UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUCAS JOSÉ MARINI

**Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus* sp. por
colorimetria**

São Carlos

2019

LUCAS JOSÉ MARINI

**Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus* sp. por
colorimetria**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2019

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

MM339e Marini, Lucas José
 Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de
Pinus sp. por colorimetria / Lucas José Marini;
orientador Francisco Antonio Rocco Lahr. São Carlos,
2019.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de
Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e
Aplicação de Materiais -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

 1. Colorimetria. 2. Modelos de Regressão. 3.
Propriedades Mecânicas. 4. Pinus. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCAS JOSÉ MARINI**.

Título da dissertação: "Estimativa do desempenho mecânico de peças de Pinus sp. colorimetria".

Data da defesa: 01/02/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Francisco Antonio Rocco Lahr**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Maximiliano dos Anjos Azambuja**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Diego Henrique de Almeida**
(Universidade Federal de Rondônia/UNIR)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Associado **Rafael Salomão**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada mãe Odila F. Marini, em memórias ao meu querido pai José A. Marini e ao professor Rocco.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela oportunidade de estudar, por me guiar em bons caminhos e por todas as graças que me concede.

Ao meu pai, José Antônio, que cedo se foi, mas de quem guardo as primeiras lições de vida que certamente foram imprescindíveis para a concretização deste sonho. Agradeço a Deus por ter me permitido conviver com uma pessoa tão especial quanto você.

À minha mãe, Odila, por todo amor, por ser modelo de vida e me proporcionar força para superar todos os obstáculos, fazendo de tudo para que eu pudesse realizar este sonho. Não basta palavras para expressar os mais sinceros agradecimentos.

Ao meu irmão Marcos Rafael, minha cunhada Luciana, minha sobrinha Rafaela e minha avó Vicensa, pelo apoio sempre presente.

Ao meu orientador, professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pela amizade e confiança depositada em mim e em nosso trabalho. Agradeço pela sua dedicação, atenção e por todos os ensinamentos, contribuindo para o meu crescimento científico.

Aos amigos, presentes em todos os momentos e que sempre me apoiaram nesta jornada, sendo eles: Matheus, Michelle, Leticia, Roberta, Fabiano, Mariano, Iris, Joice, Rafael e Talles.

Agradeço a professora Dr^a Laurenn Borges de Macedo, pela amizade e por ter me iniciado nos caminhos da investigação científica.

Agradeço ao professor Dr. André Luís Christoforo, pelos valiosos conhecimentos e discussões ao decorrer do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da EESC/USP.

A todos os amigos do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM).

A toda equipe do LaMEM: Prof. Dr. Antônio Alves Dias, Prof. Dr. Carlito Calil Jr., Bragatto, Cido (*in memoriam*), que tanto me ajudou com os ensaios, Arnaldo, Jaime, Roberto, Sílvio e Samuel.

Aos professores que compuseram a banca de qualificação, sendo eles: André Luís Christoforo, Antônio Alves Dias e Lísias Pereira Novo.

À empresa Partículas Tecnologia e Desenvolvimento em Materiais Lignocelulósicos LTDA, pela disponibilização do colorímetro portátil.

À empresa Berneck S.A., pela disponibilização das peças de madeira de *Pinus*.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

MARINI, L. J. **Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus* sp. por colorimetria.** 102f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

A possibilidade de utilização da técnica de colorimetria para obter informações relevantes das peças de *Pinus* é uma excelente alternativa, uma vez que o colorímetro é um equipamento de fácil manuseio e rápida aquisição de dados, e o uso de madeira de florestas plantadas é crescente no Brasil. O objetivo desta pesquisa foi gerar modelos de regressão para estimativa da densidade aparente e das propriedades mecânicas (resistência e módulo de elasticidade) em função de parâmetros colorimétricos. Nesta pesquisa, 403 amostras de *Pinus* sp. foram caracterizadas de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$, utilizando um colorímetro *Konica Minolta*. A densidade aparente, a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras das 403 amostras também foram determinados, de acordo com as premissas do Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Foi proposto um modelo de regressão multivariável e testado utilizando análise de variância (ANOVA), ao nível de significância de 5%, para estimar as três propriedades citadas, em função dos parâmetros colorimétricos e do número anéis de crescimento (quantidades de lenho inicial e lenho tardio). Os resultados indicaram que a madeira apresenta coloração branco-amarelada, pois possui valor de luminosidade (L^*) superior a 54. A pigmentação amarela (b^*) é a principal responsável pela formação das cores no gênero *Pinus*. A análise de correlação entre cor, número de lenhos (Nle) e densidade revelou que apenas a luminosidade, o número de lenhos e a interação desses fatores afetaram significativamente os valores de densidade. A diminuição da luminosidade e o aumento na quantidade de lenhos implicam um aumento significativo nos valores de densidade da madeira. A análise de correlação entre cor, número de lenhos e módulo de elasticidade revelou que apenas o número de lenhos afetou significativamente os valores do módulo de elasticidade. O aumento no número lenhos implica aumento significativo no módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras. A análise de correlação entre cor, número de lenhos e resistência à compressão paralela às fibras mostrou que apenas os fatores L^* , a^* , b^* e as interações $L^* \cdot b^*$, $a^* \cdot b^*$, afetaram significativamente os valores da resistência. A interação entre os fatores L^* e b^* implicou na redução dos valores da resistência à compressão paralela às fibras. A técnica de colorimetria mostrou-se adequada para a estimativa de propriedades físico-mecânicas da madeira.

Palavras-chave: Colorimetria, Modelos de Regressão, Propriedades Mecânicas, *Pinus*.

ABSTRACT

MARINI, L. J. **Estimative of physical and mechanical properties of *Pinus* sp. by colorimetry**. 102f. Dissertation (Master) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The possibility of using the colorimetric technique to obtain relevant information of *Pinus* pieces is an excellent alternative, since the colorimeter is an equipment of easy handling and quick data acquisition, and the use of wood from planted forests is growing in Brazil. This research aims to generate regression models to estimate the wood density and mechanical properties (strength and modulus of elasticity) as a function of colorimetric parameters. Here, 403 pieces of *Pinus* sp. have been characterized according to the CIE $L^*a^*b^*$ system using a *Konica Minolta* colorimeter. The apparent density, the compression parallel to the grain strength and the modulus of elasticity in the compression parallel to the grain of the 403 samples were also determined, according to the assumptions of Brazilian standard code ABNT NBR 7190 (1997). It was proposed a multivariate regression model and tested using analysis of variance (ANOVA), at 5% significance level, to estimate the density, the compressive strength and the modulus of elasticity as a function of the colorimetric parameters and the number of tree growth rings (earlywood and latewood). Results indicated that the wood has a yellowish-white coloration, with a value of brightness (L^*) higher than 54. The yellow pigmentation (b^*) is the main responsible for the color formation of the genus *Pinus*. Correlation analysis among color, number of tree growth rings (N_{le}) and density showed that only the brightness, the number of tree growth rings and the interaction of these factors affected significantly the values of density. Decreasing in brightness and increasing in the number tree growth rings implies a significant increasing in wood density values. Correlation analysis among color, number of tree growth rings and modulus of elasticity showed that only the number of tree growth rings affected significantly the values of modulus of elasticity. Increasing in the number tree growth rings implies a significant increasing in the modulus of elasticity. Correlation analysis among color, number of tree growth rings and compression parallel to the grain strength showed that only the factors L^* , a^* , b^* and the interactions $L^* \cdot b^*$, $a^* \cdot b^*$, affected significantly the values of strength. The interaction between the factors L^* and b^* implied the reduction of the values of the compression parallel to the grain strength. The colorimetric technique was appropriated for estimative of physico-mechanical properties of wood.

Keywords: Colorimetry, Mechanical Properties, Regression Models, *Pinus*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Área de árvores plantadas (valores em milhões de hectares).	30
Figura 2 – Áreas de árvores plantadas no Brasil por estado e por gênero.	31
Figura 3 – Cultivo de <i>Pinus taeda</i>	32
Figura 4 – Seção de um tronco típico.	34
Figura 5 – Anéis de crescimento e lenho inicial e tardio em <i>Pinus taeda</i>	36
Figura 6 – Demarcação de madeira juvenil, adulta e de transição em <i>Pinus taeda</i> L.	36
Figura 7 – Introdução à composição química da madeira.	37
Figura 8 – Estrutura da celulose.	38
Figura 9 – Nós em peças estruturais.	39
Figura 10 – Exemplos de cores da madeira: (A) arroxeada de Roxinho (<i>Peltogyne</i> spp.); (B) amarelo-dourado da Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.); (C) castanho-claro-amarelado do Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i> Aublet.).	46
Figura 11 – Sistema CIE L*a*b*.	47
Figura 12 – Exemplo de colorímetro portátil.	48
Figura 13 – Regressão linear entre densidade da madeira de <i>Pinus caribaea</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> e os parâmetros colorimétricos: (A) claridade (luminosidade (L*)) e (B) pigmento vermelho (a*).	51
Figura 14 – Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira do cerne de Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) correlação entre densidade e b* na direção radial e (B) correlação entre densidade e L* na direção tangencial.	57
Figura 15 – Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira do alburno de Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) correlação entre densidade e L* na direção radial e (B) correlação entre densidade e a* na direção radial.	57
Figura 16 – Correlação entre teor de extrativos e parâmetros colorimétricos da madeira Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) L* e (B) a* na direção radial e (C) L* e (D) na direção tangencial.	58
Figura 17 – Corpo de prova antes do ensaio de compressão.	63
Figura 18 – Corpos de prova descartados em função da incidência severa de nós.	64
Figura 19 – Equipamento de ensaio de compressão paralela às fibras com corpo de prova, transdutores de deslocamento e célula de carga.	65
Figura 20 – Colorímetro portátil <i>Konica Minolta</i> : (A) Ensaio sendo realizado na amostra, (B) visor do aparelho com os valores dos parâmetros colorimétricos.	67
Figura 21 – Identificação dos lenhos no corpo de prova.	68
Figura 22 – Resultados dos parâmetros colorimétricos L* (A), a* (B) e b* (C).	71
Figura 23 – Resultados do número de lenhos (A) e da densidade aparente (B).	73
Figura 24 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para a densidade aparente – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).	74
Figura 25 – Gráfico da interação dos fatores L* e Nle para a densidade aparente.	75
Figura 26 – Corpos de prova com elevada densidade.	76
Figura 27 – Gráfico ou superfície do modelo de regressão da Equação 21.	76

Figura 28 – Resultado do módulo de elasticidade.	77
Figura 29 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para o módulo de elasticidade – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).	78
Figura 30 – Resultado da resistência na compressão paralela.	80
Figura 31 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para a resistência na compressão – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).	81
Figura 32 – Gráficos de interação entre fatores para a resistência na compressão paralela às fibras – $L^* \cdot b^*$ (A), $a^* \cdot b^*$ (B).	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de madeiras coníferas nativas e de reflorestamento (ABNT NBR 7190:1997).....	32
Tabela 2 – Resultados médios das propriedades mecânicas e da massa específica aparente (12%) da madeira de espécies de <i>Pinus</i> tropicais e <i>Pinus taeda</i>	33
Tabela 3 – Consumo de madeira para uso industrial, 2016.	33
Tabela 4 – Composição média de madeiras de coníferas e dicotiledôneas.....	37
Tabela 5 – Classes de resistência de coníferas.	41
Tabela 6 – Modelos de regressão linear entre as propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos das madeiras de <i>Cunninghamia lanceolata</i> Lamb. Hook e <i>Ulmus rubra</i> juntamente com os coeficientes de determinação.....	43
Tabela 7 – Regressão linear e coeficiente de determinação para cada propriedade mecânica baseada nos parâmetros não destrutivos da madeira de <i>Abies fabri</i> (Mast.) Craib.	44
Tabela 8 – Modelos de regressão e coeficiente de determinação entre módulos de elasticidade estático e dinâmico para as madeiras de <i>Cupressus lusitanica</i> e <i>Populus x canadensis</i>	45
Tabela 9 – Modelos de regressão entre os parâmetros colorimétricos das madeiras de Marupá, Jequitibá e Cumaru biodeteriorada e a perda de massa (P_M).....	50
Tabela 10 – Correlação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Pinus caribaea</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	52
Tabela 11 – Correlações entre a diferença de coloração e tempo de intemperismo para as madeiras de Marupá, Tauari e Cumaru com e sem tratamento químico com CCA.	53
Tabela 12– Valores da correlação de <i>Pearson</i> entre parâmetros colorimétricos e densidade aparente a 12% de umidade.	55
Tabela 13 – Valores deste trabalho e da literatura para os parâmetros L^* , a^* e b^*	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	–	Análise de Variância
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
°C	–	Grau Celsius
CCA	–	Arseniato de Cobre Cromatado
CIE	–	Comissão Internacional de Iluminantes
cm	–	Centímetro
cm ³	–	Centímetro cúbico
CV	–	Coefficiente de Variação
EESC	–	Escola de Engenharia de São Carlos
EMBRAPA	–	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
g	–	Grama
GP	–	Grau de Polimerização
GPa	–	Gigapascal
IBÁ	–	Indústria Brasileira de Árvores
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	–	Kelvin
kg	–	Quilograma
kN	–	Quilonewton
LaMEM	–	Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira
m	–	Metro
m ³	–	Metro cúbico
máx	–	Valor máximo por propriedade
MDF	–	Medium Density Fireboard
min	–	Minuto
mm	–	Milímetro
mm ²	–	Milímetro quadrado
MTG	–	Método <i>Timber Grader</i>
MOE	–	Módulo de Elasticidade
MOR	–	Módulo de Ruptura
MPa	–	Megapascal

N	–	Newton
nm	–	Nanômetro
NS	–	Não Significativo
NBR	–	Norma Brasileira Registrada
OSB	–	Oriented Strand Board
PR	–	Paraná
SET	–	Departamento de Engenharia de Estruturas
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
α_i	Coefficientes ajustados do método dos mínimos quadrados
a^*	Parâmetro colorimétrico do eixo vermelho/verde
b^*	Parâmetro colorimétrico do eixo amarelo/azul
C	Carbono
Ca	Cálcio
ε	Erro residual
$\varepsilon_{10\%}$	Deformação específica correspondente à tensão de 10%
$\varepsilon_{50\%}$	Deformação específica correspondente à tensão de 50%
E_{AC}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de acelerômetro
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_D	Módulo de elasticidade dinâmico
E_M	Módulo de elasticidade na flexão elástica
E_{MTG}	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de MTG
$E_{t0,m}$	Módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras
F	Parâmetro não destrutivo do resistógrafo
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
$f_{c90,k}$	Resistência característica à compressão normal às fibras
$f_{e0,k}$	Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras
$f_{e90,k}$	Resistência característica ao embutimento normal às fibras
f_{H90}	Dureza normal às fibras
f_M	Módulo de ruptura na flexão elástica
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
$f_{tM,k}$	Resistência característica à tração na flexão
f_v	Resistência ao cisalhamento

f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{v0,k}$	Resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
H	Hidrogênio
K	Potássio
L^*	Parâmetro colorimétrico luminosidade
ln	logaritmo neperiano
Mg	Magnésio
m_{12}	Massa da madeira ao teor de umidade de 12%
N	Nitrogênio
Nle	Número de lenhos
O	Oxigênio
P_M	Perda de massa da madeira biodeteriorada
ρ	Densidade da madeira
ρ_{ap}	Densidade aparente da madeira
$\rho_{ap,12\%}$	Densidade aparente da madeira ao teor de 12% de umidade
$\rho_{ap,15\%}$	Densidade aparente da madeira ao teor de 15% de umidade
$\sigma_{10\%}$	Tensão de compressão correspondente a 10% da resistência f_{c0}
$\sigma_{50\%}$	Tensão de compressão correspondente a 50% da resistência f_{c0}
R	Coefficiente de correlação
R^2	Coefficiente de determinação
R^2_{Aj}	Coefficiente de determinação ajustado
t	Tempo
U	Teor de umidade da madeira
V_{12}	Volume da madeira ao teor de umidade de 12%
ΔE	Diferença de coloração da madeira
ΔL^*	Diferença da luminosidade da madeira
Y	Valores das propriedades avaliadas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. Objetivos	27
1.2. Justificativa	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1. Madeiras de florestas plantadas	29
2.2. A madeira do gênero <i>Pinus</i>	30
2.3. Anatomia das coníferas.....	34
2.4. Composição química da madeira	37
2.5. Classificação Visual.....	39
2.6. Propriedades físicas e mecânicas da madeira	40
2.7. Estimativas de propriedades da madeira.....	41
2.8. Coloração na madeira	45
2.9. Técnica de Colorimetria.....	47
2.10. Aplicações da técnica de colorimetria	48
2.11. Conclusões da Revisão Bibliográfica	60
3. MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1. Confeção dos corpos de prova	63
3.2. Ensaios mecânicos nos corpos de prova	64
3.3. Determinação da densidade aparente.....	66
3.4. Determinação dos parâmetros colorimétricos.....	66
3.5. Determinação do número de lenhos.....	67
3.6. Modelos de regressão.....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1. Parâmetros Colorimétricos.....	71
4.2. Densidade Aparente	73
4.3. Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	77
4.4. Resistência na compressão paralela às fibras.....	79
5. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE – Dados obtidos dos corpos de prova estudados.....	93

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um recurso natural renovável, constituída por diferentes elementos químicos que, a partir da fotossíntese, formam moléculas que originam os polímeros celulose e hemiceluloses (CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003). A celulose é o componente majoritário da madeira, variando de $42 \pm 2\%$ para as coníferas e $45 \pm 2\%$ para as dicotiledôneas (KLOCK; ANDRADE, 2013). Além destes polímeros, o material apresenta lignina e pode apresentar extrativos.

A madeira está presente no cotidiano das pessoas nas mais diversas formas de utilização, como fabricação de móveis, celulose e papel, geração de energia e principalmente na construção civil (ANDRADE JR *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2017).

Para suprir a demanda por madeira serrada, foi introduzido no Brasil o gênero *Pinus*, nativo do hemisfério Norte, e que conta com mais de cem espécies (EMBRAPA, 2018). As estimativas indicam que, do consumo de madeira para uso industrial, estimado em aproximadamente 206 milhões de metros cúbicos, mais de 47 milhões de m³ são de *Pinus* sp. (IBÁ, 2017).

Na madeira de *Pinus* os anéis de crescimento são bem distintos. Estes se originam da atividade sazonal do câmbio vascular, a estrutura interna responsável pelo crescimento radial das árvores. Em países onde o clima possui clara distinção entre as estações do ano é mais fácil identificar o início e o fim de um período de crescimento da árvore (FERREIRA, 2009).

Em cada anel de crescimento é possível encontrar duas regiões distintas, uma apresentando coloração clara e outra escura. Na primavera e verão são produzidas células com lúmens maiores, resultando em madeira de menor densidade e de cor clara, geralmente denominado lenho inicial (*earlywood*). O lenho tardio (*latewood*) é formado durante o outono e inverno, suas células apresentam lúmens menores e densidade mais elevada, por isso apresentam maior resistência e coloração escura (SANTINI; HASELEIN; GATTO, 2000; BURGER; RICHTER, 1991).

O material proveniente de várias espécies de florestas plantadas pode apresentar grande incidência de defeitos, limitando sua utilização. Porém em um mesmo lote de madeira existe uma fração de material isento de defeitos e que pode apresentar elevada densidade. Para garantir o controle de qualidade das peças de madeira utiliza-se a classificação visual, em que as características de crescimento (como a presença de nós, distorção de fibra, etc.) são utilizadas para selecionar a madeira em classes de qualidade (CARREIRA, 2003).

A densidade da madeira é uma das propriedades físicas mais importantes, pois além de ser de fácil obtenção é possível utilizá-la na estimativa de propriedades de resistência e rigidez (AQUINO *et al.*, 2017; CHEN; GUO, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2016; DIAS; LAHR, 2004).

O ensaio de compressão da madeira fornece a resistência à compressão paralela às fibras, cujo valor característico ($f_{c0,k}$), possibilita a classificação de lotes de madeira nas classes de resistência estabelecidas pela ABNT NBR 7190:1997), além de fornecer também o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) que determina a rigidez da madeira (BERTOLINI *et al.*, 2012; FERRO *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2017).

Como a estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira necessita de equipamentos de grande porte, geralmente encontrados apenas em centros de estudos, a ABNT NBR 7190:1997 estabelece relações entre propriedades de resistência com base no conhecimento da resistência à compressão paralela às fibras (FERRO *et al.*, 2013; ALMEIDA, 2017).

Pesquisadores estão utilizando métodos não destrutivos, tais como os baseados em vibração e uso do resistógrafo, para estimar propriedades de rigidez e densidade da madeira, como os trabalhos de Chen e Guo (2016), Hodousek *et al.* (2017) e Lima *et al.* (2007).

A cor é uma propriedade organoléptica da madeira, permitindo sua caracterização macroscópica. Pode ser influenciada por fatores como: espécie, estrutura anatômica, composição química, genética, densidade e tratamentos silviculturais (MONTES *et al.*, 2008; GARCIA; MARINONIO, 2016; GIERLINGER *et al.*, 2003; GARCIA *et al.*, 2014).

No entanto, é uma propriedade subjetiva. Para padronizar a coloração é necessário transformá-la em números, possibilitando estudar a cor e suas variações nos materiais (ZENID; CECCANTINI, 2007; ALMEIDA, 2017).

O espaço de cor CIE $L^*a^*b^*$ é um método de quantificação de cores definido pela Comissão Internacional de Iluminantes (CIE) em 1976. Expressa a cor utilizando três valores numéricos: L^* para a luminosidade (escala entre as cores branco e preto), a^* (escala entre as cores verde e vermelho) e b^* (escala entre as cores amarelo e azul) para os componentes de tonalidade.

A técnica de colorimetria, que consiste em determinar a cor de uma superfície por meio de espectrofotômetros e colorímetros, tem sido aplicada à madeira para caracterizar seus parâmetros colorimétricos, avaliar os efeitos de tratamentos termomecânicos na coloração da madeira e avaliar infestações patológicas (AMORIM; GONÇALEZ; CAMARGO, 2013;

ZANUNCIO *et al.*, 2014; CADEMARTORI *et al.*, 2014; BARCÍK *et al.*, 2015; POUBEL *et al.*, 2015; MEINTS *et al.*, 2016; LAZAROTTO *et al.*, 2016).

Barros, Muniz e Matos (2014) destacam a utilização da técnica de colorimetria quantitativa para o conhecimento da cor da madeira, pois é uma técnica de simples aplicação, podendo ser empregada na pré-classificação, a partir do desdobro da tora, na qualificação das peças e na formação de banco de dados.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a viabilidade da estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus* em função de seus parâmetros colorimétricos ($L^*a^*b^*$) e do número de anéis de crescimento utilizando modelos de regressão multivariadas.

1.2. Justificativa

A demanda por peças de *Pinus* sp. homogêneas, isentas de defeitos e que apresenta boa resistência é crescente, especialmente para a indústria que fabrica peças estruturais de madeira laminada colada. A possibilidade do uso de modelos de regressão na estimativa da densidade e de propriedades de resistência e de rigidez da madeira com o uso do equipamento colorímetro se apresenta como uma ótima alternativa, pois é possível analisar um grande volume de material com maior rapidez e precisão, separando a fração do lote de madeira que apresenta altos valores de resistência, agregando valor a este material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos necessários para o entendimento do tema desta pesquisa, sendo: a madeira de florestas plantadas, as características do material e sua composição química, os procedimentos para obtenção de algumas de suas propriedades (densidade aparente, resistência na compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade), os estudos em que foram investigadas as relações entre propriedades da madeira, a técnica de colorimetria e pesquisas recentes que envolveram o uso do colorímetro para obtenção dos parâmetros colorimétricos da madeira.

2.1. Madeiras de florestas plantadas

As árvores podem ser classificadas em dois grandes grupos: Gimnospermas (coníferas) e Angiospermas (dicotiledôneas). A madeira é proveniente do material lenhoso das árvores, sendo um recurso natural e renovável. É empregada como matéria-prima em diversos segmentos: celulose e papel, indústria moveleira e principalmente na construção civil (ANDRADE JR *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2017).

Para suprir a crescente demanda por matéria-prima foram introduzidos ao Brasil gêneros exóticos, substituindo a madeira proveniente de florestas nativas. Os principais gêneros trazidos para o país foram o *Eucalyptus* e o *Pinus*.

De acordo com os dados do relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) em 2016 a área de florestas plantadas no Brasil era de 7,84 milhões de hectares. Os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* se destacaram como mostra a Figura 1. Os plantios de Eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares, localizados principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul. Já a área plantada de *Pinus* sp. ocupa cerca de 1,6 milhões de hectares e se concentra principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina (IBÁ, 2017).

Figura 1 – Área de árvores plantadas (valores em milhões de hectares).

Fonte: IBÁ (2017).

Segundo Valverde *et al.* (2004), a expansão da área de florestas plantadas se deve às condições favoráveis encontradas no país, como clima, solo e extensão territorial. Estas plantações atendem à demanda das indústrias de madeira no Brasil, pois têm a vantagem de apresentarem rápido crescimento.

2.2. A madeira do gênero *Pinus*

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) (2018), o gênero *Pinus* engloba mais de 100 espécies com potencial a ser explorado. É um gênero nativo do hemisfério Norte, sendo um dos gêneros mais cultivados no Brasil, uma vez que teve boa adaptação nas regiões Sul e Sudeste.

Morais, Nascimento e Melo (2005) enfatizam que as plantas lenhosas de *Pinus* apresentam altura que varia entre 3 a 50 m, possuem o tronco reto, praticamente cilíndrico e copa em formato de cone. Macroscopicamente, sua madeira apresenta coloração clara, variando de branca a amarelada (EMBRAPA, 2018).

Atualmente a área compreendida por plantações de *Pinus* sp. concentram-se no Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%), como é possível verificar por meio da Figura 2 (IBÁ, 2017).

Figura 2 – Áreas de árvores plantadas no Brasil por estado e por gênero.

Fonte: IBÁ (2017).

O *Pinus taeda* é o mais plantado na região Sul do país e amplamente utilizado pela indústria madeireira (LIMA *et al.*, 2015; SHIMIZU, 2008). A espécie tropical *Pinus caribaea* compreende três variedades: *Pinus caribaea*, *Pinus bahamensis* e *Pinus hondurensis*. Estas árvores possuem grande potencial para uso em reflorestamentos em locais de clima quente, apresentando crescimento rápido e melhor que outras espécies. A madeira de *Pinus caribaea* possui alta qualidade para produção de madeira serrada (IWAKIRI *et al.*, 2010). A Figura 3 exemplifica um plantio de *Pinus taeda*.

Figura 3 – Cultivo de *Pinus taeda*.

Fonte: EMBRAPA (2018).

A Tabela 1 apresenta os valores médios de densidade e resistência de algumas espécies de *Pinus* estudadas a partir de corpos de prova isentos de defeitos apresentados na Norma Brasileira Registrada (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 7190:1997 “Projeto de Estruturas de Madeira”, do Anexo E.

Tabela 1– Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de madeiras coníferas nativas e de reflorestamento (ABNT NBR 7190:1997).

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}$ kg/m ³	f_{c0} MPa	f_{t0} MPa	f_{t90} MPa	f_v MPa	$E_{c0,m}$ MPa
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15225
Pinus caribaea	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431
Pinus bahamensis	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110
Pinus hondurensis	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868
Pinus elliottii	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889
Pinus oocarpa	<i>Pinus oocarpa shiede</i>	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904
Pinus taeda	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304

$\rho_{ap(12\%)}$: valor médio da densidade aparente da madeira

f_{c0} : valor médio da resistência à compressão paralela às fibras

f_{t0} : valor médio da resistência à tração paralela às fibras

f_{t90} : valor médio da resistência à tração normal às fibras

f_v : valor médio da resistência ao cisalhamento

E_{c0} : valor médio do módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras

Fonte: ANBT NBR 7190:1997.

Trianoski *et al* (2014) avaliaram as propriedades mecânicas da madeira de sete espécies de *Pinus* tropicais e compararam com as propriedades da madeira do *Pinus taeda*, por ser a espécie mais plantada e utilizada industrialmente. Foram realizados ensaios de flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento. A Tabela 2 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas das espécies estudadas.

Tabela 2 – Resultados médios das propriedades mecânicas e da massa específica aparente (12%) da madeira de espécies de *Pinus* tropicais e *Pinus taeda*.

Espécie	MOR (MPa)	MOE (MPa)	f _{c0} (MPa)	E _{c0} (MPa)	f _{v0} (MPa)	ρ _{ap} (12%) kg/m ³
<i>Pinus caribaea. var. bahamensis</i>	65	7187	30	9189	10,64	0,491
<i>Pinus caribaea var. caribaea</i>	58	6060	28	9447	9,10	0,435
<i>Pinus caribaea var. hondurensis</i>	62	7106	34	10956	10,49	0,502
<i>Pinus chiapensis</i>	59	7293	33	10060	8,72	0,435
<i>Pinus maximinoi</i>	70	8943	37	12990	11,37	0,533
<i>Pinus oocarpa</i>	70	7993	39	12212	11,95	0,552
<i>Pinus tecunumanii</i>	71	8943	39	14049	11,42	0,557
<i>Pinus taeda</i>	64	8234	37	12432	10,52	0,527

MOR: módulo de ruptura

MOE: módulo de elasticidade

f_{v0}: resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Fonte: Adaptado de Trianoski *et al.* (2014).

As espécies deste gênero produzem grande quantidade de madeira, utilizadas como matéria prima para diversas aplicações, tais como: produção de celulose de fibra longa, produção de resina, MDF, OSB, laminado, móveis, construção civil, tábuas para embalagens e substrato para plantas (MORITANI, 2018; SHIMIZU, 2008). Em 2016, o consumo brasileiro de madeira de *Pinus* sp. proveniente de florestas plantadas para o uso industrial foi de 47,19 milhões de m³ e está representado na Tabela 3 (IBÁ, 2017).

Tabela 3 – Consumo de madeira para uso industrial, 2016.

Segmento	Volume (milhões de m ³)
Celulose e papel	9,25
Painéis reconstituídos	6,70
Indústria madeireira	27,37
Lenha industrial	3,72
Outros	0,15
Total	47,19

Fonte: IBÁ, 2017.

2.3. Anatomia das coníferas

A madeira é constituída por diferentes tipos de células com propriedades específicas para desempenharem as funções vitais de condução de líquidos, transformação, armazenamento, transporte de substâncias nutritivas e sustentação do vegetal (BURGER; RICHTER, 1991). A Figura 4 apresenta a seção de um tronco típico.

Figura 4 – Seção de um tronco típico.

Fonte: Burger e Ritcher (1991).

Segundo Burger e Richter (1991) as partes que compõe o tronco são:

- casca:** é constituída interiormente pelo floema, sendo o sistema de tubos por onde a seiva elaborada é transportada das folhas para o resto da árvore, e exteriormente pelo córtex, periderme e ritidoma, cuja função é de proteger a árvore contra o ressecamento, ataques fúngicos, variações climáticas etc.
- câmbio:** é a estrutura interna responsável pelo crescimento radial da árvore por meio da divisão e diferenciação de novas células. A atividade cambial difere de acordo com as estações do ano.

- c) **cerne e alburno:** o cerne é o cilindro central onde as células que compõem o tecido lenhoso não participam mais do processo vital das árvores, cumprindo apenas a função de sustentação. O cerne apresenta coloração mais escura em decorrência da deposição de tanino, resinas, gorduras e outras substâncias secundárias. Alguns exemplos de substâncias corantes são a brasilina presente no Pau-brasil (*Paubrasilia echinata* Lam.), a hematoxilina no Pau-campeche (*Haematoxylum campechianum*) e o lapachol, substância de cor amarela, no gênero *Tabebuia*. O alburno é madeira nova, cujas células participam do transporte ascendente de líquidos.
- d) **raios:** são faixas horizontais formadas por células parenquimáticas, ou seja, elementos que desempenham primordialmente a função de armazenamento de substâncias nutritivas, dispostas radialmente no tronco. Além do armazenamento, os raios realizam o transporte horizontal de nutrientes na árvore.
- e) **medula:** é a parte que normalmente ocupa o centro do tronco e armazena substâncias nutritivas. Por ser constituída de tecido parenquimático, é uma região suscetível a apodrecimento causado por fungos.
- f) **anéis de crescimento:** em regiões onde o clima apresenta clara distinção entre as estações do ano, os anéis de crescimento representam o incremento anual da árvore. A cada ano é acrescentado um novo anel ao tronco, razão pela qual é possível conhecer a idade da árvore. Em um anel de crescimento encontram-se duas regiões distintas, o lenho inicial (*earlywood*) e o lenho tardio (*latewood*).

O lenho inicial corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, normalmente primavera e verão, apresentando células de paredes finas e lúmens grandes, o que lhe confere coloração clara e densidade menor.

O lenho tardio é formado durante o outono e inverno, sendo constituído de células com paredes mais largas e menor lúmen, uma vez que as células vão diminuindo sua atividade fisiológica. Em consequência desse fato, sua coloração é escura e sua densidade maior do que a do lenho inicial. A Figura 5 exemplifica os anéis de crescimento e o lenho inicial e tardio.

Figura 5 – Anéis de crescimento e lenho inicial e tardio em *Pinus taeda*.

Fonte: Klock e Andrade (2013).

A madeira formada próxima à medula (madeira juvenil) possui características físicas e mecânicas diferentes daquela próxima à casca (madeira adulta), Figura 6. A madeira juvenil, geralmente, apresenta menor densidade, menor porcentagem de lenho tardio e, assim, menor resistência em relação à madeira adulta (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005).

Figura 6 – Demarcação de madeira juvenil, adulta e de transição em *Pinus taeda* L.

Fonte: Ballarin e Nogueira (2005).

2.4. Composição química da madeira

Os principais elementos químicos constituintes da madeira são o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O) e o nitrogênio (N). Além destes elementos, encontram-se pequenas quantidades de outras substâncias minerais, tais como o Cálcio (Ca), o Potássio (K), o Magnésio (Mg) e outros (KLOCK; ANDRADE, 2013).

A partir da reação de fotossíntese (Equação 1) ocorre a síntese de hidrato de carbono (CH_2O), monossacarídeo de elevado potencial de polimerização. Reações subsequentes dão origem aos açúcares que, por sua vez, formam as substâncias orgânicas constituintes da estrutura anatômica dos vegetais. As mais importantes são a celulose, as polioses (hemiceluloses) e a lignina. (CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

A celulose é o componente majoritário da madeira. As proporções e composição química da lignina e polioses diferem em coníferas e dicotiledôneas, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Composição média de madeiras de coníferas e dicotiledôneas.

Constituinte	Coníferas	Dicotiledôneas
Celulose (%)	42 ± 2	45 ± 2
Polioses (%)	27 ± 2	30 ± 5
Lignina (%)	28 ± 2	20 ± 4
Extrativos (%)	5 ± 3	3 ± 2

Fonte: Klock e Andrade (2013).

A Figura 7 apresenta uma introdução à composição química da madeira.

Figura 7 – Introdução à composição química da madeira.

Fonte: Klock e Andrade (2013).

Como observado na Tabela 4, a celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais e provavelmente o composto químico mais abundante no planeta. É um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear longa, insolúvel em água, caracterizando-se por regiões cristalinas em grande parte de seu comprimento entrecortadas por zonas amorfas. Possui alta massa molar (de 162.000 a 2.400.000 g.mol⁻¹) e grau de polimerização (GP) de 5.000 a 10.000 (SILVA, 2012).

Na Figura 8 está mostrado o esquema da unidade básica de celulose.

Figura 8 – Estrutura da celulose.

Fonte: Calil Jr, Lahr e Dias (2003).

As polioses são um conjunto de componentes poliméricos amorfos, com massa molar menor que a celulose e com ramificações. São solúveis em soluções alcalinas e hidrolisam facilmente em ácidos para açúcares, tais como xilose, manose, glicose e arabinose (SILVA, 2012).

A lignina é a terceira substância macromolecular da madeira e é formada por um sistema aromático. É um polímero amorfo e que possui elevado peso molecular. Durante o desenvolvimento das células, a lignina é incorporada em torno das microfibrilas, enrijecendo as paredes celulares e tornando-as resistentes às solicitações mecânicas (KLOCK; ANDRADE, 2013; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

Os extrativos compreendem um grande número de componentes que podem ser retirados da madeira por intermédio dos solventes orgânicos ou por volatilização. São classificados em vários grupos: taninos, óleos, gomas, resinas, corantes, sais de ácidos orgânicos e compostos aromáticos. Os extrativos influenciam algumas propriedades da madeira: coloração, cheiro, durabilidade, a fluorescência, etc. (LIMA *et al.*, 2007).

2.5. Classificação Visual

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural são diferentes das propriedades mecânicas de corpos de prova isentos de defeitos, oriundos de madeira de florestas plantadas, em função da presença de características de crescimento, que podem ser notadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, estas características de crescimento são utilizadas para selecionar a madeira em classes de qualidade (CARREIRA, 2003).

A madeira de florestas plantadas de *Pinus* disponível para uso comercial e industrial apresenta uma incidência muito grande de defeitos, limitando sua utilização, visto que podem afetar significativamente as propriedades físicas e mecânicas.

Um dos defeitos recorrentes em muitas espécies de madeira e que influencia na rigidez e resistência de peças estruturais é a presença de nós (Figura 9), o que reduz a área de seção transversal, e causa grande parte dos desvios de fibra, afetando a resistência do material.

O projeto de norma ABNT PN 02: 126.10-0001-3: 2016 expressa a ocorrência de nó pela relação entre o diâmetro do nó e a dimensão da face considerada, dada em mm/mm. Em um conjunto de nós, o diâmetro é definido por limites mais extremos do conjunto. Quando nós próximos ocorrerem na mesma seção transversal, o diâmetro é obtido pela soma dos diâmetros individuais.

Figura 9 – Nós em peças estruturais.

Fonte: ABNT PN 02: 126.10-0001-3: 2016.

A classificação visual é praticada para garantir o controle de qualidade nas peças estruturais. O método de classificação consiste na seleção das peças através de sua aparência, verificando a presença de nós, distorção de fibra, presença de medula, arqueamento, torcimento, fungos, insetos, etc.

Carreira (2003) estudou os critérios para classificação de peças de *Pinus* sp. e propôs quatro classes de qualidade (SS-D, SS-ND, N°2-D, N°2-ND) estabelecidas com base nos defeitos visualmente detectados. O projeto de norma ABNT PN 02: 126.10-0001-1: 2016 apresenta os critérios de classificação visual para peças estruturais de florestas plantadas, definindo três classes: Classe 1, Classe 2 e Classe 3.

2.6. Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Dentre as principais propriedades físicas da madeira destaca-se a densidade aparente, razão entre a massa e o volume da madeira a um determinado teor de umidade. A partir do valor da densidade aparente, é possível estimar outras propriedades mecânicas da madeira (ALMEIDA *et al*, 2014).

As propriedades mecânicas da madeira definem o comportamento do material quando submetido a esforços. São determinadas, geralmente, pela resistência do material e sua rigidez a diferentes solicitações. A resistência é fornecida pela máxima solicitação que pode ser aplicada a corpos de prova isentos de defeito, sem que ocorram deformações plásticas. A rigidez do material é a resistência de um corpo à deformação por uma tensão aplicada. Na madeira, a rigidez é determinada pelo valor médio do módulo de elasticidade na fase de comportamento elástico do material (REMADE, 2004).

As propriedades mecânicas são diferenciadas em duas direções de comportamento (paralela e normal às fibras), pois são influenciadas pelo arranjo dos elementos anatômicos, que conferem à madeira características ortotrópicas (NOGUEIRA, 2003).

O documento normativo brasileiro apresenta o conceito de classes de resistência da madeira, onde a madeira é classificada estruturalmente por meio do valor característico da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$). A tabela 5 apresenta as classes de resistência estabelecidas pelo projeto de norma PN02:126.10-0001-1 (ABNT NBR 7190) para as coníferas. Os valores tabelados se encontram na condição padrão de referência de teor de umidade igual a 12%. A norma ABNT NBR 7190:1997 atualmente (novembro/ 2018) passa por processo de atualização.

Tabela 5 – Classes de resistência de coníferas.

Madeira de coníferas (Valores na condição padrão de referência U = 12%)

Classes	f_{c0,k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	E_{c0,m} (MPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
C 20	20	4	3500	500
C 25	25	5	8500	550
C 30	30	6	14500	600

f_{c0,k}: resistência característica à compressão paralela às fibrasf_{vk}: resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibrasE_{c0,m}: módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras

Fonte: Adaptado de ABNT PN02: 126.10-001-1 (ABNT NBR 7190:1997)

2.7. Estimativas de propriedades da madeira

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos desenvolvidos para a estimativa de propriedades da madeira por intermédio de modelos de regressão encontrados na revisão bibliográfica. A norma ABNT NBR 7190:1997 apresenta em seu Anexo B os métodos para a caracterização completa da madeira.

A maioria destes ensaios tende a ser realizada em grandes centros de pesquisas, pois requerem equipamentos específicos e de grande porte, com custo elevado. No impedimento da realização de todos os ensaios para caracterização da madeira, a ABNT NBR 7190:1997 apresenta relações entre os valores característicos de resistência (Equações de 2 a 8).

$$f_{c0,k} / f_{t0,k} = 0,77 \quad (2)$$

$$f_{tM,k} / f_{t0,k} = 1,00 \quad (3)$$

$$f_{c90,k} / f_{c0,k} = 0,25 \quad (4)$$

$$f_{e0,k} / f_{c0,k} = 1,00 \quad (5)$$

$$f_{e90,k} / f_{c0,k} = 0,25 \quad (6)$$

$$f_{v0,k} / f_{c0,k} = 0,15 \text{ (para coníferas)} \quad (7)$$

$$f_{v0,k} / f_{c0,k} = 0,12 \text{ (para dicotiledôneas)} \quad (8)$$

Nas equações de 2 a 8, $f_{c0,k}$ é resistência característica à compressão paralela às fibras, $f_{t0,k}$ é resistência característica à tração paralela às fibras, $f_{tM,k}$ é 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 também apresenta relações entre os valores médios das propriedades de rigidez da madeira (Equações 9 a 12).

$$E_{c0,m} = E_{t0,m} \quad (9)$$

$$E_M = 0,85 \cdot E_{c0} \text{ (para coníferas)} \quad (10)$$

$$E_M = 0,90 \cdot E_{c0} \text{ (para dicotiledôneas)} \quad (11)$$

$$E_{c90} = E_{c0}/20 \quad (12)$$

Nas equações de 9 a 12, $E_{c0,m}$ é módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras, $E_{t0,m}$ é módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras.

Dias e Lahr (2004) apresentaram as relações entre as propriedades físicas e mecânicas de quarenta espécies de madeiras brasileiras do grupo das dicotiledôneas. Através de modelos de regressão, foram ajustadas equações que permitem estimar, a partir da densidade aparente, algumas propriedades mecânicas. Os resultados dos coeficientes de variação variaram de 62,77% (relação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras) a 92,25% (relação entre a densidade aparente e a dureza normal às fibras). Para a estimativa da resistência à compressão paralela às fibras por meio da densidade aparente, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi 77,10%.

Machado *et al.* (2014) avaliaram a variação da densidade aparente e as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, módulo de ruptura e 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. Foi adotado o modelo de regressão linear para correlacionar a densidade aparente com as propriedades mecânicas. A análise realizada com os dados da densidade das madeiras apresentou os melhores valores de coeficiente de determinação: correlações entre a densidade aparente e módulo de elasticidade

($R^2 = 53\%$), densidade aparente e módulo de ruptura ($R^2 = 64\%$) e densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras ($R^2 = 45\%$).

Chen e Guo (2016) utilizaram madeiras de *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra* para avaliar a densidade e as propriedades mecânicas obtidas por ensaios não destrutivos (técnica das ondas de tensão (*stress wave method*) e análise de penetração realizada com resistógrafo), ensaio de flexão estática e compressão paralela às fibras. Foram gerados modelos de regressão lineares (Tabela 6) para correlacionar a densidade e as propriedades mecânicas com os resultados obtidos dos ensaios não destrutivos.

Tabela 6 – Modelos de regressão linear entre as propriedades físicas e mecânicas e parâmetros não destrutivos das madeiras de *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra* juntamente com os coeficientes de determinação.

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

ρ = densidade da madeira
 F = parâmetro não destrutivo do resistógrafo
 E_D = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de *stress wave*
 R^2 = coeficiente de determinação

Fonte: Adaptado de Chen e Guo (2017).

Missanjo e Matsumura (2016) realizaram estudo com o objetivo de avaliar a densidade e as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus kessiya* Royle ex Gordon. Análise de regressão foi realizada para determinar a relação entre a densidade da madeira e suas propriedades mecânicas. Os resultados mostram que a densidade da madeira tem uma forte relação com o módulo de elasticidade, apresentando R^2 igual a 79%. Já para o módulo de ruptura o valor do coeficiente de determinação foi 79,3%.

Lahr *et al.* (2016) realizaram a caracterização completa da madeira de Angelim Saia (*Vatairea* sp.) de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997. Além disso, estimaram as propriedades mecânicas da madeira por intermédio da densidade aparente, utilizando modelos de regressão (linear, quadrático, logarítmico e geométrico). Das quatorze propriedades investigadas, três apresentaram boa correlação com coeficientes de determinação acima de

60% para todos os modelos: resistência à compressão paralela às fibras, dureza paralela às fibras e dureza normal às fibras.

Almeida *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de determinar a resistência da madeira à compressão paralela às fibras a partir da densidade aparente das seguintes madeiras tropicais brasileiras: Canafístula (*Cassia ferrugínea*); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum sp.*). Foram utilizados modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico. Para Canafístula e Castelo, o melhor modelo de regressão foi o geométrico com coeficientes de determinação iguais a 48,57% e 52,84%, respectivamente. A madeira de Angelim não apresentou correlação entre os valores das propriedades investigadas, uma vez que os modelos apresentaram p-valores superiores a 5%.

Chen e Guo (2017) avaliaram as propriedades mecânicas da madeira de *Abies fabri* (Mast.) Craib em testes não destrutivos (resistografia e teste de onda de tensão), resistência à compressão paralela às fibras e flexão estática. Foram propostos os modelos de regressão lineares apresentados na Tabela 7 para correlacionar os parâmetros não destrutivos com propriedades mecânicas da madeira e densidade.

Tabela 7 – Regressão linear e coeficiente de determinação para cada propriedade mecânica baseada nos 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
MOE (GPa)	$MOE = 2,731 \cdot E_D + 2,011$	63,5
MOR (MPa)	$MOE = 9,546 \cdot E_D + 37,109$	59,7
f_{c0} (MPa)	$f_{c0} = 3,535 \cdot E_D + 24,012$	62,9

Fonte: Adaptado de CHEN; GUO (2017).

Christoforo *et al.* (2017) determinaram 4 propriedades físicas e 13 propriedades mecânicas da madeira de Angico Branco (*Anadenanthera colubrina*) e, por meio de modelos de regressão linear, exponencial, quadrático e geométrico foi possível correlacionar as propriedades determinadas e a densidade aparente da madeira. O módulo de elasticidade na direção paralela às fibras obtido por meio de correlação foi a melhor estimativa, apresentando coeficiente de determinação de 53,32%.

Aquino *et al.* (2017) descreveram a relação entre 27 propriedades mecânicas, densidade, coeficientes de retratibilidade, teor de umidade, coeficientes de anisotropia e o

ponto de saturação das fibras para corpos de prova de madeira de *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. A melhor correlação foi para a estimativa do módulo de elasticidade da madeira a 12% de umidade por intermédio dos seguintes parâmetros: coeficiente de anisotropia, densidade básica, teor de umidade verde, retratibilidade tangencial, retratibilidade radial e densidade anidra. Foi utilizado um modelo linear multivariado que apresentou $R^2 = 0,93$.

Hodousek *et al.* (2017) avaliaram o módulo de elasticidade dinâmico das madeiras *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis* utilizando duas técnicas: com *Timber Grader* e com acelerômetro, comparando com valores obtidos em ensaios de flexão estática. A Tabela 8 apresenta as equações obtidas dos modelos de regressão lineares entre os módulos de elasticidade.

Tabela 8 – Modelos de regressão e coeficiente de determinação entre módulos de elasticidade estático e dinâmico para as madeiras de *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis*.

Espécies	Equação (Resultados em MPa)	R ² (%)
<i>Cupressus lusitanica</i>	$E_M = 1,17 \cdot E_{MTG} - 103,22$	87
	$E_M = 1,17 \cdot E_{AC} - 242,38$	88
<i>Populus x canadensis</i>	$E_M = 0,94 \cdot E_{MTG} + 397,77$	81
	$E_M = 0,78 \cdot E_{AC} + 2277,57$	82
E_{MTG} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de MTG		
E_{AC} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de acelerômetro		

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

2.8. Coloração na madeira

A coloração é uma das principais propriedades organolépticas da madeira, permitindo a identificação de espécies apenas com uma análise visual, por exemplo, as madeiras do gênero *Peltogyne* (conhecida popularmente como Roxinho) que apresentam lenho de cor arroxeadada. A cor também exerce extrema importância sobre o valor decorativo do material, adicionando valor estético. É importante ressaltar a subjetividade desta propriedade, pois existem diferenças de sensibilidade dos observadores (ZENID; CECANTINI, 2007).

As categorias de cores de madeira normalmente observadas são: esbranquiçada, amarelada, avermelhada, acastanhada, parda, enegrecida e arroxeadada. A Figura 10 apresenta coloração da madeira de algumas espécies.

Figura 10 – Exemplos de cores da madeira: (A) arroxeadada de Roxinho (*Peltogyne* spp.); (B) amarelo-dourado da Tatajuba (*Bagassa guianensis* Aubl.); (C) castanho-claro-amarelado do Cumaru (*Dipteryx odorata* Aublet.).

Fonte: Adaptado de IPT (2018).

A cor da madeira e sua variação se devem à impregnação de diversas substâncias corantes nas células e nas paredes celulares (tanino, resinas etc.) encontrando-se depositadas de forma mais acentuada no cerne (BURGER; RITCHER, 1991; ZENID; CECANTINI, 2007). Segundo Mady* (2000 *apud* SILVA et al., 2017) a composição química da madeira também é responsável pela formação da coloração, devido à presença de polifenóis, flavanóides, estilbenos, quinomas entre outros.

Mori *et al.* (2004) investigaram a influência dos componentes químicos na cor da madeira de Eucaliptos, verificando as quantidades de lignina e polifenóis na madeira, os quais apresentaram alta correlação com a cor da madeira.

A anatomia da madeira influencia na coloração da madeira. Garcia e Marinonio (2016) realizaram análises colorimétricas nas faces radial e tangencial das madeiras de cerne e alburno da madeira de teca (*Tectona grandis* L. f.). Verificaram que as coordenadas de cor variam de acordo com o plano de corte, indicando que a orientação e/ou proporção das células afeta a cor da madeira. Na seção radial, as madeiras de cerne de maior densidade apresentaram mais pigmento amarelo, enquanto que na seção tangencial elas são mais escuras e com menor pigmento amarelo. As madeiras de alburno de maior densidade apresentaram mais pigmento vermelho e mostraram-se mais escuras em ambas as seções.

A alteração no teor de umidade altera também a coloração da madeira, normalmente tornando-a mais escura, pela oxidação dos componentes orgânicos contidos no material

* Mady, F. T. M. Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais. Manaus: SEBRAE/ AM/ Programa de Desenvolvimento Empresarial e Tecnológico, 2000. 212p.

lenhoso (BURGER; RITCHER, 1991). Os tratamentos termomecânicos e o intemperismo são outros fatores que alteram os parâmetros colorimétricos das madeiras (FREITAS; GONÇALEZ; DELL MENEZZI, 2016; ZANUNCIO *et al.*, 2014; POUBEL *et al.*, 2015; TELES; COSTA, 2014).

2.9. Técnica de Colorimetria

Como descrito na seção 2.8 a coloração apresenta alta subjetividade sendo necessário sua padronização. O modo encontrado para padronizar esta propriedade foi transformá-la em números. A Comissão Internacional de Iluminantes (CIE) recomendou o sistema CIE $L^*a^*b^*$ para padronizar a sensação de cor baseada nos parâmetros colorimétricos luminosidade e tonalidade, sendo um dos sistemas mais utilizado para quantificação da cor (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001; ALMEIDA, 2017).

No espaço $L^*a^*b^*$, duas cores não podem ser verdes e vermelhas ao mesmo tempo, ou amarelas e azuis. Neste sistema a luminosidade (L^*) é um parâmetro definido pela escala cinza variando entre 0 (cor preta) e 100 (cor branca). Para a determinação da tonalidade, as coordenadas cromáticas a^* (escala entre as cores vermelho ($+a^*$) e verde ($-a^*$)) e b^* (escala entre as cores amarelo ($+b^*$) e azul ($-b^*$)) são adotadas e os valores numéricos para cada um deles variam entre 0 e 60. A Figura 11 apresenta as escalas e os eixos para determinação dos parâmetros colorimétricos de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$ (CIE, 2018).

Figura 11 – Sistema CIE $L^*a^*b^*$.

Fonte: Adaptado de Barcik (2015)

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, para padronizar os métodos para realização das medidas dos parâmetros colorimétricos.

O iluminante recomendado pela CIE é o iluminante padrão D65, que apresenta temperatura correlata de cor de 6504K, sendo utilizado para representar a média da luz do dia. Sobre o ângulo de visão, a CIE especifica dois tipos de padrão: 2° e 10°. A diferença básica entre os dois tipos de observador padrão é a área do campo de visão, sendo que o de 10° possibilitou melhor acuidade visual.

O colorímetro, apresentado na Figura 12, é um dos equipamentos apropriados para descrever quantitativamente os parâmetros colorimétricos de um material.

Figura 12 – Exemplo de colorímetro portátil.

Fonte: Autoria própria.

2.10. Aplicações da técnica de colorimetria

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos encontrados na revisão bibliográfica em que os autores utilizaram a técnica de colorimetria na madeira para estimar suas propriedades colorimétricas.

Gierlinger *et al.* (2003) estudaram a cor do cerne da madeira de *Larix decidua* Mill. em relação aos extrativos e resistência à deterioração, com o objetivo de estimar sua durabilidade através da coloração. Foi utilizado o sistema CIE $L^*a^*b^*$ e um espectrômetro

Phyma Codec 400 Vis. Os resultados mostraram que a tonalidade vermelha (a^*) permite a estimativa da quantidade de substâncias fenólicas (Coeficiente de correlação (R) igual a 84%), que possuem grande influência na resistência à deterioração.

Souza *et al.* (2010) investigaram a resistência natural e alteração na cor da madeira de Jacarandá Caviúna (*Machaerium scleroxylon* Tul.) após a exposição a fungos de podridão branca e podridão parda. Os parâmetros colorimétricos foram determinados de acordo com sistema CIE $L^*a^*b^*$ com espectrofotômetro *Datacolor International Microflahs 200* antes e após a bioteterioração de 12 semanas. Foram observadas alterações apreciáveis nos parâmetros colorimétricos da madeira após o ciclo de biodeterioração.

Gonzalez *et al.* (2010) estudaram o efeito da radiação ultravioleta, relativo ao envelhecimento artificial acelerado, na coloração da madeira de Freijó (*Cordia goeldiana* Huber), com e sem tratamento superficial. As amostras foram tratadas com produtos de acabamento (*polistain* e seladora). As medições dos parâmetros colorimétricos foram realizadas em um espectrocolorímetro *Datacolor Microflah 200D*, com iluminante D65, ângulo de 10° , de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$. Segundo os autores, os produtos de acabamento alteraram a cor da madeira, escurecendo-a. O envelhecimento dessa madeira quando tratada com seladora continua modificando a sua cor com o passar do tempo. O *polistain*, depois de aplicado à madeira, conservou a cor para os períodos de envelhecimentos simulados na pesquisa.

Costa *et al.* (2011) utilizaram a técnica de colorimetria para determinar os parâmetros colorimétricos das madeiras de Marupá (*Simarouba amara*) e Andiroba (*Carapa guianensis*) antes e após serem submetidas ao ataque de fungos de podridão branca e podridão parda. Foi utilizado o espectrofotocolorímetro *Datacolor International Micriflash – Model 200d*, com esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65, lâmpada de xenônio que simula a radiação solar diurna, ângulo de 10° em temperatura ambiente. Ambas as madeiras estudadas apresentaram-se mais escuras após o ataque fúngico de podridão parda. Segundos os autores, a técnica de colorimetria se mostrou eficiente para determinar e diferenciar o ataque dos fungos de podridão branca e parda.

Atayde *et al.* (2011) avaliaram as características colorimétricas das seções anatômicas (radial, tangencial e transversal) da madeira de Muirapiranga (*Brosimum* sp.), utilizando o sistema CIE $L^*a^*b^*$. Foi utilizado um espectrofotômetro *Datacolor International Microflash-Model 200*, com iluminante D65, lâmpada de xenônio que simula a radiação solar diurna e ângulo de 10° . Os resultados mostraram que houve variações significativas entre os parâmetros colorimétricos nas três seções analisadas. 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.

Pincelli *et al.* (2012) estudaram o comportamento colorimétrico das madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Pinus* var. *caribaea hondurensis* sobre tratamentos de termorreificação. Os parâmetros colorimétricos foram mensurados com um espectrofotômetro *Datacolor International Microflash 200d*, com iluminante D65 e ângulo de 10°. Ambas as espécies mostraram comportamentos colorimétricos distintos em função do tratamento térmico, sendo o *Pinus* mais resistente ao escurecimento quando exposto em temperaturas inferiores a 180°C. A coordenada cromática b^* aumentou nas peças de *Pinus* e diminuiu nas de eucalipto.

Stangerlin *et al.* (2013) avaliaram a técnica de colorimetria na caracterização da biodeterioração das madeiras de Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), Jequitibá (*Cariniana micranta* Ducke) e Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild) submetidas ao ataque de fungos de podridão branca e podridão parda. Para a determinação dos parâmetros colorimétricos foi utilizado um espectrofotocolorímetro com resolução de 3nm, dotado de uma esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65, com ângulo de observação de 10°, temperatura ambiente, baseado no sistema CIE $L^*a^*b^*$. Os autores definiram modelos de regressão para predição da perda de massa em função dos parâmetros colorimétricos das madeiras deterioradas pelos fungos apodrecedores, sendo selecionados os modelos que apresentaram os maiores valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{Aj}) (Tabela 9).

Tabela 9 – Modelos de regressão entre os parâmetros colorimétricos das madeiras de Marupá, Jequitibá e Cumaru biodeteriorada e a perda de massa (P_M).

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 Branca	$P_M = 186,015 - 6,939 \cdot L^* + 0,065 \cdot L^{*2}$	96
	$P_M = -1,226 - 0,141 \cdot \Delta E + 0,077 \cdot \Delta E^2$	95
Cumaru x Podridão Branca	$P_M = -18,602 + 6,381 \cdot \ln(b^*)$	62
Cumaru x Podridão Parda	$P_M = 24,540 - 1,17 \cdot L^* + 0,014 \cdot L^{*2}$	85
	$P_M = 0,663 - 0,155 \cdot \Delta E + 0,012 \cdot \Delta E^2$	87

ΔE : Diferença de coloração da madeira

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

Segundo os autores, as melhores estimativas da resistência natural aos fungos de podridão branca e parda foram obtidas com os parâmetros colorimétricos b^* e L^* , respectivamente.

Amorim, González e Camargo (2013) realizaram a caracterização tecnológica das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* utilizando a técnica de colorimetria. As análises colorimétricas foram realizadas de acordo com sistema CIE $L^*a^*b^*$ utilizando um espectrofotômetro *Datacolor Microflash 200D*, com iluminante D65 e ângulo de 10° , em temperatura ambiente. Os resultados obtidos para as propriedades físicas (densidade aparente, retratibilidade e parâmetros colorimétricos) e mecânicas (módulo de elasticidade e resistência em ensaios de flexão elástica) foram correlacionados com os resultados dos parâmetros colorimétricos por *Pearson* a 1%. Foram calculadas regressões para o ajuste de equações, para a estimativa de propriedades físicas e mecânicas das madeiras em estudo em função dos parâmetros colorimétricos. A Figura 13 apresenta a análise de regressão da densidade das madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* em função dos parâmetros luminosidade (L^*) e pigmento vermelho (a^*).

Figura 13 – Regressão linear entre densidade da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* e os parâmetros colorimétricos: (A) claridade (luminosidade (L^*)) e (B) pigmento vermelho (a^*).

(A)

(B)

Fonte: Amorim, González e Camargo (2013).

A Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes de correlação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades das madeiras estudadas.

Tabela 10 – Correlação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*.

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
MOE	-0,04	0,01	-0,05
MOR	-0,59	0,53	-0,6

Fonte: Adaptado de Amorim, González e Camargo (2013).

Segundo os autores, não foram encontradas correlações significativas entre a retratibilidade volumétrica e os parâmetros colorimétricos e entre o módulo de elasticidade e os parâmetros colorimétricos. Para o módulo de ruptura as correlações foram significativas, sendo o modelo de regressão que considera a luminosidade da madeira em sua estimativa, o que melhor correlaciona as duas propriedades, permitindo uma estimativa de 40% o valor do MOR (Equação 13).

$$Y = 0,2079 \cdot L^2 - 22,78 \cdot L + 712,76 \quad (13)$$

Zanuncio *et al.* (2014) estudaram as alterações químicas e colorimétricas da madeira de *Eucalyptus grandis* submetida à termorreificação. A análise colorimétrica foi realizada com a utilização do espectrofotômetro *Konica Minolta* CM-2500D, baseado no sistema CIE L*a*b*. A termorreificação provocou redução na luminosidade (L*) e nos parâmetros de tonalidade (a* e b*).

Teles (2014) realizou estudo com diferentes técnicas de ensaio não destrutivo, incluindo a colorimetria, para avaliar a mudança de coloração de três espécies de madeira tratadas com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado), e sem tratamento, submetidas ao intemperismo artificial. As espécies estudadas foram: Marupá (*Simarouba amara*), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipteryx odorata*). Os parâmetros colorimétricos foram definidos de acordo com sistema CIE L*a*b* utilizando um espectrofotômetro *Color-Eye-XTH-X-Rite* acoplado a um computador, com iluminante D65, ângulo de 10°, em temperatura ambiente. O autor utilizou modelos de regressão para propor equações para estimativa da diferença de coloração (ΔE) em função do tempo de exposição (t) ao intemperismo para as madeiras

tratadas com preservante e sem tratamento. As equações, bem como os coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Correlações entre a diferença de coloração e tempo de intemperismo para as madeiras de Marupá, Tauari e Cumaru com e sem tratamento químico com CCA.

Madeira sem tratamento		
Espécie	Equação	R ² (%)
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	R ² (%)
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).

Garcia, Lopes e Santos (2014) estudaram a mudança de coloração da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden após a termorretificação. Os parâmetros colorimétricos foram estimados por meio do sistema CIE L*a*b* com o auxílio do espectrofotômetro *Color-Eye-XTH-X-Rite 200d*, com iluminante D65, ângulo de 10° em temperatura ambiente. As madeiras termorretificadas apresentaram-se mais escuras (menores valores de L*) quando comparadas à madeira não tratada. Segundo os autores, a alteração da cor original da madeira após o tratamento possibilitou a criação de novos padrões de cor, o que pode agregar maior valor a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Lopes *et al.* (2014) determinaram o efeito do tratamento térmico na alteração da cor de Teca (*Tectona grandis* L. f.), proveniente de plantios de diferentes espaçamentos (4 x 2m; 5 x 2m; 6 x 2m). O tratamento ocorreu em amostras de cerne e alburno a 180 e 200°C durante 2h30min. As análises colorimétricas foram realizadas de acordo com sistema CIE L*a*b*, utilizando o espectrofotômetro portátil *Konica Minolta 2600D versão 1.41*. Os resultados mostram que o espaçamento afetou a cor original da madeira antes e após o tratamento térmico. Além disso, o aumento da temperatura intensificou a alteração de cor, principalmente para a madeira do alburno.

Conte *et al.* (2014) avaliaram as propriedades físicas e colorimétricas da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* submetida a processos de termorretificação. Os parâmetros colorimétricos foram mensurados de acordo com o sistema CIE L*a*b* por meio de um colorímetro portátil *Konica Minolta*, modelo CR-400, que apresenta abertura do sensor de 8

mm, iluminante D65 e ângulo de observação de 2°. O tratamento afetou significativamente a coloração, sendo o parâmetro L^* o mais representativo. Segundo os autores, a cor da madeira passou de pálida/branca para marrom escuro.

Barros, Muniz e Matos (2014) estudaram a variação da cor da madeira nas seções anatômicas (radial, tangencial e transversal) de três espécies amazônicas: Breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J. F. Macbr.), Tauari-vermelho (*Cariniana micranta* Ducke) e Pequiarana (*Caryocar glabrum*). Os parâmetros colorimétricos foram determinados pelo sistema CIE $L^*a^*b^*$ utilizando um espectrofotômetro *Konica Minolta CM-5*, com iluminante D65, lâmpada de xenônio difusa que simula a radiação solar diurna, ângulo de 10°, acoplado a um computador com o programa *Spectra Magic NX*. As espécies Breu-vermelho e Tauari-vermelho são caracterizadas pela coordenada a^* (pigmentação vermelha) e a Pequiarana pela pigmentação amarela (coordenada b^*). As espécies estudadas apresentaram diferença de cor entre as seções anatômicas, com maior observado no plano radial, sendo influenciadas pela coloração amarela. Os autores destacam a utilização da técnica de colorimetria quantitativa para o conhecimento da cor da madeira, pois, é uma técnica de simples aplicação, podendo ser empregada na pré-classificação, a partir do desdobro da tora, na qualificação das peças e na formação de banco de dados.

Cademartori *et al.* (2014) investigaram as alterações nos parâmetros colorimétricos nas espécies *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* submetidas a tratamentos térmicos em diferentes condições (pré-tratamento em autoclave e tratamento térmico em estufa). As variações de coloração foram detectadas de acordo com sistema CIE $L^*a^*b^*$, utilizando um colorímetro *Konica Minolta* modelo CR-400, configurado com iluminante D65 e ângulo de observação de 10°. A diferença de cor após os tratamentos foi superior a 45 para ambas as espécies. O parâmetro L^* foi o que melhor descreveu o comportamento colorimétrico das espécies.

Gonzalez *et al.* (2014) analisaram o efeito do processo de secagem (ao ar ou em estufa) nas propriedades colorimétricas determinadas nas seções radial e tangencial para a madeira de *Simarouba amara*. Após o processo de secagem, foi utilizado um espectrofotômetro *Datacolor International Microflash* para a determinação dos parâmetros colorimétricos de acordo com sistema CIE $L^*a^*b^*$. O equipamento possuía iluminante A10, com lâmpada incandescente e ângulo de 10°. De acordo com os autores, o efeito do processo de secagem nos parâmetros colorimétricos da madeira depende da direção de corte (radial ou tangencial). A madeira de *S. amara* apresenta cor mais clara quando seca ao ar comparado à madeira seca em estufa.

Barčík *et al.* (2015) examinaram o efeito de diferentes tratamentos térmicos na mudança de cor da madeira de *Quercus robur* L. Os parâmetros colorimétricos foram determinados com um espectrofotômetro *Konica Minolta CM-600D*, com iluminante D65, ângulo de visão de 10°, baseado no sistema CIE L*a*b*. Segundo os autores com o aumento da temperatura do tratamento térmico houve diminuição da luminosidade e aumento da diferença total da cor da madeira.

Silva *et al.* (2015) avaliaram a coloração natural de oito espécies nativas do Estado do Rio Grande do Sul: Grápia (*Apuleia leiocarpa*), Araucária (*Araucaria angustifolia*), Guatambu (*Balfourodendrom riedelianum*), Canjerana (*Cabralea canjerona*), Cedro (*Cedrela fissilis*), Caúna (*Ilex psedobuxus*), Açoita-cavalo (*Luehea divaticata*) e Cabreúva (*Myrocarpus frondosus*). A caracterização colorimétrica das oito espécies de madeira foi realizada de acordo com o sistema CIE L*a*b* por meio de um espectrofotocolorímetro com resolução de 3 nm, dotado de esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65 com lâmpada de xenônio e ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente. Os autores estabeleceram correlações simples de *Pearson* entre a densidade aparente ao teor de umidade de 12% e os parâmetros colorimétricos (Tabela 12).

Tabela 12– Valores da correlação de *Pearson* entre parâmetros colorimétricos e densidade aparente a 12% de umidade.

Espécie - plano	L*vs.ρ _{ap. 12}	a*vs.ρ _{ap. 12}	b*vs.ρ _{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)

Segundo os autores não foi verificada correlação positiva entre o parâmetro colorimétrico b^* e a densidade aparente, exceto para as madeiras de Araucária e Caúna, porém as correlações não foram significativas. A coordenada a^* apresentou as melhores correlações com a densidade aparente, já que pelo menos para um dos planos anatômicos de cada espécie foi verificada correlação significativa, com exceção da madeira de Guatambu.

Poubel *et al.* (2015) estudaram o efeito da modificação térmica nas propriedades físicas e na coloração da madeira de *Pinus* sp. Os parâmetros colorimétricos foram determinados com espectrofotômetro portátil *CM 2600d Konica Minolta*, com iluminante padrão D65 e ângulo de 10° , no espaço CIE $L^*a^*b^*$. Os tratamentos causaram diminuição no valor do parâmetro luminosidade (L^*), ou seja, provocou escurecimento nas amostras de madeira de *Pinus* sp.

Yang *et al.* (2015) avaliaram as mudanças na coloração e na composição química da madeira de *Betula alnoides* submetida a tratamento térmico a vácuo. Para determinar os parâmetros colorimétricos foi utilizado o equipamento *SC-80C, Beijing Kangguang Instruments Co.* pelo sistema CIE $L^*a^*b^*$. A variação nos teores de celulose, hemicelulose e lignina foi determinada por análise química. A madeira submetida ao tratamento térmico em altas temperaturas e longo período de tempo apresentou menores valores de L^* e alta variação na diferença de coloração. Os autores estabeleceram correlações lineares entre a diferença de coloração e a diferença de luminosidade (ΔL^*) com a diferença de teores de celulose, hemicelulose e lignina, apresentando coeficiente de correlação acima de 90%.

Okino *et al.* (2015) utilizaram três espécies de madeiras de Tauari (*Couratari oblongifolia* Ducke & R. Knuth; *Couratari guianensis* Aublet.; *Couratari stelatta* A.C.Smith) submetidas à biodetereioração por diferentes tipos de fungos (dois de podridão-branca e dois de podridão-parda), para avaliar os parâmetros colorimétricos. Os autores utilizaram um espectrofotômetro *Datacolor International Microflabs 200D*, equipado com iluminante D65 e luz xenônio, de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$, para determinar os parâmetros colorimétricos. Todas as espécies atacadas ficaram mais escuras e mais vermelhas em relação às amostras de controle, apresentando variação média da coloração da ordem de 29,5.

Garcia e Marinonio (2016) avaliaram o efeito da densidade e do teor de extrativos na variação da cor da madeira de Teca (*Tectona grandis* L. f.) proveniente de plantios de diferentes espaçamentos. A densidade e o teor de extrativos da madeira foram determinados de acordo com as normas ASTM D2395-93:1999 e ASTM D1105-96:1999. Foram retirados discos das toras e realizados cortes perfeitamente orientados nos planos transversal, radial e tangencial. Os parâmetros colorimétricos foram obtidos com o auxílio do espectrofotômetro

portátil *Konica Minolta CM2600d*, 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 alburno. As Figuras 14 e 15 apresentam as correlações entre a densidade e os parâmetros colorimétricos da madeira do cerne de alburno, respectivamente.

Figura 14 – Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira do cerne de Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) correlação entre densidade e b^* na direção radial e (B) correlação entre densidade e L^* na direção tangencial.

Fonte: Adaptado de Garcia e Marinonio (2016).

Figura 15 – Correlações entre densidade e parâmetros colorimétricos da madeira do alburno de Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) correlação entre densidade e L^* na direção radial e (B) correlação entre densidade e a^* na direção radial.

Fonte: Adaptado de Garcia e Marinonio (2016).

De acordo com os autores, as madeiras mais escuras (menor L^*) e com mais pigmentos vermelhos (a^*) apresentaram um maior teor de extrativos. Também concluíram que as coordenadas de cor variaram de acordo com o plano de corte observando, indicando

que a orientação ou a proporção das células afetam a cor da madeira. A Figura 16 apresenta as correlações entre o teor de extrativos e os parâmetros colorimétricos.

Figura 16 – Correlação entre teor de extrativos e parâmetros colorimétricos da madeira Teca, bem como os respectivos coeficientes de correlação (r): (A) L^* e (B) a^* na direção radial e (C) L^* e (D) na direção tangencial.

Fonte: Adaptado de Garcia e Marinonio (2016).

Meints *et al.* (2016) realizaram a caracterização colorimétrica da madeira de 24 espécies austríacas utilizando o sistema CIE $L^*a^*b^*$. Os parâmetros colorimétricos foram determinados com o espectrofotômetro *Phyma CODEC 400*, com iluminante D65 e ângulo de observação de 2° . Para determinar a mudança na coloração, a medição foi realizada com os corpos de prova secos e depois com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. A maior mudança de coloração foi encontrada para a madeira de *Populus alba* ($\Delta E = 40,6$) e a menor para a madeira de *Pyrus communis* ($\Delta E = 8,9$).

Freitas, González e Del Menezzi (2016) analisaram a influência do tratamento termomecânico nas propriedades colorimétricas e no módulo de elasticidade da madeira de

Marupá (*Simarouba amara*). Foi utilizado um espectrofotômetro *Color Eye XTH-X-Rite*, iluminante D65 e ângulo de 10° para determinar os parâmetros colorimétricos de acordo com o sistema CIE $L^*a^*b^*$. Os resultados mostraram que a madeira escureceu com a diminuição do valor de L^* e maiores valores de a^* .

Teles, Costa e Souza (2016) utilizaram a técnica de colorimetria na avaliação da superfície de três madeiras tropicais Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipteryx odorata* (Aublet) Willd.) tratadas com CCA. Os parâmetros colorimétricos ($L^*a^*b^*$) foram determinados com o uso do espectrofotocolorímetro *ColorEye-XHT-X-Rite* acoplado a um microcomputador, com iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente. Foram realizadas 10 leituras na face exposta da madeira. A coloração de todas as madeiras foi alterada de forma significativa com o tratamento, ficando escuras, com a diminuição dos pigmentos vermelhos e amarelos, com tendência ao esverdeamento da superfície.

Lazarotto *et al.* (2016) avaliaram os parâmetros colorimétricos da madeira de *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* após sua submissão a tratamentos térmicos e ao ataque de fungos causadores da podridão-branca (*Trametes versicolor* e *Ganoderma applanatum*), a fim de observar o efeito da termorretificação sobre a durabilidade natural da madeira. Um colorímetro portátil da marca *Konica Minolta*, modelo CR-400, foi utilizado para determinar os parâmetros colorimétricos. O aparelho foi configurado para fonte de luz D65, como descrito pela CIE. Os resultados mostraram que as maiores mudanças nos parâmetros colorimétricos ocorrem devido ao tratamento térmico, que promoveu o escurecimento, ou seja, redução da variável luminosidade (L^*) e queda nas tonalidades vermelha (a^*) e amarela (b^*).

Paula (2016) realizou pesquisa com o objetivo de verificar o efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades colorimétricas das madeiras de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*) e Sapucaia (*Lecythis pisonis*). A autora utilizou um espectrofotômetro da marca *X-Rite Color-Eye-XTH* com resolução de 3nm, possuindo uma esfera integradora de refletância difusa, iluminante D65 e ângulo de 10°, em temperatura ambiente, baseado no sistema CIE La^*b^* , acoplado a um microcomputador. O tratamento térmico provocou a diminuição da luminosidade (L^*) e das tonalidades a^* e b^* , promovendo um maior escurecimento e avermelhamento das madeiras. Também possibilitou a aproximação da cor entre as faces radial e tangencial para ambas as espécies.

Oliveira (2016) desenvolveu estudo para avaliar o processo de biodeterioração das madeiras de Marupá (*Simarouba amara*) e eucalipto (*Eucalyptus saligna*) ao ataque fúngico

de podridão branca e podridão parda. Os parâmetros colorimétricos foram determinados pós-ataques dos fungos, com espectrofotômetro *X-Rite Color-Eye-XTH*, que apresenta resolução de 3nm, integrado com uma esfera de refletância difusa, iluminante D65 e ângulo de 10° em temperatura ambiente. A técnica de colorimetria foi altamente eficaz, proporcionando a diferenciação do mecanismo de ação dos fungos de podridão branca e parda.

Kerber *et al.* (2016) estudaram a cor e a rugosidade de três espécies amazônicas submetidas ao intemperismo natural. Foram corpos de prova das seguintes espécies: Garapeira (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.), Cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm) e Angelim-saia (*Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp.). As amostras foram expostas ao intemperismo natural por 240 dias. Os parâmetros colorimétricos foram obtidos por meio de um colorímetro com resolução de 3nm, ângulo de observação de 10°, iluminante D65, de acordo com o sistema CIE L*a*b*. A superfície se mostrou acinzentada após o ciclo de exposição ao intemperismo para as três espécies, sendo que a madeira de Angelim-saia apresentou a maior variação total de coloração (35%).

Almeida (2017) gerou modelos de regressão para estimar as propriedades de resistência e rigidez de cinco espécies tropicais brasileiras em função dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente a 12% de umidade. As espécies estudadas foram: Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) e Roxinho (*Peltogyne* sp.). Foram determinados os parâmetros colorimétricos das espécies por meio de um colorímetro portátil *Konica Minolta CR 400*, com iluminante D65, de acordo com o sistema CIE L*a*b*. O intervalo dos valores do coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa de cada propriedade variou entre 45,50% (f_{H90} para a madeira de Roxinho) e 85,30% (f_M para a madeira de Tatajuba).

2.11. Conclusões da Revisão Bibliográfica

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

Existem poucos trabalhos na literatura consultada que correlacionam propriedades física e mecânica de *Pinus* sp. com seus parâmetros colorimétricos, e nenhuma pesquisa que correlaciona a resistência à compressão paralela às fibras com os parâmetros colorimétricos;

A estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira é importante para conhecer as características do material e a sua melhor aplicação sem a necessidade da realização de ensaios destrutivos;

As técnicas não destrutivas, tais como: métodos baseados em vibração e uso do resistógrafo, são importantes para a estimativa de propriedades da madeira, apresentando bons valores de coeficientes de determinação em correlações com propriedades mecânicas da madeira obtidas por meio de ensaios destrutivos;

A coloração é uma das propriedades organolépticas da madeira e de extrema importância sobre o valor decorativo do material, porém é uma propriedade subjetiva. Desta maneira, o sistema CIE $L^*a^*b^*$, padroniza a sensação de cor nos parâmetros colorimétricos luminosidade (L^*) e tonalidade (escala vermelho/verde (a^*) e escala amarelo/azul (b^*));

Pesquisas com a determinação dos parâmetros colorimétricos estão sendo realizadas para avaliar os efeitos de tratamentos termomecânicos, as ações de organismos xilófagos e o intemperismo na madeira.

Alguns fatores influenciam a cor da madeira, entre eles: composição química, anatomia da madeira, teor de umidade, tratamentos termomecânicos, infestações patológicas (fungos de podridão parda e podridão branca) e o intemperismo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esta pesquisa foi utilizado um lote de *Pinus* sp. fornecido pela empresa BERNECK S.A. Painéis e Serrados com sede em Araucária, Estado do Paraná.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP).

3.1. Confeção dos corpos de prova

A partir do lote foram confeccionados 500 corpos de prova com dimensões nominais de 50 mm de espessura, 100 mm de largura e 150 mm de comprimento (Figura 17) para ensaios de compressão paralela às fibras. Decidiu-se aumentar a amostragem buscando a representatividade estatística ao lote considerado, pois é desconhecida a relação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades mecânicas. O teor de umidade da madeira estudada foi determinado por gravimetria, o valor encontrado foi da ordem de 12%, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190:1997.

Num primeiro momento foram descartados 97 corpos de prova que apresentaram defeitos, tais como incidência acentuada de nós e medula (Figura 18).

A densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) da madeira foi determinada a partir dos dados dos 403 corpos de prova (massa e volume).

Figura 17 – Corpo de prova antes do ensaio de compressão.

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Corpos de prova descartados em função da incidência severa de nós.

Fonte: Autoria própria.

3.2. Ensaios mecânicos nos corpos de prova

Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados na máquina universal de ensaios AMSLER, instalada no laboratório, que possui capacidade de carga de 250 kN.

A resistência da madeira à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é fornecida pela relação entre a máxima força de compressão e a área da seção transversal (Equação 16).

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (16)$$

Onde:

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newton (N);

A é área inicial da seção transversal comprimida, em milímetro quadrado (mm^2);

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras, em Mega Pascal (MPa).

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade (E_{c0}), obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica. Para esta finalidade, E_{c0} foi determinado pela inclinação da reta secante à curva

tensão deformação, correspondente respectivamente a 10% e 50% de f_{c0} determinada no ensaio, dado pela Equação 17:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (17)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} ;

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de 10% e 50%.

Os ensaios de compressão paralela às fibras ocorreram em corpos de prova prismáticos com seção transversal nominal retangular de 5 cm por 10 cm e comprimento na direção das fibras de 15 cm. Iniciou-se a aplicação do carregamento monotônico pela máquina de ensaio com taxa crescente de 10 MPa/min, de acordo com a norma ABNT NBR 7190:1197.

O ensaio foi automatizado utilizando-se dois transdutores de deslocamento e uma célula de carga com capacidade de 250 kN, acoplados a um sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo Departamento de Estruturas (Figura 19). Este sistema foi configurado para capturar as informações de força e deslocamento a cada 0,5 segundos. Os transdutores de deslocamento foram devidamente calibrados antes dos ensaios.

Figura 19 – Equipamento de ensaio de compressão paralela às fibras com corpo de prova, transdutores de deslocamento e célula de carga.

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram carregados axialmente até atingirem a ruptura. O arquivo gerado em cada ensaio foi importado para uma planilha do *Microsoft Excel* onde foi tabulado e realizado o cálculo de acordo com as Equações 16 e 17.

3.3. Determinação da densidade aparente

A densidade aparente é 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 18). A densidade aparente da madeira foi estimada a partir dos corpos de prova de compressão paralela às fibras. As dimensões da seção transversal foram determinadas com paquímetro (precisão de 0,1mm) e a massa específica em balança analítica (precisão de 0,01 g).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (18)$$

Onde:

m_{12} é a massa específica a 12% de umidade, em gramas (g);

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, em centímetros cúbicos (cm³).

3.4. Determinação dos parâmetros colorimétricos

Os ensaios para determinação dos parâmetros colorimétricos foram realizados no LaMEM utilizando um colorímetro da marca *Konica Minolta* modelo CR-400, configurado com iluminante D65, ângulo de observação de 10°, baseado no sistema CIE L*a*b* (Figura 20). O equipamento foi cedido pela empresa *Partículas Tecnologia e Desenvolvimento em Materiais Lignocelulósicos LTDA*.

Figura 20 – Colorímetro portátil *Konica Minolta*: (A) Ensaio sendo realizado na amostra, (B) visor do aparelho com os valores dos parâmetros colorimétricos.

Fonte: Autoria própria.

Segundo a norma ASTM D2244:2011, não existe necessidade da confecção de corpos de prova específicos para determinação dos parâmetros colorimétricos. Sendo assim, foram utilizados os corpos de prova preparados para o ensaio de compressão paralela às fibras, fornecendo para cada um deles os valores dos parâmetros $L^*a^*b^*$.

A utilização do colorímetro portátil para a obtenção dos parâmetros colorimétricos facilita sua determinação. Foram realizadas duas medições em cada corpo de prova, na área da seção transversal.

Após obtenção dos parâmetros, todos os dados foram registrados e tabulados em uma planilha do Microsoft Excel. Foram calculados os valores médios dos parâmetros L^* , a^* e b^* para cada um dos corpos de prova.

3.5. Determinação do número de lenhos

O anel de crescimento é composto de duas camadas, uma com tonalidade mais clara (lenho inicial) e outra de tonalidade mais escura (lenho tardio). Foi identificado visualmente o lenho inicial e tardio nas duas seções transversais de cada corpo de prova (Figura 21). Posteriormente os dados foram inseridos em uma planilha do *Microsoft Excel* onde foi calculada a média desses valores.

Figura 21 – Identificação dos lenhos no corpo de prova.

Fonte: Autoria própria.

3.6. Modelos de regressão

Modelo de regressão (Equação 19) baseado em análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizado para investigar a influência dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*) e do número de lenho (Nle) nos valores da densidade aparente (ρ_{ap}), módulo de elasticidade (E_{c0}) e resistência à compressão (f_{c0}) na direção paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp., utilizando-se 403 determinações para cada propriedade.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot L^* - \alpha_2 \cdot a^* - \alpha_3 \cdot b^* + \alpha_4 \cdot Nle - \alpha_5 \cdot L^* \cdot a^* - \alpha_6 \cdot L^* \cdot b^* - \alpha_7 \cdot L^* \cdot Nle + \alpha_8 \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_9 \cdot a^* \cdot Nle + \alpha_{10} \cdot b^* \cdot Nle + \varepsilon \quad (19)$$

Da Equação 19, Y denota as propriedades estimadas (ρ_{ap} , E_{c0} , f_{c0}), α_0 são os coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados e ε consiste no erro aleatório. A significância dos fatores e interações em cada propriedade foi avaliada pelo gráfico de Pareto,

e a qualidade dos ajustes foi obtida pelo coeficiente de determinação R^2 , em que quão mais próximo de 1 melhor ou mais preciso é o ajuste obtido.

Para a análise de validação da ANOVA, a normalidade dos resíduos da ANOVA foi avaliada com o teste de normalidade de Anderson-Darling (ao nível de 5% de significância), a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo gráfico de resíduos versus valores ajustados e a independência foi avaliada pelo gráfico de resíduos versus ordem de observação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram produzidos 500 corpos de prova de madeira de *Pinus* sp. Devido à presença de defeitos visuais, como nós, foram descartados 97 corpos de prova, resultando um total de 403 corpos de prova para análise das propriedades físicas, mecânicas e colorimétrica.

No Apêndice encontram-se todas as características físico-mecânicas mensuradas para cada um dos corpos de prova estudados.

4.1. Parâmetros Colorimétricos

A Figura 22 ilustra os valores médios, os intervalos de confiança da média (ao nível de 5% de significância) e os coeficientes de variação (CV) dos parâmetros colorimétricos.

Figura 22 – Resultados dos parâmetros colorimétricos L^* (A), a^* (B) e b^* (C).

Fonte: Autoria própria.

O valor médio determinado para o parâmetro L^* (0 implica cor preta e 100 cor branca) neste estudo foi igual a 75,22, próximo ao determinado por outros autores (CONTE *et al.*

2014; PINCELLI; MOURA; BRITO, 2012; POUBEL *et al.* 2015). De acordo com a classificação proposta por Camargos e Gonzalez (2001) o *Pinus* é uma madeira de coloração branco-amarelada, pois possui luminosidade (L^*) superior a 54. A variabilidade anatômica da madeira pode responder valores diferentes para luminosidade, já que este fator também pode influenciar a cor da madeira.

O valor médio para o parâmetro a^* (60 implica cor vermelha e -60 implica cor verde) foi 6,34, próximo ao determinado por Pincelli, Moura e Brito (2012) e ligeiramente superior aos determinados pelos demais autores que estudaram a madeira de *Pinus* (AMORIM; GONÇALEZ; CAMARGO, 2013; CONTE *et al.*, 2014). Segundo Gierlinger *et al* (2003), a coordenada cromática a^* é influenciada diretamente pelo teor de extrativos presentes na madeira.

Para o parâmetro b^* (60 implica cor amarela e -60 indica cor azul) o valor médio encontrado foi igual a 25,80, mesmo valor encontrado por Pincelli, Moura e Brito (2012) para a madeira de *Pinus caribaea*. Este valor também está próximo ao determinado em outros estudos (CONTE *et al.*, 2014; POUBELL *et al.*, 2015). A pigmentação amarela é a principal responsável pela formação de cor na espécie de *Pinus*, e está relacionada com a fotoquímica dos principais componentes da madeira, como a lignina e os extrativos (CONTE *et al.*, 2014; PINCELLI; MOUR; BRITO, 2012). Os resultados encontram-se resumidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores deste trabalho e da literatura para os parâmetros L^* , a^* e b^* .

Parâmetros	Luminosidade L^*	Tonalidade a^*	Tonalidade b^*
Este estudo	75,22	6,34	25,80
Conte <i>et al.</i> (2014): <i>Pinus elliottii</i>	78	4	19
Pincelli, Moura e Brito (2012): <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	76,2	6,6	25,8
Poubel <i>et al.</i> (2015): <i>Pinus</i> sp.	73,68	8,51	25,77
Amorim, Gonzalez e Camargo (2013): <i>Pinus caribaea</i>	56,53	4,72	18,86

Fonte: Autoria própria.

4.2. Densidade Aparente

A Figura 23 ilustra os valores médios, os intervalos de confiança da média (ao nível de 5% de significância) e os coeficientes de variação (CV) do número de lenhos e da densidade aparente, respectivamente.

Figura 23 – Resultados do número de lenhos (A) e da densidade aparente (B).

Fonte: Autoria própria.

A variabilidade dos anéis de crescimento é causada por diversos fatores, sendo o clima um dos que mais influencia, uma vez que os fatores climáticos contribuem para o maior ou menor crescimento das camadas de lenho inicial e tardio. Os anéis de crescimento por sua vez influenciam as diferentes características físicas e mecânicas da madeira.

A densidade aparente média da madeira de *Pinus* sp. determinada neste estudo ($\rho_{ap, 12\%} = 0,46 \text{ g/cm}^3$) foi igual ao valor encontrado por Amorim, Gonzalez e Camargo (2013) e ficou próximo ao determinado por Almeida *et al.* (2003) ($\rho_{ap, 12\%} = 0,50 \text{ g/cm}^3$) e pelo IPT:2017 ($\rho_{ap, 15\%} = 0,48 \text{ g/cm}^3$).

A Equação 20 expressa o modelo de regressão para a estimativa da densidade aparente das madeiras de *Pinus* sp. em função dos parâmetros colorimétricos e também do número de lenhos, e a Figura 24 apresenta os resultados da ANOVA do modelo de regressão.

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = 0,20 + 0,0146 \cdot L - 0,0623 \cdot a - 0,0117 \cdot b + 0,0728 \cdot Nle - 0,00096 \cdot L \cdot a - 0,000176 \cdot L \cdot b - 0,001034 \cdot L \cdot Nle + 0,00361 \cdot a \cdot b + 0,00162 \cdot a \cdot Nle + 0,000040 \cdot b \cdot Nle \quad (20)$$

[$R^2 = 51,03\%$]

Figura 24 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para a densidade aparente – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).

Fonte: Autoria própria.

Da Figura 24, a normalidade ($P\text{-valor} > 0,05$ – teste de Anderson-Darling), homogeneidade (agrupamento dos valores ajustados em torno de 0) e a independência (inexistência de padrão na dispersão dos resíduos) dos resíduos foram atendidas, validando o modelo da ANOVA. Do gráfico de Pareto, apenas os fatores L, Nle e a interação desses (L·Nle) afetou de forma significativa nos valores da densidade (Equação 20), o que evidencia a pouca significância dos demais fatores avaliados.

Da Equação 20 o valor do coeficiente de determinação obtido foi de 51,03%, entretanto, com toda a variabilidade intrínseca da madeira, a Análise de Variância confirmou a significância do modelo e dos fatores e interações nos valores da densidade aparente, permitindo maior compreensão da relação entre as variáveis confrontadas. Este valor de R^2 ficou um pouco abaixo que o determinado por Rall (2006) ($R^2 = 60,36\%$), por meio de

regressão linear múltipla para estimar a densidade em função do número de anéis de crescimento por polegada e porcentagem de lenho tardio, na madeira de *Pinus taeda* L..

A diminuição na luminosidade e o aumento no número de lenhos implicam em aumentos significativos nos valores da densidade aparente das madeiras de *Pinus* sp, e a interação (Figura 25) de ambos fatores provocou reduções nessa propriedade.

Figura 25 – Gráfico da interação dos fatores L^* e Nle para a densidade aparente.

Fonte: Autoria própria.

A presença do lenho tardio afeta a luminosidade, pois apresenta coloração mais escura do que o lenho inicial. Amorim, González e Carmago (2013) observaram que o parâmetro L^* obtido na face radial é recomendado para estimar a densidade, verificando que quanto maior for o valor de L^* , menor a densidade da madeira.

Alguns corpos de prova apresentaram alta densidade, com mais da metade da seção transversal contendo anéis de crescimento estreitos, ou seja, com maior quantidade de lenho tardio (Figura 26). Segundo González *et al.* (2018) madeiras com maior percentual de lenho tardio podem apresentar maiores valores de densidade.

Figura 26 – Corpos de prova com elevada densidade.

Fonte: Autoria própria.

Excluindo-se os termos não significativos no modelo da Equação 20, assim como expressa a Equação 21, o valor do coeficiente de determinação do modelo completo sofreu redução de apenas 3,37%, o que reforça a pequena significância dos demais termos. A Figura 27 ilustra a superfície gerada do modelo de regressão da Equação 21.

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = -0,091 + 0,00635 \cdot L + 0,0796 \cdot Nle - 0,000966 \cdot L \cdot Nle \quad [R^2=47,66\%] \quad (21)$$

Figura 27 – Gráfico ou superfície do modelo de regressão da Equação 21.

Fonte: Autoria própria.

4.3. Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras

A Figura 28 ilustra o valor médio, o intervalo de confiança da média (ao nível de 5% de significância) e o coeficientes de variação (CV) do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

Figura 28 – Resultado do módulo de elasticidade.

Fonte: Autoria própria.

O valor médio para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. neste estudo foi igual a 15681 MPa (com teor de umidade da ordem de 12%) próximo ao apresentado pela ABNT NBR 7190:1997 ($E_{c0} = 13.304,0$ MPa) e por Trianoski *et al* (2014) ($E_{c0} = 12.432,0$ MPa), ambos para a madeira de *Pinus taeda* L.

A Equação 22 expressa o modelo de regressão para a estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras das madeiras de *Pinus* sp. em função dos parâmetros colorimétricos e também do número de lenhos, e a Figura 29 apresenta os resultados da ANOVA do modelo de regressão.

$$E_{c0}(\text{MPa}) = -258294 + 3608 \cdot L - 26449 \cdot a + 15431 \cdot b + 2441 \cdot Nle + 327 \cdot L \cdot a - 205 \cdot L \cdot b - 12.4 \cdot L \cdot Nle + 33 \cdot a \cdot b + 86 \cdot a \cdot Nle - 51.5 \cdot b \cdot Nle \quad [R^2=43,61\%] \quad (22)$$

Figura 29 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para o módulo de elasticidade – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).

Fonte: Autoria própria.

Da Figura 29, a normalidade ($P\text{-valor} > 0,05$ – teste de Anderson-Darling), homogeneidade (agrupamento dos valores ajustados em torno de 0) e a independência (inexistência de padrão na dispersão dos resíduos) dos resíduos foram atendidas, validando o modelo da ANOVA. Do gráfico de Pareto, apenas o fator Nle afetou de forma significativa nos valores do módulo de elasticidade na compressão paralela (Equação 22), o que evidencia a pouca significância dos demais fatores avaliados.

Da Equação 22, o valor do coeficiente de determinação obtido foi de 43,61%. A Análise de Variância acusou a significância do modelo, o que possibilitou identificar a

significância dos fatores e das interações, permitindo maior compreensão da relação entre as variáveis confrontadas.

Rall (2006) utilizou análise de regressão linear múltipla entre o módulo de elasticidade e o número de anéis por polegada e proporção de lenho tardio para a madeira de *Pinus taeda* L., encontrando coeficiente de determinação (R^2) igual a 41,5%, bem próximo ao determinado neste estudo.

Não foi encontrada correlação significativa entre o módulo de elasticidade e os parâmetros colorimétricos da madeira de *Pinus* sp., da mesma forma como verificado por Amorim, González e Carmago (2013). Apenas o número de lenhos foi considerado significativo pela ANOVA. Aumentos no número de lenhos implicam em aumentos significativos nos valores do módulo de elasticidade na compressão paralela das madeiras de *Pinus* sp.

Diversos autores relataram que o módulo de elasticidade é afetado pela presença de madeira juvenil, ou seja, madeira com menor quantidade de lenho tardio. Larson *et al.* (2001) afirma que o módulo de elasticidade é correlacionado fortemente com a densidade, sendo influenciado pela quantidade de madeira juvenil. Ballarin e Palma (2003) encontraram diferenças de 54% nos valores do módulo de elasticidade na madeira adulta em relação à juvenil da madeira de *Pinus taeda*. Barrios, Trincado e Watt (2017) encontraram coeficiente de correlação (R) de 52% entre o módulo de elasticidade e a proporção de lenho tardio para madeira adulta de *Pinus radiata* D. Don.

Excluindo-se os termos não significativos no modelo da Equação 22, assim como expressa a Equação 23 o valor do coeficiente de determinação do modelo completo sofreu redução de apenas 3,11%, o que reforça a pequena significância dos demais termos.

$$E_{c0}(\text{MPa}) = 6339 + 72,2 \cdot N_{le} \quad [R^2=40,50\%] \quad (23)$$

4.4. Resistência na compressão paralela às fibras

A Figura 30 ilustra o valor médio, o intervalo de confiança da média (ao nível de 5% de significância) e o coeficientes de variação (CV) da resistência na compressão paralela às fibras.

Figura 30 – Resultado da resistência na compressão paralela.

Fonte: Autoria própria.

O coeficiente de variação na determinação da resistência à compressão paralela às fibras foi 19,25%, próximo ao adotado pela ABNT 1997 para a compressão paralela às fibras (18%).

O valor médio para a resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. neste estudo foi igual a 33,25 MPa (com teor de umidade da ordem de 12%) próximo ao apresentado NBR 7190: pela ABNT NBR 7190:1997 para as espécies de *Pinus caribaea* ($f_{c0} = 35,4$ MPa) e *Pinus bahamensis* ($f_{c0} = 32,6$ MPa). Segundo o IPT a madeira de *Pinus elliottii* apresenta resistência à compressão paralela às fibras de 31,5 MPa, para umidade de 15%.

A Equação 24 expressa o modelo de regressão para a estimativa da resistência na compressão paralela às fibras das madeiras de *Pinus* sp. em função dos parâmetros colorimétricos e também do número de lenhos, e a Figura 31 apresenta os resultados da ANOVA do modelo de regressão.

$$f_{c0}(\text{MPa}) = 352 - 2.53 \cdot L - 57.0 \cdot a - 2.8 \cdot b + 7.93 \cdot Nle + 0.380 \cdot L \cdot a - 0.018 \cdot L \cdot b - 0.0411 \cdot L \cdot Nle + 0.904 \cdot a \cdot b + 0.200 \cdot a \cdot Nle - 0.1931 \cdot b \cdot Nle \quad [R^2=48,53\%] \quad (24)$$

Figura 31 – Resultados da análise de variância do modelo e regressão para a resistência na compressão – normalidade (A), homogeneidade das variâncias (B), independência dos resíduos (C), gráfico de Pareto (D).

Fonte: Autoria própria.

Da Figura 31, a normalidade ($P\text{-valor} > 0,05$ – teste de Anderson-Darling), homogeneidade (agrupamento dos valores ajustados em torno de 0) e a independência (inexistência de padrão na dispersão dos resíduos) dos resíduos foram atendidas, validando o modelo da ANOVA. Do gráfico de Pareto, os fatores L^* , a^* , b^* e as interações $L^* \cdot b^*$, $a^* \cdot b^*$ afetaram de forma significativa nos valores da resistência na compressão paralela (Equação 24), o que evidencia a pouca significância dos demais fatores avaliados.

Da Equação 24, o valor do coeficiente de determinação obtido foi de 48,53%. A Análise de Variância acusou a significância do modelo, o que possibilitou identificar a significância dos fatores e das interações, permitindo maior compreensão da relação entre as variáveis confrontadas. Aumentos nos três parâmetros colorimétricos implicam em reduções nos valores da resistência na compressão. A interação entre os fatores L^* e b^* implicou na

redução dos valores da resistência, sendo constatados aumentos nessa propriedade pela interação dos fatores a^* e b^* (Figura 32).

Como apresentado anteriormente, a pigmentação amarela (b^*) é a principal responsável pela formação de cor para o *Pinus* sp. e está relacionada com a fotoquímica dos principais componentes da madeira, como a lignina. A lignina é responsável, em parte, pela resistência mecânica da madeira (DUARTE, 2017; SANTOS, 2008).

Almeida (2017) em seu modelo de regressão para estimar a resistência à compressão paralela às fibras da madeira de Tatajuba, cujo valor do parâmetro b^* é igual a 23,85 (próximo ao determinado para o *Pinus* neste trabalho), obteve coeficiente de determinação 72,49%.

Figura 32 – Gráficos de interação entre fatores para a resistência na compressão paralela às fibras – $L \cdot b^*$ (A), $a^* \cdot b^*$ (B).

Fonte: Autoria própria.

Os modelos de regressão propostos para cada propriedade são muito importantes, pois, possibilitam estimar algumas propriedades mecânicas da madeira de *Pinus* sp. utilizando os parâmetros colorimétricos, facilmente obtidos com um colorímetro portátil.

É importante ressaltar a escassez de trabalhos na literatura consultada que correlacionam propriedades físicas e mecânicas de *Pinus* sp. com seus parâmetros colorimétricos. Como não foi encontrada nenhuma pesquisa que correlaciona as propriedades mecânicas na compressão paralela às fibras com os parâmetros colorimétricos, não foi possível realizar a comparação dos resultados obtidos neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

A técnica de colorimetria aplicada à investigação de propriedades física e mecânica mostrou-se adequada. Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) utilizados nas definições do modelo são de fácil obtenção a partir do uso de um equipamento portátil (colorímetro).

O *Pinus* sp. é uma madeira de coloração branco-amarelada, sendo a pigmentação amarela (b^*) a principal responsável pela formação da cor neste gênero. O valor médio do parâmetro luminosidade (L^*) foi igual a 75,22. O valor médio determinado para o parâmetro a^* foi igual a 6,34. O parâmetro b^* apresentou valor médio igual a 25,80.

Os valores dos coeficientes de determinação foram: 47,66% para estimativa da densidade, 40,50% para estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e 48,53% para estimativa da resistência à compressão paralela às fibras. Entretanto, com toda a variabilidade intrínseca da madeira, a Análise de Variância acusou a significância dos modelos, o que possibilitou identificar a significância dos fatores e das interações, permitindo maior compreensão da relação entre as variáveis confrontadas.

O valor médio da densidade determinado neste estudo foi igual a 0,46 g/cm³, compatível com os resultados da literatura. A análise de correlação mostrou que apenas a luminosidade, número de lenhos e a interação entre esses fatores afetaram significativamente os valores da densidade da madeira. A diminuição da luminosidade e o aumento no número de lenhos implicam em aumentos significativos nos valores da densidade.

O valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras foi igual a 15.681,87 MPa. A análise de correlação mostrou que apenas o número de lenhos afetou significativamente os valores do módulo de elasticidade. Aumentos no número de lenhos geram aumentos significativos nos valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

O valor médio da resistência à compressão paralela às fibras foi igual a 33,25 MPa, adequado com os resultados da literatura. A análise de correlação mostrou que apenas os fatores L^* , a^* , b^* e as interações $L^* \cdot b^*$, $a^* \cdot b^*$ afetaram de forma significativa os valores da resistência na compressão paralela às fibras.

Novos modelos de regressão multivariáveis podem ser propostos para estimativa de outras propriedades mecânicas da madeira de *Pinus* sp., em função dos seus parâmetros colorimétricos. Também deve ser avaliada influência das características dos anéis de crescimento (número de anéis por polegadas, ângulo de inclinação e proporção de lenho tardio) nas propriedades física e mecânica da madeira de *Pinus* sp. isentas de defeitos.

A técnica de colorimetria possibilita a separação de lotes a partir dos parâmetros colorimétricos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. H. **Estimativa de Propriedades de Resistência e de Rigidez de Madeiras Tropicais Brasileiras pela Técnica de Colorimetria**. 2017. 98f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; CHRISTOFORO, A. L.; VARANDA, L. D.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A.; CALIL JR, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 203-207, 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, 2017.

ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; CHAHUD, E.; BRANCO, L. A. M. N.; LAHR, F. A. R. Density as estimator of strength in compression parallel to the grain in wood. **International Journal of Materials Engineering**, v.6, n.3, p. 67-71, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.01

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 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 JR, 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**, 2017. DOI: 10.1007/s00107-017-1168-9

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PN02: 126.10-0001-1**. (ANBT NBR 7190): Projeto de estruturas de madeira – revisão. Rio de Janeiro: ABNT. 2013.

_____. **PN02: 126.10-0001-3**. (ANBT NBR 7190): Projeto de estruturas de madeira – revisão. Rio de Janeiro: ABNT. 2016.

_____. **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.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.19-28, 2005.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedade de Resistência e Rigidez da Madeira Juvenil e Adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.

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

BARRIOS, A.; TRINCADO, G.; WATT, M. S. Wood Properties of Juvenile and Mature Wood of *Pinus radiata* D. Don Trees Growing on Contrasting Sites in Chile, **Forest Science**, v. 63, n.2, p.184-191,2017. DOI: <https://doi.org/10.5849/forsci.2016-060>

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_{c0} . **Floresta e Ambiente**, v.19, n.2, p. 179-183, 2012. DOI: 10.4322/floram.2012.021

BURGER, M. B; RITCHER, H. C. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CADEMARTORI, P.H.G.; MATTOS, B.D.; MISSIO, A.L.; GATTO, D.A. Color responses of two fast-growing hardwoods to two-step steam-heat treatments. **Materials Research**.v.17, n.2, p.487-493, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151614392014000200030&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 2 Out. 2018.

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

CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação de peças estruturais de *Pinus* sp.** 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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.

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

CHRISTOFORO, A. L.; AFTIMUS, B. H. C; PANZERA, T. H.; MACHADO, G. O.; LAHR, F. A. R. Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrina* Wood specie. **Engenharia Agrícola**, v.37, n.2, p. 376-384, 2017. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p376-384/2017

CONTE, B.; MISSIO, A. L. ; PERTUZZATTI, A.; CADEMARTORI, P. H. G. de; GATTO, D. A. Propriedades físicas e colorimétricas da madeira termorretificada de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 545-553, 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. 127f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistemas de Produção Embrapa. [Home page]. **EMBRAPA**, 2018. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 7 Jun. 2018.

FERREIRA, A. T. B. **Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr.** **Et Golf**. 2009. 83f. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2009.

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

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

GARCIA, R. A.; LOPES, J.O.; SANTOS, W.A. Modificação da cor original da madeira de *Eucalyptus grandis* através de tratamentos termorretificadores. **Cerne**, v.20, n.3, p.449-457, 2014. DOI:10.1590/01047760201420031410

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

GARCIA, R. A.; OLIVEIRA, N. S.; NASCIMENTO, A. M.; SOUZA, N. D. Colorimetria de madeiras dos espécies *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, p.509-517, 2014.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRADNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees**, Vancouver, v. 18, p. 101-108, 2003.

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.

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.; SANTOS, N.; SILVA, F. G. Growth ring width of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and its relationship with wood properties. **Scientia Forestalis**, v.46, n.118, p. 309-317, 2018.

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.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras. **IPT**, 2017. Disponível em: <http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira>. Acesso em: 7 Jun. 2018.

INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION (CIE). Comissão Internationale de l'Eclairage. **CIE**, 2018. Disponível em: <<http://www.cie.co.at>>. Acesso em: 7 Jun. 2018.

IWAKIRI, S.; MANHIÇA, A. A.; PARCHEN, C. F. A.; CIT. E. J.; TRIANOSKI, R. Use of wood from *Pinus caribaea* var. *caribaea* and *Pinus caribaea* var. *bahamensis* for production of particleboard panels. **Cerne**, v.16, n.2, p.193-198, 2010.

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: 10.14583/23187670.v04n05a06

KLOCK, U.; ANDRADE, A.S. **Manual didático: química da madeira**. 87 f. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 2013.

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

LARSON, P.R.; KRETSCHMANN, D.E.; CLARK III, A.; ISEBRANDS, J.G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: A synopsis**. Forest Products Laboratory, Madison, 42f, 2001.

LAZAROTTO, M.; CAVA, S.S.; BELTRAME, R.; GATTO, D.A.; MISSIO, A.L.; GOMES, L.G.; MATTOSO, T.R. Resistência biológica e colorimetria da madeira termorretificada de duas espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, v.40, n.1, p.135-145, 2016.

LIMA, C. K. P; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, v.13, n.2, p.123-129, 2007.

LIMA, R.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; INOUE, M.T.; PACHECO, J.M. Volume de madeira de *Pinus taeda* L. em diferentes espaços vitais de crescimento. **Revista do Instituto Florestal**, v.27, n.2, p.167-175, 2015.

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

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.

MISSANJO, E.; MATSUMURA, J. Wood density and mechanical properties of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Malawi. **Forests**, v.7, 2016. DOI:10.3390/f7070135

MONTES, C. S.; HERNANDEZ, R. E.; BEAULIEU, J.; WEBER, J. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. **New Forests**, Dordrecht, v. 35, p.57-73, 2008.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D.C. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.461-470, 2005.

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.

MORITANI, F. Y. **Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá)**. 2018. 176f. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de *Pinus taeda* L. com o uso de ultrassom.** 2003.149f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

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.

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.

PINCELLI, A.L.P.S.M; MOURA, L.F.; BRITO, J.O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas**, v.14, n.2, p.239-248, 2012.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A.; LELIS, R. C. C.; VIEIRA, L.A.A. Análises físicas e colorimétricas da madeira de *Pinus* sp. modificada termicamente. **Scientia Forestalis**, v.43, n.107, p.511-521, 2015.

RALL, R. **Influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L.** 2006.73f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

Relatório 2017 – **Indústria Brasileira de Árvores**, Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf/. Acesso em: 7 Jun. 2018.

REMADE - Revista da Madeira. Edição 83, 2004 Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=596&subject=Propriedades&title=Propriedades. Acesso em 25 Nov. 2018.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Comparative analysis of physical and mechanical properties old wood from three plantation softwoods”. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** 2008. 57f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SHIMIZU, J. Y. ***Pinus* na silvicultura brasileira.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223p.

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

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda***. 2012. 223f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, R. A. F.; SETTER, C.; MAZETTE, S. S.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n.1, p.36-41, 2017. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p36-41

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.; 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, 2013.

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. 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

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

TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Forestalis**, v.42, n.101, p.21-28, 2014.

VALVERDE, S. R.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de Eucalypto no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

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. 7936-945, 2015.

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.

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

APÊNDICE – Dados obtidos dos corpos de prova estudados

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 01	0,4382	11608,62	31,39	73,83	6,56	25,33	13
CP 03	0,4123	3675,77	19,49	72,64	7,34	27,09	7
CP 04	0,4019	17157,36	18,70	74,51	7,48	25,52	8
CP 05	0,4025	7925,46	15,44	79,37	5,88	27,57	7
CP 06	0,4575	4198,21	20,34	76,08	6,31	26,78	10
CP 07	0,4309	10377,36	25,37	75,67	6,42	25,36	8
CP 09	0,4721	3227,15	23,20	74,93	6,39	23,39	7
CP 10	0,4428	43855,46	38,90	75,29	6,57	26,45	11
CP 13	0,5206	8411,18	26,33	74,84	5,86	25,49	10
CP 14	0,5063	6856,29	17,30	77,17	5,78	27,36	8
CP 15	0,4924	2678,66	15,65	77,09	5,29	26,85	7
CP 16	0,3842	8145,56	23,23	74,22	6,29	25,83	8
CP 18	0,5064	10324,56	18,12	77,80	6,05	26,26	11
CP 19	0,4459	6336,61	24,39	74,14	6,13	24,00	12
CP 20	0,4094	11956,34	27,80	74,84	6,32	24,70	8
CP 21	0,5099	41909,04	25,03	77,14	5,43	25,02	8
CP 22	0,5206	9595,35	18,48	75,43	6,34	25,29	13
CP 23	0,4377	6811,02	27,20	79,45	5,12	25,22	10
CP 24	0,3721	4718,66	23,08	75,13	7,18	24,44	10
CP 25	0,4176	12348,71	26,91	76,18	6,31	24,37	7
CP 26	0,5673	5919,80	15,98	74,61	6,37	24,36	9
CP 27	0,5495	2028,91	29,11	74,85	5,82	24,15	12
CP 29	0,4260	10645,65	29,06	74,22	6,35	24,21	8
CP 30	0,3724	11080,35	23,81	74,58	6,81	24,53	8
CP 31	0,3857	14128,19	26,42	77,98	5,41	25,35	10
CP 32	0,5018	5545,35	22,54	73,52	6,37	24,04	13
CP 33	0,4706	11357,62	26,93	73,01	5,94	25,86	12
CP 34	0,4471	1364973,52	32,96	74,93	6,30	24,50	17
CP 36	0,4800	4234,54	26,49	70,98	7,64	25,38	15
CP 37	0,4121	7148,93	22,53	78,08	6,00	26,91	14
CP 38	0,3821	10705,95	25,02	77,79	5,97	28,40	6
CP 39	0,4766	7809,39	22,40	78,33	5,97	27,83	7
CP 40	0,4107	18734,22	32,94	77,41	5,62	25,67	7
CP 43	0,4343	13616,82	33,68	74,62	6,37	25,66	8
CP 44	0,4313	8397,82	25,98	72,18	7,49	26,18	9
CP 45	0,4569	19469,41	37,27	76,74	5,35	23,66	9
CP 46	0,4577	6418,88	26,49	73,89	6,98	25,74	11
CP 47	0,3898	13097,22	29,54	76,73	6,40	16,69	8
CP 48	0,4074	12694,81	27,18	77,47	5,95	17,05	5
CP 49	0,4425	18320,48	24,94	75,54	6,51	24,87	7
CP 50	0,4497	16502,84	31,97	74,71	6,45	24,77	8

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 52	0,4232	19697,26	26,26	72,40	7,38	25,91	13
CP 54	0,4540	19484,70	35,78	75,97	5,90	26,28	10
CP 55	0,4209	4912,72	19,08	74,57	6,55	24,88	6
CP 56	0,4270	4399,09	21,90	75,715	6,44	24,785	7
CP 57	0,4454	8569,90	26,87	73,71	6,665	23,98	12
CP 58	0,4883	4422,15	27,38	77,96	5,535	26,92	7
CP 59	0,3909	13332,75	26,18	76,735	5,835	24,6	9
CP 63	0,5297	21913,78	44,58	75,62	5,845	25,145	11
CP 64	0,5567	23839,46	41,11	74,745	5,91	27,57	11
CP 65	0,4384	12690,92	32,35	75,52	5,87	28,895	10
CP 66	0,4642	6257,31	18,72	77,16	5,675	27,195	7
CP 67	0,3565	10679,74	24,29	76,92	6,1	29,345	6
CP 69	0,5065	21735,59	28,56	75,365	6,335	27,06	14
CP 70	0,4172	10842,16	19,92	75,54	6,83	26,555	6
CP 72	0,3712	6346,79	16,90	76,96	6,19	25,41	8
CP 73	0,4445	9044,78	21,26	78,11	5,95	28,15	5
CP 74	0,4469	9490,24	26,77	74,16	6,29	24,92	11
CP 75	0,3556	11337,59	19,33	77,50	6,23	25,88	6
CP 76	0,4921	15592,21	40,39	72,71	6,11	24,62	10
CP 77	0,4875	11187,90	28,00	75,05	6,77	27,67	9
CP 79	0,5388	16979,10	29,51	73,80	7,07	27,59	14
CP 80	0,4928	12063,78	27,16	76,79	6,32	27,85	9
CP 81	0,3603	12311,75	29,55	84,56	3,65	25,62	12
CP 82	0,3814	10278,67	26,50	74,58	6,21	26,14	10
CP 84	0,4595	10931,94	24,77	74,28	6,59	17,18	10
CP 85	0,5146	15873,35	37,76	74,85	5,82	25,27	13
CP 86	0,4090	14715,67	31,34	76,14	6,56	27,43	8
CP 87	0,4787	15634,70	36,33	76,18	5,84	26,81	8
CP 88	0,4291	12827,10	30,22	77,00	5,51	24,27	9
CP 89	0,4405	5722,84	21,98	78,02	6,02	24,99	12
CP 90	0,4603	12250,37	24,50	75,73	6,07	28,27	8
CP 92	0,5276	11935,73	32,81	73,50	6,81	24,20	11
CP 94	0,4806	15721,18	36,38	76,84	5,12	26,39	11
CP 96	0,5371	11079,71	28,87	77,02	5,63	25,79	6
CP 97	0,3827	9067,81	23,80	76,40	6,26	25,55	6
CP 98	0,3865	7636,75	22,38	78,70	5,82	26,87	7
CP 99	0,3915	11922,06	24,83	79,77	5,32	26,36	5
CP 100	0,3654	8754,99	24,59	73,54	7,04	25,61	7
CP 103	0,4165	15521,62	33,36	77,09	6,60	26,50	11
CP 104	0,4021	15515,49	34,69	76,04	6,39	26,98	8
CP 105	0,5333	96246,42	34,88	77,46	5,67	24,59	10
CP 106	0,4684	4390,29	21,89	72,06	7,26	25,78	6
CP 108	0,6380	9111,49	28,22	77,45	5,21	25,05	6

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 109	0,4444	4143,47	21,08	75,66	7,19	26,73	7
CP 110	0,4569	11640,96	28,34	76,70	6,82	28,98	7
CP 111	0,3773	13719,09	26,92	76,56	6,58	28,68	7
CP 112	0,3994	6704,31	25,00	73,97	6,90	24,42	9
CP 113	0,5207	12622,85	33,06	73,79	6,81	27,13	9
CP 115	0,3327	9082,09	23,23	75,33	6,95	15,11	9
CP 116	0,5869	6455,26	49,85	72,05	6,32	25,35	16
CP 117	0,5643	13262,17	37,63	75,40	6,25	25,52	9
CP 118	0,4583	11512,39	22,36	77,64	6,01	28,42	9
CP 119	0,4564	15695,66	36,09	74,67	6,77	26,48	9
CP 120	0,3893	10774,12	26,51	75,11	6,23	26,94	9
CP 121	0,3981	13450,37	29,89	76,77	6,97	28,01	8
CP 122	0,5000	6799,75	38,14	76,09	6,03	25,97	9
CP 123	0,4707	11248,10	33,45	74,96	6,73	25,49	16
CP 124	0,3704	8933,74	29,16	77,37	6,15	27,19	6
CP 125	0,4905	16410,38	43,54	76,12	5,91	26,53	7
CP 126	0,4042	14415,24	33,30	77,33	6,16	27,52	8
CP 128	0,4639	10661,69	33,51	75,47	6,30	24,94	8
CP 129	0,4756	8528,31	33,46	78,04	5,38	25,72	7
CP 130	0,4364	8506,76	26,24	78,67	6,12	29,13	6
CP 132	0,5014	11341,67	32,85	75,23	6,71	25,28	7
CP 133	0,4616	11476,99	33,29	76,46	6,29	27,22	10
CP 135	0,4718	12241,70	36,60	73,56	6,72	26,08	10
CP 136	0,4337	11985,67	27,14	76,46	6,40	25,58	7
CP 137	0,4466	6677,52	28,39	78,09	5,23	25,56	6
CP 139	0,5241	20119,68	48,68	76,27	5,33	24,81	9
CP 140	0,4515	14095,00	38,12	76,25	5,32	25,24	9
CP 141	0,4538	21285,72	40,68	74,92	6,97	26,99	8
CP 142	0,4606	11747,11	31,69	78,38	5,93	22,94	7
CP 143	0,4093	15616,72	31,28	75,45	6,52	26,53	6
CP 144	0,4291	11796,70	33,38	75,36	7,11	26,76	14
CP 145	0,4727	11842,63	36,98	73,86	6,78	24,09	15
CP 146	0,4372	20125,46	38,45	76,69	6,32	25,99	9
CP 147	0,4385	13806,42	31,79	76,79	6,56	29,41	9
CP 148	0,4677	12093,73	39,91	74,15	6,65	27,82	17
CP 149	0,4997	16618,44	48,48	75,18	6,29	26,24	8
CP 150	0,4178	8768,10	32,41	76,45	6,04	26,61	13
CP 151	0,4502	4211,39	25,54	76,37	5,51	27,41	5
CP 153	0,3634	13775,53	32,22	75,35	6,53	29,01	9
CP 154	0,4770	15672,18	42,06	79,00	5,57	25,82	12
CP 156	0,4934	11638,22	37,69	73,81	7,15	29,20	12
CP 158	0,4210	12074,62	33,91	75,55	6,77	28,09	7
CP 159	0,3444	10213,53	27,31	75,80	6,89	27,92	7

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 160	0,3764	4697,56	22,48	42,95	5,99	25,85	6
CP 161	0,4415	9322,30	32,93	78,77	5,31	26,84	8
CP 162	0,5580	16412,21	46,00	75,44	6,57	26,24	12
CP 163	0,3984	8307,15	28,53	76,53	6,24	27,99	9
CP 164	0,3908	11889,94	32,73	75,77	6,07	27,53	9
CP 165	0,4107	4670,69	21,84	78,69	5,43	27,16	8
CP 167	0,4191	11752,38	21,73	78,99	5,42	24,42	8
CP 169	0,3567	9128,14	30,01	76,24	7,10	27,02	5
CP 170	0,4718	15606,63	39,09	76,18	6,31	26,93	12
CP 173	0,5679	16966,56	51,08	75,31	5,43	25,62	8
CP 174	0,4219	6976,77	27,19	77,11	5,81	25,70	8
CP 176	0,4094	11074,17	21,96	72,07	8,11	27,67	7
CP 178	0,4436	16834,31	43,54	76,79	6,26	25,15	9
CP 179	0,4761	6003,15	30,13	76,92	5,56	24,43	6
CP 180	0,4413	7897,55	22,32	77,64	5,85	24,66	8
CP 181	0,5717	20763,86	46,99	73,23	7,32	28,48	18
CP 182	0,4105	7589,67	30,53	76,55	6,07	24,31	9
CP 183	0,4541	15713,51	38,38	77,26	6,29	28,16	10
CP 184	0,3699	13435,55	23,91	76,39	6,83	27,48	8
CP 186	0,4444	15104,96	28,76	75,03	6,10	26,12	7
CP 187	0,4596	24942,53	48,16	75,68	6,06	24,93	19
CP 188	0,3803	9934,56	29,16	72,86	7,39	26,53	8
CP 189	0,5502	19840,95	376,52	74,28	5,87	16,20	12
CP 190	0,5356	6003,30	34,55	74,22	5,92	24,60	11
CP 191	0,4751	17869,88	45,67	74,89	6,55	24,68	11
CP 192	0,4389	5563,73	24,46	68,37	8,61	27,52	9
CP 193	0,5404	23355,90	48,56	74,09	6,33	16,80	21
CP 194	0,4666	6706,87	20,08	76,77	6,42	29,03	8
CP 195	0,4446	17434,71	41,96	75,75	5,54	25,81	10
CP 197	0,4534	9795,08	32,54	73,14	3,86	25,98	14
CP 198	0,5023	12722,74	36,23	75,97	5,56	24,11	10
CP 199	0,4465	10935,27	33,74	71,82	7,53	27,50	10
CP 200	0,4878	16030,55	47,56	73,35	6,89	25,82	14
CP 201	0,4404	12632,50	39,02	76,70	6,40	25,17	8
CP 202	0,4169	4331,98	16,42	72,52	7,55	27,17	9
CP 203	0,4399	6857,72	30,11	76,97	5,70	25,23	10
CP 204	0,5227	12315,00	42,47	74,51	6,50	27,22	18
CP 205	0,4596	11289,57	36,52	75,63	5,62	25,91	7
CP 207	0,6076	16931,27	39,97	71,37	7,39	28,70	25
CP 208	0,4852	9897,35	29,46	76,77	5,65	16,13	14
CP 209	0,4379	8170,44	32,39	77,12	5,61	25,62	8
CP 210	0,5107	22112,22	49,24	73,57	6,87	27,33	18
CP 211	0,4269	6015,77	27,89	76,05	5,85	26,08	11

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 212	0,3989	7137,39	23,65	76,66	5,74	23,82	6
CP 213	0,5125	14249,70	27,51	77,73	6,55	30,16	9
CP 216	0,4233	15591,09	41,82	75,92	5,99	26,87	18
CP 217	0,4326	12412,61	36,79	76,70	6,64	29,41	7
CP 219	0,4327	4768,80	28,58	71,30	7,96	26,10	9
CP 220	0,3980	11291,23	34,97	76,05	7,03	27,41	10
CP 221	0,4854	10310,69	32,97	75,79	6,65	24,82	11
CP 222	0,5458	5311,46	25,99	76,54	5,69	28,22	6
CP 223	0,4852	6458,66	29,00	73,04	6,12	26,87	7
CP 224	0,5598	8227,36	31,66	73,82	6,27	23,79	10
CP 225	0,4269	10409,38	34,09	80,52	4,60	27,82	9
CP 226	0,6791	36182,97	69,83	71,36	6,57	23,01	28
CP 227	0,3646	13168,11	27,33	78,59	6,36	31,94	7
CP 228	0,3718	11664,98	28,59	75,10	7,25	28,66	11
CP 231	0,5363	23381,99	37,83	73,93	6,53	27,60	11
CP 232	0,3633	8497,78	24,68	78,76	6,12	28,43	6
CP 234	0,4781	14887,66	38,46	76,22	6,11	24,93	9
CP 235	0,5221	14083,82	33,04	76,50	6,27	28,34	15
CP 236	0,4423	6511,32	20,16	76,72	6,25	25,51	12
CP 237	0,4956	12812,13	30,88	72,28	6,52	28,50	12
CP 238	0,4384	17967,47	39,59	73,25	6,93	27,18	9
CP 239	0,4162	10412,90	29,53	78,01	5,73	28,50	6
CP 240	0,4561	46935,94	33,98	77,11	6,10	18,23	7
CP 241	0,4737	17120,12	37,58	76,48	5,92	26,51	6
CP 242	0,4546	18255,64	41,06	76,10	5,78	26,51	7
CP 243	0,4697	21633,68	40,99	74,73	6,61	27,21	20
CP 244	0,5313	22323,20	45,10	73,00	6,92	27,26	17
CP 245	0,4884	19687,93	44,96	74,89	6,03	26,21	14
CP 246	0,6131	24823,41	50,62	71,91	6,97	26,16	14
CP 247	0,4088	13128,48	31,82	75,59	6,35	27,86	9
CP 250	0,3712	10213,88	25,43	76,52	6,53	26,27	7
CP 251	0,4273	17827,10	37,31	74,64	6,92	28,27	11
CP 252	0,4396	13219,31	34,04	76,69	6,10	26,01	8
CP 254	0,4627	12976,17	35,84	76,45	6,18	27,07	10
CP 255	0,4576	13248,50	31,83	76,06	6,37	26,46	10
CP 256	0,3962	17387,78	30,57	76,78	6,38	28,35	10
CP 257	0,4370	12945,82	27,95	77,01	5,89	25,16	8
CP 258	0,4783	22001,93	48,23	74,41	6,48	16,61	15
CP 259	0,4408	19795,61	33,20	76,50	6,69	27,10	7
CP 260	0,3592	-11862,33	26,41	76,10	7,49	30,93	6
CP 263	0,5664	19055,47	25,45	78,76	5,74	27,59	9
CP 264	0,5063	11973,45	34,66	76,18	5,95	26,09	13
CP 265	0,4107	13190,53	35,40	76,56	6,08	24,96	12

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 266	0,4841	13087,78	20,39	73,73	7,12	24,95	12
CP 267	0,5958	52478,71	56,69	73,50	6,51	24,73	23
CP 268	0,3953	12040,46	31,87	78,21	6,25	28,64	8
CP 270	0,4701	8931,48	29,63	75,85	6,30	25,46	8
CP 271	0,4493	19393,85	40,66	75,86	5,99	24,60	14
CP 272	0,3707	13727,66	29,43	75,49	6,80	28,10	10
CP 273	0,5128	19357,08	42,54	74,20	6,19	18,04	13
CP 274	0,4317	11968,27	37,65	76,50	6,57	28,74	10
CP 275	0,4972	12771,17	36,04	74,60	6,29	24,49	15
CP 276	0,4390	8430,20	24,54	73,08	6,81	26,60	5
CP 278	0,4660	13712,51	26,46	74,26	6,08	24,67	11
CP 279	0,5268	11829,52	30,52	71,85	7,10	28,60	12
CP 280	0,4445	8311,71	26,51	74,65	6,76	25,59	8
CP 281	0,3887	9891,65	28,42	78,23	5,95	27,40	7
CP 282	0,4341	10970,50	27,40	76,99	5,14	23,26	9
CP 284	0,4245	20549,53	37,89	74,71	7,14	28,26	8
CP 285	0,4123	29212,96	21,67	74,69	6,32	24,79	11
CP 287	0,5432	19473,05	41,12	73,64	6,20	25,80	9
CP 288	0,4062	12810,79	27,05	74,04	6,75	27,92	10
CP 289	0,5290	27443,67	30,13	79,32	4,48	24,05	10
CP 290	0,2798	9911,51	29,81	75,68	5,91	23,94	8
CP 291	0,4611	25922,64	26,23	75,19	6,73	27,43	10
CP 292	0,4845	8590,91	31,62	78,03	5,72	25,24	9
CP 293	0,4611	18564,50	39,57	75,65	6,36	14,56	8
CP 294	0,5319	21078,18	52,61	74,92	6,60	14,02	14
CP 295	0,5130	9734,35	32,42	77,13	5,38	24,78	13
CP 296	0,4455	4916,64	20,65	74,49	6,95	28,22	5
CP 297	0,3978	10830,99	29,15	74,62	7,26	26,98	10
CP 298	0,5722	14644,39	44,68	75,19	5,73	26,84	15
CP 299	0,4750	14234,98	42,61	74,06	6,46	25,44	13
CP 300	0,4307	15667,49	36,60	75,71	5,94	26,68	11
CP 301	0,4212	8381,60	32,63	76,06	6,30	26,94	7
CP 302	0,3920	13362,65	32,14	76,15	6,75	26,36	7
CP 303	0,4281	19364,63	33,44	75,97	6,59	27,43	12
CP 304	0,4809	23222,49	36,88	73,59	6,97	25,83	11
CP 305	0,4858	16882,27	46,10	75,02	5,92	23,49	16
CP 306	0,5105	6656,62	30,47	70,88	8,41	25,96	8
CP 307	0,5101	13627,13	35,27	78,11	5,50	23,84	8
CP 308	0,4244	5022,25	22,94	76,93	6,19	27,30	8
CP 309	0,5458	15075,48	50,15	75,33	6,44	24,06	18
CP 311	0,5028	13590,35	20,85	74,80	6,90	28,98	13
CP 312	0,4484	6845,08	25,81	74,74	6,87	27,84	9
CP 313	0,4342	12756,80	20,94	75,66	7,11	18,48	11

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 314	0,4910	12684,09	37,55	76,00	6,57	24,44	14
CP 315	0,4437	20187,68	36,20	76,46	6,32	27,64	9
CP 316	0,4071	12182,10	28,41	74,93	7,14	18,55	9
CP 319	0,5223	33587,30	48,45	75,38	6,47	23,39	14
CP 320	0,3803	36420,56	35,20	76,43	6,52	27,42	8
CP 321	0,5369	25915,49	44,90	75,41	6,26	24,25	15
CP 322	0,4379	12004,99	36,76	75,52	6,19	27,31	9
CP 323	0,4835	10622,32	29,99	70,11	8,47	26,56	6
CP 324	0,4584	10801,03	27,54	75,75	5,83	25,73	6
CP 326	0,5301	22983,33	49,34	72,46	6,47	25,12	14
CP 327	0,4926	31582,79	44,05	74,42	6,60	25,39	16
CP 328	0,4123	11114,23	31,95	77,40	6,03	26,51	8
CP 329	0,4740	8509,49	30,46	71,12	6,71	24,57	10
CP 332	0,4749	4649,85	23,14	77,63	5,62	26,31	11
CP 334	0,5883	17341,92	56,68	71,11	5,59	23,40	15
CP 336	0,4183	14765,23	36,05	74,96	5,93	27,63	8
CP 337	0,5358	12048,80	36,73	76,19	5,95	19,46	10
CP 338	0,5512	11065,23	41,47	74,93	6,50	25,34	9
CP 339	0,5169	18544,61	40,86	71,45	6,29	25,94	13
CP 340	0,4553	27088,55	37,28	74,00	6,60	24,94	14
CP 341	0,5204	13503,47	32,97	77,23	5,28	23,26	8
CP 343	0,5173	13061,56	36,15	77,36	6,43	28,52	10
CP 344	0,5052	18255,66	25,34	76,39	6,25	29,09	10
CP 345	0,4267	20267,02	38,32	73,12	6,79	24,25	9
CP 347	0,4688	6058,31	26,21	71,94	6,55	28,38	5
CP 348	0,4121	22647,09	36,07	73,19	7,07	23,41	7
CP 349	0,4419	13590,31	33,31	75,63	6,15	25,81	10
CP 350	0,4568	23585,95	35,71	73,46	6,62	26,04	12
CP 351	0,5382	10650,64	40,18	74,08	5,33	23,66	8
CP 352	0,4190	21003,95	30,47	74,00	6,75	25,36	11
CP 353	0,5092	22025,65	32,07	75,88	5,85	25,76	7
CP 354	0,4606	15693,24	26,09	77,36	5,70	28,01	8
CP 355	0,4937	12345,59	36,79	76,52	6,16	25,99	6
CP 356	0,4453	19502,17	43,01	73,33	7,33	25,41	12
CP 358	0,5082	20172,76	46,19	73,31	6,31	25,85	16
CP 359	0,5503	6530,27	30,02	72,13	7,10	27,21	13
CP 361	0,5407	30453,80	54,34	74,02	6,10	22,61	13
CP 362	0,5300	5854,01	28,70	76,09	6,40	24,51	12
CP 363	0,4536	23566,87	42,33	77,53	5,98	23,74	12
CP 364	0,3955	29570,30	24,00	74,40	6,73	27,87	10
CP 365	0,4551	15067,57	33,65	75,22	6,49	26,15	10
CP 366	0,4807	10990,31	38,88	74,92	6,47	27,50	14
CP 367	0,4500	22489,98	38,24	73,37	7,00	26,40	11

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{co} (MPa)	f _{co} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 368	0,4497	27732,51	39,19	74,02	6,37	24,10	10
CP 369	0,4030	22572,19	32,47	73,94	6,98	18,80	8
CP 370	0,4653	12912,03	33,92	75,08	6,32	24,53	10
CP 371	0,4779	19698,02	37,83	75,61	6,38	25,72	10
CP 372	0,4980	7375,60	31,42	72,58	6,78	24,76	10
CP 373	0,3987	21067,15	35,57	75,30	6,83	24,93	10
CP 374	0,5090	24728,91	40,18	75,23	5,93	27,12	18
CP 375	0,4235	14787,04	27,65	73,86	6,85	25,44	9
CP 378	0,4630	15094,07	24,07	75,25	6,61	26,75	14
CP 379	0,4480	9280,24	32,57	78,15	5,24	28,03	12
CP 381	0,3792	23666,02	34,36	73,33	7,08	26,45	11
CP 382	0,6255	18896,95	51,35	71,44	6,44	25,05	18
CP 383	0,4513	15487,97	27,78	74,84	5,88	24,46	8
CP 384	0,4686	6530,07	29,90	73,23	6,82	24,84	9
CP 386	0,5121	23680,11	34,29	73,62	6,53	25,26	12
CP 387	0,4541	13128,91	28,53	71,95	7,58	25,80	10
CP 388	0,4795	32346,50	49,24	74,93	5,40	22,27	14
CP 389	0,3662	11713,47	30,07	71,07	7,78	27,77	8
CP 391	0,4159	13325,94	33,48	76,56	6,28	27,17	8
CP 392	0,5178	22500,39	38,03	70,09	7,06	26,26	12
CP 393	0,4946	6098,15	29,59	76,27	5,91	24,02	9
CP 394	0,4871	12472,95	23,92	76,83	5,81	24,82	7
CP 395	0,4575	15836,71	23,92	75,37	6,58	24,70	7
CP 396	0,4452	12025,04	22,88	69,98	7,81	27,19	10
CP 397	0,3920	18642,45	26,01	75,65	6,81	26,05	8
CP 398	0,3734	10246,46	30,81	75,32	7,29	26,08	7
CP 399	0,4361	10631,95	28,31	74,42	6,51	26,08	8
CP 402	0,4145	9226,85	27,28	75,33	6,85	26,52	5
CP 403	0,4746	10651,60	30,34	75,70	6,25	25,91	10
CP 405	0,3768	8975,23	25,18	75,58	6,31	25,78	8
CP 406	0,3731	10147,71	25,22	74,03	7,22	27,82	10
CP 407	0,5036	11761,02	31,62	74,13	6,92	25,89	12
CP 408	0,4670	9807,99	27,69	76,75	6,33	27,67	12
CP 409	0,4974	4745,13	29,36	71,41	6,89	26,15	9
CP 410	0,6644	17005,40	50,51	66,55	7,01	22,75	28
CP 413	0,4647	21849,69	37,15	74,05	5,98	23,89	15
CP 414	0,4644	9946,56	33,36	72,35	7,07	14,13	12
CP 415	0,5013	5786,84	31,45	75,68	6,40	27,77	17
CP 416	0,4060	8177,24	26,59	76,64	7,01	27,33	8
CP 417	0,3866	12150,29	30,62	73,71	7,41	27,49	6
CP 418	0,5608	12984,34	40,59	73,81	3,83	27,18	14
CP 419	0,4272	13543,77	24,33	76,18	6,06	27,07	5
CP 420	0,4695	11999,92	31,63	75,02	6,81	28,07	16

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 422	0,4907	15204,30	35,30	74,22	6,60	25,61	7
CP 424	0,4013	12824,22	35,65	74,64	3,89	27,98	10
CP 425	0,4489	11753,94	38,30	73,62	7,29	26,56	8
CP 426	0,4077	7867,64	32,01	75,26	6,70	27,09	10
CP 427	0,5587	15418,55	47,05	73,07	6,12	26,65	18
CP 428	0,5655	14057,43	43,18	73,02	6,38	24,30	12
CP 430	0,4753	9322,33	32,31	77,71	5,96	26,80	13
CP 431	0,5189	7176,05	32,86	70,56	8,33	28,02	12
CP 432	0,5469	13523,42	44,35	74,02	6,98	26,43	18
CP 433	0,4692	18069,64	43,85	74,14	6,06	26,80	13
CP 435	0,4316	9095,93	31,79	78,51	6,06	24,56	13
CP 436	0,4487	15019,08	41,42	72,80	6,45	26,59	11
CP 437	0,5128	6068,90	33,46	76,14	5,74	24,49	9
CP 438	0,5241	14579,67	35,22	75,36	6,65	27,47	8
CP 439	0,3939	17270,31	30,96	77,78	6,27	27,40	9
CP 441	0,4264	19421,30	37,25	75,07	6,26	25,01	12
CP 443	0,4507	9078,61	29,33	73,73	6,43	26,09	7
CP 444	0,5743	20402,26	48,70	74,83	6,14	24,45	15
CP 445	0,4177	4214,21	24,69	75,08	6,46	25,58	6
CP 446	0,4116	6776,31	21,43	75,62	6,34	25,99	9
CP 447	0,4448	14727,07	39,89	74,23	5,90	24,03	13
CP 448	0,4399	19173,07	42,78	74,92	7,02	25,15	12
CP 449	0,5097	16912,66	37,43	76,42	6,00	24,90	10
CP 450	0,4668	21526,32	37,60	73,07	7,04	27,69	14
CP 451	0,4513	10853,13	33,06	73,25	6,54	25,13	5
CP 452	0,5340	18433,75	45,26	74,02	6,70	27,25	12
CP 453	0,4396	2213,78	25,63	71,07	7,55	25,38	8
CP 455	0,4840	12116,42	42,19	73,62	6,39	26,63	15
CP 457	0,5035	8956,72	35,11	77,41	5,63	24,13	9
CP 458	0,5764	13987,22	33,34	75,45	6,19	26,36	18
CP 459	0,4185	11614,17	31,76	74,48	6,05	27,13	10
CP 460	0,5606	4558,88	30,00	73,96	6,20	25,19	6
CP 461	0,4177	8748,08	26,15	78,64	5,85	26,90	11
CP 462	0,4355	10152,48	22,74	75,49	6,72	28,81	17
CP 463	0,4386	19987,53	21,22	76,23	6,71	27,77	8
CP 464	0,4197	11266,01	29,95	78,61	5,90	26,51	8
CP 466	0,4284	15628,26	30,51	76,10	6,51	27,30	11
CP 467	0,4367	11443,30	35,86	74,84	6,47	27,88	10
CP 468	0,4998	7823,50	31,32	75,85	6,25	24,28	9
CP 469	0,5085	16385,86	46,09	73,74	6,10	26,16	12
CP 470	0,5380	14096,21	32,98	75,29	3,06	27,25	19
CP 474	0,3553	11005,78	30,25	75,65	7,26	30,63	7
CP 476	0,4969	9162,38	32,41	75,42	5,59	13,86	6

C. P.	Densidade (g/cm ³)	E _{c0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	Média Luminosidade (L*)	Média Vermelho a Verde (a*)	Média Amarelo a Azul (b*)	nº lenhos
CP 477	0,5819	19888,62	46,50	73,36	6,21	27,14	18
CP 478	0,4444	15129,98	42,22	74,47	6,80	27,23	10
CP 479	0,4599	11044,80	30,64	74,39	6,83	25,26	9
CP 480	0,4710	17409,70	31,06	76,59	5,95	26,98	12
CP 481	0,4741	11616,04	25,38	76,12	6,53	28,01	12
CP 483	0,4819	15846,58	36,44	76,66	5,92	23,22	10
CP 484	0,4099	13145,83	37,90	74,39	7,17	28,36	14
CP 485	0,4104	12609,52	23,66	76,99	6,34	26,52	6
CP 487	0,4046	7714,57	23,52	74,52	6,72	27,45	8
CP 488	0,3485	4351,88	19,44	78,43	6,12	24,70	5
CP 489	0,4499	10223,07	30,44	74,52	7,04	25,09	11
CP 492	0,3894	12050,10	30,16	76,12	6,66	27,04	7
CP 494	0,4655	12542,85	34,00	75,91	6,26	26,55	12
CP 495	0,4408	9370,28	32,49	77,71	6,07	29,70	9
CP 496	0,3777	8796,14	23,78	76,91	6,45	27,78	11
CP 498	0,3979	10757,15	25,04	74,46	6,79	25,60	8
CP 499	0,7334	21547,76	58,51	68,67	7,33	24,02	24
CP 500	0,4214	11155,98	20,43	77,04	6,43	27,44	11