Porém, colocando todas as espécies em um mesmo grupo e impondo um modelo de ajuste linear, foi determinado um p-valor $< 5\%$ e R^2 igual a 52%, não sendo um valor razoável.

Almeida *et al.* (2014d) objetivaram descrever a tenacidade da madeira como função da densidade aparente. Os autores utilizaram madeira de seis espécies (*Tectona grandis*; *Schizolobium amazonicum*; *Pinus oocarpa* Shiede; *Corymbia citriodora*; *Hymenaea* sp.; *Anadenanthera falcata*). Foram utilizados três modelos de regressão para a tenacidade em função da densidade aparente (linear, quadrático e cúbico). Os modelos de regressão para estimativa da tenacidade mostraram ser significativos em todos os casos, implicando ser possível estimar a tenacidade das madeiras avaliadas a partir dos dados da densidade aparente, pois os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 70%, sendo que, para este caso, o modelo de regressão geométrico apresentou $R^2 = 84,70\%$.

Christoforo *et al.* (2014) realizaram o estudo para estimar a tenacidade da madeira em função da densidade aparente e do módulo de ruptura na flexão estática. Para ambas as estimativas foram adotados modelos de regressão linear, quadrático e cúbico. Foram pesquisadas madeiras de 15 espécies tropicais brasileiras classificadas nas diferentes classes de resistência de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997. Os valores de R^2 determinados para os modelos de regressão da tenacidade como função da densidade aparente apresentaram maior acurácia para os modelos de regressão que relacionaram a tenacidade como função do módulo de ruptura na flexão estática. O modelo de regressão quadrático para a tenacidade como função da densidade aparente foi o melhor com valor de R^2 igual a 67,8%.

Machado *et al.* (2014) estudaram a variação da densidade aparente a 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. de acordo com o local de extração da árvore, entre árvores e locais de extração do corpo de prova na árvore. Os autores adotaram modelo de regressão linear para correlacionar a densidade aparente com as propriedades mecânicas. A primeira análise realizada com os dados dos corpos de prova apresentou valores de coeficiente de determinação 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 com os dados de densidade das madeiras apresentaram valores de coeficiente de determinação melhores: 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} ($R^2 = 45\%$).

Dias e Lahr (2004) realizaram estudo com o objetivo de estimar propriedades de resistência e rigidez da madeira por meio da densidade aparente. Foram pesquisados dados de quarenta espécies nativas brasileiras, do grupo das dicotiledôneas (folhosas). Os autores apresentaram correlações em forma de potência para todas as regressões para estimativa das propriedades mecânicas da madeira a partir da densidade aparente, com resultados de R^2 variando entre 0,62773 (relação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras) e 0,92249 (relação entre a densidade aparente e a dureza normal às fibras). A relação entre a densidade aparente e a compressão paralela às fibras apresentou valor de R^2 igual a 0,77104.

2.7 Aplicações da Técnica de Colorimetria na Madeira

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos encontrados na revisão bibliográfica desenvolvida até o momento em que os autores desenvolveram trabalhos utilizando a técnica de colorimetria para estimativa de suas propriedades colorimétricas. Na seção Referências Complementares são apresentadas outras fontes de interesse a respeito das propriedades colorimétricas da madeira.

Teles *et al.* (2016) analisaram a influência do tratamento preservante com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado) na cor e rugosidade de superfícies de Madeiras Tropicais. Foram estudadas madeiras de três espécies tropicais: Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipterix odorata* (Aublet) Willd.). Para realização das análises colorimétricas foi utilizado um colorímetro *Color-Eye-XTH-X-Rite* acoplado a um microcomputador, com iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, sendo realizadas 10 leituras dos parâmetros colorimétricos (L*, a* e b*) nas faces expostas da madeira. Segundo os autores, a cor de todas as madeiras foi alterada de forma significativa pelo tratamento químico com o CCA, ficando escuras e com diminuição de pigmentos vermelhos e amarelos, com tendência ao esverdeamento da superfície.

Meints *et al.* (2016) realizaram a caracterização colorimétrica da madeira de 24 espécies (entre *softwoods* e *hardwoods*) da Áustria utilizando o sistema CIE L*a*b*. Foram realizados testes com espectrofotômetro *Phyma CODEC 400*, com iluminante D65 e ângulo de observação de 2°. As medidas dos parâmetros colorimétricos foram realizadas em dois momentos: com os corpos de prova secos e, após, com teor de umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF), para determinar a mudança na coloração. A menor mudança de coloração, após ser molhada, foi determinada para a madeira de *Populus alba* ($\Delta E = 8,9$) e a maior foi para a madeira de *Pyrus communis* ($\Delta E = 40,6$).

Kerber *et al.* (2016) avaliaram a cor e a rugosidade de três espécies Amazônicas submetidas ao intemperismo natural. As espécies de madeira estudadas foram: Garapeira (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.), Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm) e Angelim-saia (*Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp). Corpos de prova foram expostos ao intemperismo natural, sem contato com o solo, durante 240 dias. Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com o sistema CIE L*a*b*, utilizando espectrofotômetro com resolução de 3 nm, ângulo de observação de 10°, equipada com esfera difusa e com iluminante D65. Todas as madeiras apresentaram escurecimento após o ciclo de exposição ao

intemperismo, devido à redução dos parâmetros colorimétricos, sendo que a madeira de Angelim-saia apresentou a maior variação total de coloração (35%).

Freitas *et al.* (2016) estudaram a influência de tratamento termomecânico nas propriedades colorimétricas e no módulo de elasticidade da madeira de Marupá (*Simarouba amara*). Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$ com um espectrofotômetro *Color Eye XTH-X-Rite*, com iluminante D65 e ângulo de 10°. Após os tratamentos térmicos, a madeira de Marupá apresentou escurecimento com diminuição da luminosidade (L^*) e aumento do valor do módulo de elasticidade.

Paula (2016) estudou o efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades colorimétricas das madeiras de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*) e Sapucaia (*Lecythis pisonis*). Para este estudo a autora utilizou um espectrofotômetro da marca *Color-Eye-XTH-X-Rite* com resolução de 3 nm, integrado com uma esfera de refletância difusa, iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, baseada no sistema CIE $L^*a^*b^*$. Segundo a autora, ambas as espécies de madeira estudadas apresentaram diferenças de cores entre as faces nas direções radial e tangencial, sendo que o tratamento térmico possibilitou a aproximação entre as cores, fornecendo um maior escurecimento e avermelhamento das madeiras. A autora sugere que sejam realizados tratamentos térmicos na madeira, caso a mudança da cor tenha como objetivo a proposta de uniformizar sua cor.

Oliveira (2016) estudou as madeiras de *Simarouba amara* e *Eucalyptus saligna* submetidas ao ataque fúngico de podridão branca e podridão parda. O ensaio para determinação da cor da madeira pós-ataque dos fungos foi realizado utilizando-se o espectrofotocolorímetro *Color-Eye-XTH-X-Rite*, que apresenta uma resolução de 3 nm e possui uma esfera integradora de reflectância difusa, com iluminante D65 (uma lâmpada de xenônio que simula a radiação solar diurna), com um ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente.

Garcia e Marinonio (2016) realizaram pesquisa com o objetivo de avaliar o efeito da densidade e do teor de extrativo na variação da cor da madeira de Teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de plantios de diferentes espaçamentos (5 x 2 m e 6 x 2 m). A densidade da madeira e o teor de extrativos foram determinados de acordo com as normas ASTM D2395-93:1999 e ASTM D1105-96:1999, respectivamente. Foram obtidos discos das toras e realizados cortes perfeitamente orientados nas direções radial e tangencial. As análises colorimétricas foram realizadas com o auxílio do espectrofotômetro portátil *Konica Minolta CM 2600d* de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$. As análises de correlação entre a densidade e as coordenadas de cor

indicaram correlações significativas, tanto para o cerne quanto para o albarno. As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, as correlações entre a densidade e os parâmetros colorimétricos da madeira do cerne e do albarno da madeira de Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (R) para as diferentes orientações das faces.

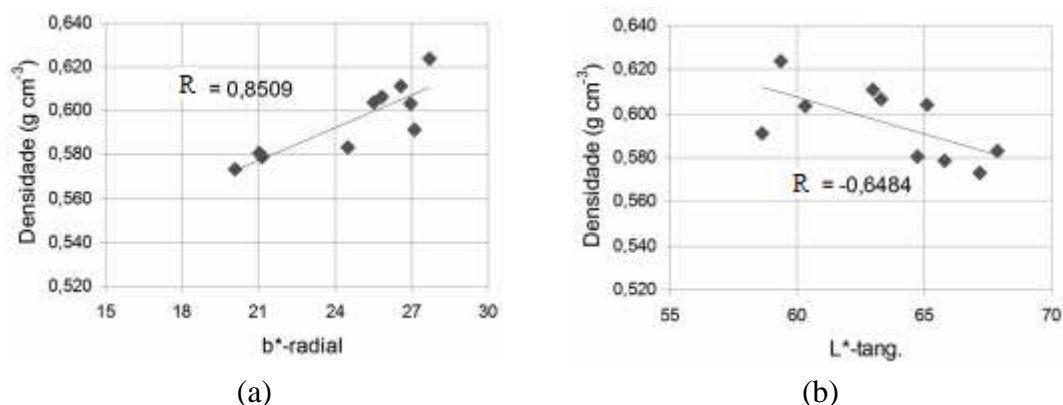


Figura 3. Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira de cerne de Teca: (a) densidade e parâmetros b* na direção radial e (b) L* na direção tangencial.

Fonte: Adaptado de GARCIA; MARINONIO (2016).

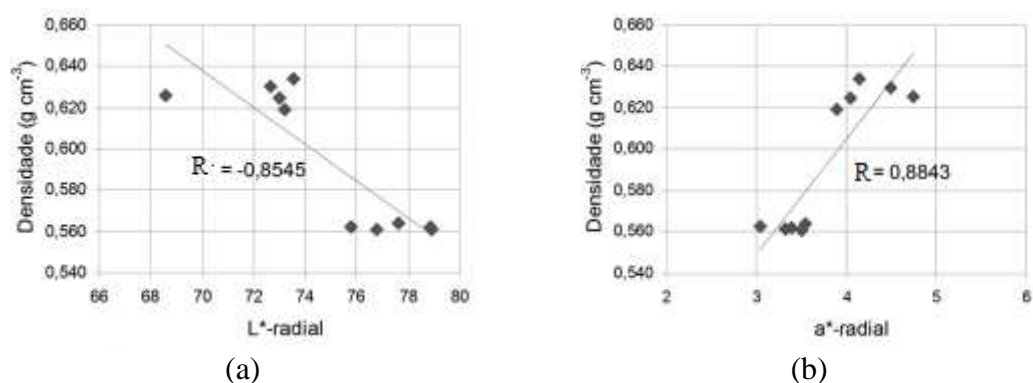


Figura 4. Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira de albarno de Teca: (a) densidade e parâmetros L* na direção radial e (b) a* na direção radial.

Fonte: Adaptado de GARCIA; MARINONIO (2016).

Segundo Garcia e Marinonio (2016), as madeiras mais escuras (menor L*) e com mais pigmento vermelho (a*) apresentaram um maior teor de extrativos. Além disso, as coordenadas de cor variaram de acordo com o plano de corte observado, indicando que a orientação ou a proporção das células afetam a cor da madeira. A Figura 5 apresenta as correlações entre o teor de extrativos e as coordenadas colorimétricas, bem como os valores dos coeficientes de correlação da madeira de Teca.

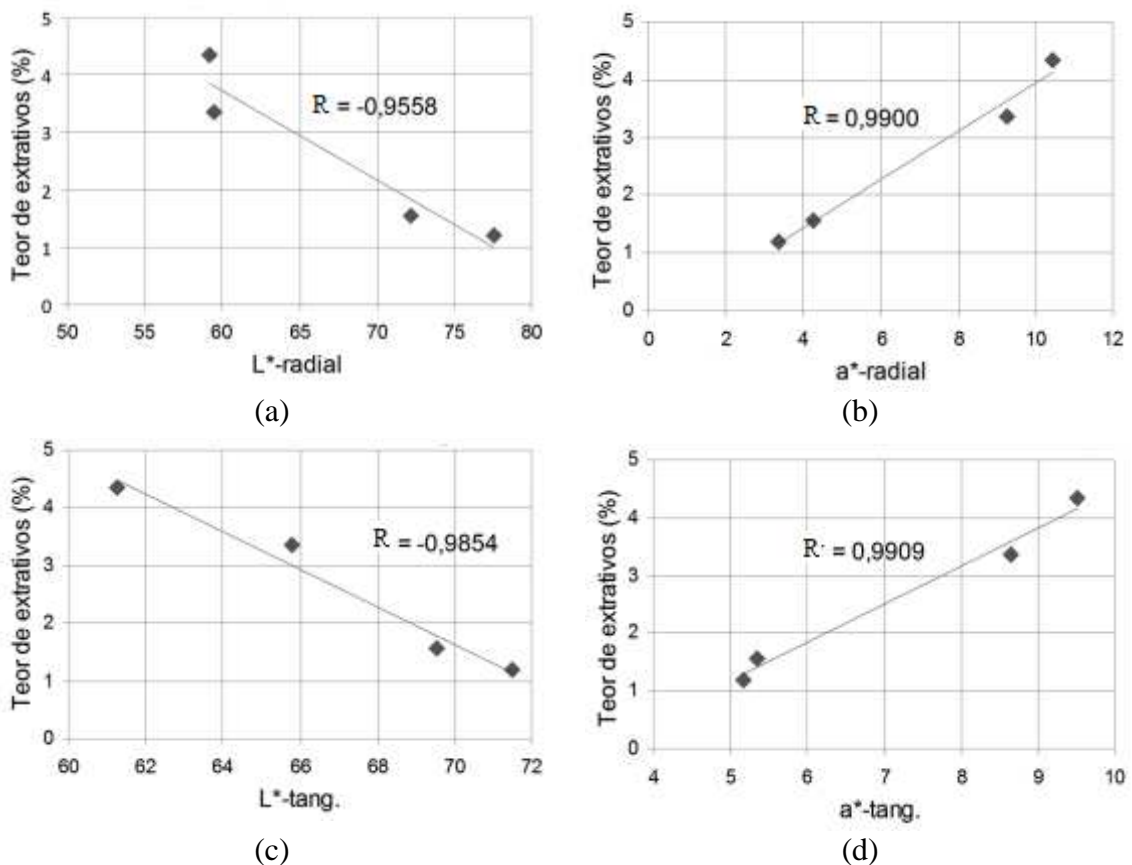


Figura 5. Correlações entre teor de extrativos e parâmetros colorimétricos: (a) L* e (b) a* na direção radial e (c) L* e (d) a* na direção tangencial.

Fonte: Adaptado de GARCIA; MARINONIO (2016).

Silva *et al.* (2015) avaliaram a coloração natural nas direções radial e tangencial da madeira de oito espécies nativas do Estado do Rio Grande do Sul (RS): Grapia (*Apuleia leiocarpa*), Araucária (*Araucaria angustifolia*), Guatambu (*Balfourodendrom riedelianum*), Canjerana (*Cabrlea canjerana*), Cedro (*Cedrela fissilis*), Caúna (*Ilex pseudobuxus*), Açoitacavallo (*Luehea divaricata*) e Cabreúva (*Myrocarpus frondosus*). Os autores determinaram a densidade aparente a 12% de umidade de acordo com a ABNT NBR 7190:1997. A caracterização colorimétrica das oito espécies de madeira foi realizada com um espectrofotocolorímetro com resolução de 3 nm com esfera integradora de reflectância difusa, com iluminante D65 com lâmpada de xenônio e ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente, de acordo com o sistema CIE L*a*b*. Os autores estabeleceram correlações de *Pearson* entre os parâmetros colorimétricos e a densidade aparente ao teor de umidade de 12% da madeira das espécies estudadas (Tabela 20).

Tabela 20. Valores da correlação de *Pearson* entre parâmetros colorimétricos e densidade aparente de madeiras do Rio Grande do Sul.

Espécie - plano	L* vs. $\rho_{ap,12}$	a* vs. $\rho_{ap,12}$	b* vs. $\rho_{ap,12}$
Canjerana - radial	- 0,24 ^{NS}	- 0,59 ^{NS}	- 0,25 ^{NS}
Canjerana - tangencial	0,16 ^{NS}	- 0,73 [*]	- 0,71 [*]
Cabreúva - radial	- 0,93 ^{**}	0,90 ^{**}	- 0,74 [*]
Cabreúva - tangencial	- 0,83 ^{**}	0,71 [*]	- 0,67 [*]
Cedro - radial	- 0,01 ^{NS}	- 0,12 ^{NS}	- 0,78 [*]
Cedro - tangencial	- 0,22 ^{NS}	- 0,84 ^{**}	- 0,76 [*]
Araucária - radial	- 0,78 [*]	0,46 ^{NS}	0,07 ^{NS}
Araucária - tangencial	- 0,82 ^{**}	0,79 [*]	0,31 ^{NS}
Guatambu - radial	0,25 ^{NS}	- 0,28 ^{NS}	- 0,21 ^{NS}
Guatambu - tangencial	0,34 ^{NS}	- 0,10 ^{NS}	- 0,75 [*]
Açoita-cavalo - radial	- 0,69 [*]	- 0,19 ^{NS}	- 0,69 [*]
Açoita-cavalo - tangencial	- 0,03 ^{NS}	- 0,67 [*]	- 0,24 ^{NS}
Grápia - radial	0,40 ^{NS}	-0,31 ^{NS}	- 0,70 [*]
Grápia - tangencial	- 0,08 ^{NS}	0,80 ^{**}	- 0,36 ^{NS}
Caúna - radial	- 0,32 ^{NS}	0,82 ^{**}	0,53 ^{NS}
Caúna - tangencial	0,20 ^{NS}	0,68 ^{**}	0,56 ^{NS}

*significativo a 5% de probabilidade; **significativo a 1% de probabilidade; NS = não significativo.

Fonte: Adaptado de SILVA *et al.*, (2015).

De acordo com Silva *et al.* (2015) as madeiras de Cabreúva (radial e tangencial), Araucária (radial e tangencial) e Açoita-cavalo (tangencial) apresentaram correlações negativas entre a variável colorimétrica a* e a densidade aparente, indicando redução na luminosidade com o aumento da densidade aparente (Tabela 20). A coordenada a* apresentou melhores correlações com a densidade específica, já que pelo menos para uma das seções estudadas foi verificada correlação significativa (exceto para a madeira de Guatambu).

Okino *et al.* (2015) desenvolveram pesquisa para estudar os parâmetros colorimétricos de acordo com o sistema CIE L*a*b*, de três espécies de madeira conhecidas vulgarmente como Tauri (*Couratari oblongifolia* Ducke & R.Knuth.; *Couratari guianensis* Aublet.; *Couratari stellata* A.C.Smith), submetidas a ensaios acelerados de biodeterioração com diferentes tipos de fungos (dois de podridão-parda e dois de podridão-branca). Os parâmetros colorimétricos foram determinados utilizando-se um espectrofotômetro *Datacolor International Microflash 200D*, equipado com iluminante D65 e luz de xenônio. Todas as espécies de madeira atacadas pelos fungos ficaram mais escuras e mais vermelhas em relação às amostras de controle. A variação média da coloração das três espécies estudadas foi de 29,5.

Barčík *et al.* (2015) avaliaram o efeito de diferentes temperaturas em tratamentos térmicos na mudança de cor da madeira de *Quercus robur* L. As temperaturas máximas nos tratamentos térmicos foram de 160, 180, 210 e 240°C. Para determinação dos parâmetros colorimétricos foi utilizado o espectrofotômetro *Konica Minolta CM-600D*, com ângulo de observação de 10° e iluminante D65. Segundo os autores, a luminosidade da madeira diminuiu com o aumento da temperatura do tratamento térmico. De maneira geral, o aumento da temperatura do tratamento térmico também fez aumentar a diferença total da cor da madeira.

Yang *et al.* (2015) determinaram as mudanças na coloração e nas propriedades químicas da madeira de *Betula alnoides* submetida a tratamento térmico à vácuo. Foram determinados os teores de celulose, hemiceluloses e lignina. Os parâmetros colorimétricos foram determinados pelo sistema CIE L*a*b* utilizando o equipamento *SC-80C*, *Beijing Kangguang Instruments Co.*. A madeira de *Betula alnoides* apresentou cor clara antes do tratamento e, após o tratamento térmico, à 200°C por 4 horas e vácuo, apresentou coloração marrom escura. Os autores correlacionaram (modelo de correlação linear) a diferença de coloração (ΔE) e a diferença de luminosidade (ΔL^*) com a diferença dos teores de celulose, hemicelulose e lignina. Todas as correlações lineares apresentaram coeficiente de correlação (R) acima de 90%.

Barros *et al.* (2014) caracterizaram as propriedades colorimétricas das madeiras de três espécies da Amazônia: Breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J. F. Macbr), Tauari-vermelho (*Cariniana micranta* Ducke) e Pequiarana (*Caryocar glabrum*). Foram analisadas a variabilidade da cor das madeiras nas seções radial, tangencial e transversal. Para determinação da cor da madeira utilizou-se o método CIE L*a*b*, no espectrofotômetro *Konica Minolta CM-5*, acoplado a um computador com programa *SpectraMagic NX*, com iluminante D65, lâmpada de xenônio difusa que simula a radiação solar diurna e ângulo de observação de 10°. Segundo os autores, as espécies Breu-vermelho e Tauri-vermelho são caracterizadas pela pigmentação vermelha, e a Pequiarana pela pigmentação amarela. As espécies estudadas apresentam diferença de cor entre as seções anatômicas. Os autores ressaltam a utilização da colorimetria quantitativa para o conhecimento da cor da madeira, pois, revelou-se uma técnica de fácil aplicação, podendo ser empregada na sua classificação, a partir do desdobro da tora, na qualificação de peças e na formação de banco de dados.

González *et al.* (2014) estudaram o efeito do processo de secagem (ao ar ou em estufa) nas propriedades colorimétricas de *Simarouba amara*. Após passar pelos processos de secagem, os parâmetros colorimétricos foram determinados utilizando espectrofotômetro *Datacolor*

International Microflash. Segundo os autores, o efeito do processo de secagem nas propriedades colorimétricas depende da direção radial ou tangencial da madeira. De maneira geral, a *Simarouba amara* apresenta cor mais clara quando seca ao ar comparada à madeira seca em estufa.

Lopes *et al.* (2014) estudaram a alteração da cor de Teca (*Tectona grandis* L. f.) após tratamento térmico proveniente de plantios de diferentes espaçamentos (4 x 2 m; 5 x 2 m; 6 x 2 m). O tratamento térmico ocorreu em forno mufla a 180 e 200 °C. As análises colorimétricas foram realizadas de acordo com o sistema CIE L*a*b*, utilizando o espectrofotômetro portátil *CM 2600D versão 1.41*, da *Konica Minolta Sensing Inc.* Após a coleta de dados dos parâmetros colorimétricos antes e após o tratamento térmico, foram calculadas as variações de cada coordenada após o tratamento e a variação total de cor. Os resultados determinados mostram que o espaçamento afetou a cor original da Teca antes e após o tratamento térmico. Além disso, o aumento de temperatura intensificou a alteração de cor.

Santos *et al.* (2014) realizaram pesquisa para determinar o efeito do tratamento térmico nas propriedades de Cedroarana (*Cedrelinga catanaeformis*) e Cedro Marinheiro (*Guarea trichilioides*). Os tratamentos térmicos ocorreram em forno elétrico com temperaturas máximas de 160°C e 220°C. Os dados relativos aos parâmetros colorimétricos foram coletados nas amostras sem tratamento e com tratamento térmico, com espectrofotômetro *Konica Minolta CM-2500D*, com iluminante D65 e ângulo de observação de 10°, de acordo com o sistema CIE L*a*b*. Para ambos os tratamentos térmicos, as madeiras apresentaram coloração escura. Para as condições experimentais, o Cedro Marinheiro apresentou maior mudança de cor, comparada com a Cedroarana. Segundo os autores, a mudança de cor da madeira pode trazer competitividade para espécies menos utilizadas pelo mercado.

Teles (2014) estudou a mudança de coloração da madeira tratada com CCA e sem tratamento de três espécies da Amazônia (Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipterix odorata* (Aubl.) Willd)) submetidas ao intemperismo artificial. Os parâmetros colorimétricos utilizados para determinação da mudança de cor foram estimados de acordo com o sistema CIE L*a*b* utilizando um espectrofotocolorímetro *Color-Eye-XTH-X-Rite*, com iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente. Foram utilizados modelos de regressão na tentativa de propor equações para estimativa da diferença total da cor em função do tempo de exposição ao intemperismo para as madeiras tratadas com preservante e sem tratamento (Tabela 21). Os valores obtidos para o coeficiente de determinação (R²) foram muito

bons, sendo o menor deles igual a 87% (modelo de regressão quadrático para Marupá sem tratamento químico).

Tabela 21. Correlações entre a diferença de coloração e tempo de intemperismo para madeiras de espécies Amazônicas com e sem tratamento químico com CCA.

Madeira sem Tratamento		
Espécie	Equação	R² (%)
Marupá	$\Delta E = 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0359 \cdot t + 27,418$	87
Tauari	$\Delta E = 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0315 \cdot t + 21,779$	97
Cumaru	$\Delta E = -0,0038 \cdot t + 8,088$	95
Madeira Tratada com CCA		
Espécie	Equação	R² (%)
Marupá	$\Delta E = 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,018 \cdot t + 15,34$	99
Tauari	$\Delta E = 7 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,0144 \cdot t + 13,108$	97
Cumaru	$\Delta E = -0,0038 \cdot t + 8,0459$	95

t = tempo de exposição da madeira ao intemperismo.

Fonte: Adaptado de TELES (2014).

Amorim *et al.* (2013) realizaram a caracterização tecnológica das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* utilizando técnica da colorimetria. Foram determinadas propriedades físicas da madeira (densidade aparente, retratibilidade e parâmetros colorimétricos) e propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência em ensaios de flexão estática). Para determinação das propriedades físicas densidade aparente e retratibilidade foram utilizados os métodos recomendados pelas normas COPANT 461:1972 e COPANT 462:1972, respectivamente.

Para a realização dos ensaios para determinação das propriedades de resistência e rigidez em ensaios de flexão, os autores adotaram os métodos da norma COPANT 30:1-006:1972. A colorimetria foi realizada de acordo com o sistema CIE L*a*b* utilizando um espectrofotômetro *Datacolor Microflash 200D*, com iluminante D65 e ângulo de 10°C, em temperatura ambiente. Os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas foram correlacionados com os resultados dos parâmetros colorimétricos por *Pearson* à 1%. Os autores calcularam regressões para ajuste de equações, para estimativa de propriedades físicas e mecânicas das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função dos parâmetros colorimétricos. A Figura 6 apresenta a análise de regressão da densidade das madeiras estudadas em função dos parâmetros luminosidade (L*) e pigmento vermelho (a*).

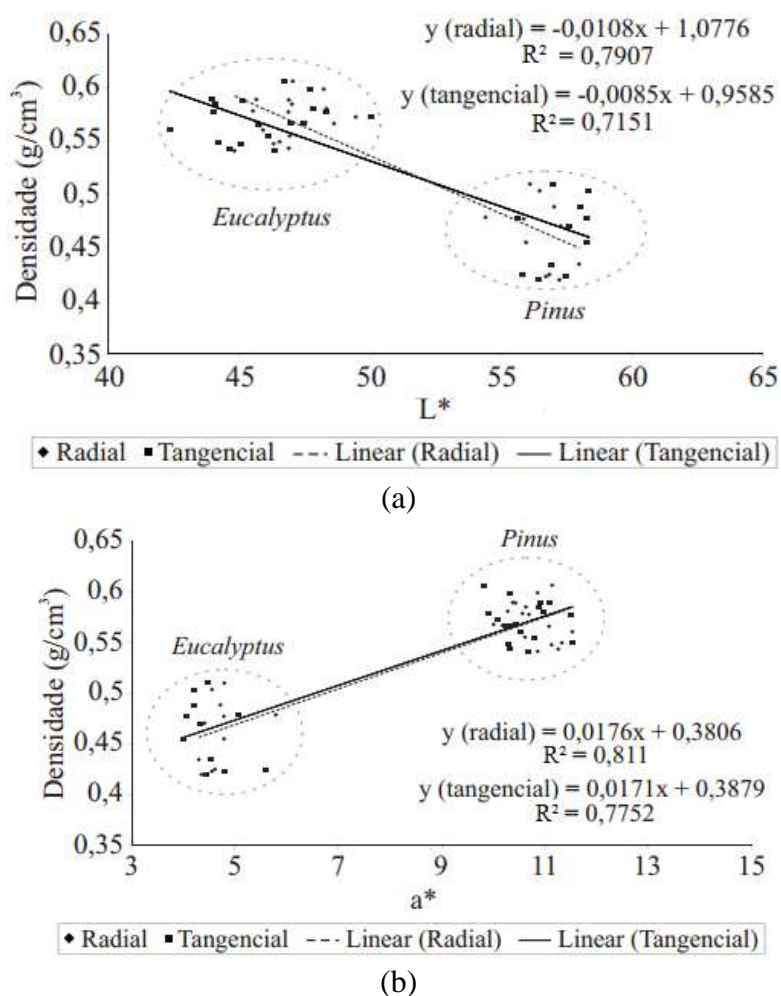


Figura 6. Regressão linear entre densidade da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e os parâmetros colorimétricos: (a) luminosidade (L*) e (b) tonalidade a*.

Fonte: Adaptado de AMORIM *et al.*, (2013).

A Tabela 22 apresenta os valores dos coeficientes de correlação entre as propriedades das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e os parâmetros colorimétricos.

Tabela 22. Valores dos coeficientes de correlação entre as propriedades das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e os parâmetros colorimétricos.

Propriedades	Valores de Correlações		
	L*	a*	b*
Densidade	-0,70	0,76	-0,77
Retratibilidade Volumétrica	-0,16	0,13	-0,08
Anisotropia	0,61	-0,64	0,68
E _M	-0,04	0,01	-0,05
f _M	-0,59	0,53	-0,6

FONTE: Adaptado de AMORIM *et al.*, (2013).

Segundo Amorim *et al.* (2013), não foram encontradas correlações significativas entre a retratibilidade volumétrica e os parâmetros colorimétrico e entre o módulo de elasticidade na flexão estática e os parâmetros colorimétricos.

As análises das correlações para determinação do módulo de ruptura na flexão estática foram significativas, sendo o modelo de regressão quadrático que considera a luminosidade em sua estimativa, o que melhor correlaciona as duas propriedades (Equação 18), apresentando $R^2 = 40\%$.

$$f_M = 0,2079 \cdot L^{*2} - 22,78 \cdot L^* + 712,76 \quad (18)$$

Stangerlin *et al.* (2013b) utilizaram a colorimetria na caracterização da biodeterioração das madeiras de Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), Jequitibá (*Cariniana micranta* Ducke) e Cumaru (*Dipterix odorata* (Aubl.) Willd) submetidas ao ataque de fungos de podridão branca e podridão parda. Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$, utilizando um espectrofotocolorímetro com resolução de 3 nm e dotado de uma esfera integradora de refletância difusa. Utilizou-se iluminante D65, composto de uma lâmpada de xenônio, o qual simula a radiação solar diurna, com um ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente. Os autores também determinaram modelos de regressão para predição da perda de massa da madeira submetida ao ataque fúngico em função dos parâmetros colorimétricos das madeiras deterioradas pelos fungos apodrecedores, sendo que os modelos de regressão selecionados foram aqueles que apresentaram os maiores valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{Aj}). Os modelos de regressão testados foram: linear, quadrático, inverso do parâmetro colorimétrico, raiz quadrada do parâmetro colorimétrico e logarítmico (Tabela 23). Segundo os autores, os parâmetros colorimétricos que forneceram as melhores predições da resistência natural aos fungos de podridão branca e parda foram obtidos dos parâmetros b^* e L^* , respectivamente.

Tabela 23. Modelos de regressão entre parâmetros colorimétricos da madeira biodeteriorada e a perda de massa.

Madeira x Fungo	Equação de Regressão	R ² Aj (%)
Marupá x Podridão Branca	$P_M = 255,667 - 21,570 \cdot b^* + 0,451 \cdot b^{*2}$	85
	$P_M = -1,219 - 1,494 \cdot \Delta E + 0,416 \cdot \Delta E^2$	87
Marupá x Podridão Parda	$\sqrt{P_M} = 16,102 - 0,228 \cdot L^*$	97
	$\sqrt{P_M} = 0,358 + 0,226 \cdot \Delta E$	97
Jequitibá x Podridão Branca	$P_M = -69,079 + 3,780 \cdot b^*$	76
	$P_M = -2,111 - 0,122 \cdot \Delta E + 0,116 \cdot \Delta E^2$	88
Jequitibá x Podridão Parda	$P_M = 186,015 - 6,939 \cdot L^* + 0,065 \cdot L^{*2}$	96
	$P_M = -1,226 - 0,141 \cdot \Delta E + 0,077 \cdot \Delta E^2$	95
Cumarú x Podridão Branca	$P_M = -18,602 + 6,381 \cdot \ln(b^*)$	62
Cumarú x Podridão Parda	$P_M = 24,540 - 1,171 \cdot L^* + 0,014 \cdot L^{*2}$	85
	$P_M = 0,663 - 0,155 \cdot \Delta E + 0,012 \cdot \Delta E^{*2}$	87

Fonte: Adaptado de STANGERLIN *et al.*, (2013).

Atayde *et al.* (2011) utilizando o sistema CIE L*a*b* avaliaram as características colorimétricas das seções anatômicas (transversal, tangencial e radial) da madeira de Muirapiranga (*Brosimum* sp.). Foram realizadas 34 medições dos parâmetros colorimétricos em cada uma das seções anatômicas. Para determinação da cor da madeira utilizou-se o espectrofotômetro *Datacolor International Microflash-Model 200*, com iluminante D65, lâmpada de xenônio que simula a radiação solar diurna e ângulo do observador de 10°. A pesquisa revelou diferenças significativas entre os parâmetros colorimétricos nas três seções estudadas. Em relação à refletância, observou-se que a seção transversal refletiu menos luz que as seções tangencial e radial. Conforme o plano anatômico da madeira, pode-se obter madeiras com diferentes tons de vermelho, permitindo a formação de lotes de madeira com a mesma tonalidade.

Costa *et al.* (2011) determinaram a cor da madeira de Marupá (*Simarouba amara*) e Andiroba (*Carapa guianensis*) antes e após serem submetidas ao ataque de fungos de podridão branca e podridão parda. Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com o sistema CIE L*a*b*, utilizando um espectrofotocolorímetro *Datacolor International Microflash, modelo 200D*, com iluminante D65, uma lâmpada de xenônio que simula a radiação solar diurna, com um ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente. Ambas as espécies de madeira estudadas escureceram após serem submetidas ao ataque fúngico de podridão parda.

Gonzalez *et al.* (2010) estudaram a diferença na coloração da madeira de Freijó (*Cordia goeldiana* Huber), com e sem tratamento superficial, submetidas ao intemperismo artificial

(simulando um ano de utilização em escritório). As amostras foram tratadas com produtos de acabamento (*polisten* e seladora). As medições dos parâmetros colorimétricos foram realizadas em um espectrofotocolorímetro *Datacolor Microflash 200D* conectado a um microcomputador, com iluminante D65, e ângulo *standard* de 10°, de acordo com o sistema CIE L*a*b*. A madeira de Freijó foi caracterizada pela coordenada b* (pigmentação amarela) e pela luminosidade (L*), entretanto, o envelhecimento da madeira, em seu estado natural, é detectado sobretudo pela coordenada a*. Segundo os autores os produtos de acabamento escureceram a madeira, porém, o *polisten*, após aplicado à madeira, conservou a cor para os períodos de envelhecimentos simulados na pesquisa.

Souza *et al.* (2010) estudaram a resistência natural e alteração da cor da madeira de Jacarandá Caviúna (*Machaerium scleroxylon* Tul.) após a exposição a fungos de podridão branca e parda. Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com o Sistema CIE L*a*b* pelo espectrofotômetro *Datacolor International Microflash 200* antes e depois da biodeterioração de 12 semanas. Foram consideradas apreciáveis as mudanças na cor da madeira após o ciclo de biodeterioração, com alterações nos parâmetros colorimétricos.

2.8 Conclusões da Revisão Bibliográfica

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, algumas conclusões podem ser apresentadas:

Não existe na literatura consultada, pesquisas que correlacionem propriedades mecânicas de madeiras tropicais com seus parâmetros colorimétricos determinados a partir do sistema CIE L*a*b*;

A estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira é importante para o estudo deste material, pois assim é possível conhecer as propriedades da madeira sem a necessidade da realização de ensaios destrutivos e grandes instalações em laboratórios;

As técnicas não destrutivas (vibração transversal, vibração longitudinal e ultrassom) são importantes para a estimativa de propriedades da madeira, apresentando valores de coeficientes de determinação satisfatórios em correlações com propriedades mecânicas da madeira determinados em ensaios destrutivos;

A cor, como demais propriedades organolépticas, apresenta subjetividade na sua determinação. Desta maneira, o sistema CIE L*a*b*, transforma em números os parâmetros

colorimétricos, possibilitando comparação entre cores. Os parâmetros colorimétricos são a luminosidade (L^*), escala vermelho/verde (a^*) e escala amarelo/azul (b^*);

A cor da madeira é uma propriedade importante, já que é possível a partir dela, em uma análise macroscópica, verificar desvios de grã, ataques de organismos xilófagos e degradação por intemperismo;

A utilização da madeira para fins estéticos na construção civil também está relacionada à sua coloração. Pesquisa com a finalidade de escurecimento da madeira para sua utilização como pisos são desenvolvidas com a finalidade de proporcionar mercado a madeiras pouco utilizadas para este fim;

Pesquisas para determinação dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* estão sendo realizadas para determinação dos efeitos de intemperismo (artificial ou natural), da ação de organismos xilófagos na madeira e na utilização de produtos que protegem a madeira destes tipos de degradação;

Alguns fatores influenciam a cor da madeira, entre eles: o ataque de organismos xilófagos, como, por exemplos, fungos de podridão parda e podridão branca; o tratamento químico com preservantes ao ataque de organismos xilófagos; tratamentos termomecânicos; intemperismo; composição química, principalmente os relacionados com o teor de extrativos e; anatomia da madeira (seções radial e tangencial; cerne e alburno).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados nesta pesquisa para estabelecer os modelos de regressão que correlacionem algumas propriedades mecânicas (f_{c0} , f_M , E_M e f_{H90}) de madeiras tropicais com seus parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) e densidade aparente (para o conjunto considerando todas as espécies).

3.1 Materiais

Para a realização desta pesquisa foram utilizados 5 lotes de madeira de diferentes espécies tropicais brasileiras adquiridas em empresas do setor, localizadas na região da cidade de São Carlos (SP): Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianensis* Aubl.) e Roxinho (*Peltogyne* sp.). Foram escolhidas estas espécies visando abranger todas as classes de resistência apresentadas pela norma ABNT NBR 7190:1997. O teor de umidade das madeiras estudadas foi da ordem de 12%, de acordo com o estabelecido pela norma ABNT NBR 7190:1997.

A confecção dos corpos de prova nas dimensões recomendadas pela norma foi realizada na marcenaria do LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), laboratório que já possui os equipamentos necessários para esta atividade. Os ensaios para determinação das propriedades mecânicas foram realizados na máquina universal de ensaios AMSLER, que possui capacidade de carga de 25 toneladas e está instalada no LaMEM.

3.2 Métodos

3.2.1 Confecção dos corpos de prova

A partir do lote homogêneo de madeira de cada uma das espécies, foram confeccionados 19 corpos de prova para ensaios de flexão estática (devido ao desconhecimento da relação entre parâmetros colorimétricos e propriedades mecânicas, decidiu-se aumentar a amostragem), sendo necessário um corpo de prova para estimativa da força e ruptura, de acordo com o procedimento padronizado pela ABNT NBR 7190:1997.

Com a força de ruptura na flexão estimada, foi possível realizar os ciclos de carregamento para determinação do módulo de elasticidade (E_M) e do valor do módulo de ruptura (f_M) para os demais corpos de prova.

Com o objetivo de diminuir a variabilidade na determinação das propriedades da madeira, das frações não danificadas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de flexão estática, foi possível a confecção dos corpos de prova para ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e de dureza normal às fibras (f_{H90}). A densidade aparente ($\rho_{ap,12}$) da madeira foi determinada a partir dos dados dos corpos de prova de flexão estática (massa e volume).

3.2.2 Determinação da resistência característica da madeira

De acordo com a ABNT NBR 7190:1997, de um lote de madeira considerado homogêneo, devem ser retirados, no mínimo, 12 corpos de prova para determinação da resistência da madeira à alguma solicitação (por exemplo, resistência da madeira à compressão paralela às fibras).

Após a determinação da resistência para n corpos de prova, os resultados devem ser colocados em ordem crescente ($f_1 < f_2 < f_3 < f_n$) para o cálculo da resistência característica da madeira (f_k) (Equação 19). De acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 (Anexo F “Esclarecimentos sobre a calibração desta Norma”; Item F.7 “Resistências características da madeira”), o valor da resistência característica não pode ser inferior a f_1 e a 70% do valor médio de resistência.

$$f_k = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} - f_{(n/2)} \right) \cdot 1,1 \quad (19)$$

3.2.3 Ensaio de flexão estática

Os ensaios de flexão estática ocorreram 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 115 cm (Figura 7).



Figura 7. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de flexão estática.

Fonte: Do autor.

Os corpos de prova foram vinculados em dois apoios, de modo que o vão livre (L) apresentasse 105 cm de comprimento, atendendo a exigência da norma ABNT NBR 7190:1997 (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 crescente de forma concentrada no meio do vão por meio de um cutelo acoplado ao atuador, de forma monotônica, à taxa de 10 MPa/min, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997.

O valor do módulo de ruptura (f_M) foi obtido por meio do quociente entre o máximo momento aplicado ao corpo de prova ($M_{máx}$) e o módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo de prova (W_e) (Equação 20). Para determinação de W_e considera-se que o corpo de prova apresenta seção transversal com largura (b) e altura (h) (Equação 21).

$$f_M = M_{máx}/W_e \quad (20)$$

$$W_e = (b \cdot h^2)/6 \quad (21)$$

O módulo de elasticidade da madeira em ensaio de flexão estática (E_M) (Equação 22) foi determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento. Foram realizados dois ciclos até 50% da força de ruptura estimada na flexão. No terceiro ciclo de carregamento, para as forças correspondentes a 10% ($F_{M10\%}$) e 50% ($F_{M50\%}$) da força de ruptura, foram determinados, os respectivos deslocamentos ($v_{10\%}$, $v_{50\%}$) no meio do vão com o uso de um relógio comparador.

$$E_M = \frac{(F_{M50\%} - F_{M10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (22)$$

3.2.4 Ensaio de compressão paralela às fibras

Os ensaios de compressão paralela às fibras ocorreram 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 (Figura 8).



Figura 8. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de compressão paralela às fibras.

Fonte: Do autor.

Os ensaios de compressão paralela às fibras ocorreram com carregamento crescente, de forma monotônica, à taxa de 10 MPa/min, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997, até a ruptura do corpo de prova.

A resistência da madeira à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é fornecida pela máxima força de compressão (F_{c0}) que pode atuar na direção paralela às fibras de um corpo de prova com seção transversal quadrada (A) (Equação 23).

$$f_{c0} = F_{c0}/A \quad (23)$$

3.2.5 Ensaio de dureza normal às fibras

Os ensaios de dureza normal às fibras ocorreram 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 (Figura 9).



Figura 9. Corpo de prova de madeira Caixeta durante o ensaio de dureza normal às fibras.
Fonte: Do autor.

A dureza (f_H) é dada pela razão entre a força necessária para produzir a penetração de uma semi-esfera de aço ($F_{m\acute{a}x,p}$) com área diametral de 1 cm^2 (A_{sd}) (Equação 24), por esta razão, a dureza é apresentada em unidades de força. De acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997, a dureza pode ser determinada nas direções paralela (f_{H0}) e normal (f_{H90}) em relação às fibras da madeira.

$$f_H = F_{m\acute{a}x,p}/A_{sd} \quad (24)$$

Para este trabalho foram realizados ensaios para determinação da dureza na direção normal às fibras, propriedade de interesse para a utilização da madeira na construção civil como parte componente da edificação, por exemplos, pisos, batentes, portas, entre outras finalidades.

3.2.6 Determinação da densidade aparente

A densidade aparente é a massa específica convencional, definida pela razão entre a massa (m_{12}) e o volume (V_{12}) dos corpos de prova de madeira com teor de umidade de 12% (Equação 25). A densidade aparente da madeira foi estimada a partir do corpo de prova de flexão estática. As dimensões da seção transversal foram determinadas com paquímetro (precisão de 0,1 mm) e a massa em balança analítica (precisão de 0,01 g).

$$\rho_{ap,12} = m_{12}/V_{12} \quad (25)$$

3.2.7 Determinação dos parâmetros colorimétricos

Os ensaios para estimativa dos parâmetros colorimétricos foram realizados no Departamento de Engenharia Civil (DECiv), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) utilizando um colorímetro portátil da marca *Konica Minolta* modelo CR-400 baseado no sistema CIE $L^*a^*b^*$ (Figura 10). O colorímetro foi cedido pela empresa *Partículas Tecnologia e Desenvolvimento em Materiais Lignocelulósicos LTDA*.



Figura 10. Colorímetro portátil *Konica Minolta*.

Fonte: Do autor.

De acordo com a norma ASTM D2244:2011, não existe necessidade da confecção de corpos de prova específicos para determinação dos parâmetros colorimétricos. Desta maneira, foi realizada medição dos parâmetros colorimétricos em cada um dos corpos de prova preparados para o ensaio de flexão estática, fornecendo para cada um deles os valores dos parâmetros L^* , a^* e b^* .

A utilização do colorímetro portátil para a realização da medição dos parâmetros colorimétricos facilita a sua determinação e, para tornar o procedimento ainda mais fácil e rápido, optou-se pela realização de apenas uma medição em cada corpo de prova, simulando a obtenção dos parâmetros colorimétricos no estoque de uma serraria, por exemplo.

3.2.8 Modelos de regressão

Por não se conhecer a relação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades estimadas para as madeiras estudadas nesta pesquisa (E_M , f_M , f_{c0} , f_{H90}), foi adotado um modelo de regressão multivariável quadrático completo, pois, este permite contabilizar o efeito de cada variável, do produto entre elas e de ambas elevadas ao quadrado.

Para cada uma das espécies foram gerados modelos para estimar o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura na flexão estática (f_M), da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e da dureza normal às fibras (f_{H90}). Neste caso, como variáveis independentes foram adotados apenas os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* (Equação 26). Na Equação 26, Y é igual aos valores das propriedades de resistência e de rigidez avaliadas, α_i são os coeficientes ajustados do método dos mínimos quadrados e ε o erro residual.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot L^* + \alpha_2 \cdot a^* + \alpha_3 \cdot b^* + \alpha_4 \cdot L^* \cdot a^* + \alpha_5 \cdot L^* \cdot b^* + \alpha_6 \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_7 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_8 \cdot L^{*2} + \alpha_9 \cdot a^{*2} + \alpha_{10} \cdot b^{*2} + \varepsilon \quad (26)$$

Também foram gerados modelos de regressão para estimativa das propriedades mecânicas utilizando o conjunto de madeira das 5 espécies estudadas nesta pesquisa. Neste caso, além dos parâmetros colorimétricos, também foi adicionada aos modelos de regressão, como variável independente, a densidade aparente da madeira com teor de umidade da ordem de 12% ($\rho_{ap,12}$) (Equação 27).

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot L^* + \alpha_2 \cdot a^* + \alpha_3 \cdot b^* + \alpha_4 \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_5 \cdot L^* \cdot a^* + \alpha_6 \cdot L^* \cdot b^* + \alpha_7 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_8 \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_9 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_{10} \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_{11} \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_{12} \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_{13} \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_{14} \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} \cdot L^* + \alpha_{15} \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + \alpha_{16} \cdot L^{*2} + \alpha_{17} \cdot a^{*2} + \alpha_{18} \cdot b^{*2} + \alpha_{19} \cdot \rho_{ap,12}^2 + \varepsilon \quad (27)$$

A inclusão da densidade aparente como uma variável independente nos modelos de regressão para o conjunto de espécies foi importante para levar em consideração a variabilidade desta importante propriedade das madeiras, que pode ser encontrada entre as diferentes espécies tropicais.

Nas Equações 26 e 27, os modelos de regressão foram construídos e testados com o auxílio do *software* Mathcad® 14, e a qualidade dos ajustes foi obtida pelo coeficiente de determinação (R^2), em que quanto mais próximo de 1 (ou de 100%) melhor ou mais preciso é o ajuste obtido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e as discussões das propriedades mecânicas e dos parâmetros colorimétricos obtidos para as madeiras estudadas nesta pesquisa. Além disso, também são apresentadas as equações obtidas dos modelos de regressão para estimativa das propriedades de resistência e de rigidez para cada uma das espécies, bem como o resultado do conjunto, considerando a densidade aparente das madeiras como variável independente.

4.1 Resultados Obtidos para Caixeta

Além da obtenção do valor médio (x_m), do coeficiente de variação (CV), do menor (Mín) e do maior (Máx) valor por propriedade, valores do intervalo de confiança (IC) para a média também foram obtidos, ao nível de 5% de significância, possibilitando estimar o intervalo de valores que contém a média das populações baseadas nos valores amostrais obtidos (Tabela 24).

Tabela 24. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Caixeta.

Propriedades	x_m	CV (%)	Mín	Máx	IC	
					Inf	Sup
E_M (MPa)	7114	7,13	6392	8614	6821	7366
f_M (MPa)	63	7,98	45	68	60,12	65,19
f_{c0} (MPa)	32	4,26	30	35	31,64	33,02
f_{H90} (N/cm ²)	2188,18	7,42	1912,95	2403,45	2107,40	2268,90
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,41	2,44	0,39	0,43	0,40	0,41
L^*	78,89	1,06	77,03	80,72	78,47	79,31
a^*	1,45	20,23	1,08	2,03	1,30	1,59
b^*	18,66	3,68	17,42	19,91	18,32	19,00

Inf = limite inferior do intervalo de confiança; Sup = limite superior do intervalo de confiança.

Fonte: Do autor.

O coeficiente de variação na determinação da resistência à compressão paralela às fibras foi igual a 4,26%, menor que os 28% para esforços tangenciais, adotado pela ABNT NBR 7190:1997. O coeficiente de variação na determinação da dureza normal às fibras foi igual a 7,42%, menor que os 18% adotados para esforços normais, adotado pela ABNT NBR 7190:1997.

Para a determinação da resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi utilizada a Equação 19. O lote de madeira de Caixeta utilizado neste estudo apresentou $f_{c0,k}$ igual a 23 MPa, sendo categorizada na classe de resistência D20 das dicotiledôneas (folhosas).

O lote de madeira de Caixeta estudado apresentou valores médios de resistência à compressão paralela às fibras e de módulo de ruptura à flexão estática próximos aos apresentados pelo IPT (2017) ($f_{c0} = 33$ MPa; $f_M = 64$ MPa), para a madeira com teor de umidade da ordem de 12%.

O valor médio de dureza normal às fibras para a madeira de Caixeta, à 12% de umidade, apresentou valor de 2188,18 N/cm², diferente do valor apresentado pelo IPT (2017) que é igual a 1402 N/cm². Isto pode estar relacionado ao baixo coeficiente de variabilidade encontrado para f_{H90} (CV = 7,42%) para o lote de madeira de Caixeta utilizado nesta pesquisa.

Freitas (2015) determinou para as propriedades mecânicas E_M , f_M , f_{c0} e f_{H90} valores médios iguais a 7738,49, 72,17, 39,19 MPa e 2511,14 N/cm², respectivamente, todos superiores aos determinados nesta pesquisa, porém, devido à variabilidade do material madeira, os resultados podem ser considerados aceitáveis.

A densidade aparente da madeira Caixeta determinada neste estudo ($\rho_{ap,12} = 0,41$ g/cm³) ficou próximo ao determinado pelo IPT:2017 ($\rho_{ap,12} = 0,44$ g/cm³) e por Freitas (2015) ($\rho_{ap,12} = 0,44$ g/cm³).

O valor médio determinado para o parâmetro L^* (0 implica cor preta e 100 cor branca) neste estudo foi igual a 78,89, próximo ao determinado por Gonzalez *et al.* (2014), tendendo a uma coloração esbranquiçada. A variabilidade anatômica da madeira pode responder valores diferentes para a luminosidade, já que este fator também pode influenciar a cor da madeira.

O valor médio para o parâmetro a^* (60 implica cor vermelho e -60 implica cor verde) foi mais baixo que o determinado pelos demais autores ($a^* = 1,45$). Desta maneira, os valores determinados para as cores no eixo vermelho/verde parecem não apresentar muita influência na cor da madeira de Caixeta.

O valor do parâmetro b^* (60 implica cor amarelo e -60 implica cor azul) (eixo amarelo/azul) apresentou valor igual a 18,66, próximo ao determinado pelos demais autores que estudaram a madeira de *Simarouba amara*, tendendo a uma coloração amarela.

Barreto e Pastore (2009) e Freitas *et al.* (2016) classificam a madeira de Caixeta de acordo com os parâmetros colorimétricos como Branca-Amarelada, igual às características sensoriais apresentadas para a madeira de Marupá pelo IPT (2017), cerne e alburno indistintos pela cor, esbranquiçado a levemente amarelado.

Os modelos de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para cada propriedade estimada a partir dos parâmetros colorimétricos para a madeira de Caixeta são apresentados nas Equações 28 a 31 (utilizando a Equação 26).

$$E_M = -2,3851 \cdot 10^6 + 6740,26 \cdot L^* + 2,36902 \cdot 10^6 \cdot a^* + 242435 \cdot b^* - 30457,8 L^* \cdot a^* - 2871,99 \cdot L^* \cdot b^* - 133970 \cdot a^* \cdot b^* + 1710,61 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 279,113 \cdot L^{*2} + 5109,62 \cdot a^{*2} - 462,898 \cdot b^{*2} \quad (28)$$

$$[R^2=75,54\%]$$

$$f_M = -91948,5 + 1070,61 \cdot L^* + 57405,7 \cdot a^* + 5501,58 \cdot b^* - 733,809 \cdot L^* \cdot a^* - 66,3024 \cdot L^* \cdot b^* - 3167,8 \cdot a^* \cdot b^* + 40,3193 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 0,856961 \cdot L^{*2} + 84,7728 \cdot a^{*2} - 7,66477 \cdot b^{*2} \quad (29)$$

$$[R^2=63,21\%]$$

$$f_{c0} = 30417,4 - 539,367 \cdot L^* - 5043,08 \cdot a^* - 938,057 \cdot b^* + 62,7937 \cdot L^* \cdot a^* + 10,4569 \cdot L^* \cdot b^* + 249,174 \cdot a^* \cdot b^* - 3,11167 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 2,13671 \cdot L^{*2} + 6,76808 \cdot a^{*2} + 2,84996 \cdot b^{*2} \quad (30)$$

$$[R^2=66,84\%]$$

$$f_{H90} = -481278 + 9869,61 \cdot L^* + 162146 \cdot a^* + 9187,01 \cdot b^* - 2063,04 \cdot L^* \cdot a^* - 139,596 \cdot L^* \cdot b^* - 7660,23 \cdot a^* \cdot b^* + 100,443 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 44,6567 \cdot L^{*2} - 1439,81 \cdot a^{*2} + 39,3837 \cdot b^{*2} \quad (31)$$

$$[R^2=58,24\%]$$

Os limites inferior e superior de cada variável independente presente nas Equações 28 a 31 foram iguais a: L^* (77,03; 80,72), a^* (1,08; 2,03) e b^* (17,42; 19,91).

Os modelos de regressão para estimativa do módulo de ruptura e módulo de elasticidade na flexão estática e dureza normal às fibras apresentam todos os coeficientes associados aos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) positivos. Isso implica que incrementos nos valores dos parâmetros colorimétricos aumentam os valores destas propriedades.

O modelo de regressão para a estimativa da resistência da madeira de Caixeta à compressão paralela às fibras por meio dos parâmetros colorimétricos apresentou comportamento diferente dos outros modelos utilizados na estimativa das demais propriedades. Os coeficientes associados aos parâmetros colorimétricos são negativos, implicando em maiores valores de resistência à compressão paralela às fibras de acordo com a diminuição dos valores dos parâmetros colorimétricos.

Em relação aos coeficientes de determinação obtidos das correlações, o maior deles foi para a estimativa do módulo de elasticidade ($R^2 = 75,54\%$) e o menor para a estimativa da dureza normal ($R^2 = 58,24\%$). O coeficiente de determinação para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras em função dos parâmetros colorimétricos foi 66,84%.

4.2 Resultados Obtidos para Cajueiro

A Tabela 25 apresenta os resultados das propriedades estudadas para a madeira de Cajueiro.

Tabela 25. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Cajueiro.

Propriedades	x_m	CV (%)	Mín	Máx	IC	
					Inf	Sup
E_M (MPa)	12056	6,20	10269	13374	11684	12428
f_M (MPa)	84	6,45	73	95	81,51	86,91
f_{c0} (MPa)	48	5,60	43	54	47,32	50,03
f_{H90} (N/cm ²)	2842	8,21	2501	3482	2726	2958
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,60	5,35	0,55	0,66	0,58	0,61
L*	63,52	3,19	59,97	68,20	62,51	64,53
a*	5,28	13,91	4,19	6,37	4,92	5,65
b*	12,48	20,39	9,34	18,68	11,22	13,75

Fonte: Do autor.

A resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) foi igual a 34 MPa, classificando o lote de madeira Cajueiro estudado como D30 da classe das dicotiledôneas (folhosas). Vale ressaltar o baixo coeficiente de variação para determinação das propriedades de resistência e de rigidez e densidade aparente da madeira de Cajueiro, devido à homogeneidade do lote e ao planejamento experimental, onde foram utilizados corpos de prova da mesma peça.

Em relação à resistência à compressão paralela às fibras, o valor médio determinado foi igual a 48 MPa. O IPT (2017) apresenta para esta madeira o valor de f_{c0} com teor de umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF) igual a 29,30 MPa. Desta maneira, não é possível realizar comparações entre os resultados.

O valor médio para o módulo de ruptura em ensaio de flexão estática da madeira de Cajueiro neste estudo foi igual a 84 MPa (com teor de umidade da ordem de 12%) maior que o apresentado pelo IPT (2017) ($f_M = 68,90$ MPa). Vale destacar que o valor apresentado pelo IPT é para madeira com 15% de teor de umidade.

A dureza normal às fibras da madeira de Cajueiro apresentada pelo lote estudado nesta pesquisa ($f_{H90} = 2842$ N/cm²) é maior que o apresentado por IPT:2017 ($f_{H90} = 2246$ N/cm²). Neste caso, para ambos valores médios, a densidade aparente é da ordem de 12%. O maior valor determinado neste trabalho pode ser explicado pelo fato da homogeneidade do lote, onde o

coeficiente de variação da dureza foi de 8,21% (menor que os 28% para esforços normais, adotado pela ABNT NBR 7190:1997).

As propriedades mecânicas e a densidade aparente determinadas para o lote estudado para a madeira de Cajueiro qualificam esta madeira para sua utilização como elementos estruturais na construção civil (classificada como D30 das dicotiledôneas). Diferente das aplicações sugeridas pelo IPT (2017), baseado em valores de propriedades da madeira com teor de umidade diferente do recomendado pela ABNT NBR 7190:1997.

A madeira de Cajueiro apresentou, para os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* , os valores médios iguais a 63,52, 5,28 e 12,48, respectivamente, o que denota madeira com coloração branca amarelada com pequena incidência da coloração vermelha (parâmetro a^*). Os valores apresentados neste estudo estão de acordo com as características sensoriais apresentadas pela madeira Cajueiro pelo IPT (2017), cerne e alborno indistintos pela cor, branco-amarelado-claro a branco-amarelado-rosado.

Os modelos de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para cada propriedade estimada a partir dos parâmetros colorimétricos para a madeira de Cajueiro são apresentados nas Equações 32 a 35 (utilizando a Equação 26).

$$E_M = 78877,5 - 5782,1 \cdot L^* + 54885,2 \cdot a^* + 7126,65 \cdot b^* - 1004,64 \cdot L^* \cdot a^* - 118,4 \cdot L^* \cdot b^* - 2368,36 \cdot a^* \cdot b^* + 33,9108 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 80,4524 \cdot L^{*2} + 1236,53 \cdot a^{*2} + 44,9666 \cdot b^{*2} \quad (32)$$

$$[R^2=58,71\%]$$

$$f_M = 1764,61 - 11,92 \cdot L^* - 546,844 \cdot a^* - 190,759 \cdot b^* + 9,84302 \cdot L^* \cdot a^* + 2,92437 \cdot L^* \cdot b^* + 42,5229 \cdot a^* \cdot b^* - 0,612829 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 0,271623 \cdot L^{*2} - 11,8966 \cdot a^{*2} - 0,514165 \cdot b^{*2} \quad (33)$$

$$[R^2=47,91\%]$$

$$f_{c0} = 1811,23 - 15,8722 \cdot L^* - 394,532 \cdot a^* - 234,274 \cdot b^* + 6,08524 \cdot L^* \cdot a^* + 3,82343 \cdot L^* \cdot b^* + 37,7813 \cdot a^* \cdot b^* - 0,59143 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 0,197772 \cdot L^{*2} + 0,42151 \cdot a^{*2} - 0,293815 \cdot b^{*2} \quad (34)$$

$$[R^2=61,26\%]$$

$$f_{H90} = -227137 + 2393,14 \cdot L^* + 52301,6 \cdot a^* + 27443,8 \cdot b^* - 851,436 \cdot L^* \cdot a^* - 442,934 \cdot L^* \cdot b^* - 5072,38 \cdot a^* \cdot b^* + 73,4021 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 21,6905 \cdot L^{*2} + 679,435 \cdot a^{*2} + 103,529 \cdot b^{*2} \quad (35)$$

$$[R^2=83,97\%]$$

Os limites inferior e superior de cada variável independente presente nas Equações 32 a 35 foram iguais a: L^* (59,97; 68,20), a^* (4,19; 6,37) e b^* (9,34; 18,68).

Os modelos de regressão para estimativa do módulo de ruptura na flexão estática e da resistência à compressão paralela às fibras apresentam todos os coeficientes associados aos

parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) negativos. Esta situação implica que incrementos nos valores dos parâmetros colorimétricos diminuem os valores de f_M e f_{c0} .

O modelo de regressão para a estimativa da dureza normal às fibras da madeira de Cajueiro em função dos parâmetros colorimétricos apresenta os coeficientes associados a estes parâmetros positivos, ou seja, maiores valores de dureza podem ser encontrados quanto maiores os valores dos parâmetros L^* , a^* e b^* . Vale destacar que o valor do coeficiente de determinação para este modelo foi igual a 83,97% (o maior dentre as correlações propostas para esta espécie).

Para estimativa do módulo de elasticidade na flexão estática, o modelo de regressão apresentou $R^2 = 58,71\%$. Para esta correlação, maiores valores de luminosidade (L^*), contribuem para a diminuição de E_M . Ao contrário, maiores valores de tonalidades (parâmetros a^* e b^*) contribuem para aumento nos valores de E_M .

4.3 Resultados Obtidos para Cambará

A Tabela 26 apresenta os resultados das propriedades estudadas para a madeira de Cambará.

Tabela 26. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Cambará.

Propriedades	x_m	CV (%)	Mín	Máx	IC	
					Inf	Sup
E_M (MPa)	13767	16,50	9378	16997	12598	14937
f_M (MPa)	120	21,88	77	189	106,90	133,99
f_{c0} (MPa)	59	18,11	37	71	49,26	59,37
f_{H90} (N/cm ²)	4622	14,02	3581	5739	4289	4955
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,74	4,99	0,68	0,78	0,71	0,75
L^*	63,04	4,62	58,66	69,49	61,54	64,54
a^*	7,89	22,44	3,28	9,44	6,98	8,80
b^*	14,70	8,71	12,19	16,65	14,04	15,36

Fonte: Do autor.

Os valores médios determinados para as propriedades mecânicas e densidade aparente a 12% do lote da madeira de Cambará utilizado nesta pesquisa foram superiores aos determinados por outros autores que estudaram as propriedades da madeira da espécie *Erismia uncinatum* Warm (ARRUDA *et al.*, 2015; LAHR *et al.*, 2016; MORALES; LAHR, 2002; RIBEIRO *et al.*, 2016) e também quando comparados com os valores fornecidos pela norma ABNT NBR 7190:1997 e pelo IPT:2017 (para propriedades determinadas com a madeira com teor de umidade de 12%).

A resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira de Cambará estudada apresentou valor igual a 41 MPa, classificando a madeira como D40 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 de Cambará, apesar do coeficiente de variação da densidade aparente ter sido baixo (4,99%). Essa situação demonstra a variabilidade das propriedades da madeira e a importância da sua caracterização para sua aplicação como material estrutural na construção civil.

Kerber *et al.* (2016) determinaram para a madeira de *Erisma uncinatum* os valores dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* iguais a 54,26, 13,82 e 22,33, respectivamente. Os valores dos parâmetros a^* e b^* determinados neste estudo, mostram que a tonalidade da madeira do lote estudado foi menor que o determinado por Kerber *et al.* (2016), entretanto, a luminosidade foi maior ($L^* = 63,04$), ou seja, esta a madeira estudada nesta pesquisa apresentou maior claridade.

Os modelos de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para cada propriedade estimada a partir dos parâmetros colorimétricos para a madeira de Cambará são apresentados nas Equações 36 a 39 (utilizando a Equação 26).

$$E_M = 2,72271 \cdot 10^6 - 65511,5 \cdot L^* - 222218 \cdot a^* - 17012,9 \cdot b^* + 3371,62 \cdot L^* \cdot a^* + 226,71 \cdot L^* \cdot b^* + 4358,85 \cdot a^* \cdot b^* - 93,434 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 371,915 \cdot L^{*2} + 2074,83 \cdot a^{*2} + 493,612 \cdot b^{*2} \quad (36)$$

$$[R^2=54,68\%]$$

$$f_M = -43557,2 + 1538,62 \cdot L^* + 3275 \cdot a^* - 1059,96 \cdot b^* - 59,7148 \cdot L^* \cdot a^* + 30,9946 \cdot L^* \cdot b^* - 127,125 \cdot a^* \cdot b^* + 2,64656 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 14,6002 \cdot L^{*2} - 9,06441 \cdot a^{*2} - 39,7721 \cdot b^{*2} \quad (37)$$

$$[R^2=72,21\%]$$

$$f_{c0} = 22672,2 - 799,153 \cdot L^* - 1470,38 \cdot a^* + 1176,19 \cdot b^* + 26,8253 \cdot L^* \cdot a^* - 21,0355 \cdot L^* \cdot b^* - 47,2513 \cdot a^* \cdot b^* + 0,0788773 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 7,03787 \cdot L^{*2} + 25,2193 \cdot a^{*2} + 16,5665 \cdot b^{*2} \quad (38)$$

$$[R^2=54,21\%]$$

$$f_{H90} = -1,71643 \cdot 10^6 + 76000,2 \cdot L^* + 31719,5 \cdot a^* - 135623 \cdot b^* - 884,165 \cdot L^* \cdot a^* + 2455,43 \cdot L^* \cdot b^* + 6179,51 \cdot a^* \cdot b^* - 57,6021 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 784,187 \cdot L^{*2} - 893,487 \cdot a^{*2} - 1319,87 \cdot b^{*2} \quad (39)$$

$$[R^2=79,54\%]$$

Os limites inferior e superior de cada variável independente presente nas Equações 36 a 39 foram iguais a: L^* (58,66; 66,49), a^* (3,28; 9,44) e b^* (12,19; 16,65).

De acordo com os modelos de regressão para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de Cambará, quanto maiores os valores dos parâmetros L^* e a^* , maiores serão os valores das propriedades f_M e f_{H90} e menores serão os valores de E_M e f_{c0} .

Em relação ao parâmetro b^* , quanto maiores seus valores, menores serão os valores das propriedades mecânicas E_M , f_M e f_{H90} , entretanto, os valores de f_{c0} serão maiores.

O modelo de regressão para a estimativa de f_{H90} da madeira de Cajueiro por intermédio dos parâmetros colorimétricos apresenta os coeficientes associados a L^* e a^* positivos e, o coeficiente associado ao parâmetro b^* , negativo. Este modelo de regressão apresentou o melhor coeficiente de determinação ($R^2 = 79,54\%$) dentre todos os propostos para estimativa das propriedades mecânicas de Cambará utilizando os parâmetros colorimétricos.

4.4 Resultados Obtidos para Tatajuba

A Tabela 27 apresenta os resultados das propriedades estudadas para a madeira de Tatajuba.

Tabela 27. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Tatajuba.

Propriedades	x_m	CV (%)	Mín	Máx	IC	
					Inf	Sup
E_M (MPa)	12299	8,70	9715	14033	11681	12728
f_M (MPa)	104	21,99	58	136	92,09	116,15
f_{c0} (MPa)	73	10,72	34	97	61,49	72,86
f_{H90} (N/cm ²)	5693	38,07	3335	10693	4726	6937
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,74	11,59	0,56	0,92	0,70	0,79
L^*	68,17	6,32	60,83	73,44	65,70	70,11
a^*	5,39	30,61	3,16	9,48	4,58	6,32
b^*	23,85	15,20	18,75	29,23	22,01	25,84

Fonte: Do autor.

Os valores médios determinados para a madeira de Tatajuba apresentados pela ABNT NBR 7190:1997 e IPT (2017) foram iguais a 79,50 MPa (madeira com teor de umidade igual a 12%) e 79,70 MPa (madeira com teor de umidade igual a 15%), respectivamente, superiores ao determinado neste estudo ($f_{c0} = 73$ MPa).

O módulo de ruptura na flexão estática estimado neste estudo foi inferior ao estimado pelo IPT (2017) ($f_M = 138,2$ MPa) para a madeira de Tatajuba com teor de umidade 15%.

A densidade aparente da madeira de Tatajuba com teor de umidade de 12% apresentada pela norma ABNT NBR 7190:1997 ($\rho_{ap,12} = 0,94$ g/cm³) foi superior ao determinado neste estudo ($\rho_{ap,12} = 0,74$ g/cm³). O IPT (2017) apresenta a densidade aparente com teor de umidade da madeira a 15% ($\rho_{ap,15} = 0,82$ g/cm³).

A resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira de Tatajuba determinada neste estudo ($f_{c0,k} = 51$ MPa) classifica o lote estudado como classe de resistência D50 das dicotiledôneas (folhosas), podendo ser aplicada na construção de estruturas de madeira.

Silva *et al.* (2007) determinaram para a madeira de Tatajuba os valores dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* iguais a 47,09, 6,76 e 21,27, respectivamente e, além disso, classificam a madeira como clara com cor marrom-dourado. O IPT (2017) apresenta a madeira de Tatajuba com cerne (amarelo-dourado) e alborno (castanho-amarelado) distintos pela cor.

Os valores apresentados por IPT (2017) e Silva *et al.* (2007) são parecidos aos determinados para o lote de madeira de Tatajuba estudado. Vale ressaltar que a madeira de Tatajuba apresentou o maior valor do parâmetro b^* ($b^* = 23,85$), dentre as espécies utilizadas neste estudo, sendo este o parâmetro que fornece a esta madeira a característica dourada.

Os modelos de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para cada propriedade estimada a partir dos parâmetros colorimétricos para a madeira de Tatajuba são apresentados nas Equações 40 a 43 (utilizando a Equação 26).

$$E_M = -440778 + 5064,03 \cdot L^* + 49903,6 \cdot a^* + 16258,9 \cdot b^* - 511,849 \cdot L^* \cdot a^* - 133,833 \cdot L^* \cdot b^* - 1202,03 \cdot a^* \cdot b^* + 12,5581 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 4,23234 \cdot L^{*2} - 597,8 \cdot a^{*2} - 106,795 \cdot b^{*2} \quad (40)$$

$$[R^2=56,32\%]$$

$$f_M = -2514,33 + 137,916 \cdot L^* + 293,157 \cdot a^* - 193,933 \cdot b^* - 9,90053 \cdot L^* \cdot a^* + 3,88882 \cdot L^* \cdot b^* + 3,45815 \cdot a^* \cdot b^* + 0,145611 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 1,44556 \cdot L^{*2} + 5,56907 \cdot a^{*2} - 2,77654 \cdot b^{*2} \quad (41)$$

$$[R^2=85,30\%]$$

$$f_{c0} = -2708,28 - 29,1818 \cdot L^* + 789,622 \cdot a^* + 272,278 \cdot b^* - 10,665 \cdot L^* \cdot a^* - 2,97014 \cdot L^* \cdot b^* - 26,9972 \cdot a^* \cdot b^* + 0,377224 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 0,796502 \cdot L^{*2} - 3,19672 \cdot a^{*2} - 1,1893 \cdot b^{*2} \quad (42)$$

$$[R^2=72,49\%]$$

$$f_{H90} = -1,4669 \cdot 10^6 + 48780,4 \cdot L^* + 64644,9 \cdot a^* - 20208,7 \cdot b^* - 1123,48 \cdot L^* \cdot a^* + 499,706 \cdot L^* \cdot b^* - 993,416 \cdot a^* \cdot b^* + 21,6226 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 428,178 \cdot L^{*2} - 86,6733 \cdot a^{*2} - 327,141 \cdot b^{*2} \quad (43)$$

$$[R^2=59,21\%]$$

Os limites inferior e superior de cada variável independente presente nas Equações 40 a 43 foram iguais a: L^* (60,83; 73,44), a^* (3,16; 9,48) e b^* (18,75; 29,23).

Os modelos de regressão apresentados para a madeira de Tatajuba mostram que maiores valores do parâmetro a^* tendem a aumentar os valores das propriedades mecânicas, pois, os coeficientes associados a este parâmetro são todos positivos.

Maiores valores do parâmetro b^* tendem a aumentar os valores estimados para de E_M e f_{c0} e diminuir os valores de f_M e f_{H90} .

Em relação ao parâmetro luminosidade (L^*), quanto maiores o seu valor, maiores serão os valores estimados para as propriedades E_M , f_M e f_{H90} , entretanto, haverá diminuição de f_{c0} .

A correlação para estimativa de E_M para a madeira de Tatajuba (Equação 40) apresenta coeficientes associados aos parâmetros colorimétricos positivos. Isso significa que, quanto maiores os valores determinados para L^* , a^* e b^* , os valores de E_M também serão maiores.

A correlação para estimativa de f_M (Equação 41) apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 85,30\%$) para as correlações propostas para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de Tatajuba em função dos valores determinados pelo colorímetro.

4.5 Resultados Obtidos para Roxinho

A Tabela 28 apresenta os resultados das propriedades estudadas para a madeira de Roxinho.

Tabela 28. Resultados das propriedades obtidas para a madeira de Roxinho.

Propriedades	x_m	CV (%)	Mín	Máx	IC	
					Inf	Sup
E_M (MPa)	17156	7,80	14457	19207	16489	17824
f_M (MPa)	144	11,76	109	174	135,58	152,42
f_{c0} (MPa)	86	10,78	62	96	75,75	84,33
f_{H90} (N/cm ²)	9219	8,44	8044	10791	8831	9606
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,97	2,46	0,94	1,02	0,96	0,98
L^*	55,32	2,16	52,82	58,09	54,73	0,55
a^*	12,98	6,99	11,63	14,85	12,53	13,44
b^*	5,72	10,93	4,29	6,83	5,41	6,03

Fonte: Do autor.

Os valores médios das propriedades mecânicas determinadas para a madeira de Roxinho estão coerentes com os determinados por outros autores. Os valores médios para f_{c0} e f_M determinados por IPT (2017) para a madeira de Roxinho com 15% de teor de umidade são iguais a 84,1 e 184,5 MPa, respectivamente.

O lote de madeira da espécie Roxinho estudada neste trabalho é enquadrado na classe de resistência D60, pois, apresentou $f_{c0,k}$ 60 MPa.

Em relação aos parâmetros colorimétricos, a madeira de Roxinho apresentou valor médio de luminosidade (L^*) igual a 55,32, o menor resultado entre todas as espécies estudadas neste trabalho, ou seja, a madeira de Roxinho é a que apresenta a menor claridade.

A madeira de Roxinho apresentou o maior valor médio do parâmetro a^* (eixo colorimétrico entre as cores vermelho e verde) dentre as espécies estudadas ($a^* = 12,98$).

Os modelos de regressão e os respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para cada propriedade estimada a partir dos parâmetros colorimétricos para a madeira de Roxinho são apresentados nas Equações 44 a 47 (utilizando a Equação 26).

$$E_M = 7,61036 \cdot 10^6 - 133986 \cdot L^* - 622268 \cdot a^* - 1,21212 \cdot 10^6 \cdot b^* + 11445,7 \cdot L^* \cdot a^* + 21415,7 \cdot L^* \cdot b^* + 96806,8 \cdot a^* \cdot b^* - 1759,98 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 56,0313 \cdot L^{*2} - 298,681 \cdot a^{*2} + 2948,11 \cdot b^{*2} \quad (44)$$

$$[R^2=51,63\%]$$

$$f_M = 115105 - 1689,83 \cdot L^* - 10350,9 \cdot a^* - 21251,6 \cdot b^* + 187,594 \cdot L^* \cdot a^* + 386,925 \cdot L^* \cdot b^* + 1607,71 \cdot a^* \cdot b^* - 29,1608 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 7,22054 \cdot L^{*2} + 0,118834 \cdot a^{*2} - 6,65145 \cdot b^{*2} \quad (45)$$

$$[R^2=52,86\%]$$

$$f_{c0} = -27172,1 + 475,129 \cdot L^* + 2309,31 \cdot a^* + 4676,76 \cdot b^* - 41,9376 \cdot L^* \cdot a^* - 86,8005 \cdot L^* \cdot b^* - 380,553 \cdot a^* \cdot b^* + 6,95742 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 0,457243 \cdot L^{*2} - 0,668453 \cdot a^{*2} + 6,46774 \cdot b^{*2} \quad (46)$$

$$[R^2=54,26\%]$$

$$f_{H90} = 2,55916 \cdot 10^6 - 37908,4 \cdot L^* - 234161 \cdot a^* - 493356 \cdot b^* + 4149,05 \cdot L^* \cdot a^* + 8796,03 \cdot L^* \cdot b^* + 38748,7 \cdot a^* \cdot b^* - 693,662 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 131,977 \cdot L^{*2} + 102,304 \cdot a^{*2} + 146,038 \cdot b^{*2} \quad (47)$$

$$[R^2=45,40\%]$$

Os limites inferior e superior de cada variável independente presente nas Equações 44 a 47 foram iguais a: L^* (52,82; 58,09), a^* (11,63; 14,85) e b^* (4,29; 6,83).

Os modelos de regressão apresentados para a madeira de Roxinho mostram que maiores valores dos parâmetros L^* , a^* e b^* tendem a diminuir os valores estimados para E_M , f_M e f_{H90} e aumentar os valores estimados de f_{c0} .

A correlação para estimativa de f_{c0} (Equação 46) apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 54,26\%$) para as correlações propostas para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de Roxinho por meio dos valores determinados para os parâmetros.

4.6 Comparação entre Valores das Propriedades das Espécies

As Figuras 11 a 15 apresentam os valores médios das propriedades mecânicas e da densidade aparente de todas as espécies estudadas nesta pesquisa. De maneira geral, é observado

o aumento dos valores médios de resistência e rigidez com o aumento da densidade aparente da madeira.

Para todas as propriedades estudadas é possível observar que a madeira de Caixeta apresenta os menores valores médios. Entretanto, o lote de madeira de Caixeta utilizado neste estudo pode ser empregado na construção civil como elemento estrutural, pois, é classificado como madeira D20.

Dentre as espécies utilizadas nesta pesquisa, a madeira de Roxinho apresentou os maiores valores médios das propriedades, destaque para sua resistência à compressão paralela às fibras médio igual a 85 MPa.

As madeiras de Cajueiro e Cambará apresentaram valores intermediários de resistência à compressão paralela às fibras iguais a 48 e 59 MPa, respectivamente.

A madeira de Cambará e a de Tatajuba apresentaram valores próximos de densidade aparente (Figura 16), porém, a madeira de Cambará apresentou maiores valores médios de módulo de elasticidade (Figura 11) e de ruptura na flexão estática (Figura 12).

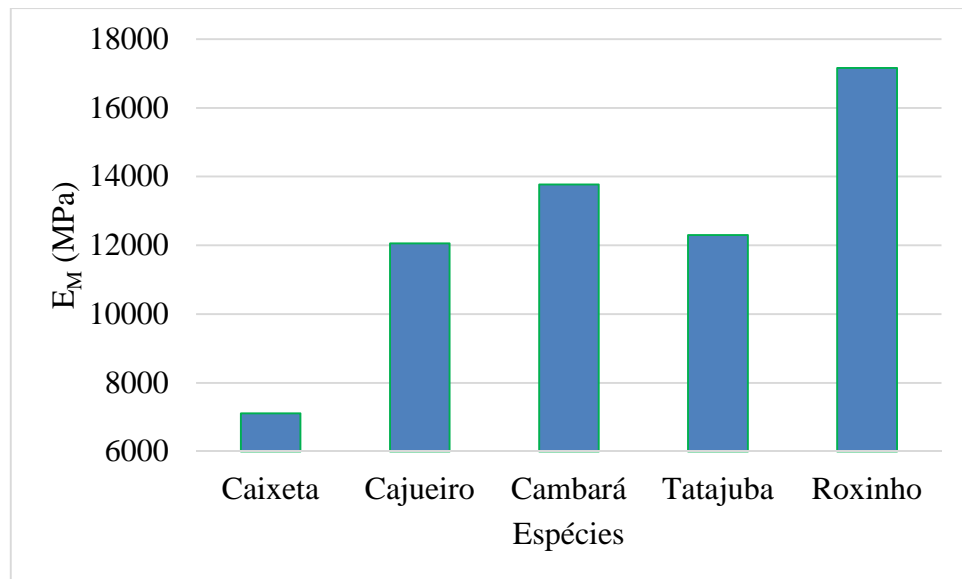


Figura 11. Valores médios do módulo de elasticidade na flexão estática para cada espécie.

Fonte: Do autor.

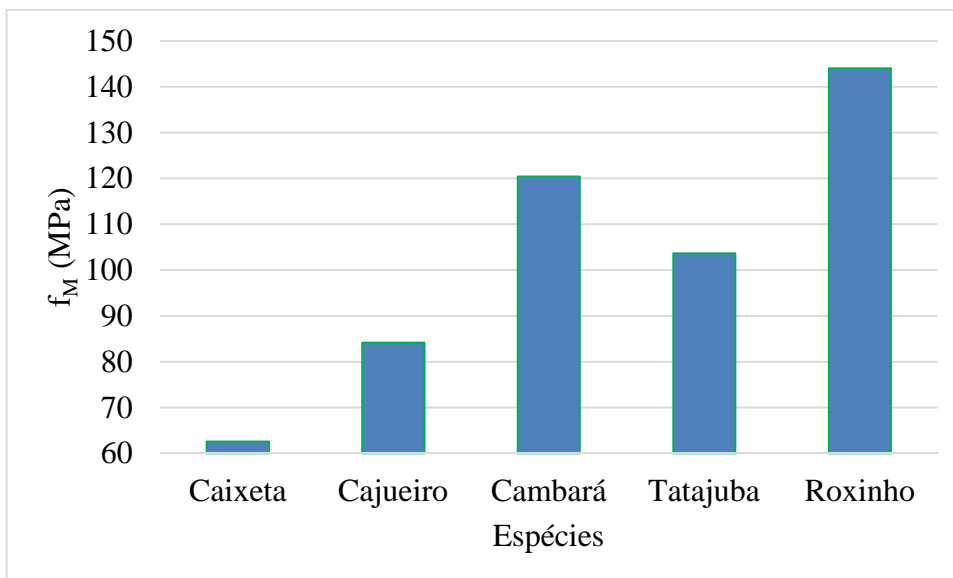


Figura 12. Valores médios do módulo de ruptura na flexão estática para cada espécie.

Fonte: Do autor.

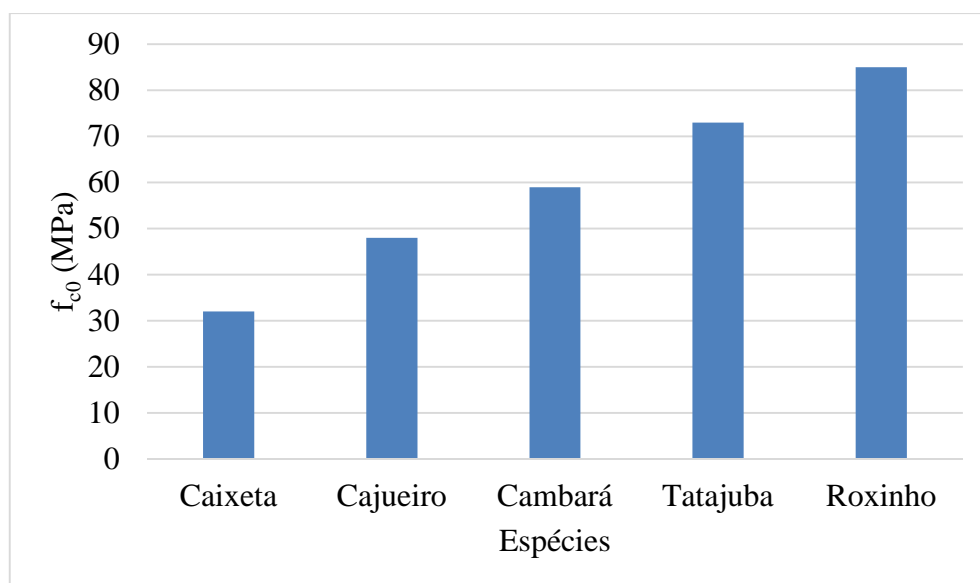


Figura 13. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras para cada espécie.

Fonte: Do autor.

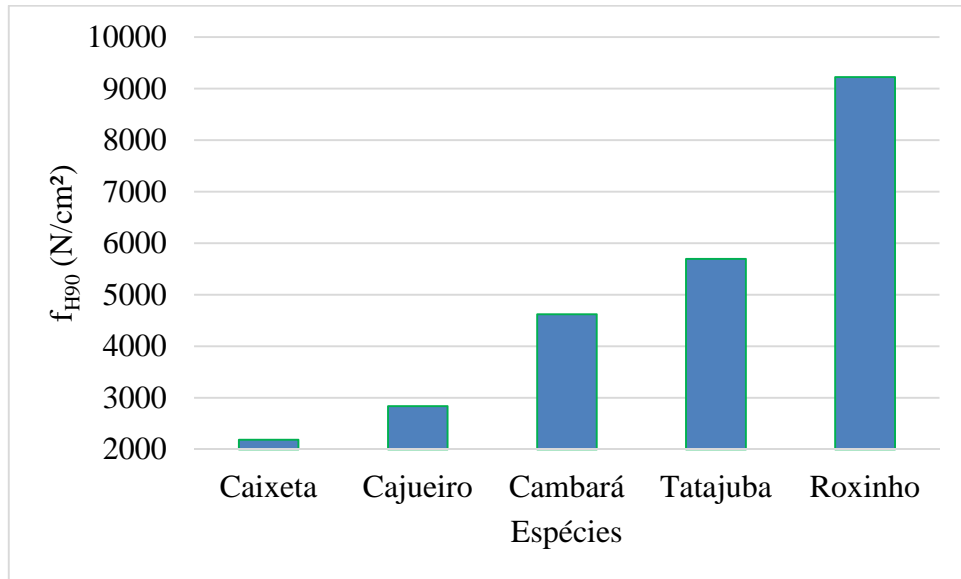


Figura 14. Valores médios da dureza normal às fibras para cada espécie.

Fonte: Do autor.

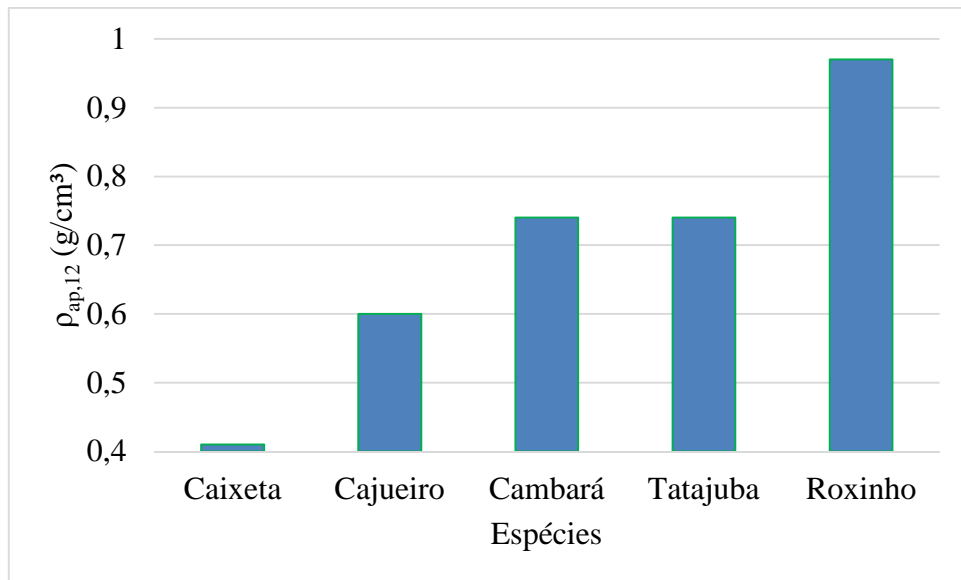


Figura 15. Valores médios de densidade aparente para cada espécie.

Fonte: Do autor.

As Figuras 16 a 18 mostram, respectivamente, os valores médios dos parâmetros colorimétricos para cada uma das espécies de madeira estudadas nesta pesquisa.

A Caixeta apresentou o maior valor para o parâmetro luminosidade ($L^* = 78,89$), sendo a madeira mais clara dentre as estudadas. A madeira de Roxinho apresentou luminosidade igual

a 55,33 (o menor valor dentre todas). Vale lembrar que o valor de L^* varia entre 0 (cor preta) e 100 (cor branca). Para as demais espécies, os valores de luminosidade ficaram próximos a 65.

A madeira de Caixeta que apresenta o menor valor de densidade aparente ($\rho_{ap,12} = 0,41 \text{ g/cm}^3$), também apresentou o menor valor para a tonalidade do eixo a^* ($a^* = 1,45$). Por sua vez, a madeira de Roxinho apresentou os maiores valores médios de densidade aparente e para o parâmetro a^* , sendo iguais a $0,97 \text{ g/cm}^3$ e 12,98, respectivamente.

Em relação ao parâmetro colorimétrico b^* (eixo entre cores amarelo e azul), a Tatajuba apresentou o maior valor médio ($b^* = 23,85$). A madeira de Roxinho apresentou o menor valor para esta propriedade, $b^* = 5,72$.

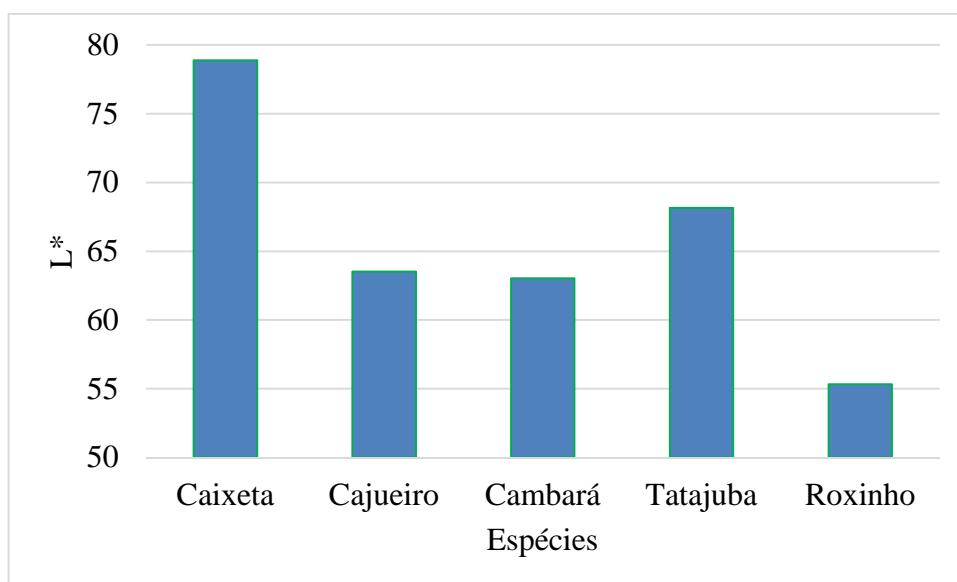


Figura 16. Valores médios do parâmetro colorimétrico L^* para cada espécie.

Fonte: Do autor.

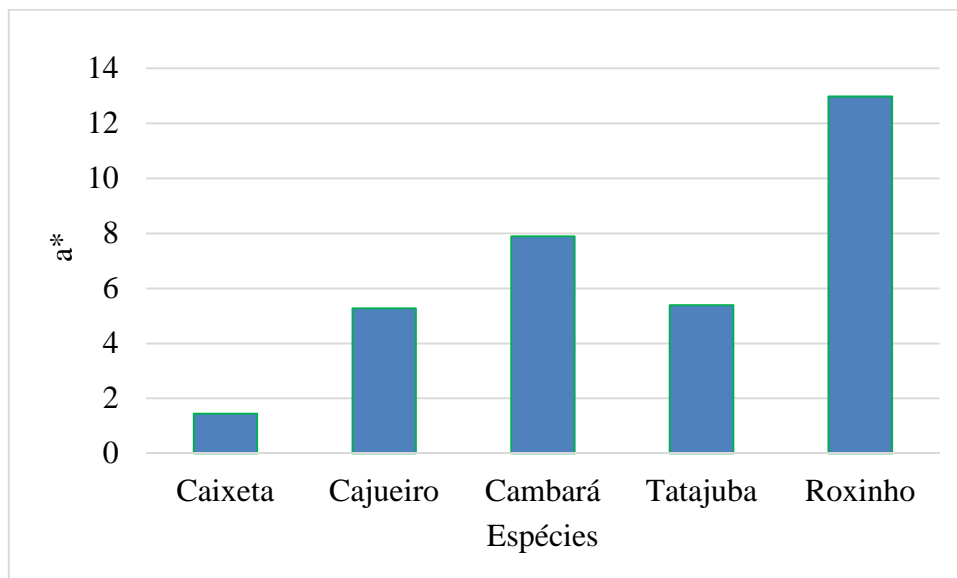


Figura 17. Valores médios do parâmetro colorimétrico a^* para cada espécie.

Fonte: Do autor.

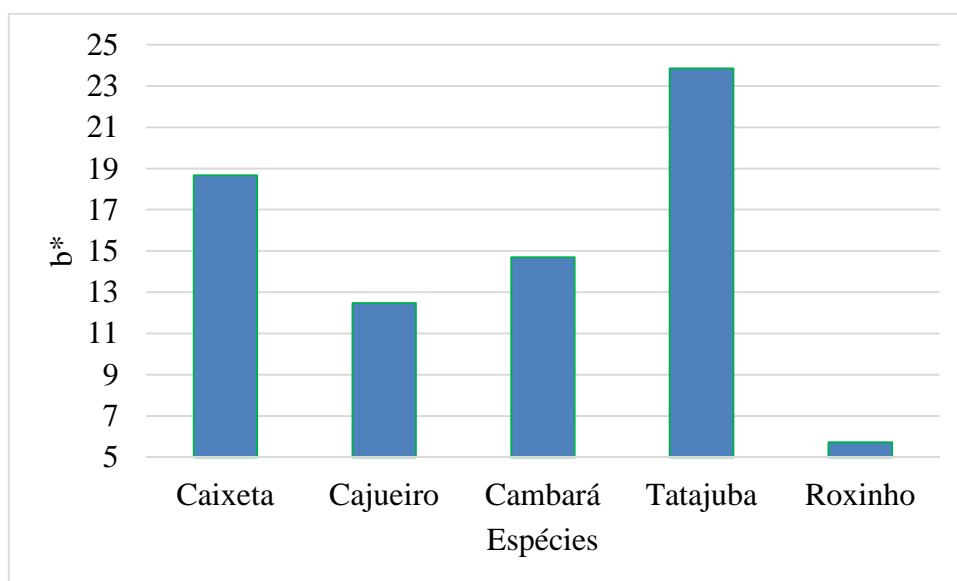


Figura 18. Valores médios do parâmetro colorimétrico b^* para cada espécie.

Fonte: Do autor.

A Tabela 29 reúne os valores dos coeficientes de determinação dos modelos de regressão propostos para estimativa das propriedades de resistência e de rigidez em função dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* .

Tabela 29. Coeficientes de determinação (R^2) das correlações propostas para a estimativa das propriedades da madeira em função dos parâmetros colorimétricos.

Propriedades*	Espécies				
	Caixeta	Cajueiro	Cambará	Tatajuba	Roxinho
E_M	75,54	58,71	54,68	56,32	51,63
f_M	63,21	47,91	72,21	85,30	52,86
f_{c0}	66,84	61,26	54,21	72,49	54,26
f_{H90}	58,24	83,97	79,54	59,21	45,40

*Valores em porcentagem.

Fonte: Do autor.

O maior valor do coeficiente de determinação foi para a estimativa do módulo de ruptura na flexão estática da madeira de Tatajuba ($R^2 = 85,30\%$), por sua vez, a correlação para estimativa da dureza normal às fibras do Roxinho apresentou o menor valor do coeficiente de correlação ($R^2 = 45,40\%$).

Os resultados dos coeficientes de determinação da madeira de Roxinho foram todos abaixo de 55%. Entretanto, a madeira de Caixeta apresentou os melhores coeficientes de determinação, sendo o menor deles igual a 58,24% para estimativa de f_{H90} .

Os melhores modelos de regressão para estimativa de E_M , f_M , f_{c0} e f_{H90} foram encontrados nos modelos propostos para as madeiras de Caixeta ($R^2 = 75,54\%$), Tatajuba ($R^2 = 85,30\%$), Tatajuba ($R^2 = 72,49\%$) e Cajueiro ($R^2 = 83,97\%$), respectivamente.

4.7 Modelos de Regressão Multivariáveis para o Conjunto de Espécies

Os modelos de regressão obtidos para as estimativas do módulo de elasticidade (E_M) e do módulo de ruptura na flexão estática (f_M), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e dureza normal às fibras (f_{H90}) para o conjunto de variáveis independentes (L^* , a^* , b^* e $\rho_{ap,12}$) são apresentadas pelas Equações 48, 49, 50 e 51, respectivamente (utilizando a Equação 27).

$$\begin{aligned}
 E_M = & - 53253,3 - 429,03 \cdot L^* - 12976,7 \cdot a^* + 13318,4 \cdot b^* + 316115 \cdot \rho_{ap,12} + \\
 & 240,071 \cdot L^* \cdot a^* - 152,484 \cdot L^* \cdot b^* - 3965,35 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12} - 239,756 \cdot a^* \cdot b^* - \\
 & 586,362 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} - 21670,8 \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 1,6851 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* - 89,9967 \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} \\
 & + 297,26 \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 277,541 \cdot L^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 3,16465 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + \\
 & 12,4195 \cdot L^{*2} + 149,63 \cdot a^{*2} - 31,1741 \cdot b^{*2} + 2142,93 \cdot \rho_{ap,12}^2
 \end{aligned} \tag{48}$$

$[R^2=94,63\%]$

$$\begin{aligned}
 f_M = & - 1470,33 + 13,5383 \cdot L^* + 162,956 \cdot a^* + 161,207 \cdot b^* + 2955,73 \cdot \rho_{ap,12} - \\
 & 1,82949 \cdot L^* \cdot a^* - 1,91122 \cdot L^* \cdot b^* - 32,7081 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12} - 18,561 \cdot a^* \cdot b^* - \\
 & 235,75 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} - 235,487 \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 0,19851 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 2,20909 \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} +
 \end{aligned} \tag{49}$$

$$+ 18,9745 \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 2,7678 \cdot L^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 0,156185 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 0,0467315 \cdot L^{*2} + 1,09651 \cdot a^{*2} - 0,0975859 \cdot b^{*2} + 15,7444 \cdot \rho_{ap,12}^2$$

$$[R^2=87,62\%]$$

$$f_{c0} = 103,75 + 7,98205 \cdot L^* + 165,964 \cdot a^* - 34,0582 \cdot b^* - 1573,94 \cdot \rho_{ap,12} - 2,80825 \cdot L^* \cdot a^* + 0,35475 \cdot L^* \cdot b^* + 21,5578 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12} - 9,62655 \cdot a^* \cdot b^* - 40,3945 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} + 73,4591 \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 0,15922 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 1,46799 \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} \quad (50)$$

$$+ 7,43347 \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 0,910486 \cdot L^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 0,12953 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 0,105119 \cdot L^{*2} - 1,79138 \cdot a^{*2} + 0,0463943 \cdot b^{*2} - 136,222 \cdot \rho_{ap,12}^2$$

$$[R^2=91,14\%]$$

$$f_{H90} = - 49345,4 + 1684,77 \cdot L^* + 10589,5 \cdot a^* - 1439,69 \cdot b^* - 96387 \cdot \rho_{ap,12} - 143,858 \cdot L^* \cdot a^* + 13,2845 \cdot L^* \cdot b^* + 1340,19 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12} - 694,311 \cdot a^* \cdot b^* - 4678,07 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} + 5172,04 \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} + 9,17158 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + 47,2429 \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12} \quad (51)$$

$$+ 561,596 \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 86,6407 \cdot L^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 6,53266 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12} - 12,6051 \cdot L^{*2} - 17,5136 \cdot a^{*2} + 28,5868 \cdot b^{*2} + 22100,4 \cdot \rho_{ap,12}^2$$

$$[R^2=96,08\%]$$

Cabe destacar que as validades dos modelos de regressão obtidos se restringem aos intervalos de variação das variáveis L^* (52,82 [madeira de Roxinho]; 80,72 [madeira de Caixeta]), a^* (1,08 [madeira de Caixeta]; 14,85 [madeira de Roxinho]), b^* (4,29 [madeira de Roxinho]; 29,23 [madeira de Tatajuba]) e $\rho_{ap,12}$ (0,39 g/cm³ [madeira de Caixeta]; 1,02 g/cm³ [madeira de Roxinho]).

Pelos valores dos coeficientes de determinação obtidos, constatou-se a excelente previsão do ajuste na estimativa dos valores das propriedades mecânicas estudadas, quando foi realizada a inclusão da densidade aparente como variável independente nos modelos de regressão.

O menor valor do coeficiente de determinação foi encontrado para o modelo gerado para estimativa de f_{c0} ($R^2 = 87,62\%$) e, mesmo assim, foi um valor excelente para estimativa desta importante propriedade mecânica da madeira.

Para as estimativas de E_M (Equação 48) e f_M (Equação 49), maiores valores de densidade aparente acarretarão em maiores valores destas propriedades mecânicas, por causa da contribuição positiva dos termos que apresentam a densidade aparente como variável independente isolada. Ao contrário ocorre para a estimativa de f_{c0} (Equação 50) e f_{H90} (Equação 51).

Os modelos de regressão propostos para o conjunto de espécies são importantes, pois, possibilitam estimar algumas propriedades mecânicas de madeira tropical utilizando os parâmetros colorimétricos (facilmente obtido utilizando um colorímetro portátil) e o valor de sua densidade aparente, com teor de umidade da ordem de 12%.

5 CONCLUSÕES

Os baixos coeficientes de variação determinados para algumas propriedades mecânicas e para densidade aparente neste estudo mostram a homogeneidade dos lotes de madeira utilizados.

As madeiras de Caixeta ($\rho_{ap,12} = 0,41 \text{ g/cm}^3$) e de Roxinho ($\rho_{ap,12} = 0,97 \text{ g/cm}^3$) apresentaram, respectivamente, a menor e a maior densidade aparente, dentre as espécies estudadas nesta pesquisa.

A madeira de Roxinho apresentou os maiores valores médios de resistência dentre as madeiras estudadas, classificada como D60 das dicotiledôneas. A madeira de Caixeta apresentou os menores valores médios das propriedades mecânicas estudadas. Entretanto, de acordo com a resistência característica determinada neste estudo, foi possível classificá-la como madeira D20 das dicotiledôneas.

Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) utilizados nas definições dos modelos são de fácil obtenção a partir do uso de um equipamento portátil e permitem a obtenção desses dados em campo e em estudos futuros.

O parâmetro L^* variou entre 52,82, para a madeira de Roxinho (menos clara) e 80,72 para a madeira de Caixeta (mais clara). O menor valor determinado para o parâmetro a^* foi igual a 1,08 para a madeira de Caixeta e o maior valor foi de 14,85 para a madeira de Roxinho. O parâmetro b^* variou entre 4,29 (madeira de Roxinho) e 29,23 (madeira de Tatajuba).

As melhores estimativas de E_M , f_M , f_{c0} e f_{H90} para cada uma das espécies utilizando os parâmetros colorimétricos como variáveis independentes foram encontradas nos modelos propostos para as madeiras de Caixeta ($R^2 = 75,54\%$), Tatajuba ($R^2 = 85,30\%$), Tatajuba ($R^2 = 72,49\%$) e Cajueiro ($R^2 = 83,97\%$), respectivamente.

Foram determinados excelentes representatividades dos modelos de regressão para estimativa das propriedades mecânicas considerando todas as espécies em um conjunto, justificados pelos coeficientes de determinação que foram iguais a 94,63, 87,62, 91,14 e 96,08% para estimativa de E_M , f_M , f_{c0} e f_{H90} , respectivamente, isto devido ao fato da adição da densidade aparente como uma variável independente nos modelos de regressão propostos. Vale ressaltar que os ajustes desenvolvidos neste trabalho são válidos para os intervalos de variação das variáveis L^* (52,82; 80,72), a^* (1,08; 14,85), b^* (4,29; 29,23) e $\rho_{ap,12}$ (0,39 g/cm³; 1,02 g/cm³).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos excelentes resultados para os coeficientes de determinação obtidos para os modelos de regressão multivariáveis propostos para estimativa de algumas propriedades mecânicas da madeira em função dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente e, além disso, pelo fato do ineditismo do presente estudo, algumas considerações para pesquisas futuras são apresentadas abaixo:

- Novos modelos de regressão devem ser propostos para estimativa de outras propriedades mecânicas de interesse para o projeto estrutural de acordo com a ABNT NBR 7190:1997;
- Estudar outras espécies de madeiras tropicais com o intuito de aumentar os intervalos de valores dos parâmetros colorimétricos e de densidade aparente;
- Trabalhar com a madeira com teor de umidade elevado, com o objetivo de estimar propriedades mecânicas, densidade aparente e parâmetros colorimétricos e, a partir destes propor novos modelos de regressão para estas novas condições, simulando a estimativa de propriedades mecânicas em madeira recém abatida na floresta;
- Verificar a possibilidade da estimativa da resistência da madeira durante processos termomecânicos, para estabelecer padrões de coloração e respectivos valores de propriedades mecânicas, para melhorar o valor de mercado de madeiras pouco utilizadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. H.; DIAS, A. A. Comparison between test methods to determine wood embedment strength parallel to the grain. **Revista Árvore**, v.40, n.4, p. 741-748, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000400018
- ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; TAKESHITA, S.; MODES, K. S.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, v.44, n.110, p. 303-309, 2016A. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n110.03
- ALMEIDA, D. H.; CHAHUD, E.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. Determination of density, shear and compression parallel to the grain strengths of Pariri (*Pouteria* sp.), Brazilian Native Wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v.5, n.5, p. 109-112, 2015A. DOI: 10.5923/j.ijme.20150505.01
- ALMEIDA, D. H.; CHAHUD, E.; FERRO, F. S.; POLETO, S. F. S.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical and mechanical properties of *Dipterix odorata* (Aublet) Willd. **Advanced Materials Research**, v.1025, p. 46-49, 2014a. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.46
- ALMEIDA, D. H.; CAVALHEIRO, R. S.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Hardness of the *Schizolobium amazonicum* wood. **Advanced Materials Research**, v.912, p. 2018-2021, 2014b. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.912-914.2018
- ALMEIDA, D. H.; FERRO, F. S.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Comparação entre valores de ensaios experimentais e calculados da resistência ao embutimento da madeira de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p. 347-352, 2014c.
- ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v.38, n.1, p. 203-207, 2014d.
- ALMEIDA, D. H. **Proposta de método de ensaio para determinação da resistência da madeira ao embutimento**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ALMEIDA, D. H.; CAVALHEIRO, R. S.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R. Full characterization of strength properties of *Schizolobium amazonicum* Wood for timber structures. **IJET: International Journal of Engineering and Technology**, v.13, p. 97-100, 2013a.
- ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; MACEDO, L. B.; MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie

amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, v.37, n.6, p. 1175-1181, 2013b.

ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Study of dimensional stability of Brazilian tropical wood species**. República da Moldávia: Lambert Academic Publishing, 2014.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; ARAÚJO, V. A.; SILVA, S. A. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods. **BioResources**, v.12, n.3, p. 6579-6590, 2017b.

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, 2016B. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.01

ALMEIDA, T. H. **Estudo da estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

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, 2015B. DOI: 10.5923/j.ijme.20150501.01

AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR WOOD PRODUCTS/ AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION (NDS). **NDS**. American national design and specification for wood construction. Washington: NDS, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2244**. Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates. West Conshohocken: ASTM, 2011.

_____. **ASTM D5764**. Evaluating dowel-bearing strength of wood and wood-based products. West Conshohocken: ASTM, 2007.

_____. **ASTM D2395-93**. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Philadelphia: ASTM, 1999.

_____. **ASTM D1105-96**. Standard test methods for preparation of extractive-free wood. Philadelphia: ASTM, 1999.

AMORIM, P. G. R.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, v.19, n.3, p. 461-466, 2013.

ANDRADE, A. **Pisos de madeira**: características de espécies brasileiras. Piracicaba: ANPM, 2015.

ANDRADE, A. **Auditoria em certificação da qualidade para pisos de madeira**. Piracicaba: ANPM, 2014.

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.; PEÑA, M. M. G.; HERNÁNDEZ, J. I. V.; MANZANARES, A. R.; SALINAS, M. F. Mechanical properties of wood of two Mexican Oaks: relationship to selected physical properties. **European Journal of Wood Products**, on-line, 2017.
DOI: 10.1007/s00107-017-1168-9

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; ANDRADE, A. Utilization of a thermomechanical process to enhance properties of a hardwood used for flooring. **Ciência da Madeira**, v.6, n.3, p. 223-231, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p223-231

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02: 126.10-001-1**. (ANBT 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.

ATAYDE, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de Muirapiranga (*Brosimum* sp.). **Cerne**, v.17, n.2, p. 231-235, 2011.

BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of mechanical properties – modulus of rupture and modulus of elasticity – of five tropical species by nondestructive methods. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.17, n.2, p. 239-252, 2015. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000023

BARCÍK, S.; GASPARÍK, M.; RAZUMOV, E. Y. Effect of thermal modification on the colour changes of Oak Wood. **Wood Research**, v.60, n.3, p. 385-396, 2015.

BARROS, S. V. S.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. **Cerne**, v.20, n.3, p. 337-342, 2014. DOI: 10.1590/01047760201420031421

BERTOLINI, M. S.; SILVA, D. A. L.; SOUZA, A. M.; CALIL NETO, C.; LAHR, F. A. R. Influência do comprimento de corpos-de-prova na obtenção do módulo de elasticidade E_c ". **Floresta e Ambiente**, v.19, n.2, p. 179-183, 2012. DOI: 10.4322/loram.2012.021

BRITO, L. D. **Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. 2014. 501 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CADEMARTORI, P. H. G.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; MUNIZ, G. I. B. Surface wettability of Brazilian tropical wood flooring treated with He plasma”. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.18, n.4, p. 715-722, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000062

CALIL JUNIOR, C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo**. São Paulo: Pini, 2010.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

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

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n.71, p. 30-41, 2001.

CARDOSO, D.; SÄRKINEN, T.; ALEXANDER, S.; AMORIM, A. M.; BITTRICH, V.; CELIS, M.; DALY, D. C.; FIASCHI, P.; FUNK, V. A.; GIACOMIN, L. L.; GOLDENBERG, R.; HEIDEN, G.; IGANCI, J.; KELLOF, C. L.; KNAPP, S.; LIMA, H. C.; MACHADO, A. F. P.; SANTOS, R. M.; SILVA, R. M.; MICHELANGELI, F. A.; MITCHELL, J.; MOONLIGHT, P.; MORAES, P. L. R.; MORI, S. A.; NUNES, T. S.; PENNINGTON, T. D.; PIRANI, J. R.; PRANCE, G. T.; QUEIROZ, L. P.; RAPINI, A.; RIINA, R.; RINCON, C. A. V.; ROQUE, N.; SHIMIZU, G.; SOBRAL, M.; STEHMANN, J. R.; STEVENS, W. D.; TAYLOR, C. M.; TROVÓ, M.; BERG, C. V. D.; WERFF, H. V. D.; VIANA, P. L.; ZARTMAN, C. E.; FORZZA, R. C. Amazon plant diversity revealed by taxonomically verified species list. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.144, n.40, p. 10695-10700, 2017

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PAULA, M. O. Método de ressonância para predição de propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* termoretificadas. **Revista Matéria**, v.22, n.1, e11772, 2017.

CARVALHO, M. S. P.; CARVALHO, J. O. P. Influência do espaçamento na densidade da madeira de *Bagassa guianensis* Aubl. (Tatajuba) no planalto de Belterra, Pará. **Revista Ciências Agrárias**, v.35, p. 73-78, 2001.

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

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. 103 f. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

- CHAUHAN, S.; SETHY, A. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v.18, n.2, p. 373-382, 2016. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000034
- CHEN, Y.; GUO, W. Nondestructive evaluation and reliability analysis for determining the mechanical properties of old wood of ancient timber structure. **BioResources**, v.12, n.2, p. 2310-2325, 2017.
- CHEN, Y.; GUO, W. Mechanical properties evaluation of two wood species of ancient timber structure with nondestructive testing methods. **BioResources**, v.11, n.3, p. 6600-6612, 2016.
- 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. **Engenharia Agrícola**, v.37, n.2, p. 376-384, 2017. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p376-384/2017
- 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, 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, A. L.; MOLINA, J. C.; PANZERA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; SCALIANTE, R. M.; LAHR, F. A. R. Módulo de elasticidade em vigas de madeira de dimensões estruturais pelo método dos mínimos quadrados. **Revista Árvore**, v.37, n.5, p. 981-988, 2013.
- COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 462**. Maderas: método de determinación de contracción. La Paz: COPANT, 1972.
- _____. **COPANT 30:1-006**. Maderas: método de determinación de flexión estática. La Paz: COPANT, 1972.
- _____. **COPANT 30:1-006**. Maderas: método de determinación del peso específico aparente. La Paz: COPANT, 1972.
- COSTA, C. P. D. **Fôrmas para construção civil e suas aplicações**. 2014. 97 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- COSTA, M. A.; COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v.21, n.3, p. 567-577, 2011.

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

DUARTE, B. B. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira**. 2017. 102 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ELEOTÉRIO, J. R.; SILVA, C. M. K. Programas de secagem para Marupá (*Simarouba amara*), Pará-Pará (*Jacaranda copaia*) e Virola (*Virola surinamensis*). *Floresta*, v.44, n.2, p. 313-322, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (EUROCODE). **EN 383**. Timber Structures. Test Methods. Determination of Embedding Strength and Foundation Values for Dowel Type Fasteners. Brussels: EUROCODE, 2007.

_____. **EUROCODE 5**. Design of Timber Structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings Structures. Brussels: EUROCODE, 2004.

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influência da posição dos instrumentos de medida na determinação do módulo de elasticidade da madeira na compressão paralela às fibras (E_{co}). *Revista Árvore*, v.39, n.4, p. 743-749, 2015. DOI: 10.1590/0100-67622015000400017

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Verification of test conditions to determine the compression modulus of elasticity of wood. *International Journal of Agriculture and Forestry*, v.3, n.2, p. 66-70, 2013. DOI: 10.5923/j.ijaf.20130302.06

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R. Comparação entre resultados determinados para propriedades mecânicas da madeira a partir de duas máquinas universais de ensaios. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v.14, n.34, p. 9-22, 2013.

FREITAS, A. C. S. **Tratamento termomecânico unilateral em madeira tropical para produção de piso: efeitos sobre as propriedades físicas, mecânicas e superficiais**. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

FREITAS, A. S.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da *Simarouba amara* (Aubl.). *Floresta e Ambiente*, v.23, n.4, p. 565-572, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.144115

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (FSC). FSC: Facts & Figures. **FSC, 2017**. Disponível em: <<https://br.fsc.org/pt-br/fsc-brasil/fatos-e-nmeros>>. Data de acesso: 20.out.2017.

GARAY, R.; INOSTROZA, M.; DUCAUD, A. Color and gloss evaluation in decorative stain applied to cases of *Pinus radiata* wood treated with copper azole micronized type C.

Maderas: Ciencia y Tecnologia, v.19, n.1, p. 21-38, 2017. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000003

GARCIA, R. A.; MARINONIO, G. B. Variação da cor da madeira de Teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Floresta e Ambiente**, v.23, n.1, p. 124-134, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.035313

GONÇALEZ, J. C.; MARQUES, M. H. B.; KARAS, M. C. S.; JANIN, G.; RIBEIRO, P. G. Effect of drying process on Marupá Wood color. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.16, n.3, p. 337-342, 2014. DOI: 10.4067/S0718-221X2014005000026

GONÇALEZ, J. C.; FÉLIX, T. L. F.; GOUVEIA, F. N.; CAMARGOS, J. A. A.; RIBEIRO, P. G. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de Freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, v.20, n.4, p. 657-664, 2010.

GÜNTEKIN, E.; AYDIN, T. Y. Prediction of bending properties for some softwood species grown in Turkey using ultrasound. **BioResources**, v.61, n.6, p. 993-1002, 2016.

HANSSON, L.; ANTTI, A. L. The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood. **Journal of Materials Precessing Technology**, v.171, p.467-470, 2006. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.007

HERMOSO, E.; MATEO, R.; GONZÁLEZ, G. I.; MONTÓN, J.; ARRIAGA, F. Visual grading and structural properties assessment of large cross-section *Pinus radiata* D. Don Timber. **BioResources**, v.11, n.2, p. 5312-5321, 2016.

HODOUSEK, M.; DIAS, A. M. P. G.; MARTINS, C.; MARQUES, A. F. S.; BÖHM, M. Comparison of non-destructive methods based on natural frequency for determining the modulus of elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*. **BioResources**, v.12, n.1, p. 270-282, 2017.

ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of specimen orientation on determination of elasticity in static bending. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.17, n.2, p. 229-238, 2015. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000022

ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of the wood specimen position on calculus of the bending modulus of elasticity. **International Journal of Materials Engineering**, v.3, n.3, p. 41-46, 2013. DOI: 10.5923/j.ijme.20130303.03

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras. **IPT**, 2017. Disponível em: <http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira>. Data de acesso: 18. jan. 2017.

INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION (CIE). Comissão Internationale de l'Eclairage. **CIE**, 2017. Disponível em: <<http://www.cie.co.at>>. Data de acesso: 10. jan. 2017.

- JANIN, G.; GONÇALEZ, J.; ANANÍAS, R.; CHARRIER, B.; SILVA, G. F.; DILEM, A. Aesthetics appreciation of woos colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELAB system. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v.3, n.1, p. 3-13, 2001. DOI: 10.4067/S0718-221X2001000100001
- KERBER, P. R.; STANGERLIN, D. M.; PARIZ, E.; MELO, R. R.; SOUZA, A. P.; CALEGARI, L. Colorimetry and surface roughness of three amazon woods submitted to natural weathering. **Nativa**, v.4, n.5, p. 303-307, 2016. DOI: 10.14583/2318-7670.v04n05a06
- LAHR, F. A. R.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA FILHO, F. M.; MENDES, I. S.; CHRISTOFORO, A. L. Full characterization of *Erismia uncinatum* Warm wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.5, p. 147-150, 2016a 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, 2016b DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.05
- LAHR, F. A. R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. 1983. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.
- LEDERER, W.; BADER, T. K.; UNGER, G.; EBERHARDSTEINER, J. Influence of different types of reinforcements on the embedment behavior of steel dowels in wood. **European Journal of Wood Products**, v.74, p. 793-807, 2016. DOI: 10.1007/s00107-016-1058-6
- LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. How many species are there in Brazil? **Conservation Biology**, v.19, n.3, p. 619-624, 2005. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2005.00680.x
- LOBÃO, M. S.; DELLA LÚCIA, R. M.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de Eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p. 889-894, 2004.
- LOPES, J. O.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. F.; NASCIMENTO, A. M. Alteração da cor da madeira de Teca por tratamento térmico. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, p. 521-534, 2014. DOI: 10.1590/2179-8087.013612
- 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
- MARANHÃO, G. M. **Fôrmas para concreto: otimização do projeto segundo a NBR 7190/1997**. 2000. 225 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de

Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MEINTS, T.; TEISCHINGER, A.; STINGL, R.; HANSMANN, C. Wood colour of central European wood species: CIELAB characterization and colour intensification. **European Journal of Wood Products**, v.11,n.2, p. 5155-5168, 2016. DOI: 10.1007/s00107-016-1108-0.

MOLINA, J. C.; CESAR, T. K.; ALMEIDA, C. C.; PALLAROLAS, E. A. F. F. Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004). **REM: International Engineering Journal**, v.70, n.1, p. 9-17, 2017 DOI: 10.1590/0370-44672016700044

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. 3^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira: análise do número de ciclos de carregamento. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v.3, n.8, p. 1-28, 2002.

MORI, C. L. S. O.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, A. C. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de Eucaliptos. **Ciência Florestal**, v.14, n.2, p. 123-132, 2004.

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

OKINO, E. Y. A.; PASTORE, T. C. M.; CAMARGOS, J. A. A.; CORADIN, V. T. R.; TEIXEIRA, D. E.; SANTANA, M. A. E.; FAGG, C. W. Accelerated laboratory test of three Amazonian Wood specie called Tauari, exposed to white- and brow-rot fungi and color response according to CIEL L*a*b* system. **Ciência Florestal**, v.25, n.3, p. 581-593, 2015. DOI: 10.5902/1980509819609

OLIVEIRA, E. M. **Avaliações não destrutivas para o monitoramento de madeiras submetidas a fungos apodrecedores**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

OLIVEIRA, J. T. S.; SOUZA, L. C.; DELLA LUCIA, R. M.; SOUZA JÚNIOR, W. P. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, v.29, n.5, p. 819-826, 2005.

OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A.; SALES, A. Ultrasonic measurements in Brazilian wood. **Materials Research**. v.5, n.1, p. 51-55, 2002.

PAULA, M. H.; MESQUITA, R. S. R.; GONÇALEZ, J. C.; RIBEIRO, E. S.; SOUZA, R. S. Utilização de métodos não destrutivos para a caracterização simplificada da madeira de Cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, v.15, n.2, p. 136-149, 2016.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

RIBEIRO, E. S.; GONÇALEZ, J. C.; SOUZA, R. S.; PAULA, M. H. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v.4, n.2, p. 103-106, 2016. DOI: 10.14583/2318-7670.v04n02a09

SANTOS, D. V. B.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of heat treatment on color, weight loss, specific gravity and equilibrium moisture content of two low market valued tropical woods. **Wood Research**, v.59, n.2, p. 253-264, 2014.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: Seru (*Allantoma lineata*) e Marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, v.40, n.2, p. 345-354, 2010.

SANTOS, Z. M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill: Maiden em ensaios laboratoriais**. 1992. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

SCALIANTE, R. M. **Pontes em vigas e tabuleiros em painéis de Madeira Laminada Colada (MLC)**. 2014. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

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

SILVA, E. S.; STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L.; PARIZ, E. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência da Madeira**, v.6, n.1, p. 31-37, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p31-37

SOUZA, F.; TELES, R. F.; RIBEIRO, P. G.; CAMARGOS, A. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Resistência natural e alteração da cor da madeira de *Machaerium scleroxylon* Tul. submetida ao ataque de fungos apodrecedores. **Scientia Forestalis**, v.38, n.87, p. 449-457, 2010.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; GARLET, A. Dureza *Rockwell* da madeira de três espécies amazônicas submetidas a ensaios de apodrecimento acelerado. **Ciência Rural**, v.43, n.4, p. 623-630, 2013a.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; PASTORE, T. C. M.; GARLET, A. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazonica**, v.43, n.4, p. 429-438, 2013b.

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/floram.2011.043

TELES, R. F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras Amazônicas tratadas quimicamente**. 2014. 208 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TELES, R. F.; COSTA, A. F.; SOUZA, M. R. Análise da influência do tratamento preservativo na cor e rugosidade de superfícies de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, v.23, n.1, p. 100-108, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.079714

TELES, R. F.; COSTA, A. F. Influência do intemperismo acelerado nas propriedades colorimétricas da madeira de Angelim Pedra. **Nativa**, v.2, n.2, p. 65-70, 2014. DOI: 10.14583/2318-7670.v02n02a02

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v.3, n.9, p. 1-15, 2002.

ZBOROWSKA, M.; WENCEK, A. S.; ORGANISTA, M. N.; WALISZEWSKA, B.; PRADZYNSKI, W. Analysis of photodegradation process of *Pinus sylvestris* L. Wood after treatment with acid and alkaline buffers and light irradiation. **BioResources**, v.10, n.2, p. 2057-2066, 2015.

ZENID, G. J.; CECCANTINI, G. C. T. **Identificação macroscópica de madeiras**. São Paulo: IPT, 2007.

YANG, Y.; ZHAN, T. Y.; LU, J. X.; JIANG, J. H. Influences of thermo-vacuum treatment on colors and chemical compositions of Alder Birch Wood. **BioResources**, v.10, n.4, p. 7936-7945, 2015.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

- ABRUZZI, R. C.; DEDAVID, B. A.; PIRES, M. J. R.; FERRARINI, S. F. Relationship between density and anatomical structure of different species of Eucalyptus and identification of preservatives. **Materials Research**, v.16, n.4, p. 1428-1438, 2013. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000148.
- ADAMOPOULOS, S.; PASSIALIS, C. Relationship of toughness and modulus of elasticity in static bending of small clear spruce wood specimens. **European Journal of Wood Products**, v.68, p. 109-111, 2010. DOI: 10.1007/s00107-009-0365-6
- AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de Muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de Seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização de interiores. **Ciência Florestal**, v.16, n.4, p. 445-451, 2006.
- BARRETO, C. C. K.; PASTORE, T. C. M. Resistência ao intemperismo artificial de quatro madeiras tropicais: o efeito dos extrativos. **Ciência Florestal**, v.19, n.1, p. 23-30, 2009.
- CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.15, n.1, p. 57-64, 2013. DOI: 10.4067/S0718-221X2013005000005
- CADEMARTORI, P. H. G.; MATTOS, B. D.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A. Colour responses of two fast-growing hardwoods to two-step steam-heat treatments. **Materials Research**, v.17, n.2, p. 487-493, 2014. DOI: 10.1590/S1516-14392014005000031
- CARRASCO, E. V. M.; PEREIRA, N. C. S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Contruindo**, v.5, n.1, p. 45-51, 2013.
- CHRISTOFORO, A. L.; ARROYO, F. N.; SILVA, D. A. L.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Full characterization of *Calycophyllum multiflorum* wood specie. **Engenharia Agrícola**, v.37, n.4, p. 637-643, 2017. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p637-643/2017
- CONDE, M. J. M.; LIÑÁN, C. R.; HITTA, P. R. A study of the wood-related factors involved in non-destructive ultrasound tests perpendicular to the grain for Scots pine. **Materials and Structures**, v.12, n.2, p. 1543-1552, 2016. DOI: 10.1617/s11527-015-0594-6.
- CUECUECHA, O. G. V.; CAMPOS, E. M. Z.; GALLEGOS, E. G.; FLORES, J. A. R. Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. **Madera y Bosques**, v.21, n.1, p. 129-138, 2015.
- CSORDÓS, D.; NÉMETH, R.; BAK, M. Variation of colour properties between and within new *Robina* varieties with enhanced growing rates from different sites. **BioResources**, v.9, n.4, p. 7099-7108, 2014.
- GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBER, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationship to extractives

and brown-rot decay resistance. **Trees**, v.18, p. 102-108, 2004. DOI: 10.1007/s00468-003-0290-y

GONZÁLEZ, G. I.; MONTÓN, J.; ARRIAGA, F.; SEGUÉS, E. In-situ assessment of structural timber density using non-destructive and semi-destructive testing. **BioResources**, v.10, n.2, p. 2256-2265, 2015.

HASSAN, K. T. S.; HORÁČEK, P.; TIPPNER, J. Evaluation of stiffness and strength of Scots Pine Wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. **BioResources**, v.8, n.2, p. 1634-1645, 2013.

KLOIBER, M.; DRDÁČKÝ, M.; TIPPNER, J.; HRIVNÁK, J. Conventional compressive strength parallel to the grain and mechanical resistance of wood against pin penetration and microdrilling established by in-situ semidestructive devices. **Materials and Structures**, v.12, n.2, p. 3217-3229, 2015. DOI: 10.1617/s11527-014-0392-6

KLOIBER, M.; TIPPNER, J.; HRIVNÁK, J. Mechanical properties of wood examined by semi-destructive devices. **Materials and Structures**, v.12, n.2, p. 199-212, 2014. DOI: 10.1617/s11527-013-0055-z

KOKUTSE, A. D.; STOKES, A.; BAILLÈRES, H.; KOKOU, K.; BAUDASSE, C. Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f) heartwood and relationship with colour. **Trees**. v. 20, p. 219-223, 2006. DOI:10.1007/s00468-005-0028-0

LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVA, D. A. L.; GONÇALVES, D. Anisotropy influence in obtaining stiffness property in bending of Brazilian Wood species. **International Journal of Materials Engineering**, v.4, n.3, p. 92-96, 2014. DOI: 10.5923/j.ijme.20140403.04

LENTINI, M. W.; GOMES, P. C.; SOBRAL, L. **Acertando o alvo 3: desvendando o mercado brasileiro de madeira amazônica certificada FSC**. Piracicaba: Imaflora, 2012.

LLANA, D. F.; GONZALEZ, G. I.; ARRIAGA, F.; NIEMZ, P. Influence of temperature and moisture content on non-destructive measurements in Scots Pine Wood. **Wood Research**, v.59, n.5, p. 768-780, 2014.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; PENNA, E. S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinheiro, *Guarea trichilioides* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, v. 38, n.1, p. 43-51, 2008.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de Peroba-Mica, *Aspidosperma populiform* A. DC. (APOCYNACEAE). **Floresta**, v.36, n.77, p. 11-21, 2008.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; ESTEVÃO, J. G. Descrição dendrológica e caracterização físico-mecânica da madeira de Amescla-Aroeira, *Protium heptaphyllum* (Aubl.) March. (Burseraceae). **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v.6, n.17, p. 1-13, 2005.

- MARTINS, C. E. J.; DIAS, A. M. P. G.; MARQUES, A. F. S.; DIAS, A. M. A. Non-destructive methodologies for assessment of the mechanical properties of new utility poles. **BioResources**, v.12, n.2, p. 2269-2283, 2017.
- MARTINS, M. F.; BELTRAME, R.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; SANTOS, G. A. Colorimetria como ferramenta de agrupamento de madeira de clones de eucalipto. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, n.84, p. 443-449, 2015.
- MATTOS, B. D.; CADEMARTORI, P. H. G.; LOURENÇON, T. V.; GATTO, D. A. Colour changes of Brazilian eucalypts wood by natural weathering. **International Wood Products Journal**, v.5, n.1, p. 33-38, 2014. DOI: 10.1179/2042645313Y.0000000035
- OBERHOFNEROVÁ, E.; ARNETOVÁ, K.; HOLECEK, T.; BORUVKA, V.; BOMBA, J. Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering. **BioResources**, v.11, n.2, p. 5155-5168, 2016.
- PÁNEK, M.; REINPRECHT, L. Colour stability and surface defects of naturally aged wood treated with transparent paints for exterior constructions. **Wood Research**, v.59, n.3, p. 421-430, 2014.
- PAULA, M. H. **Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess)**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- PAZOS, G. B.; MORALES, R. P. Z.; CANDELARIA, V. R. O.; BÁEZ, A. G.; SALAZAR, J. A. H. Correlación de los resultados de impacto o tenacidad de 16 maderas mexicanas utilizando dos métodos de prueba. **Madera y Bosques**, v.9, n.1, p. 55-70, 2003.
- QUEIROZ, F. L. C.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H.; RIBEIRO, E. S.; LIMA, C. M. Intemperismo artificial em lâminas de *Tectona grandis* tratadas com produtos de acabamento. **Floresta e Ambiente**, v.23, n.4, p. 573-581, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.126315
- REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **Revista IPEF**, v.39, p. 33-40, 1998.
- ROYER, M.; RODRIGUES, A. M. S.; HERBETTE, G.; BEAUCHÊNE, J.; CHEVALIER, M.; HÉRAULT, B.; THIBAUT, B.; STIEN, D. Efficacy of *Bagassa guianensis* Aubl. extract against wood decay and human pathogenic fungi. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.70, p. 55-59, 2012. DOI: 10.1016/j.ibiod.2011.10.016
- SANTOS, C. L.; JESUS, A. M. P.; MORAIS, J. J. L.; LOUSADA, J. L. P. C. Bearing properties of Portuguese Pine wood beneath a laterally loaded dowel. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v.20, p. 45-51, 2008.
- SEGUNDINHO, P. G. 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**, v.36, n.6, p. 1155-1161, 2012.

SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JUNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, v.17, n.1, p. 17-23, 2007.

SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M. Fotodecomposição e proteção de madeiras tropicais. **Floresta e Ambiente**, v.11, n.2, p. 7-13, 2004.

TELEGINSKI, E.; MACHADO, G. O.; CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, D. A. L.; SEGUNDINHO, P. G. A.; LAHR, F. A. R. Emprego de técnica de colorimetria e ferramentas de sensoriamento remoto para avaliar o tratamento por CCB de mourões de madeira. **Scientia Forestalis**, v.44, n. 111, p. 587-593, 2016. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.05

TOONG, W.; RATNASINGAM, J.; ROSLAN, M. K. M.; HALIS, R. The prediction of wood properties from anatomical characteristics: the case of common commercial Malaysian timbers. **BioResources**, v.9, n.3, p. 5184-5197, 2014.

TORRES, S. S.; JOMAA, W.; MARC, F.; PUIGGALI, J. R. Étude des altérations de la couleur du bois de chêne lors du séchage sous vide discontinu. **Madera y Bosques**, v.22, n.2, p. 119-130, 2016.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SOUZA, M. T.; JARDIM, C. M.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Effect of extractives on wood color of heat treated *Pinus radiata* and *Eucalyptus pellita*. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v.17, n.4, p. 857-864, 2015. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000074

ZANUNCIO, A. J. V.; NOBRE, J. R. C.; MOTTA, J. P.; TRUGILHO, P. F. Química e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden termorretificada. **Revista Árvore**, v.38, n.4, p. 765-770, 2014.

WEILER, M.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; GÜTHS, W. G. Nondestructive evaluation of wood decayed by xylophagous organisms. **Materials Research**, v.16, n.5, p. 1203-1208, 2013. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000102

YEO, H.; SMITH, W. B.; HANNA, R. B. Determination of surface moisture content of wood utilizing a colorimetric technique. **Wood and Fiber Science**, v.34, n.3, p. 419-424, 2002.