

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS JOSÉ MARINI

ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MADEIRAS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DE
PARÂMETROS FÍSICOS E ANATÔMICOS

São Carlos
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS JOSÉ MARINI

**ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MADEIRAS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DE
PARÂMETROS FÍSICOS E ANATÔMICOS**

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

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Coorientador: Prof. Dr. Francisco A. Rocco Lahr

São Carlos
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Lucas José Marini, realizada em 16/12/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Julio Cesar Molina (UNESP)

Profa. Dra. Cristiane Inácio de Campos (UNESP)

Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo (UNESP)

Profa. Dra. Juliana Cortez Barbosa (UNESP)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à **minha amada mãe Odila**, em memórias ao **meu querido pai José Antônio**, ao **meu irmão Rafael** e aos **professores André e 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 bastam palavras para expressar os mais sinceros agradecimentos.

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

Ao meu orientador, professor Dr. André L. Christoforo, e ao meu coorientador, professor Dr. Francisco A. Rocco Lahr, pela amizade e confiança depositada em mim e em nosso trabalho. Agradeço pela 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 e Joice.

Agradeço à professora Dr.^a Raquel S. Cavalheiro, pela amizade e por toda a ajuda nos caminhos da investigação científica que este estudo demandou.

A todos os amigos do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

À toda equipe do LaMEM: Prof. Dr. Francisco A. R. Lahr, Prof. Dr. Antônio A. Dias, Prof. Dr. Carlito Calil Jr., Bragatto, Jaime, Roberto e Sílvio.

Agradeço aos professores Dr. Eder T. G. Cavalheiro e Dr.^a Carla C. S. Cavalheiro por toda a ajuda e disponibilização do laboratório do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da USP.

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

Aos professores que compuseram a banca de qualificação e de defesa, sendo eles: André L. Christoforo, Francisco A. Rocco Lahr, Sérgio A. Mello da Silva, Victor A. de Araujo, Julio C. Molina, Cristiane I. de Campos e Juliana C. Barbosa

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

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta.

O que ela quer da gente é coragem.

O que Deus quer é ver a gente aprendendo a ser capaz de ficar alegre a mais, no meio da alegria, e inda mais alegre ainda no meio da tristeza!

A vida inventa!

A gente principia as coisas, no não saber por que, e desde aí perde o poder de continuação porque a vida é mutirão de todos, por todos remexida e temperada.

O mais importante e bonito do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram terminadas, mas que elas vão sempre mudando.

Afinam ou desafinam. Verdade maior. Viver é muito perigoso; e não é não. Nem sei explicar estas coisas. Um sentir é o do sentente, mas outro é do sentidor.”

**João Guimarães Rosa, in Grande Sertão:
Veredas, 1956**

RESUMO

MARINI, L.J. **Estimativa de propriedades mecânicas de madeiras de Eucalipto em função de parâmetros físicos e anatômicos**. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

As espécies exóticas introduzidas no Brasil têm sido de grande interesse para a indústria da construção civil pois, dentre suas vantagens, possuem crescimento rápido e propiciam a sustentabilidade das espécies nativas intensamente exploradas. Nas atividades de reflorestamento, verifica-se o uso do gênero *Eucalyptus* por possuir várias espécies empregadas para a geração de produtos e subprodutos. É importante ressaltar que o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira possibilita sua aplicação racional com maior segurança e funcionalidade em projetos estruturais, contudo os ensaios para determinação dessas propriedades demandam treinamentos técnicos e equipamentos específicos, encontrados apenas em centros de pesquisa desenvolvidos. Uma alternativa para compreender as propriedades da madeira é o uso de microscopia ótica, conseqüentemente, neste trabalho foi utilizado um microscópio Olympus EX51 para determinação dos elementos anatômicos da madeira, objetivando-se analisar as características anatômicas, suas correlações com as propriedades mecânicas e demonstrar a viabilidade da estimativa de propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus* em função de seus parâmetros anatômicos e da densidade aparente, por meio de modelos de regressão. Para a realização das análises foram utilizados 10 lotes de *Eucalyptus* de diferentes espécies. Os ensaios desenvolvidos se constituíram na determinação da densidade aparente, da resistência à compressão paralela às fibras, da tração paralela às fibras, da tração normal às fibras, do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, das retratibilidades, bem como de parâmetros anatômicos (fibras, vasos e raios) das amostras, de acordo com as normas brasileiras ABNT NBR 7190 (1997) e ABNT NBR 15066 (2004). Os modelos de regressão propostos foram excelentes, pois os valores de R^2 foram iguais a 94,15, 92,95, 90,55, 86,55, 77,77 e 67,95% para estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistência à tração normal às fibras, respectivamente.

Palavras-chave: *Eucalyptus*. Propriedades mecânicas. Modelos de regressão. Anatomia da madeira. Densidade aparente.

ABSTRACT

MARINI, L.J. **Estimation of mechanical properties in *Eucalyptus* woods towards physical and anatomical parameters**. 129p. Doctoral's Thesis (PhD in Civil Engineering) – Civil Engineering Department, Federal University of São Carlos, São Carlos, 2022.

Exotic species introduced in Brazil have been of great interest to the civil construction industry because, among their advantages, they have rapid growth and provide sustainability for intensively exploited native species. In reforestation activities, the use of the *Eucalyptus* genus is verified as it has several species used to generate products and by-products. It is important to emphasize that the knowledge of the mechanical properties of wood allows its rational application with greater safety and functionality in structural projects, however, the tests to determine these properties demand technical training and specific equipment, found only in developed research centers. An alternative to understand the properties of wood is the use of optical microscopy, consequently, in this study an Olympus EX51 microscope was used to determine the anatomical elements of wood, aiming to demonstrate the feasibility of estimating the mechanical properties of *Eucalyptus* wood as a function of its anatomical parameters and bulk density, through regression models. To carry out the analysis, 10 lots of *Eucalyptus* of different species were used, and the tests developed consisted of determining the bulk density, strength to compression parallel to the grain, strength to tensile parallel to the grain, strength to tensile normal to the grain, the modulus of elasticity in compression parallel to the grain, the modulus of elasticity in tensile parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, shrinkage, as well as of anatomical parameters (fibers, vessels and radii) of the samples, according to the Brazilian standards ABNT NBR 7190 (1997) and ABNT NBR 15066 (2004). The proposed regression models were excellent, as the R^2 values were equal to 94.15, 92.95, 90.55, 86.55, 77.77 and 67.95% for estimating the modulus of elasticity in compression parallel to the grain, strength to compression parallel to the grain, modulus of elasticity in tensile parallel to the grain, strength to tensile parallel to the grain, shear strength parallel to the grain and strength to tensile normal to the grain, respectively.

Keywords: *Eucalyptus*. Mechanical properties. Regression Models. Wood anatomy. Bulk density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Introdução à composição química da madeira.....	32
Figura 2 - Estrutura da celulose.....	33
Figura 3 - Seção de um tronco típico.....	34
Figura 4 - Esquema microscópico de madeira folhosa.....	36
Figura 5 - Planos de cortes no tronco de uma árvore.	37
Figura 6 - Visualização da madeira nas três seções.: (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal Tangencial e (c) Seção longitudinal Radial.....	38
Figura 7 - Histórico do consumo de madeira para uso industrial (valores em milhões de m ³).	39
Figura 8 - Cultivo de Eucalipto.	40
Figura 9 - Corpo de prova e sistema de orientação para determinação da propriedade de retração.	42
Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.....	43
Figura 11 – Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras.....	45
Figura 12 – Corpo de prova para tração normal às fibras.	46
Figura 13 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.....	47
Figura 14 – Extração dos cavacos: (a) extração dos cavacos de cada espécie e (b) acondicionamento e identificação dos cavacos.	67
Figura 15 – Processo de maceração: (a) preparo da solução macerante e inserção dos cavacos nos frascos devidamente identificados e (b) frascos colocados na estufa a 50°C por 24 horas.	67
Figura 16 – Amostras após 24 horas na estufa.....	68
Figura 17 – Montagem das lâminas com material macerado: (a) lavagem das amostras em água destilada e (b) coloração das amostras.	68
Figura 18 – Montagem das lâminas de material macerado: (a) pequena quantidade de solução adicionada na lâmina e (b) lâmina coberta com a lamínula.	69
Figura 19 - Obtenção das imagens das fibras isoladas a partir das lâminas de material macerado	70
Figura 20 – Corpos de prova para preparação de lâminas histológicas 71	71
Figura 21 – Preparo das amostras: (a) fervura das amostras em água e glicerina e (b) seccionamento em micrótomo.	72
Figura 22 – Seccionamento das amostras: (a) corte das amostras nas três direções e (b) armazenamento do material para posterior montagem das lâminas.	73
Figura 23 – Coloração das amostras com safranina 74	74
Figura 24 – Lâminas histológicas prontas para ensaio microscópico: (a) cortes da seção transversal; (b) cortes da seção tangencial e (c) cortes da seção radial.....	74
Figura 25 – Plano transversal contendo elementos de vaso de <i>E. alba</i> (aumento de 10x).....	81
Figura 26 – Plano transversal com elementos de vasos de <i>E. camaldulensis</i> (aumento de 10x).	81
Figura 27 – Plano transversal com elementos de vasos de <i>E. cloeziana</i> (aumento de 10x)....	82
Figura 28 – Elemento isolado de vaso de <i>E. paniculata</i> (aumento de 20x).....	82

Figura 29 – Elementos de raios de <i>E. grandis</i> (aumento de 10x).....	83
Figura 30 – Elementos de raios de <i>E. urophylla</i> (aumento de 10x).....	83
Figura 31 – Elementos de raios de <i>E. tereticornis</i> com raros elementos bisseriados (aumento de 10x).....	84
Figura 32 – Elementos de raios de <i>E. saligna</i> com elementos unisseriados (aumento de 10x).	84
Figura 33 – Elementos de fibras de <i>E. cloeziana</i> (aumento de 5x).....	85
Figura 34 – Elementos de fibras de <i>E. tereticornis</i> (aumento de 5x).	85
Figura 35 – Elementos de fibras de <i>E. propínqua</i> (aumento de 5x).	86
Figura 36 – Elementos de fibras de <i>E. saligna</i> (aumento de 5x).	86
Figura 37 – Elementos de fibras de <i>E. paniculata</i> (aumento de 20x).....	87
Figura 38 – Elementos de fibras de <i>E. camaldulensis</i> (aumento de 20x).....	87
Figura 39 – Elementos de fibras de <i>E. urophylla</i> (aumento de 20x).	88
Figura 40 – Elementos de fibras de <i>E. microcorys</i> (aumento de 20x).....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média de madeiras de coníferas (gimnospermas) e folhosas (angiospermas).	32
Tabela 2 - Valores médios das principais propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucalipto comerciais.	48
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de <i>Eucalyptus grandis</i>	49
Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus alba</i>	49
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	50
Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	51
Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	51
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus tereticornis</i>	52
Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i>	52
Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus paniculata</i>	53
Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus microcorys</i>	53
Tabela 12 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de <i>Eucalyptus propínqua</i>	54
Tabela 13 - 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.....	62
Tabela 14 - 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 canadense</i>	63
Tabela 15 - Números de determinações experimentais relacionadas às propriedades anatômicas das madeiras de Eucalipto.	75
Tabela 16 - Números de determinações experimentais relacionadas às propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Eucalipto.....	76
Tabela 17 – Síntese das características anatômicas das dez espécies.....	80
Tabela 18 - Síntese das propriedades físicas e mecânicas – Parte 1.....	89
Tabela 19 - Síntese das propriedades físicas e mecânicas – Parte 2.....	90
Tabela 20 - Valores característicos de resistência ($f_{w,k}$ - MPa).	92
Tabela 21 - Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas.	93
Tabela 22 - Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas das madeiras.....	95
Tabela 23 - Resultados obtidos das correlações entre a densidade aparente e as demais propriedades das madeiras.....	97
Tabela 24 - Resultados dos modelos de regressão linear dependente da densidade aparente.	98
Tabela 25 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos.	100
Tabela 26 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos raios.	101
Tabela 27 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras.	102
Tabela 28 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras.	103
Tabela 29 - Resultados dos modelos de regressão dependentes da densidade aparente e da altura dos raios.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	–	<i>Analysis of Variance</i>
°C	–	Grau Celsius
cm	–	Centímetro
cm ³	–	Centímetro cúbico
CV	–	Coefficiente de Variação
DECiv	–	Departamento de Engenharia Civil
EESC	–	Escola de Engenharia de São Carlos
EMBRAPA	–	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
g	–	Grama
GP	–	Grau de Polimerização
GPa	–	Gigapascal
h	–	Hora
IAWA	–	<i>International Association Wood Anatomists</i>
IBA	–	Indústria Brasileira de Árvores
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
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	–	<i>Medium Density Fiberboard</i>
mm	–	Milímetro
mm ²	–	Milímetro quadrado
MEV	–	Microscopia eletrônica de varredura
MLC	–	Madeira Lamelada Colada
MOE	–	Módulo de Elasticidade
MOR	–	Módulo de Ruptura
MPa	–	Mega Pascal
N	–	Newton
nm	–	Nanômetro
NBR	–	Norma Brasileira Registrada
SET	–	Departamento de Engenharia de Estruturas
t	–	Tempo
UFSCar	–	Universidade Federal de São Carlos
USP	–	Universidade de São Paulo
US\$	–	Dólar americano
v	–	volume
vs.	–	<i>Versus</i>
x _m	–	Valor médio

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção do corpo de prova
C	Carbono
Ca	Cálcio
D	Diâmetro do lúmen
Df	Diâmetro das fibras
Dlu	Diâmetro do lúmen
Dv	Diâmetro dos vasos
ε	Erro residual
$\varepsilon_{10\%}$	Deformação específica correspondente à tensão de 10%
$\varepsilon_{50\%}$	Deformação específica correspondente à tensão de 50%
ε_r	Retração da madeira
E	Espessura da parede celular
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 MTG
E_{pf}	Espessura da parede das fibras
$E_{t0,m}$	Módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras
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
$f_{e90,k}$	Resistência característica ao embutimento normal às fibras
f_{H90}	Dureza normal às fibras
f_M	Módulo de ruptura na flexão elástica
F_{rv}	Frequência dos vasos
f_{i0}	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{i0,k}$	Resistência característica à tração paralela às fibras
f_{i90}	Resistência à tração normal às fibras
$f_{iM,k}$	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
Hr	Altura dos raios
K	Potássio
L	Largura das fibras
$L_{i,sat}$	Dimensão linear para umidade superior ao ponto de saturação
$L_{i,seca}$	Dimensão linear para umidade = 0%
ln	Logaritmo neperiano

Lr	Comprimento das fibras
Mg	Magnésio
m ₁₂	Massa da madeira ao teor de umidade de 12%
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
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
$\sigma_{50\%}$	Tensão de compressão correspondente a 50% da resistência
R	Coeficiente de correlação
R ²	Coeficiente de determinação
R ² _{Aj}	Coeficiente de determinação ajustado
U	Teor de umidade da madeira
μm	Micrômetro
%	Porcentagem
V ₁₂	Volume da madeira ao teor de umidade de 12%

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1. Objetivos.....	29
1.2. Justificativas.....	29
2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS.....	31
2.1. Madeira.....	31
2.1.1. Composição química da madeira.....	31
2.1.2. Estrutura macroscópica da madeira.....	33
2.1.3. Estrutura microscópica da madeira.....	35
2.1.3.1 Planos Anatômicos de Corte.....	36
2.1.4. Madeira de florestas plantadas.....	38
2.1.5. A madeira do gênero <i>Eucalyptus</i>	39
2.1.6. A madeira na construção civil.....	40
2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira.....	41
2.2.1. Densidade aparente.....	41
2.2.2. Retratibilidades.....	41
2.2.3. Compressão paralela às fibras.....	42
2.2.4. Tração paralela e normal às fibras.....	44
2.2.5. Cisalhamento.....	46
2.3. Características das espécies pesquisadas.....	48
2.3.1. <i>Eucalyptus grandis</i>	48
2.3.2. <i>Eucalyptus alba</i>	49
2.3.3. <i>Eucalyptus saligna</i>	50
2.3.4. <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	50
2.3.5. <i>Eucalyptus cloeziana</i>	51
2.3.6. <i>Eucalyptus tereticornis</i>	51
2.3.7. <i>Eucalyptus urophylla</i>	52
2.3.8. <i>Eucalyptus paniculata</i>	53
2.3.9. <i>Eucalyptus microcorys</i>	53
2.3.10. <i>Eucalyptus propinqua</i>	54
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	55
3.1. Propriedades da madeira e a anatomia.....	55

3.2.	Estimativas de propriedades da madeira	59
3.3.	Síntese da revisão bibliográfica.....	63
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1.	Caracterização física e mecânica.....	65
4.2.	Caracterização dos parâmetros anatômicos.....	66
4.2.1.	Preparação e montagem das lâminas com material macerado para os ensaios anatômicos	66
4.2.2.	Preparação e montagem das lâminas histológicas	70
4.3.	Análise estatística	75
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1.	Caracterização anatômica.....	79
5.2.	Síntese das propriedades físicas e mecânicas.....	89
5.3.	Correlações entre as propriedades físicas e mecânicas e a anatomia	92
5.4.	Correlações entre a densidade aparente e as propriedades mecânicas	97
5.5.	Modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos na estimativa de propriedades da madeira de Eucalipto	99
5.6.	Modelos de regressão dependentes das propriedades dos raios na estimativa de propriedades da madeira de Eucalipto	100
5.7.	Modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras na estimativa de propriedades da madeira Eucalipto	102
5.8.	Modelos de regressão para estimativa de propriedades mecânicas da madeira de Eucalipto	104
6.	CONCLUSÕES	107
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural e renovável que 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; KUZMAN *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2016; DE ARAUJO, 2021; PERRIN *et al.*, 2019; DERIKVAND *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2022). Em tempos de drásticas alterações no clima do planeta, é dever do setor produtivo procurar matérias-primas certificadas que valorizem as florestas e, conseqüentemente, contribuam para a redução de gases do efeito estufa (HAMÚ, 2009; GIUNTOLI *et al.*, 2022; AHMED *et al.*, 2021). Segundo Altoé e Alvarez (2011), os movimentos ambientalistas e a conscientização popular sobre o fim dos recursos naturais pressionam para que as atividades construtivas adotem soluções menos impactantes, que garantam o manejo e o uso das edificações com base nos princípios da sustentabilidade.

O uso da madeira na construção civil é caracterizado por suas múltiplas finalidades, sendo empregada como elementos estruturais (vigas, pilares, treliças) (ANDRADE JR *et al.*, 2014; CALIL JR *et al.*, 2003; SCALIANTE, 2014, NAVARATNAM *et al.*, 2020; MARINI *et al.*, 2021), em usos temporários (cimbramentos e fôrmas) e componentes da edificação (guarnições, portas, pisos, forros, divisórias, entre outros) (KUZMAN *et al.*, 2018; DARZI *et al.*, 2020; JONES *et al.*, 2020; PAIVA *et al.*, 2013). A grande diversidade de aplicações da madeira no setor construtivo é devida a alguns fatores, tais como sua facilidade de obtenção, a sustentabilidade (madeiras de procedência legal), alta relação entre valores médios de resistência e densidade quando comparada ao aço e concreto, baixo consumo de energia para processamento, facilidade de processamento manual e mecânico e boas características de isolamento térmico (LIMA *et al.*, 2020; PFEIL, 2004).

Para suprir a demanda crescente por madeira serrada, foi introduzido no Brasil o gênero *Eucalyptus*, nativo da Austrália e que conta com mais de seiscentas espécies (EMBRAPA, 2019; FRIGOTTO *et al.*, 2020). A maioria de suas espécies conhecidas apresentam árvores com 30 a 50 metros de altura em florestas fechadas e 10 a 25 metros de altura em áreas de florestas abertas (MORA; GARCIA, 2000). Com isso, a madeira de Eucalipto vem se tornando uma matéria-prima essencial para diversas aplicações (LIANG *et al.*, 2022; LEME *et al.*, 2021; LIAO *et al.*, 2017; PAGEL *et al.*, 2020). Em 2020, o consumo de madeira para fins industriais foi de cerca de 217 milhões de metros cúbicos no Brasil, dos quais mais de 74% foram formados

por variedades de Eucalipto (IBÁ, 2021). A madeira de Eucalipto apresenta inúmeras vantagens conhecidas, como a cultura de manejo consolidada, adaptação ao clima, crescimento rápido e grande disponibilidade de plantios (PAGEL *et al.*, 2020; PIRALHO *et al.*, 2014; ELLI *et al.*, 2019).

Para a utilização racional da madeira como elemento estrutural, é necessário conhecer suas propriedades físicas e mecânicas. Os métodos de ensaios para a caracterização da madeira são realizados de acordo com a Norma Brasileira Registrada (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ABNT NBR 7190:2022 “Projeto de Estruturas de Madeira”. Dentre as propriedades mecânicas da madeira destaca-se 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 referida norma (COUTO *et al.*, 2020; FERRO *et al.*, 2015).

Como a obtenção das propriedades mecânicas da madeira necessita de equipamentos de grande porte, geralmente encontrados apenas em grandes centros de estudos, a ABNT NBR 7190-3:2022 estabelece relações entre propriedades de resistência com base no conhecimento da resistência à compressão paralela às fibras (FERRO *et al.*, 2015; SOARES *et al.*, 2021). Essas relações instigam estudos de correlação entre propriedades. Pesquisas considerando a densidade como estimador de propriedades de resistência e rigidez vem sendo desenvolvidas e os resultados encontrados na literatura contemporânea são satisfatórios (AQUINO *et al.*, 2017; CHEN; GUO, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2016; DIAS; LAHR, 2004; LAHR *et al.*, 2022, ALMEIDA *et al.*, 2016; MISSANJO *et al.*, 2016; HODOUSEK *et al.*, 2017).

Atualmente, o avanço da tecnologia e a inserção de equipamentos de microscopia em diversos laboratórios vêm contribuindo para a intensificação da caracterização da estrutura básica dos materiais. No Brasil, existem diversos centros de pesquisa dedicados a materiais, mas são bastante raros os institutos voltados para biorrecursos, especialmente sobre madeira. No entanto, a literatura inclui inúmeros estudos que procuram caracterizar a anatomia microscópica da madeira (PIRALHO *et al.*, 2014; BUENO *et al.*, 2020; ZANUNCIO *et al.*, 2018; MOTTA *et al.*, 2014; ABRUZZI *et al.*, 2013; REDMAN *et al.*, 2016; FERNÁNDEZ *et al.*, 2019; CARRILLO *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2017; TOMAZELLO FILHO, 1985; POUBEL *et al.*, 2011).

Acerca dos parâmetros anatômicos das madeiras de Eucalipto como estimadores de suas propriedades mecânicas, nenhuma pesquisa científica foi encontrada até o momento. Essa falta de informações técnicas sobre as espécies de Eucalipto restringe a utilização desse múltiplo biorrecurso como peça fabricada para construção.

Cabe destacar que a procura dos trabalhos componentes da revisão da literatura foi

realizada em base de dados como *Web of Science*, Portal Capes Periódicos, *Scopus*, *Engineering Village*, *Google Scholar* e em várias revistas nacionais e internacionais associadas à madeira, produtos derivados e estruturas de madeiras.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar a viabilidade de utilizar modelos de regressão de significativa precisão, balizados pelo valor do coeficiente de determinação R^2 , na estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus* utilizando de informações da leitura microscópica das estruturas anatômicas da madeira em conjunto com o conhecimento da densidade aparente.

Os objetivos específicos são:

- avaliar a interdependência entre as propriedades anatômicas (vasos, raios e fibras);
- avaliar a interdependência entre as propriedades anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus*;
- avaliar o efeito combinado entre as propriedades dos vasos e as propriedades físicas e mecânicas da madeira;
- avaliar o efeito combinado entre as propriedades dos raios e as propriedades físicas e mecânicas da madeira; e
- avaliar o efeito combinado entre as propriedades das fibras e as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

1.2. Justificativas

Diante do momento em que o mundo busca por mais opções construtivas, o uso da madeira como um biorrecurso renovável para a construção, sobretudo das espécies oriundas de florestas plantadas, como o eucalipto, representa uma saída urgente para suprir a demanda de insumos construtivos. Com o intuito de intensificar o uso das diferentes variedades dessa espécie florestal, esse estudo agrega conhecimentos e novos meios de estimativa de propriedades mecânicas mediante modelos de regressão e análises anatômicas, visto que se tratam de opções de maior acesso aos laboratórios em todo o país, diante dos altos custos das máquinas de ensaio universal de qual o preço varia de US\$58.000,00 a mais de US\$100.000,00. Diante da popularidade da madeira de eucalipto no setor brasileiro da construção em madeira conforme recentemente identificado por De Araujo *et al.* (2021), os resultados desse trabalho podem ser valiosos para potencializar ainda mais a exploração do uso das diferentes espécies

de Eucaliptos nas diversas aplicações construtivas, sobretudo, a partir de práticas mais tecnologicamente acessíveis e economicamente viáveis aos laboratórios ainda em condições de desenvolvimento.

2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Esta seção apresenta os principais conceitos fundamentais para o entendimento do tema desta pesquisa, sendo apresentado no primeiro subitem a madeira e suas principais características (composição, estrutura macroscópica, microscópica, madeira de florestas plantadas, madeira do gênero Eucalipto e seu uso na construção civil). Em seguida são apresentados os procedimentos para obtenção de algumas de suas propriedades, tais como: densidade aparente, retratibilidades, resistência na compressão paralela às fibras, resistência na tração normal e paralela às fibras, resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade. Por fim, no subitem 3 são apresentadas as principais características das dez espécies utilizadas neste estudo.

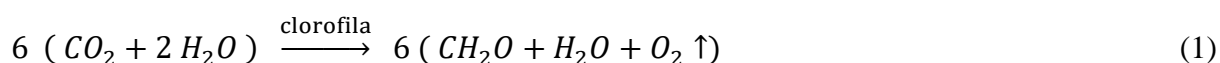
2.1. Madeira

A madeira é um material heterogêneo de origem biológica que possui grande complexidade. É constituído 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; KOLLMANN e COTÊ, 1968).

2.1.1. 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 do 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 folhosas, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição média de madeiras de coníferas (gimnospermas) e folhosas (angiospermas).

Constituinte	Coníferas	Folhosas
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 1 apresenta uma introdução à composição química da madeira.

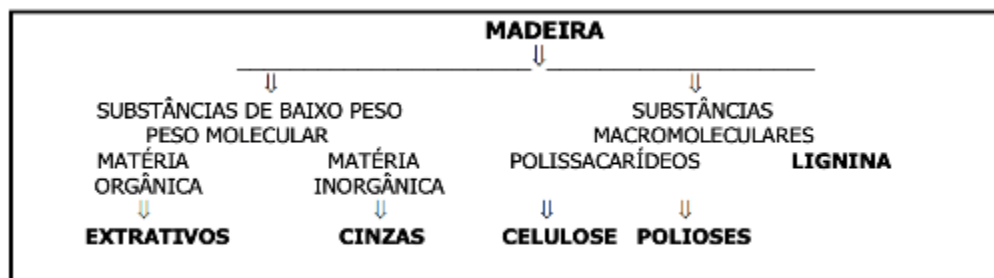


Figura 1 - Introdução à composição química da madeira.

Fonte: Klock e Andrade (2013).

Como observado na Tabela 1, 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 2 está mostrado o esquema da unidade básica de celulose.

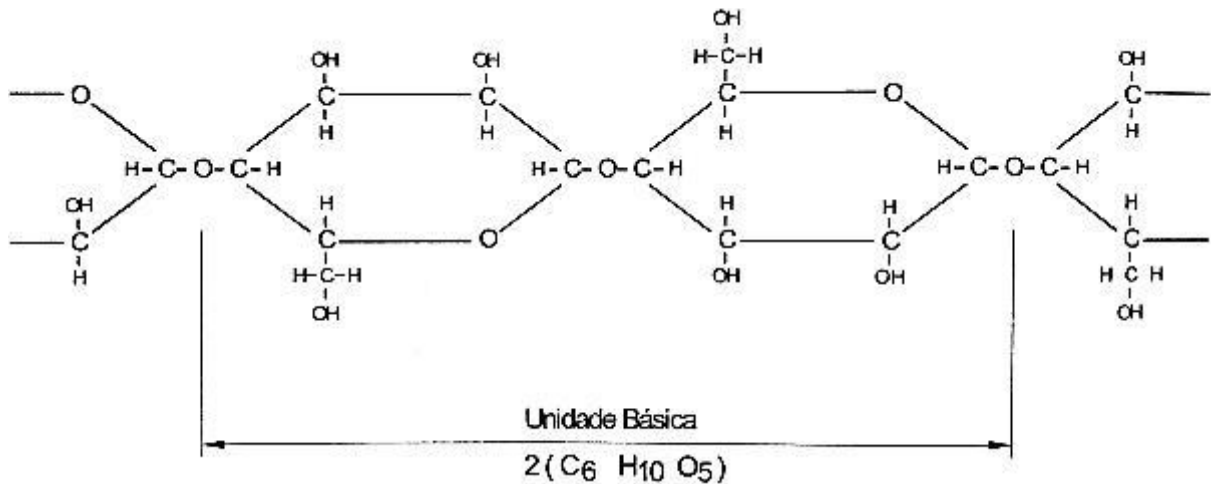


Figura 2 - Estrutura da celulose.

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 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 muitos 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, fluorescência, etc. (LIMA *et al.*, 2007).

2.1.2. Estrutura macroscópica da madeira

A estrutura macroscópica da madeira é complexa devido a sua formação por diferentes tipos de células. Considera-se para análises como estrutura macroscópica da madeira aquela que é visível a olho nu ou com o auxílio de uma lente com no máximo 10 vezes de aumento (BOTOSSO, 2009). A Figura 3 apresenta a seção de um tronco típico.

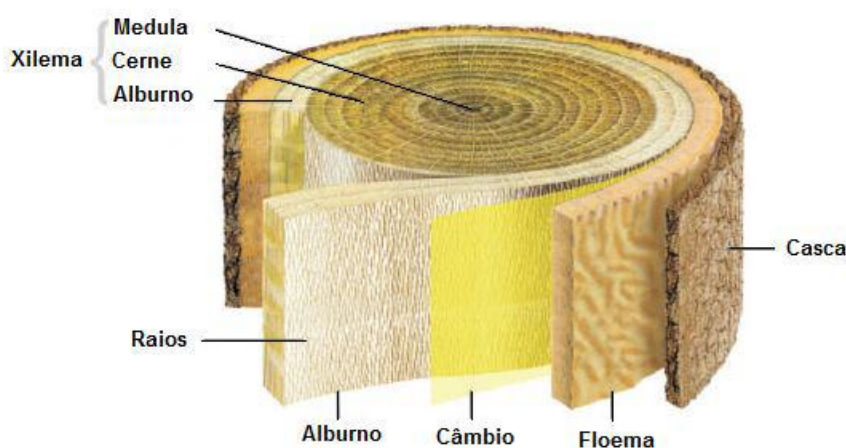


Figura 3 - Seção de um tronco típico.

Fonte: Adaptado de Gonzaga (2006).

Segundo Burger e Richter (1991), as partes que compõem a estrutura de um tronco são:

- a) **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.
- b) **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. 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.

2.1.3. Estrutura microscópica da madeira

A anatomia da madeira descreve o arranjo dos elementos celulares do lenho das árvores. A variação das dimensões dos elementos anatômicos interfere na qualidade da madeira; a dimensão, distribuição e arranjo estrutural das células conferem propriedades de resistência mecânica, trabalhabilidade, isolamento térmico e acústico (ROCHA; FLORSHEIM; COUTO, 2004).

Segundo Panshin e Zeeuw (1980), a natureza física da madeira sumariza a quantidade, o arranjo e a orientação da parede celular dos tecidos e sua composição química. A densidade da madeira está relacionada com as dimensões, espessura da parede celular, relação do número, dimensão e espessura da parede das células (CARLQUIST, 1991).

A madeira das angiospermas, como a das espécies de eucaliptos, é caracterizada por uma estrutura anatômica heterogênea, constituída por diferentes tipos de células e de tecidos: vasos (poros) de condução, parênquima lenhoso e fibras (PEREIRA, 2015; DREW *et al.*, 2010). As características anatômicas da madeira variam entre gêneros, espécies do gênero, árvores de mesma espécie, nos sentidos longitudinal e radial do tronco, entre outras (SILVA *et al.*, 2004).

As fibras são os elementos mais resistentes da madeira e possuem função de suporte mecânico, formando um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente. Elas apresentam paredes mais espessas e menor diâmetro interior do que as traqueídes das coníferas (CAVALHEIRO, 2018). As partes ocas das fibras apresentam-se como um vazio interior denominado lúmen.

As células do parênquima lenhoso são mais numerosas, apresentam raios lenhosos mais desenvolvidos do que os das coníferas. Os raios são formados por grupos de células dirigidos do centro do tronco para a periferia, sua função é de transporte e condução da seiva na direção transversal ao eixo da árvore (COSTA, 2001). Os vasos, também denominados poros, têm a função de transportar a seiva bruta e apresentam dimensões maiores, com paredes delgadas, visíveis em corte transversal. A Figura 4 representa o esquema microscópico de madeira folhosa.

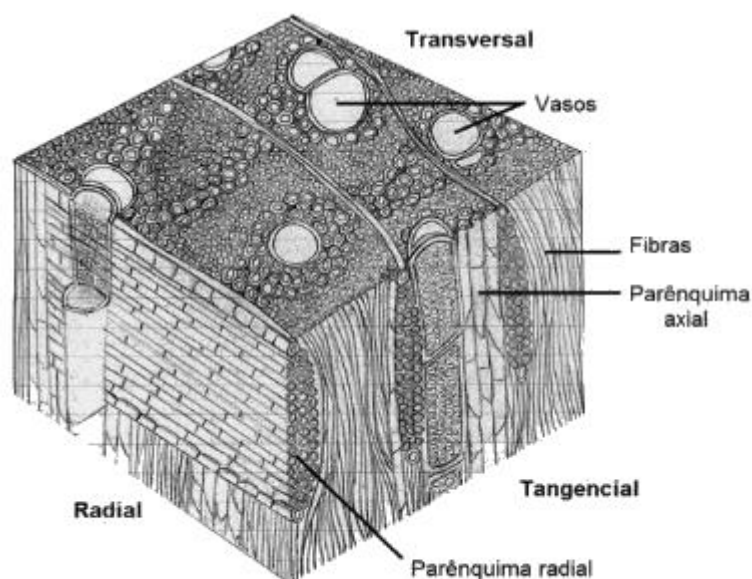


Figura 4 - Esquema microscópico de madeira folhosa.

Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

A anatomia do lenho das árvores de eucalipto é constituída por células e tecidos com variação das dimensões, distribuição e arranjo estrutural e relaciona-se com as suas propriedades, tais como resistência, trabalhabilidade e isolamento térmico e acústico (JESUS; VITAL, 1986; ROCHA *et al.*, 2004; BRYANT; TRUEMAN, 2015; PIRRALHO *et al.*, 2014).

2.1.3.1 Planos Anatômicos de Corte

A madeira é um material anisotrópico, portanto, é preciso definir os tipos de direções de cortes para o estudo da estrutura macroscópica da madeira. As três principais direções são perpendiculares entre si e coincidem com o comprimento da árvore (axial), em direção ao centro da árvore (radial) e tangente aos seus anéis de crescimento (tangencial) (BOTELHO, 2006), como mostrado na Figura 5.

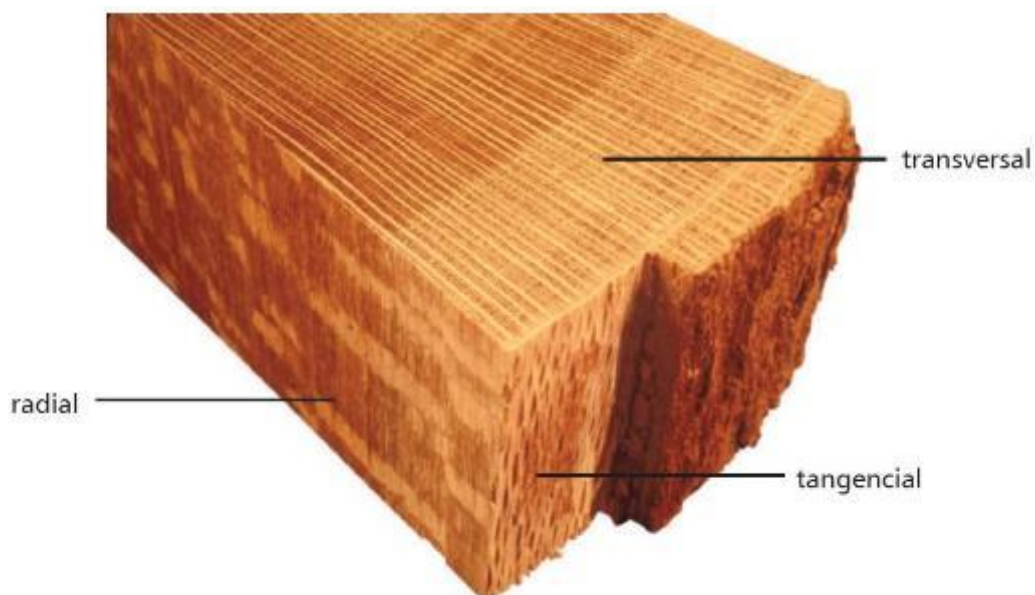


Figura 5 - Planos de cortes no tronco de uma árvore.

Fonte: Coradin (2002).

O aspecto da madeira varia de acordo com a face de corte ou de observação, visto que esse material é um organismo heterogêneo, constituído por células dispostas e organizadas em diferentes orientações (BURGUER; RICHTER, 1991). O Plano Transversal, perpendicular ao eixo do caule, evidencia os anéis de crescimento, as fibras, os vasos e parênquima axial da madeira (Figura 6a). No Plano Longitudinal Tangencial, que tangencia os anéis de crescimento, observam-se a altura dos raios, as fibras e o parênquima axial, mostrando o comprimento longitudinal de suas séries de células (Figura 6b). Já no Plano Longitudinal Radial, paralelo ao eixo do caule, os vasos e as fibras são cortados ao longo do seu eixo, e os raios seccionados mostram sua altura e comprimento (Figura 6c).

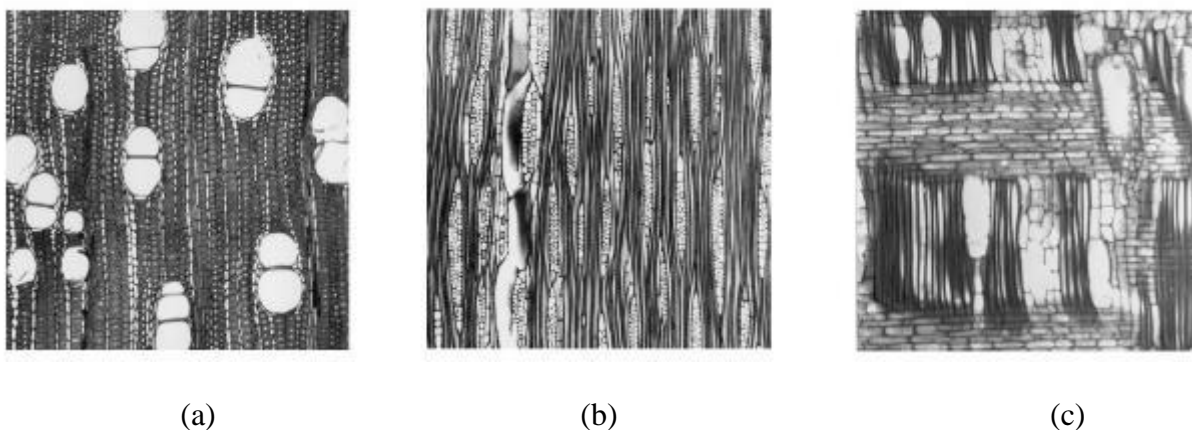


Figura 6 - Visualização da madeira nas três seções.: (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal Tangencial e (c) Seção longitudinal Radial.

Fonte: Coradin (2002).

2.1.4. Madeira de florestas plantadas

Como a crescente demanda de produtos derivados da madeira eleva o consumo de madeira de florestas nativas, a implantação de florestas plantadas constitui uma alternativa viável para a redução da pressão exercida sobre as florestas nativas (PAIVA *et al.*, 2013). Foram introduzidos gêneros exóticos no Brasil, 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 de 2020 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), do consumo de madeira para uso industrial no Brasil, estimado em aproximadamente 216,6 milhões de metros cúbicos, mais de 74% foram de *Eucalyptus* (Figura 7).

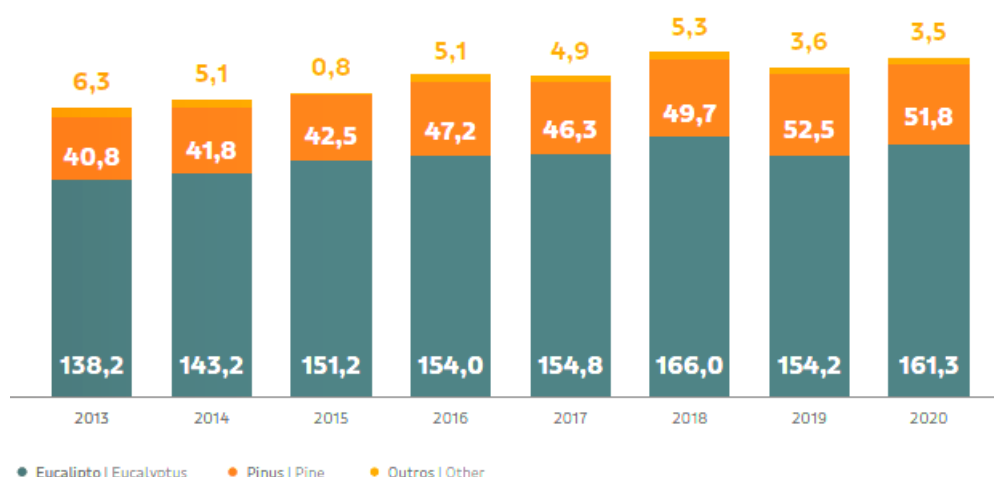


Figura 7 - Histórico do consumo de madeira para uso industrial (valores em milhões de m³).

Fonte: IBÁ (2021).

2.1.5. A madeira do gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* tem a sua origem na Austrália e possui mais de 600 espécies adaptadas às diversas condições de clima e solo (DELUCIS *et al.*, 2016). A maioria das espécies conhecidas são árvores típicas de florestas altas, com 30 a 50 metros de altura e de florestas abertas, com árvores de 10 a 25 metros de altura (MORA; GARCIA, 2000). As espécies de eucaliptos mais utilizadas no mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis* e *E. saligna* (ALZATE *et al.*, 2005). A madeira de Eucalipto vem se consolidando como uma importante matéria-prima para diferentes aplicações industriais (PLASTER *et al.*, 2012; SEVERO *et al.*, 2013).

Segundo Rezende *et al.* (2013), 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. A Figura 8 exemplifica um plantio de eucalipto.



Figura 8 - Cultivo de Eucalipto.

Fonte: Chile Bio (2014).

2.1.6. A madeira na construção civil

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados nas construções e oferece muitas peculiaridades. Destaca-se como um dos poucos materiais sustentáveis (madeiras de procedência legal) e apresenta baixo consumo de energia para processamento (muito menor que o aço, alumínio e concreto). Outras vantagens do material são a alta relação entre valores médios de resistência e densidade quando comparada ao aço e concreto, facilidade de processamento manual e mecânico e boas características de isolamento térmico (LIMA *et al.*, 2020; PFEIL, 2004). O emprego da madeira na construção civil no Brasil é caracterizado por suas múltiplas finalidades, sendo amplamente empregada como elementos estruturais (vigas, pilares, treliças) (ANDRADE JR *et al.*, 2014; CALIL JR *et al.*, 2003; SCALIANTE, 2014, NAVARATNAM *et al.*, 2020; MARINI *et al.*, 2021), em usos temporários (cimbramentos e fôrmas) e componentes da edificação (guarnições, portas, pisos, forros, divisórias, entre outros) (DE ARAUJO *et al.*, 2017; KUZMAN *et al.*, 2018; DARZI *et al.*, 2020; JONES *et al.*, 2020; PAIVA *et al.*, 2013).

O gênero *Eucalyptus* se encontra em expansão no setor da construção civil, especialmente a madeira de *E. grandis*, devido à grande disponibilidade. As demais espécies, no entanto, são praticamente desconhecidas pela indústria da construção civil em função do desconhecimento de suas propriedades como material de construção.

2.2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

As propriedades da madeira compreendem as características intrínsecas da espécie, tais como: caracteres gerais (cor, textura, grã, etc.), teor de umidade, densidade, estabilidade dimensional, propriedades térmicas, mecânicas, realógicas e acústicas. As propriedades mecânicas da madeira definem o comportamento do material quando submetido às solicitações mecânicas. São determinadas, geralmente, pela resistência do material e rigidez às diferentes solicitações. 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 ABNT NBR 7190-3 (2022) fornece os métodos de ensaio para a obtenção das propriedades físicas e mecânicas da madeira.

2.2.1. Densidade aparente

A densidade aparente, ρ_{ap} , é a massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova de madeira com teor de umidade de 12%, calculada de acordo com a Equação 2:

$$\rho_{ap,12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (2)$$

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).

O procedimento é realizado em corpos de prova prismáticos, com seção transversal nominal de 2cm por 3cm, e comprimento ao longo das fibras de 5cm.

2.2.2. Retratibilidades

A deformação específica de retração, ε_r , é determinada para cada uma das direções preferenciais, em função das respectivas dimensões da madeira saturada (verde) e seca, de acordo com a Equação 3.

$$\varepsilon_r = \left(\frac{L_{i,sat} - L_{i,seca}}{L_{i,sat}} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

$L_{i, \text{sat}}$ é a dimensão linear, para umidade igual ou superior ao ponto de saturação;

$L_{i, \text{seca}}$ é a dimensão linear, para umidade = 0%;

O procedimento é realizado em corpos de prova fabricados com o lado maior da seção transversal paralelo à direção radial, conforme Figura 9.

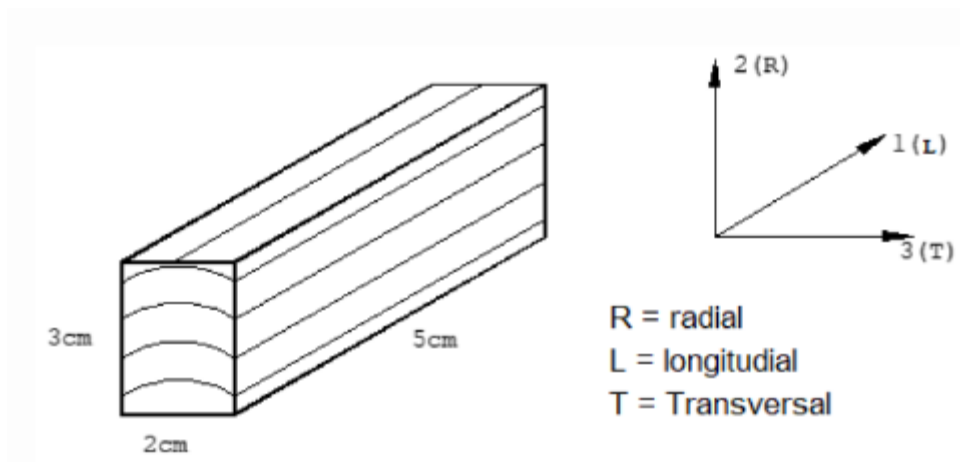


Figura 9 - Corpo de prova e sistema de orientação para determinação da propriedade de retração.

Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

2.2.3. Compressão paralela às fibras

A resistência da madeira à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é fornecida pela relação entre a máxima força de compressão que pode atuar em um corpo de prova com seção transversal de 5cm de lado e 15cm de comprimento (Figura 10), calculado conforme a Equação 4.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (4)$$

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 milímetros quadrados (mm^2);

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

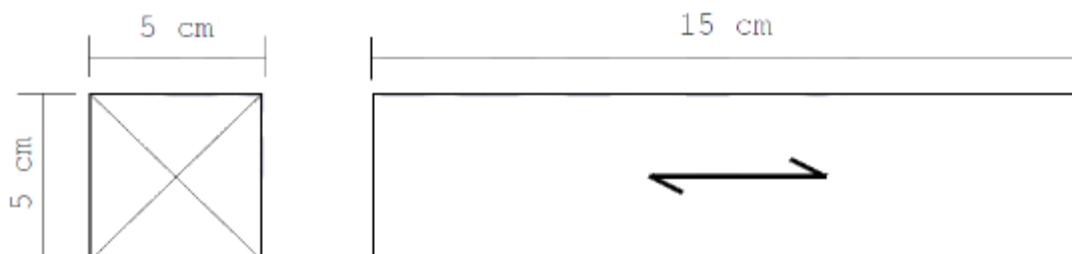


Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras.

Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

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} é 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 5:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (5)$$

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 devem ocorrer com aplicação de carregamento monotônico pela máquina de ensaio com taxa crescente de 10 MPa/min. Utiliza-se transdutores de deslocamento e célula de carga com capacidade de 250kN, acoplados a um sistema de aquisição de dados para automação dos ensaios. Este sistema é configurado para capturar as informações de força e deslocamento a cada 0,5 segundos. Os transdutores de deslocamento devem ser devidamente calibrados antes dos ensaios. Os corpos de prova são carregados axialmente até atingirem a ruptura.

2.2.4. Tração paralela e normal às fibras

A resistência da madeira à tração paralela às fibras (f_{t0}) é dada pela relação entre a máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $8\sqrt{A}$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que assegurem a ruptura no trecho central da amostra (Figura 11), calculada conforme a Equação 6.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0, \text{máx}}}{A} \quad (6)$$

Onde:

$F_{t0, \text{máx}}$ é a máxima força de tração aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newton (N);

A é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central da amostra, em milímetros quadrados (mm^2);

F_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras, em Mega Pascal (MPa).

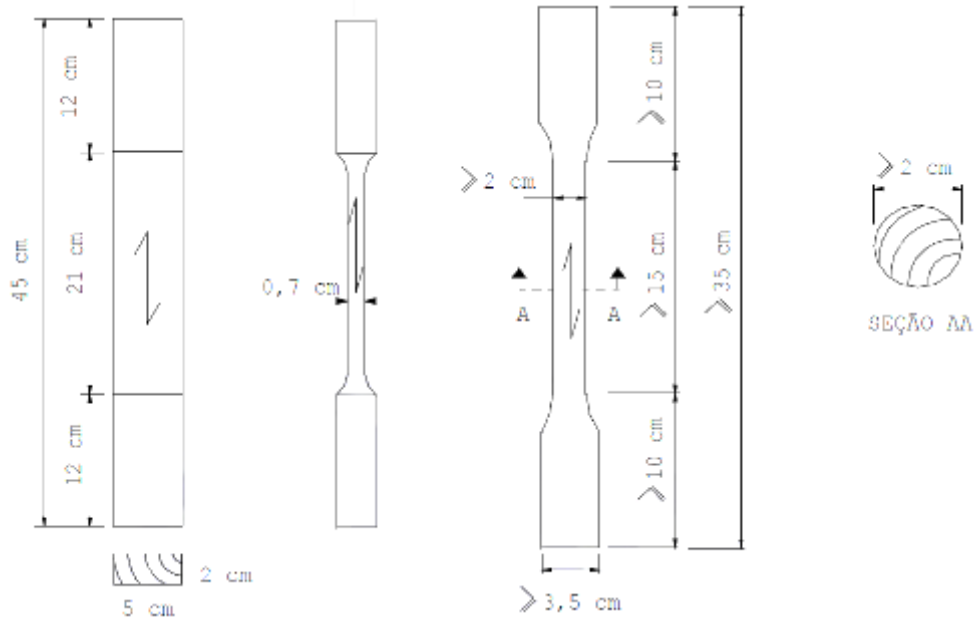


Figura 11 – Corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras.

Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

A rigidez da madeira na tração paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade (E_{t0}), obtido do trecho linear do diagrama tensão deformação específica. Para esta finalidade, E_{t0} , é determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão deformação, correspondente respectivamente a 10% e 50% de f_{t0} determinada no ensaio, dado pela Equação 7:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de tração correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{t0} ;

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

Os ensaios ocorrem com aplicação de carregamento monotônico pela máquina de ensaio com taxa crescente de 10 MPa/min. Utiliza-se pares simétricos de garras para ajustar o corpo de prova à máquina de ensaios e extensômetro para medir as deformações específicas, com precisão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os corpos de prova são carregados até atingirem a ruptura.

A resistência da madeira à tração normal às fibras (f_{t90}) é dada pela relação entre a máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova com a configuração apresentada na Figura 12, sendo calculada conforme a Equação 8.

$$f_{t90} = \frac{F_{t90,máx}}{A} \quad (8)$$

Onde:

$F_{t90,máx}$ é a máxima força de tração normal aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em Newton (N);

A é área inicial da seção transversal tracionada do trecho alongado, em milímetros quadrados (mm^2).

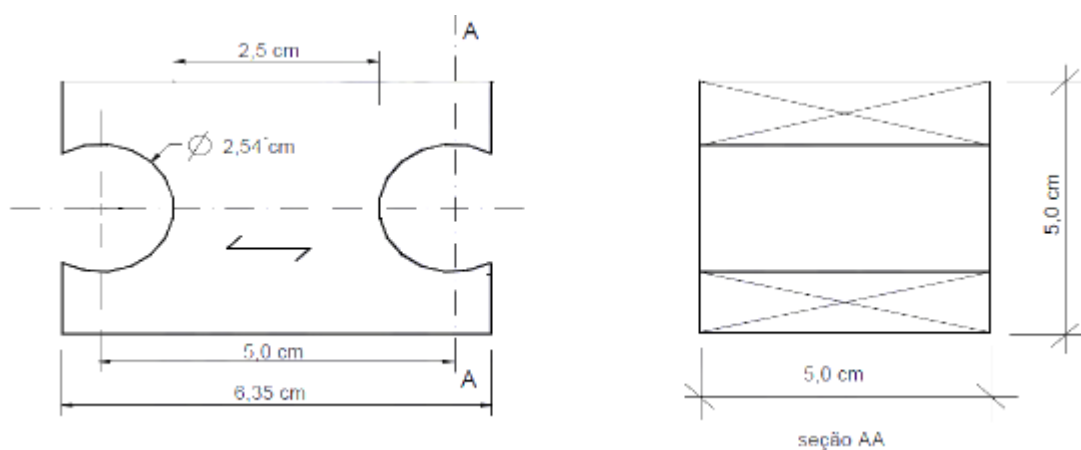


Figura 12 – Corpo de prova para tração normal às fibras.

Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

Os ensaios ocorrem com aplicação de carregamento monotônico pela máquina de ensaio com taxa crescente de 2,5 MPa/min. Utilizam-se acessórios para encaixe nos orifícios dos corpos de prova, para possibilitar a aplicação da força que traciona o corpo de prova.

2.2.5. Cisalhamento

A resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) é dada pela relação entre a máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático, calculada conforme a Equação 9.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{A_{v0}} \quad (9)$$

Onde:

$F_{v0,m\acute{a}x}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova, em newtons;

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo de prova, em metros quadrados.

Os ensaios de cisalhamento ocorrem em corpos de prova fabricados com a seção crítica paralela à direção radial da madeira, de acordo com a Figura 13. A taxa de carregamento é monotônica crescente, correspondente à uma taxa de 2,50 MPa/min.

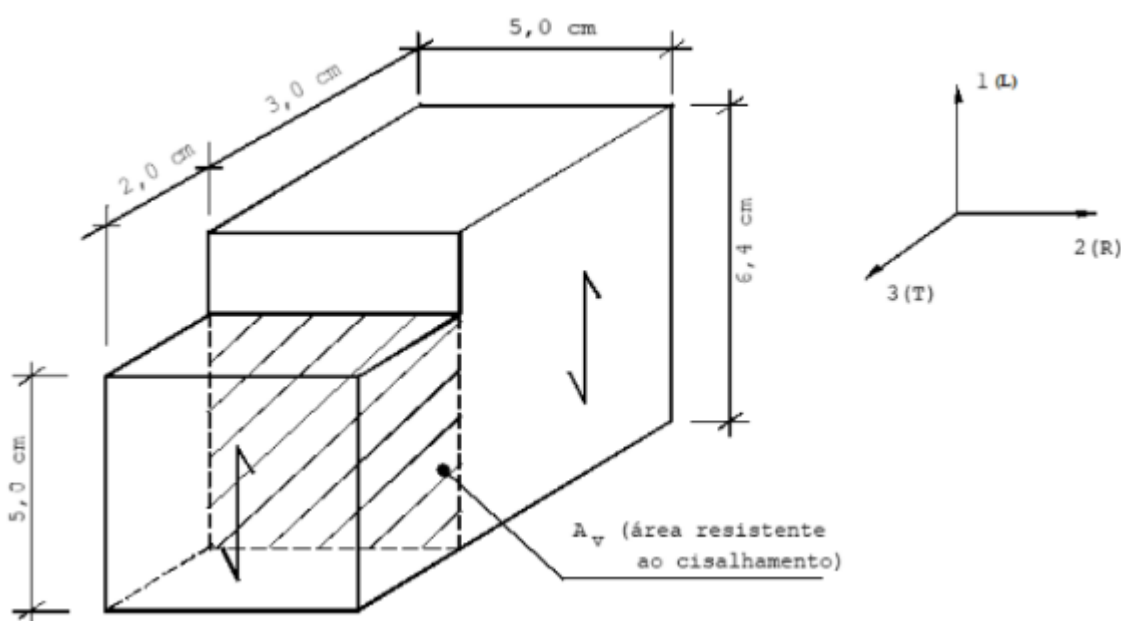


Figura 13 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras.

Fonte: ABNT NBR 7190-3 (2022).

O documento normativo brasileiro, ABNT NBR 7190 (1997) 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 2 apresenta os valores médios das principais propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de Eucalipto.

Tabela 2 - Valores médios das principais propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucalipto comerciais.

Nome científico	$\rho_{ap}(12\%)$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{i90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)	n
<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13409	24
<i>E. camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0	13 286	18
<i>Corymbia citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18 421	68
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	822	51,8	90,8	4,0	10,5	13 693	21
<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18 029	15
<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12 813	103
<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	115,6	4,1	10,6	18 099	53
<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14 431	10
<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	118,6	4,5	10,3	16 782	31
<i>Eucalyptus paniculata</i>	1 087	72,7	147,4	4,7	12,4	19 881	29
<i>Eucalyptus propínqua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15 561	63
<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9	19 360	70
<i>Eucalyptus saligna</i>	731	46,8	95,5	4,0	8,2	14 933	67
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	899	57,7	115,9	4,6	9,7	17 198	29
<i>Eucalyptus triantha</i>	755	53,9	100,9	2,7	9,2	14 617	08
<i>Eucalyptus umbra</i>	889	42,7	90,4	3,0	9,4	14 577	08
<i>Eucalyptus urophylla</i>	739	46,0	85,1	4,1	8,3	13 1688	86

n: é o número de corpos de prova ensaiados

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

2.3. Características das espécies pesquisadas

Nesta seção estão apresentadas as principais características das dez espécies consideradas para estudo nessa pesquisa: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus microcorys* e *Eucalyptus propínqua*. A seleção das espécies buscou explorar o gênero Eucalipto por ser uma saída para reduzir o consumo de espécies nativas amazônicas e por seu viável consumo por parte do setor produtivo da construção em madeira no Brasil.

2.3.1. *Eucalyptus grandis*

O *Eucalyptus grandis* é uma espécie oriunda da Austrália e reconhecida, em língua inglesa, pelos nomes comerciais “*Rose Gum*” ou “*Flooded Gum*” (CRAWFORD, 2011). Amplamente plantadas nos trópicos, no Brasil constitui a espécie florestal mais plantada (SOUZA, 2004). Sua madeira é leve, dura e de fácil trabalhabilidade. Apresenta fibras retas e possui coloração clara avermelhada (WALLIS, 1970; FERREIRA, 1979). É amplamente

utilizada nas construções em geral, como pisos, forros, pontaletes, painéis, postes e caixotaria (WALLIS, 1970; FERREIRA, 1979; NAHUZ, 2007; PERES *et al.*, 2015). A Tabela 3 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus grandis* (LAHR *et al.*, 2018; IPT, 2021).

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus grandis*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,63
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	40,1
$f_{c90} \text{ (MPa)}$	4,4
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	12696

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

2.3.2. *Eucalyptus alba*

O *Eucalyptus alba* é amplamente encontrado na Austrália, em alguns países asiáticos e africanos (TRAINOR, 2011; NUBERG *et al.*, 2015; LACLAU *et al.*, 2005; BOUKHATEM *et al.*, 2014). Essa espécie também foi difundida no Brasil desde o início do Século XX (LACLAU *et al.*, 2005; PÁSZTOR, 1975). Essa espécie pertence ao grupo dos “Red Gums”, que são espécies de madeira vermelha e casca dura, cor pardo avermelhado-clara e moderadamente dura (GOLFARI *et al.*, 1978). Sua madeira é empregada na fabricação de mourões (FERREIRA, 1979), energia (NUBERG *et al.*, 2015), aglomerados e chapas (GOLFARI *et al.*, 1978). A Tabela 4 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus alba* (NOGUEIRA *et al.*, 2019a).

Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus alba*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,71
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	47,3
$f_{c90} \text{ (MPa)}$	3,9
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	13409

Fonte: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019 a).

2.3.3. *Eucalyptus saligna*

O *Eucalyptus saligna* é bastante comum na costa do território australiano, sob o nome comercial de “*Blue Gum*” (BOLAND *et al.*, 2006). Também é encontrado no Brasil, nos Estados Unidos e em alguns países da África (DOI, *et al.*, 2010; MUGUNGA *et al.*, 2015). O *Eucalyptus saligna* apresenta madeira de coloração rosa pálida à vermelha, granulação reta, e boa trabalhabilidade (BOLAND *et al.*, 2006; GUTIÉRREZ, 1976). É empregada em diversos setores, tais como, celulose e papel, madeira serrada, painéis de partículas, móveis etc. (GUTIÉRREZ, 1976; NEIVA *et al.*, 2015; JUÍZO *et al.*, 2014; IWAKIRI *et al.*, 2013). Seu uso na construção civil ainda não é tão popular quanto na celulose e papel. A Tabela 5 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus saligna* (NOGUEIRA *et al.*, 2019 b; IPT, 2021).

Tabela 5. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus saligna*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,73
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	46,8
$f_{c90} \text{ (MPa)}$	4,8
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	15261

Fonte: Adaptado de Nogueira *et al.* (2019 b).

2.3.4. *Eucalyptus camaldulensis*

O *Eucalyptus camaldulensis* é uma das espécies mais importantes da indústria madeireira australiana, sendo reconhecida internacionalmente pelo nome comercial “*River Red Gum*” (WALLIS, 1970; CATELOTTI *et al.*, 2015). As plantações de florestas dessa espécie estão por quase todos os países. É uma espécie que fornece matéria prima para a indústria de óleos essenciais, carvão, celulose e papel e na construção civil, ainda que pouco utilizada para esse fim em países da América Latina (LI *et al.*, 2016; HEIDARI *et al.*, 2014; PIRALHO *et al.*, 2014). A madeira dessa espécie é dura e densa, apresentando coloração avermelhada (WALLIS, 1970; BOLAND *et al.*, 2006). A Tabela 7 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus camaldulensis* (TORRES *et al.*, 2016, ABNT NBR 7190, 1997).

Tabela 6. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,89
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	48
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	13286

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.5. *Eucalyptus cloeziana*

O *Eucalyptus cloeziana* se distribui por várias localidades na província australiana de Queensland, assim como também cresce em várias regiões do planeta (TURNBULL, 1979). No Brasil, o plantio dessa espécie é recomendado nos estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul (BORGES, 2008). Seu nome comercial internacional é “*Gympie Messmate*” (BOLAND *et al.*, 2006). A madeira do *E. cloeziana* é clara, apresentando um aspecto geral de amarelado pálido (WALLIS, 1970). É uma madeira dura, sendo bastante recomendada para aplicações na construção civil como piso, dormentes, pontes, vedações e compensados estruturais (GUIMARÃES JUNIOR *et al.*, 2009; GONÇALEZ *et al.*, 2006). A Tabela 7 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus cloeziana* (ABNT NBR 7190, 1997).

Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,82
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	51,8
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	13963

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.6. *Eucalyptus tereticornis*

O *Eucalyptus tereticornis*, internacionalmente denominado “*Red Gum*”, ocorre nas regiões australianas de New South Wales, Victoria e Queensland (WALLIS, 1970; BOLAND *et al.*, 2006). Essa espécie é encontrada também no Brasil e em países da América do Sul, Estados Unidos e Europa (SEGUNDINHO *et al.*, 2015; POONIA e TRIPATHI, 2016; ROCKWOOD, 2012). No Brasil está entre as sete espécies de eucalipto mais cultivadas (QUEIROZ *et al.*, 2010). Sua madeira apresenta alta densidade e coloração vermelha escura no cerne (BOLAND *et al.*, 2006). Dentre seus mais diversos usos, destacam-se a produção de celulose e papel, dormentes para ferrovias, pisos e uso estrutural em construções

(SEGUNDINHO *et al.*, 2015; CHAUHAN e AGGARWAL, 2011; WALLIS, 1970). A Tabela 8 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus tereticornis* (NOGUEIRA *et al.*, 2020).

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus tereticornis*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,90
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	57,7
$f_{c90} \text{ (MPa)}$	5,7
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	17285

Fonte: Adaptado de Nogueira *et al.* (2020).

2.3.7. *Eucalyptus urophylla*

O *Eucalyptus urophylla* é uma espécie originária do Timor Leste, encontrada também na Indonésia, alguns países africanos, China e no Brasil (LORENZI *et al.*, 2003; MARTINS-CORDER *et al.*, 1996; ANDRADE *et al.*, 2010; GUIMARÃES JUNIOR *et al.*, 2012). Seu nome comercial internacional é “*Timor White Gum*” (BOLAND *et al.*, 2006). A espécie apresenta crescimento rápido e porte grande. A madeira do cerne apresenta coloração avermelhada escura, enquanto o alburno é branco, creme ou róseo claro (SOERIANEGARA; LEMMENS, 1993). Sua madeira é utilizada para produção de compensados, aglomerados, painéis, madeira serrada e aplicações na construção civil, já que essa espécie apresenta facilidade de tratamento e penetração de produtos de preservação (GUIMARÃES JUNIOR *et al.*, 2012; MENDES *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2011; VALLE *et al.*, 2013). A Tabela 9 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus urophylla* (LAHR *et al.*, 2017).

Tabela 9 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,74
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	46,0
$f_{c90} \text{ (MPa)}$	6,5
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	13391

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

2.3.8. *Eucalyptus paniculata*

O *Eucalyptus paniculata* é originário da Austrália (LAW; CHIDEL, 2007). Seu nome comercial internacional é “*Grey Ironbark*” (BOLAND et al., 2006). É uma espécie de clima quente úmido a sub-úmido e apresenta crescimento rápido (CABI, 2013). A madeira dessa espécie apresenta coloração marrom ou marrom escura e é extremamente pesada, dura, forte e durável (DELUCIS et al., 2016). Sua madeira ainda é muito pouco utilizada na construção civil. A Tabela 10 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus paniculata* (ABNT NBR 7190, 1997).

Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus paniculata*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,08
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	72,7
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	19881

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.9. *Eucalyptus microcorys*

O *Eucalyptus microcorys* está amplamente distribuído por toda costa norte e sudeste da Austrália, cuja comercialização internacional decorre do termo “*Tallowwood*” (BOLAND et al., 2006). Seu crescimento é rápido, especialmente em clima úmido, com verões quentes e invernos frios, se adaptando tanto em solos bons, como em pobres (HILLS e BROWN, 1931). É uma árvore de médio a muito alto porte, podendo atingir mais de 70 metros de altura e 3 metros de diâmetro (BOLAND et al., 2006). Sua madeira apresenta coloração clara, predominantemente marrom amarelada, e é dura e pesada (BOLAND et al., 2006). É bastante utilizado na produção de energia, produção de madeira serrada para construções leves e pesadas, pisos e compensados (MARCHESAN et al., 2005; MARTINS et al., 2013). A Tabela 11 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus microcorys* (ABNT NBR 7190, 1997).

Tabela 11 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus microcorys*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,92
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	54,9
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	16782

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

2.3.10. *Eucalyptus propinqua*

O *Eucalyptus propinqua* é uma espécie de origem australiana e conhecida pela alcunha “Grey Gum”. São árvores de porte médio a alto, atingindo até 40 m de altura e 1 m de diâmetro (BOLAND *et al.*, 2006). A madeira dessa espécie apresenta alburno de coloração vermelha pálida e cerne avermelhado. Sua madeira é dura, forte e extremamente durável (BOLAND *et al.*, 2006). A espécie apresenta alto potencial como matéria prima para a indústria madeireira e para a produção de papel e celulose (SILVA *et al.*, 2014). A madeira também é altamente recomendada para aplicações estruturais, postes, compensados, dormentes e pisos (FERREIRA, 1979). A Tabela 12 apresenta os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus propinqua* (ABNT NBR 7190, 1997).

Tabela 12 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus propinqua*.

Propriedades	Valores
$\rho_{ap(12\%)} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,95
$f_{c0} \text{ (MPa)}$	78,5
$E_{c0} \text{ (MPa)}$	19360

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997).

3. REVISÃO DA LITERATURA

A busca dos trabalhos componentes da revisão da literatura foi realizada em base de dados como *Web of Science*, Portal Capes Periódicos, *Scopus*, *Engineering Village*, *Google Scholar* e em várias páginas de revistas internacionais associadas à madeira e estruturas de madeira. Para tal utilizou-se a seguinte combinação de palavras-chave: *Eucalyptus* OR *Anatomy* OR *Mechanical Properties* OR *Regression Models*.

Inicialmente, são apresentados os estudos em que foram investigadas a anatomia das espécies de Eucalipto, na expectativa de avaliar se em algum deles houve o uso de modelos de regressão para estimativa de propriedades mecânicas, assim como compreender a correlação entre os parâmetros anatômicos. Posteriormente, são apresentados trabalhos em que modelos de regressão são utilizados para estimativa de propriedades de madeira a partir da densidade.

3.1. Propriedades da madeira e a anatomia

Devido à grande importância da madeira de Eucalipto, a partir da década de 80 surgiram diversos trabalhos acadêmicos de caracterização das espécies para o contexto latino-americano. Tomazello Filho (1985) realizou a caracterização anatômica de seis espécies por meio de microscopia: *E. globulus*, *E. gummifera*, *E. microcorys*, *E. pilularis*, *E. pellita* e *E. triantha* e identificou as principais diferenças na estrutura anatômica da madeira, possibilitando a caracterização das diferentes espécies de eucaliptos.

Nisgoski *et al.* (1998) realizaram a caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage por meio do microscópio eletrônico. Foram avaliados os anéis de crescimento, vasos, parênquima, raio e fibras. Encontraram poros em arranjo diagonal, característico do gênero, parênquima vasicêntrico, raios homogêneos e fibras curtas.

Pereira *et al.* (2000) analisaram a variabilidade do comprimento das fibras no lenho e na casca de *Eucalyptus globulus*, apurando que as fibras da casca e do lenho são morfológicamente similares, frequentemente mais longas na casca. A variação axial foi mínima e oposta, o comprimento da fibra decresceu na madeira e ampliou significativamente a partir da casca em sentido à medula, em todos os níveis de altura.

Florsheim *et al.* (2000) conduziram um estudo da variação radial e longitudinal da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna*, de 7 anos, e constaram no sentido radial o aumento do comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras, com diminuição do

diâmetro do lúmen; já nos vasos foi verificado aumento no comprimento e no diâmetro tangencial.

Fabrowsky (2003) caracterizou anatomicamente casca e lenho de *Eucalyptus smithii*, a fim de investigar a presença de óleos essenciais. A espécie apresenta estrutura anatômica homogênea da madeira e da casca. Na casca, observa-se a presença de cavidades secretoras, porém no lenho não foi encontrada nenhuma estrutura semelhante.

Rocha *et al.* (2004), avaliando a madeira de árvores de *Eucalyptus* sp., verificaram na direção radial (medula-casca) que todas as dimensões das fibras apresentaram tendência crescente, já nos vasos a tendência crescente foi observada para comprimento e diâmetro tangencial e, decrescente para frequência. Outros pesquisadores que estudaram esse gênero também relatam a tendência comum do aumento das dimensões das fibras e do diâmetro dos vasos do lenho de espécies de *Eucalyptus* no sentido medula-casca, como os indicados por Lima *et al.* (2010), Sousa Jr. (2004), Silva (2002) Sette Jr. *et al.* (2012), Monteiro *et al.* (2017) e Trevisan *et al.* (2017).

Zbonak, Bush e Grzeskowiak (2007) realizaram análises das diferenças no crescimento, estrutura morfológica e densidade da madeira entre diferentes genótipos de eucaliptos e verificaram que as propriedades das fibras tiveram uma grande influência sobre a densidade da madeira, tornando as madeiras de árvores com maior diâmetro de lúmen significativamente mais leves.

Andrade *et al.* (2010) utilizaram a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo para obter calibrações para a madeira de *Eucalyptus urophylla*. A técnica se mostrou adequada para estimar o módulo de elasticidade obtido na madeira sólida com $r = 0,9$, já o módulo de ruptura e a resistência à compressão apresentaram r abaixo de 0,9.

Poubel *et al.* (2011) determinaram a variação das propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* com a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira, onde a densidade mostrou estar mais correlacionada às dimensões das fibras (comprimento, largura e espessura de parede) do que aos demais elementos anatômicos. Entretanto, a correlação entre a densidade básica e a contração volumétrica não foi significativa. A contração volumétrica tendeu a diminuir com o aumento da largura dos raios e a redução do comprimento dos vasos.

Dutt e Tyagi (2011) caracterizaram morfológicamente onze espécies de Eucalipto. Os autores verificaram que na madeira de *E. grandis* as fibras possuem paredes estreitas e grandes diâmetros de lúmen, que deverá ter um efeito na resistência e na flexibilidade. Já na espécie *E. tereticornis*, as fibras apresentam paredes mais largas e menores diâmetros de lúmen, portanto serão mais duras e menos flexíveis.

Ramos *et al.* (2011) avaliaram a variação radial nas características anatômicas da espécie *Eucalyptus grandis* para caracterizar e diferenciar madeira juvenil e madeira adulta. Foram analisadas a dimensão das fibras (comprimento, diâmetro e espessura da parede), elementos de vaso, porcentagem de elementos anatômicos e ângulo microfibrilar. Os autores identificaram a idade de transição entre madeira juvenil e adulta pela variação radial das fibras e ângulo microfibrilar, entre o quinto e o décimo primeiro ano.

Brisola e Demarco (2011) estudaram anatomicamente o desenvolvimento caulinar de *Eucalyptus grandis*, *E. uruphylla* e do seu híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* e observaram que a madeira do híbrido possui parênquima axial com menos células e fibras curtas com paredes espessas, verificando-se que esse genótipo apresenta maior densidade quando comparado às duas espécies parentais.

Zieminska *et al.* (2013) caracterizaram anatomicamente 24 espécies australianas. Dentre as características analisadas destacam-se a parede da fibra, diâmetro do lúmen, frequência dos vasos e dos raios. Os autores concluíram que a variação da densidade foi afetada principalmente pelas frações da parede da fibra e do lúmen.

Abruzzi *et al.* (2013) avaliaram amostras de *E. grandis*, *E. saligna* e *E. citriodora* (*Corymbia*) por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva. A análise mostrou que o diâmetro médio do lúmen das fibras variou entre as três espécies estudadas, resultando em diferenças substanciais na densidade.

Motta *et al.* (2014) caracterizaram a madeira de quatro espécies florestais: *Cedrela fissilis* (Cedro), híbrido clonal *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (Eucalipto urograndis), *Hovenia dulcis* (Uva do Japão) e *Gallesia integrifolia* (Pau d'alho). As características anatômicas avaliadas foram: diâmetro tangencial e frequência de vasos; comprimento de fibra, diâmetro de lúmen e espessura de parede de fibra; altura, largura e frequência de raios. As espécies apresentaram madeiras classificadas como leves e de média densidade básica.

Pirralho *et al.* (2014) estudaram a morfologia de espécies de Eucalipto para uso na indústria de celulose. As nove espécies estudadas apresentaram semelhanças estruturais, com características típicas da madeira de Eucalipto, como porosidade difusa com vasos predominantemente solitários e placas de perfurações simples.

Lima *et al.* (2014) caracterizaram microscopicamente a madeira de *Eucalyptus resinifera* para determinar as relações entre as propriedades da madeira e a anatomia. O estudo mostrou que a relação positiva entre a densidade aparente e o cisalhamento paralelo às fibras é decorrente do alto valor de densidade aparente associado à maior proporção de raios,

proporcionando maior resistência ao cisalhamento. O valor do R^2 para a relação entre a densidade e a resistência ao cisalhamento foi igual a 33%, já a relação entre a frequência de raios e a resistência ao cisalhamento apresentou $R^2 = 62\%$.

Palermo *et al.* (2015) avaliaram as características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e a idade de transição entre as madeiras juvenil e madura. Os resultados mostraram que o comprimento da fibra, espessura da parede celular, índice de esbeltez, fração de parede celular e diâmetro do vaso aumentam da medula para a casca. Já as fibras, parênquima axial, células do parênquima dos raios e vasos estão distribuídos igualmente da medula à casca.

Carrilo *et al.* (2015) analisaram as características microscópicas da madeira de seis árvores de *Eucalyptus globulus*. As dimensões dos vasos e das fibras mostraram um aumento da medula para a casca, enquanto a frequência de vasos diminuiu. A espessura da parede celular, o comprimento da fibra, o índice de Runkel e a aspereza foram significativamente superiores nos genótipos de alta densidade em quase todas as seções ao longo do raio analisado. Os dados mostraram correlações significativas entre a densidade da madeira e espessura da parede celular ($r = 0,52$), aspereza ($r = 0,40$) e índice de Runkel ($r = 0,41$), enquanto a aspereza tem uma relação próxima com quase todas as variáveis avaliadas, mostrando um efeito da variação cambial nas variáveis anatômicas.

Melo *et al.* (2016) estudaram o efeito do material genético e da variabilidade radial na estrutura anatômica e densidade básica das madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia citriodora*. Foram estudados dois híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* e a espécie *Corymbia citriodora*. A espécie *C. citriodora*, apresentou valores superiores de espessura, fração de parede e porção de parede das fibras e também densidade básica em comparação aos híbridos. A fração de parede e a porção de parede das fibras foram os parâmetros anatômicos que melhor explicaram a variação radial da densidade básica.

Redman *et al.* (2016) caracterizaram quatro espécies comerciais de Eucalipto: *C. citriodora*, *E. pilularis*, *E. marginata* e *E. obliqua*. Os autores verificaram uma clara diferença na porosidade da madeira, tamanho, espessura da parede e orientação entre as espécies. Observaram que existe uma forte correlação entre a densidade da madeira medida e calculada com base nas medições de porosidade. As características da fibra e a anisotropia da retração da madeira foram usadas para explicar a dificuldade observada na secagem das diferentes espécies em termos de colapso e degradação relacionada ao estresse de secagem.

Zanuncio *et al.* (2018) avaliaram as características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* \times *Eucalyptus urophylla*, com dois anos de idade. Dentre os 6 clones analisados, a madeira do clone A apresentou fibras mais robustas e de melhor

arranjo microfibrilar, resultando em melhores propriedades mecânicas e, por isto, melhor desempenho para uso estrutural. Já a madeira do clone F apresentou pouca variação da densidade básica no sentido radial, facilitando sua trabalhabilidade e a madeira do clone B apresentou menor coeficiente de anisotropia e, por isto, o material foi recomendado para locais com alta variação de umidade.

Wentzel *et al.* (2019) avaliaram as características anatômicas da madeira termicamente modificada de *Eucalyptus nitens*. Foram utilizadas técnicas de microscopia eletrônica de varredura, microscopia de transmissão e micro-tomografia computadorizada de raios X. Foram mensuradas as espessuras da parede celular, fibras e área do lúmen antes e após as modificações. Detectou-se apenas uma discreta diminuição nas características analisadas em comparação com os corpos de prova não modificados.

Fernández *et al.* (2019) estudaram a estrutura e função do xilema em quatro espécies de *Eucalyptus*. As espécies de eucalipto apresentaram xilema composto por vasos solitários circundados e conectados a elementos do sistema traqueal, e parênquima imperfurados. As análises de correlação revelaram que as tendências observadas entre o tamanho dos vasos e a vulnerabilidade à cavitação são semelhantes nos níveis interespecífico e intraespecífico.

Bueno *et al.* (2020) estudaram a anatomia da madeira de três genótipos comerciais de Eucalipto. Os autores verificaram que o diâmetro médio dos vasos no lenho tardio, a dispersão dos vasos entre as classes de diâmetro e a condutividade hidráulica teórica apresentaram diferenças significativas entre os genótipos avaliados. Quando esses genótipos foram avaliados em diferentes condições ambientais, a menor precipitação foi relacionada ao aumento do volume dos vasos e do índice de mesomorfia. O diâmetro do elemento de vaso, índice de vulnerabilidade, frequência dos elementos de vaso e a diferença da condutividade hidráulica entre o lenho inicial e o lenho tardio representaram melhor a variabilidade nas amostras.

Talgatti *et al.* (2020) caracterizaram anatomicamente as madeiras de seis clones comerciais de *Eucalyptus* spp. para aproveitamento na indústria de celulose. Os resultados obtidos indicaram que os clones apresentaram potencial para uso múltiplo devido à variabilidade observada entre os mesmos. As fibras que apresentaram maior rigidez possuem paredes mais espessas, não sendo indicadas para produção de celulose, já os valores do índice de Runkel para produção de papel, de maneira geral, foram considerados muito bons.

3.2. Estimativas de propriedades da madeira

A maioria dos ensaios de caracterização de madeiras tende a ser realizada em grandes centros de pesquisas, pois requerem equipamentos específicos, mão de obra especializada e

equipamentos de grande porte, com custo elevado. No impedimento da realização de todos os ensaios para caracterização da madeira, a ABNT NBR 7190 (2022) apresenta relações entre os valores característicos de resistência (Equações de 10 a 16).

$$f_{c0,k} / f_{t0,k} = 0,77 \quad (10)$$

$$f_{tM,k} / f_{t0,k} = 1,00 \quad (11)$$

$$f_{c90,k} / f_{c0,k} = 0,25 \quad (12)$$

$$f_{e0,k} / f_{c0,k} = 1,00 \quad (13)$$

$$f_{e90,k} / f_{c0,k} = 0,25 \quad (14)$$

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

$$f_{v0,k} / f_{c0,k} = 0,12 \text{ (para folhosas)} \quad (16)$$

A ABNT também apresenta relações entre os valores médios das propriedades de rigidez da madeira (Equações 17 a 20).

$$E_{c0,m} = E_{t0,m} \quad (17)$$

$$E_M = 0,85 \cdot E_{c0} \text{ (para coníferas)} \quad (18)$$

$$E_M = 0,90 \cdot E_{c0} \text{ (para folhosas)} \quad (19)$$

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

Dentre todas as propriedades físicas da madeira destaca-se a densidade, razão entre a massa (quantidade de parede celular) e o volume da madeira a um determinado teor de umidade. A densidade da madeira está relacionada com seus elementos anatômicos, como a dimensão das células e a espessura da parede celular. A partir do valor da densidade aparente é possível estimar outras propriedades mecânicas da madeira (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Dias e Lahr (2004) apresentaram as relações entre as propriedades físicas e mecânicas de quarenta espécies de madeiras brasileiras do grupo das dicotiledôneas. Pelos 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 entre diferentes 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 ($R^2 = 45\%$).

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% e 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) utilizaram madeiras de *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra* para avaliar a densidade e as propriedades mecânicas obtidas em 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 13) para correlacionar a densidade e as propriedades mecânicas com os resultados obtidos dos ensaios não destrutivos.

Tabela 13 - 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	R² (%)
<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*
 R² = coeficiente de determinação

Fonte: Adaptado de Chen e 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 lusitnanica* e *Populus x canadensis* utilizando duas técnicas: com *Timber Grader* e com acelerômetro, comparando com valores obtidos em ensaios de flexão estática. A Tabela 14 apresenta as equações obtidas dos modelos de regressão lineares entre os módulos de elasticidade.

Tabela 14 - Modelos de regressão e coeficiente de determinação entre módulos de elasticidade estático e dinâmico para as madeiras de *Cupressus lusitnanica* e *Populus x canadensis*.

Espécies	Equação (Resultados em MPa)	R ² (%)
<i>Cupressus lusitnanica</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 (Micro Timber Grader)
 E_{AC} = módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de acelerômetro

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

3.3. Síntese da revisão bibliográfica

A partir da revisão bibliográfica realizada anteriormente, algumas conclusões puderam ser apresentadas acerca dos estudos científicos elencados:

- Tem sido frequente o uso do gênero *Eucalyptus* em áreas de florestas plantadas, pois possui um grande número de espécies conhecidas que fornecem um grande número de produtos, embora ainda há espaço evidente para a valorização e o aumento do consumo das diversas variedades do eucalipto por parte da construção civil brasileira, conforme recentemente alertado por De Araujo *et al.* (2021);
- A obtenção das propriedades físicas e mecânicas da madeira é importante para conhecer as características do material e proporcionar a melhor aplicação deste. Entretanto, a caracterização do material é condicionada a maquinário e mão de obra especializada, existentes apenas em grandes centros de pesquisas;
- A estimativa das propriedades da madeira por intermédio da densidade aparente, que é uma propriedade de fácil obtenção, tem apresentado boas correlações;

- As técnicas de microscopia aplicadas ao estudo da estrutura anatômica da madeira permitem observar a proporção, tamanho e distribuição dos vários elementos de célula, tais como vasos, fibras, etc.;
- Por se tratar de um tema inovador para com a madeira, são raros os trabalhos na literatura que correlacionam as propriedades físicas e mecânicas com os parâmetros anatômicos no gênero *Eucalyptus*.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram adquiridos em empresas do setor, localizadas na região da cidade de São Carlos - SP (Brasil), dez lotes de madeira de *Eucalyptus* de diferentes espécies: *E. cloeziana*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. tereticornis*, *E. microcorys*, *E. urophylla*, *E. propinqua*, *E. paniculata*, *E. camaldulensis* e *E. alba*.

As madeiras foram fornecidas na forma de pranchas (dimensões nominais variadas) em lotes homogêneos (lote composto por madeiras da mesma região de extração das árvores). As pranchas de madeira foram estocadas por seis meses no pátio do 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), sendo protegidas contra a ação das intempéries visando um condicionamento estável, o que resultou em teor de umidade próximo ao considerado de equilíbrio (12%) segundo a NBR 7190 (1997).

As árvores possuíam idade igual ou superior a 18 anos, e a partir do cerne foram confeccionadas 12 peças de cada espécie para cada um dos ensaios requeridos (densidade aparente, retratibilidade, compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, tração normal às fibras e resistência ao cisalhamento), de acordo com a normativa em questão. Para a análise dos parâmetros anatômicos foram confeccionados corpos de prova orientados nos três eixos anatômicos exemplificados na Figura 5 (transversal, radial e tangencial). Foram confeccionadas 12 lâminas com material macerado de cada espécie e 12 lâminas histológicas permanentes de cada espécie, sendo 4 lâminas com orientação radial, 4 com orientação transversal e 4 com orientação tangencial.

Essa seção foi dividida em três subitens: caracterização física e mecânica das espécies de Eucalipto; caracterização dos parâmetros anatômicos e análise estatística.

4.1. Caracterização física e mecânica

Foram realizados ensaios para determinação da densidade aparente (ρ_{ap}), retratibilidade total na direção radial (RRt), retratibilidade total na direção tangencial (RTt), resistência ao cisalhamento (f_{v0}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}), módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0}) e resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), seguindo a norma ABNT NBR 7190 (1997). Os procedimentos para determinação dessas

propriedades foram apresentados detalhadamente na Seção 2.2: Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira. Os ensaios para a determinação das propriedades mecânicas foram realizados na máquina universal de ensaios AMSLER, que possui capacidade de carga de 250kN e está disponível no LaMEM.

4.2. Caracterização dos parâmetros anatômicos

Foram mensurados o comprimento, espessura da parede e diâmetro das fibras; diâmetro e frequência dos elementos de vasos; altura e largura dos raios. As mensurações foram realizadas seguindo o instrumento normativo brasileiro ABNT: NBR 15066 (2004) e as normas da *International Association of Wood Anatomists* (IAWA) (1989).

4.2.1. Preparação e montagem das lâminas com material macerado para os ensaios anatômicos

Para a mensuração das características individuais das fibras (comprimento, diâmetro e espessura da parede celular) foram confeccionadas lâminas com material macerado. Para o preparo do material macerado foram retirados pequenos fragmentos de madeira de cada amostra (30 a 40 cavacos) e identificados por espécie, Figuras 14a e 14b. Tais fragmentos foram submetidos ao processo de maceração pelo método de Franklin (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951). Os segmentos do lenho foram depositados em frascos de Erlenmeyer devidamente identificados e, então, foi adicionada a solução macerante de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio na proporção de 1v:1v até cobrir os fragmentos, Figura 15a. Os frascos foram fechados e levados à estufa a 50°C por 24 horas, Figura 15b. Após esse processo o material adquiriu coloração esbranquiçada, como mostra a Figura 16. Os frascos foram retirados da estufa e o material foi transferido para um cadinho de vidro sinterizado e lavado três vezes em água destilada (Figura 17a), posteriormente foi adicionado o corante safranina em solução aquosa 1%, Figura 17b. Uma quantidade suficiente de material foi colocada em uma lâmina (Figura 18a) e coberto com uma lamínula, evitando-se bolhas de ar, Fig. 18b.



(a)



(b)

Figura 14 – Extração dos cavacos: (a) extração dos cavacos de cada espécie e (b) acondicionamento e identificação dos cavacos.

Fonte: O autor.



(a)



(b)

Figura 15 – Processo de maceração: (a) preparo da solução macerante e inserção dos cavacos nos frascos devidamente identificados e (b) frascos colocados na estufa a 50°C por 24 horas.

Fonte: O autor.



Figura 16 – Amostras após 24 horas na estufa

Fonte: O autor.



(a)



(b)

Figura 17 – Montagem das lâminas com material macerado: (a) lavagem das amostras em água destilada e (b) coloração das amostras.

Fonte: O autor.

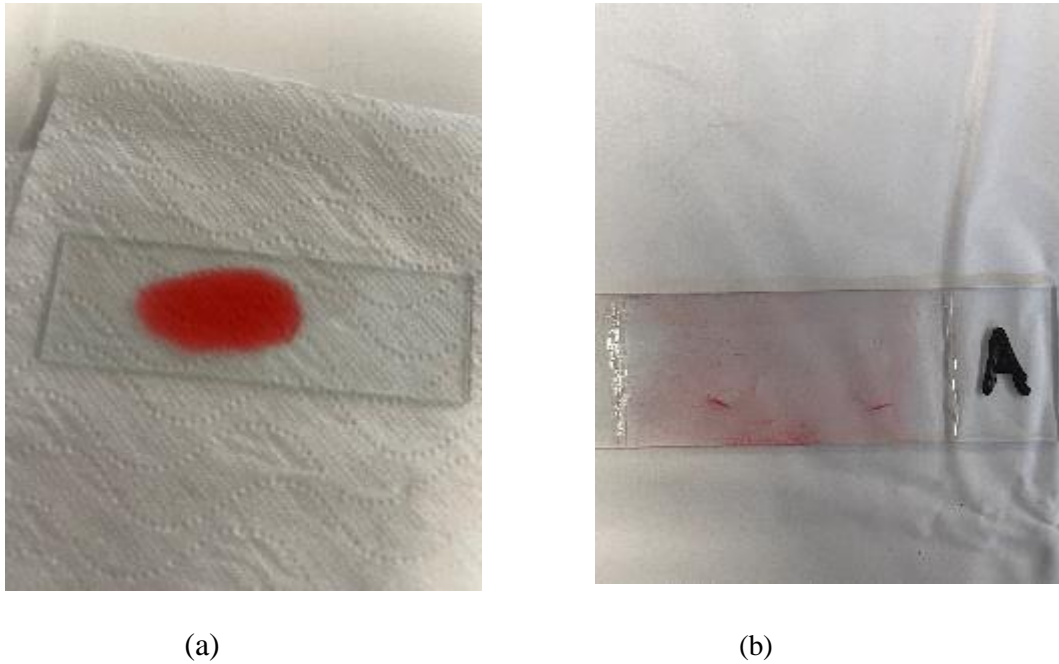


Figura 18 – Montagem das lâminas de material macerado: (a) pequena quantidade de solução adicionada na lâmina e (b) lâmina coberta com a lamínula.

Fonte: O autor.

Após a preparação do material macerado, foram efetuadas as medições das características das fibras utilizando o microscópio Olympus EX51, disponível no Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da USP, Figura 19. Com a obtenção dos valores da largura da fibra e do diâmetro do lúmen, foi calculada a espessura da parede da fibra, de acordo com a Equação 21 da ABNT NBR 15066 (2004).

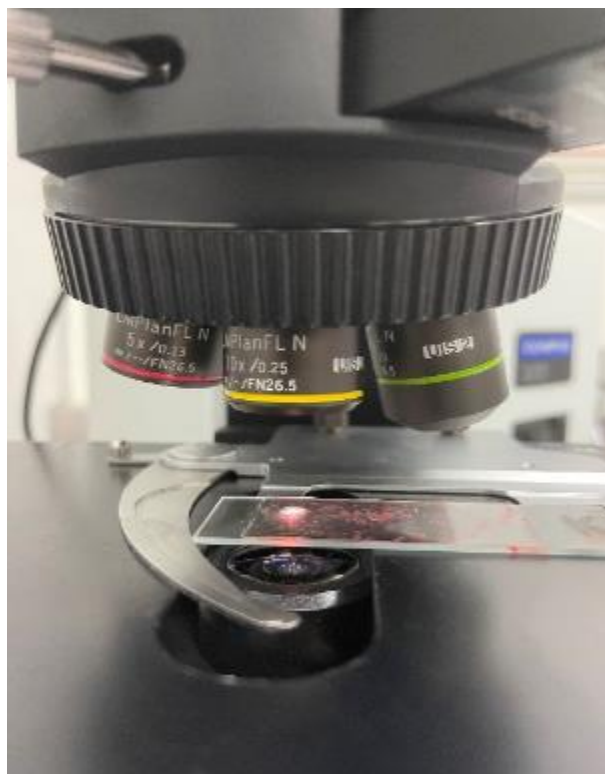


Figura 19 - Obtenção das imagens das fibras isoladas a partir das lâminas de material macerado

Fonte: O autor.

$$E = \frac{L-D}{2} \quad (21)$$

Onde:

E é a espessura da parede, em milímetros;

L é a largura da fibra, em milímetros;

D é o diâmetro do lúmen, em milímetros.

4.2.2. Preparação e montagem das lâminas histológicas

Para cada espécie foram preparados corpos de prova com dimensões de aproximadamente 1,5 cm x 1,5 cm x 1,5 cm, que foram devidamente identificados como mostrado na Figura 20.



Figura 20 – Corpos de prova para preparação de lâminas histológicas

Fonte: O autor.

Foram realizados diversos testes preliminares de amolecimento das amostras. Primeiramente, foi realizado o cozimento, em fogo médio (150° C a 160 °C), em panela de pressão (aproximadamente 2 atm) com água e glicerina PA ACS na proporção 5:1 por 1 hora, Figura 21a. Após a retirada da pressão as amostras foram resfriadas em temperatura ambiente e foi realizada a tentativa de seccionamento no micrótomo. Entretanto, a amostra ainda se apresentava dura, o que não permitia um corte perfeito, Figura 21b. Portanto, foi feito um novo cozimento por mais 1 hora em solução de água e glicerina, agora na proporção 1:1. Retirou-se a pressão e esperou-se o resfriamento das amostras em temperatura ambiente. Novamente, as amostras se apresentavam duras ao corte no micrótomo.

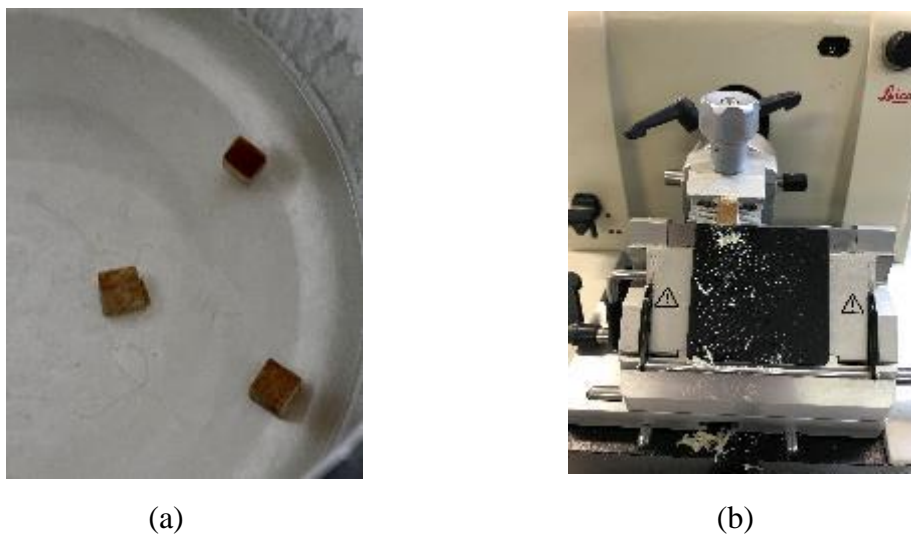
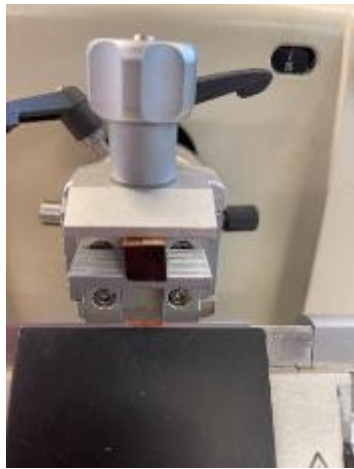


Figura 21 – Preparo das amostras: (a) fervura das amostras em água e glicerina e (b) seccionamento em micrótomo.

Fonte: O autor.

Novos testes de cozimento foram realizados. Foram adicionados água e ácido acético glacial 99,8% na proporção 4:1 em uma panela de pressão e levada ao fogo médio por 1 hora e 30 minutos. Retirou-se a pressão e esperou-se o resfriamento das amostras em temperatura ambiente. Não obstante, as amostras apresentavam-se duras ao corte. As amostras foram novamente inseridas em água e ácido acético glacial, agora na proporção 1:1, e levadas ao fogo por mais 1 hora. Como ainda se apresentavam bastante rígidas, foram realizados recozimentos na mesma solução de uma em uma hora, sempre verificando se as amostras estavam amolecidas. O tempo de cozimento variou de 3 a 12 horas em fogo médio. As amostras das espécies que apresentaram as maiores densidades foram as que demandaram maior tempo de cozimento. O tempo de amolecimento para as amostras da espécie *E. paniculata* foi superior a 12 horas de cozimento sob pressão.

Após o amolecimento, os corpos de prova foram seccionados em um micrótomo de deslize, regulado adequadamente, obtendo cortes histológicos nos três planos anatômicos, com espessura variando de 15 a 25 micrômetros, Figura 22a. Os cortes foram identificados e armazenados para a montagem das lâminas, Figura 22b.



(a)



(b)

Figura 22 – Seccionamento das amostras: (a) corte das amostras nas três direções e (b) armazenamento do material para posterior montagem das lâminas.

Fonte: O autor.

A montagem das lâminas foi feita depositando os cortes radial, transversal e longitudinal, e sobre estes uma gota de safranina aquosa 1%, Figura 23. A coloração tem o objetivo de contrastar os tecidos celulares para facilitar a posterior identificação e medição dos elementos anatômicos. Feita a coloração, foi retirado o excesso de umidade e fixada sobre os cortes uma lamínula. Foram confeccionadas 12 lâminas por espécie, sendo 4 lâminas com orientação radial, 4 com orientação transversal e 4 com orientação tangencial, Figura 24. Foram coletadas imagens digitais e determinadas suas características anatômicas para cada corte.

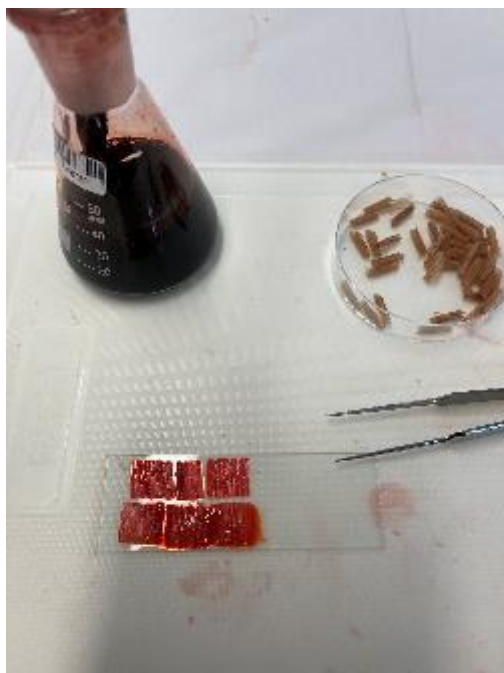


Figura 23 – Coloração das amostras com safranina

Fonte: O autor.



(a)

(b)

(c)

Figura 24 – Lâminas histológicas prontas para ensaio microscópico: (a) cortes da seção transversal; (b) cortes da seção tangencial e (c) cortes da seção radial.

Fonte: O autor.

4.3. Análise estatística

Nas Tabelas 15 e 16 são apresentados os números de determinações experimentais associados às propriedades anatômicas de diâmetro do vaso (Dv), frequência dos vasos (Frv), altura dos raios (Hr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Lf), diâmetro da fibra (Df), diâmetro do lúmen (Dlu) e espessura da parede da fibra (Epf) e também as propriedades físicas e mecânicas para as 10 espécies de Eucalipto.

Tabela 15 - Números de determinações experimentais relacionadas às propriedades anatômicas das madeiras de Eucalipto.

Espécies	Dv	Frv	Hr	Lr	Lf	Df	Dlu	Epf
<i>Cloeziana</i>	159	1	140	140	100	50	50	50
<i>Camaldulensis</i>	145	1	121	121	100	50	50	50
<i>Grandis</i>	82	1	70	70	100	50	50	50
<i>Urophylla</i>	113	1	117	117	100	50	50	50
<i>Paniculata</i>	51	1	76	76	100	50	50	50
<i>Alba</i>	157	1	115	115	100	50	50	50
<i>Tereticornis</i>	114	1	112	112	100	50	50	50
<i>Microcorys</i>	136	1	124	124	100	50	50	50
<i>Propinqua</i>	103	1	111	111	100	50	50	50
<i>Saligna</i>	114	1	132	132	100	50	50	50

Dv = diâmetro do vaso
Frv = frequência dos vasos
Hr = altura dos raios
Lr = largura dos raios
Lf = comprimento das fibras
Df = diâmetro das fibras
Dlu = diâmetro do lúmen
Epf = espessura da parede da fibra

Fonte: O autor.

Tabela 16 - Números de determinações experimentais relacionadas às propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Eucalipto.

Espécies	ρ_{ap}	RRt	RTt	f_{c0}	f_{t0}	f_{t90}	f_{v0}	E_{c0}	E_{t0}
<i>Cloeziانا</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Camaldulensis</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Grandis</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Urophylla</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Paniculata</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Alba</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Tereticornis</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Microcorys</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Propinqua</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Saligna</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12

ρ_{ap} = densidade aparente
RRt = retratibilidade radial total
RTt = retratibilidade tangencial total
 F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras
 F_{t0} = resistência à tração normal às fibras
 F_{t90} = resistência à tração normal às fibras
 F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
 E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras
 E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

Fonte: O autor.

Como o número de determinações por propriedade (anatômicas, físicas e mecânicas) é diferente tanto por espécie quanto para algumas propriedades, as análises estatísticas foram consideradas com base nos valores médios.

Determinados os valores médios das propriedades, o teste de correlação de Pearson (r de Pearson: $-1 \leq r \leq 1$), avaliado pela análise de variância (ANOVA – 5% de significância), foi utilizado com o propósito de analisar a relação entre as propriedades anatômicas e também a relação entre as propriedades anatômicas com as propriedades físicas e mecânicas das dez espécies de Eucalipto. Da ANOVA, valor-p (probabilidade p) menor ou igual ao nível de significância implica em se considerar a correlação significativa, e não significativa em caso contrário.

Por ser propriedade física de fácil determinação experimental, a densidade aparente foi correlacionada com as demais propriedades da madeira, NAHUZ, 2007). Posteriormente, modelos de regressão linear foram gerados para as correlações acusadas significativas pela ANOVA, possibilitando avaliar a precisão (medida pelo coeficiente de determinação – R^2) da

estimativa das propriedades com base apenas na densidade aparente.

Compreendida a relação entre variáveis pelas análises de correlação, modelos de regressão linear a múltiplas variáveis foram considerados com o propósito de compreender o efeito combinado de duas ou mais variáveis livres. Para tanto, equações foram geradas considerando as duas variáveis anatômicas relacionadas aos vasos (Df, Frv) como estimadoras das demais propriedades da madeira. Da mesma forma, as variáveis relacionadas com os raios (Hr, Lr) e com as características das fibras (Lf, Df, Dlu, Epf) foram consideradas na geração de modelos de regressão.

Cabe destacar que ANOVA (5% de significância) também foi considerada na análise dos modelos de regressão a múltiplas variáveis, permitindo julgar a significância do modelo, assim como a significância e a ordem de significância dos seus termos. Por fim, na tentativa de melhorar a precisão dos modelos de regressão múltipla (utilização desses para a estimativa de propriedades), a densidade aparente foi considerada em conjunto com as propriedades anatômicas que mais afetaram os modelos anteriormente obtidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção foi dividida em 8 subitens para um melhor entendimento dos resultados e das discussões deste estudo. Primeiramente, serão apresentados os resultados da caracterização anatômica das espécies. Em seguida, será apresentada a síntese das propriedades físicas e mecânicas. No terceiro subitem, serão apresentadas as correlações entre as propriedades físicas e mecânicas e a anatomia. No item posterior, as correlações entre a densidade aparente e as propriedades físicas e mecânicas. Já no quinto subitem, serão apresentados os modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos na estimativa de propriedades da madeira. No sexto e sétimo subitens, os modelos de regressão dependentes dos raios e das fibras, respectivamente. Por fim, serão apresentados os modelos de regressão dependentes da altura dos raios e da densidade aparente na estimativa de propriedades de madeira de Eucalipto.

5.1. Caracterização anatômica

A Tabela 17 apresenta a síntese dos resultados das características anatômicas das dez espécies de Eucalipto avaliadas na pesquisa.

Tabela 17 – Síntese das características anatômicas das dez espécies.

Espécies	Dv (mm)	CV (%)	Frv Vasos/mm²	CV (%)	Hr (mm)	CV (%)	Lr (mm)	CV (%)
<i>Cloeziana</i>	0,07084	24,78	20,80060	---	0,14798	42,67	0,01491	35,21
<i>Camaldulensis</i>	0,10475	32,13	16,25930	---	0,15188	27,48	0,02082	17,46
<i>Grandis</i>	0,12654	15,56	10,64550	---	0,14153	31,58	0,01594	29,42
<i>Urophylla</i>	0,14495	24,33	11,20140	---	0,15483	34,41	0,01187	25,31
<i>Paniculata</i>	0,14575	35,67	1,59141	---	0,28896	36,65	0,03229	38,65
<i>Alba</i>	0,10968	27,91	20,38220	---	0,14493	35,50	0,01279	24,32
<i>Tereticornis</i>	0,11869	24,75	12,68550	---	0,16510	30,23	0,01845	22,69
<i>Microcorys</i>	0,14267	25,19	10,12620	---	0,19915	34,40	0,01254	25,03
<i>Propinqua</i>	0,09422	33,8	11,66870	---	0,15842	36,23	0,02434	24,18
<i>Saligna</i>	0,12556	29,57	9,86650	---	0,16109	34,96	0,01319	20,80
Espécies	Lf (mm)	CV (%)	Df (mm)	CV (%)	Dlu (mm)	CV (%)	Epf (mm)	CV (%)
<i>Cloeziana</i>	0,84633	18,42	0,01288	25,47	0,00352	50,11	0,00468	26,15
<i>Camaldulensis</i>	1,05595	22,58	0,01690	24,51	0,00582	36,35	0,00554	30,99
<i>Grandis</i>	0,95388	20,80	0,01550	19,56	0,00680	36,98	0,00435	28,18
<i>Urophylla</i>	0,85068	22,91	0,01532	27,64	0,00840	40,32	0,00346	36,21
<i>Paniculata</i>	2,02036	25,93	0,04672	23,74	0,03462	29,86	0,00605	34,71
<i>Alba</i>	1,03177	18,34	0,01648	22,27	0,00770	47,03	0,00439	30,81
<i>Tereticornis</i>	0,94569	18,86	0,01526	23,19	0,00522	44,35	0,00502	23,81
<i>Microcorys</i>	1,32754	15,58	0,02072	17,52	0,00766	36,41	0,00653	32,83
<i>Propinqua</i>	1,06533	20,83	0,01670	16,24	0,00484	42,02	0,00593	19,12
<i>Saligna</i>	1,14862	22,07	0,01414	20,00	0,00572	43,69	0,00421	20,23

Dv = diâmetro do vaso
CV = coeficiente de variação
Frv = frequência dos vasos
Hr = altura dos raios
Lr = largura dos raios
Lf = comprimento das fibras
Df = diâmetro das fibras
Dlu = diâmetro do lúmen
Epf = espessura da parede da fibra

Fonte: O autor.

Os elementos de vaso são poucos numerosos na espécie *E. paniculata* e numerosos nas demais espécies estudadas, Figuras 25 e 26. O diâmetro tangencial variou de 0,070 mm na espécie *E. cloeziana*, Figura 27, a 0,145 mm na espécie *E. paniculata*, Figura 28. Os raios para todas as espécies foram extremamente baixos, variando de 0,141 mm na espécie *E. grandis* a

0,288 mm na espécie *E. paniculata*, Figuras 29 e 30. As larguras dos raios foram finas, variando de 0,01 mm para o *E. urophylla* a 0,032 mm para o *E. paniculata*, com predominância de raios unisseriados e menor porcentagem de bisseriados, Figuras 31 e 32.



Figura 25 – Plano transversal contendo elementos de vaso de *E. alba* (aumento de 10x).

Fonte: O autor.



Figura 26 – Plano transversal com elementos de vasos de *E. camaldulensis* (aumento de 10x).

Fonte: O autor.

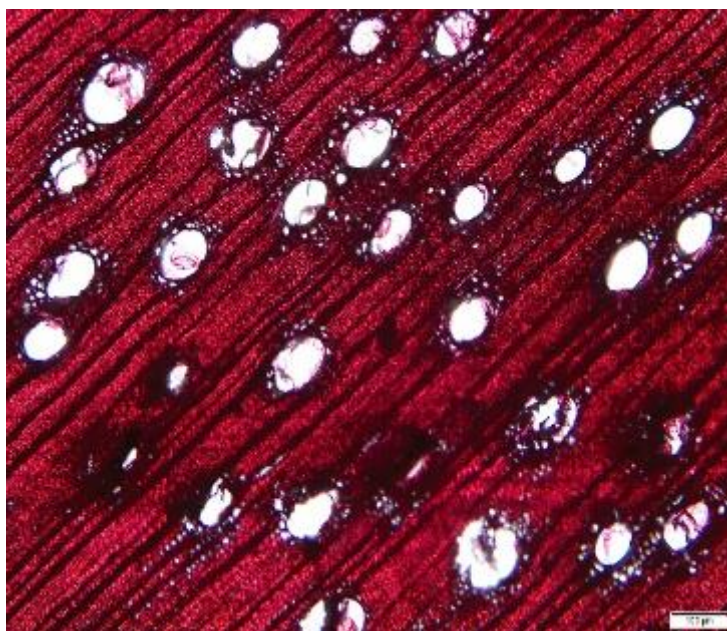


Figura 27 – Plano transversal com elementos de vasos de *E. cloeziana* (aumento de 10x).

Fonte: O autor.

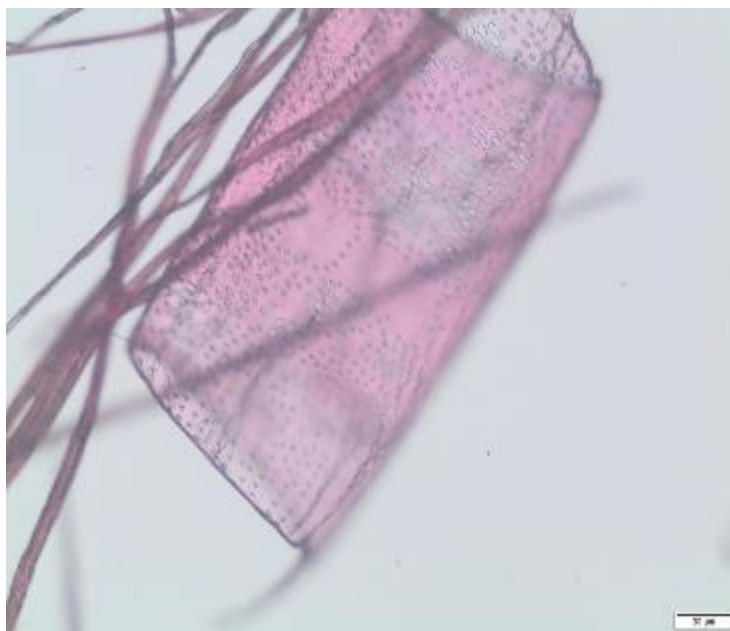


Figura 28 – Elemento isolado de vaso de *E. paniculata* (aumento de 20x).

Fonte: O autor.

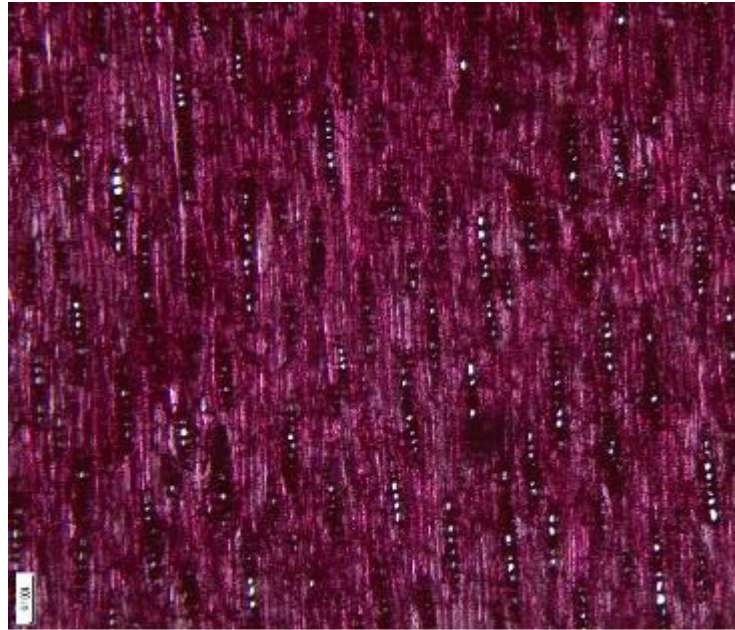


Figura 29 – Elementos de raios de *E. grandis* (aumento de 10x).

Fonte: O autor.

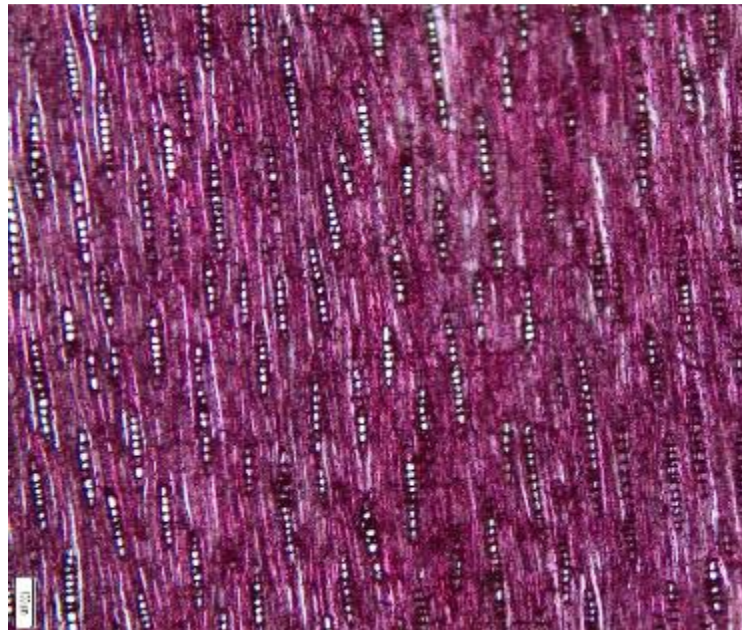


Figura 30 – Elementos de raios de *E. urophylla* (aumento de 10x).

Fonte: O autor.



Figura 31 – Elementos de raios de *E. tereticornis* com raros elementos bisseriados (aumento de 10x).

Fonte: O autor.

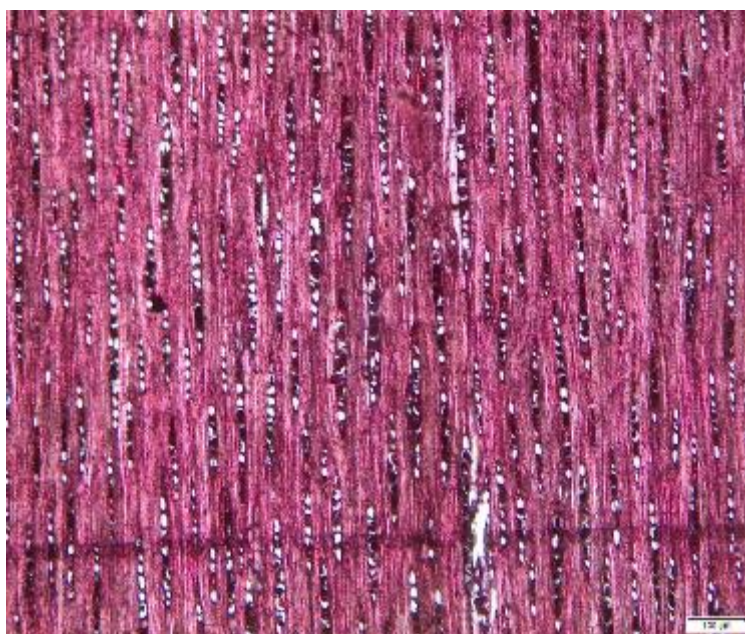


Figura 32 – Elementos de raios de *E. saligna* com elementos unisseriados (aumento de 10x).

Fonte: O autor.

Quanto ao comprimento das fibras predominam as curtas, variando de 0,84 mm para *E. cloeziana* a 2,02 mm para *E. paniculata*, Figuras 33 a 36. Os diâmetros da fibra são estreitos, variando de 0,012 mm (*E. cloeziana*) a 0,046 mm (*E. paniculata*), Figura 37. O diâmetro do lúmen é estreito e varia de 0,005 mm (*E. cloeziana*) a 0,034 mm (*E. paniculata*), Figuras 37. A

espessura da parede é média, variando de 0,0034 mm na espécie *E. urophylla*, Figura 39, a 0,0065 mm na espécie *E. microcorys*, Figura 40.

Os resultados das características anatômicas mostrados na Tabela 17 para as dez espécies deste trabalho se encontram próximos aos encontrados por outros autores, como *Abruzzi et al.* (2013), *Sobier et al.* (2003), *Calonego et al.* (2012), Tomazello Filho (1985), Alfonso (1983) e *Palermo et al.* (2015).

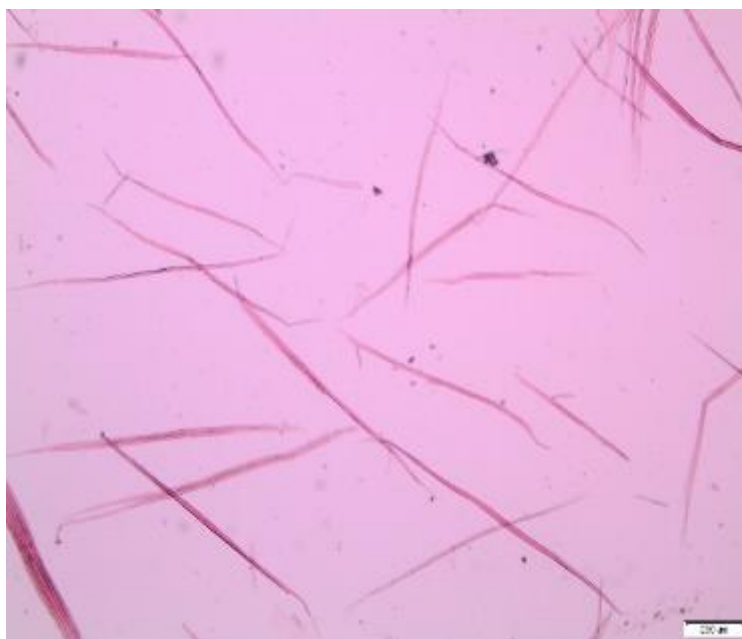


Figura 33 – Elementos de fibras de *E. cloeziana* (aumento de 5x).

Fonte: O autor.



Figura 34 – Elementos de fibras de *E. tereticornis* (aumento de 5x).

Fonte: O autor.



Figura 35 – Elementos de fibras de *E. propinqua* (aumento de 5x).

Fonte: O autor.



Figura 36 – Elementos de fibras de *E. saligna* (aumento de 5x).

Fonte: O autor.

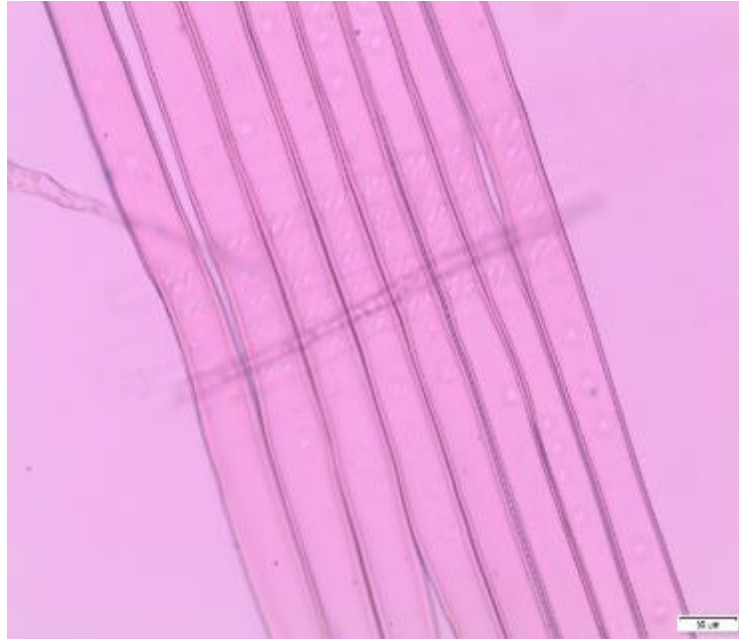


Figura 37 – Elementos de fibras de *E. paniculata* (aumento de 20x).

Fonte: O autor.



Figura 38 – Elementos de fibras de *E. camaldulensis* (aumento de 20x).

Fonte: O autor.

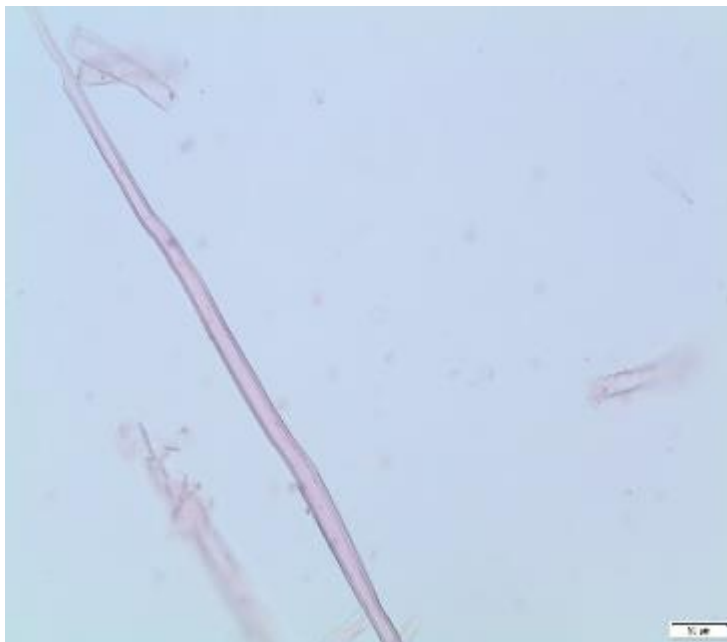


Figura 39 – Elementos de fibras de *E. urophylla* (aumento de 20x).

Fonte: O autor.

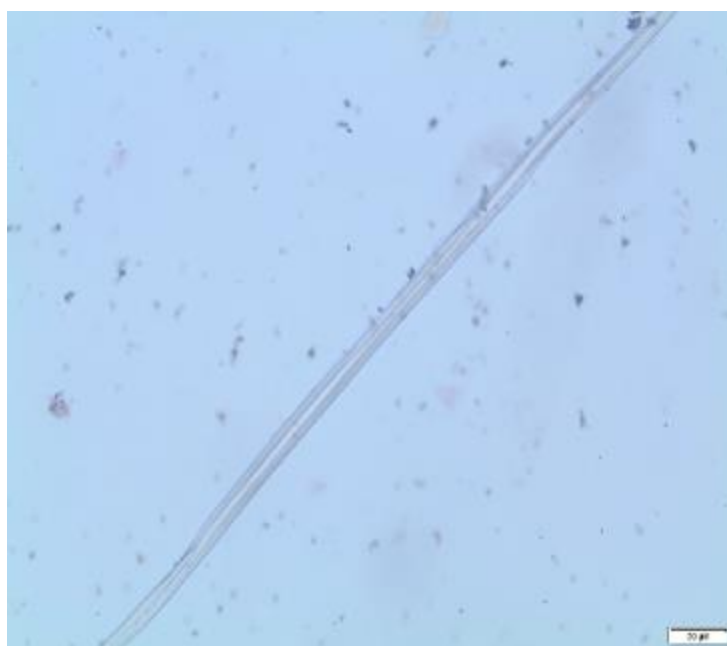


Figura 40 – Elementos de fibras de *E. microcorys* (aumento de 20x).

Fonte: O autor.

5.2. Síntese das propriedades físicas e mecânicas

As Tabelas 18 e 19 apresentam a síntese dos resultados das propriedades físicas e mecânicas das dez espécies de Eucalipto.

Tabela 18 - Síntese das propriedades físicas e mecânicas – Parte 1.

Espécies	ρ_{ap} (g/cm³)	CV (%)	RRt (%)	CV (%)	RTt (%)	CV (%)	f_{c0} (MPa)	CV (%)
<i>Cloeziana</i>	0,86	3,87	4,98	13,24	9,06	6,34	52,58	15,16
<i>Camaldulensis</i>	0,87	6,63	7,46	11,56	13,78	9,02	50,25	12,47
<i>Grandis</i>	0,67	5,33	6,25	15,23	9,16	8,22	40,00	17,26
<i>Urophylla</i>	0,74	2,81	5,93	10,92	9,22	10,76	46,00	11,64
<i>Paniculata</i>	1,09	3,64	8,51	8,76	10,39	7,84	74,00	13,21
<i>Alba</i>	0,71	4,23	8,11	11,64	12,12	12,21	47,00	14,95
<i>Tereticornis</i>	0,90	4,72	8,54	14,81	12,08	11,54	58,00	15,47
<i>Microcorys</i>	0,93	5,46	6,98	9,66	9,26	9,66	55,00	16,65
<i>Propinqua</i>	0,96	6,07	8,32	14,22	11,09	7,62	53,00	18,22
<i>Saligna</i>	0,73	4,51	7,21	10,47	10,83	12,23	47,00	13,60

Espécies	E_{c0} (MPa)	CV (%)	f_{t0} (MPa)	CV (%)	f_{t90} (MPa)	CV (%)	E_{t0} (MPa)	CV (%)
<i>Cloeziana</i>	14254	19,36	89,83	27,55	3,40	36,28	14459	14,66
<i>Camaldulensis</i>	16504	18,80	77,75	25,67	4,85	31,23	17803	13,92
<i>Grandis</i>	12697	22,65	70,00	23,65	3,00	34,36	14576	16,76
<i>Urophylla</i>	13391	24,11	84,00	28,60	4,20	31,64	15380	15,22
<i>Paniculata</i>	22886	17,63	147,00	31,14	5,50	33,25	23719	18,63
<i>Alba</i>	13409	19,81	69,00	26,55	3,60	25,62	13888	20,11
<i>Tereticornis</i>	17285	25,36	116,00	28,31	4,60	28,97	17509	22,14
<i>Microcorys</i>	17438	17,64	120,00	30,25	4,60	26,50	19327	18,71
<i>Propinqua</i>	15598	22,68	92,00	27,12	4,40	31,23	16045	21,98
<i>Saligna</i>	14260	19,32	85,00	29,52	4,10	35,21	15981	23,62

ρ_{ap} = densidade aparente
 CV = coeficiente de variação
 RRt = retratibilidade radial total
 RTt = retratibilidade tangencial total
 F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras
 F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras
 F_{t90} = resistência à tração normal às fibras
 E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras
 E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

Fonte: O autor.

Tabela 19 - Síntese das propriedades físicas e mecânicas – Parte 2.

Espécies	f_{v0} (MPa)	CV (%)
<i>Cloeziana</i>	17,64	15,54
<i>Camaldulensis</i>	15,78	13,08
<i>Grandis</i>	11,60	17,64
<i>Urophylla</i>	13,90	19,22
<i>Paniculata</i>	20,50	16,58
<i>Alba</i>	15,90	13,42
<i>Tereticornis</i>	16,20	15,62
<i>Microcorys</i>	17,00	14,19
<i>Propinqua</i>	16,40	18,05
<i>Saligna</i>	13,50	16,78

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
CV = coeficiente de variação

Fonte: O autor.

A madeira de árvores de *E. paniculata* foi a que apresentou maiores valores de densidade aparente a 12% de umidade (1,09 g/cm³), de resistência na compressão paralela às fibras (74 MPa), de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (20,5 MPa), de módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (22886 MPa), de resistência na tração paralela às fibras (147 MPa), de resistência na tração normal às fibras (5,50 MPa) e de módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (23179 MPa). Estes valores estão dentro dos valores encontrados no anexo E da ABNT NBR -7190 (1997). As madeiras dessa espécie, por apresentarem propriedades de densidade, resistência e módulo de elasticidade variando de médio a elevado, podem ser empregadas em usos estruturais.

Os valores determinados para as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. cloeziana* utilizada neste estudo ficaram próximos aos determinados por outros autores que estudaram as propriedades dessa espécie (LI *et al.*, 2017; GONÇALEZ *et al.*, 2006) e, também, aos valores fornecidos pela norma brasileira ABNT NBR -7190 (2022).

O lote de madeira de *E. camaldulensis* estudado apresentou valores das propriedades analisadas próximos aos apresentados pela norma brasileira acima citada e pela norma australiana Australian Standard, AS, 1720.2 (2006), para a madeira com teor de umidade da ordem de 12%. Para as madeiras de *E. alba* e *E. propinqua*, os resultados obtidos ficaram próximos aos valores verificados pela norma brasileira. A madeira de *E. tereticornis* apresentou o segundo maior valor de resistência à compressão paralela às fibras dentre as espécies deste

estudo e os valores das propriedades mecânicas estão próximos aos apresentados pela norma brasileira. A densidade da madeira de *E. tereticornis* foi próxima ao valor encontrado na norma australiana AS 1720.2 (2006) e na brasileira ABNT NBR 7190 (2022), para a madeira com teor de umidade da ordem de 12%. A madeira de *E. microcorys* apresentou o segundo maior valor médio de resistência à tração paralela às fibras (120 MPa), de resistência à tração normal às fibras (4,60 MPa) e de módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (19327 MPa), valores estes próximos aos apresentados pela norma brasileira. O valor da densidade aparente também ficou dentro do encontrado na referida norma e ligeiramente inferior ao verificado na norma australiana AS 1720.2 (2006).

Os valores das propriedades físicas e mecânicas obtidos para o lote de *E. urophylla* estão dentro dos valores encontrados na ABNT NBR 7190 (2022) e em outros estudos (ANDRADE *et al.*, 2010; PRASETYO *et al.*, 2017). As madeiras de *E. saligna* mostraram valores das propriedades físicas e mecânicas próximos aos verificados na normativa brasileira ABNT NBR 7190 (2022), australiana AS 1720.2 (2006) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT (2021). A madeira de *E. grandis* apresentou o menor valor de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente. Os valores das propriedades mecânicas desta espécie são coerentes aos verificados na norma brasileira supracitada, no IPT (2021) e em demais pesquisas (CALONEGO *et al.*, 2012), assim como a densidade aparente calculada nessa espécie também está de acordo com o verificado nas normas brasileira ABNT NBR 7190 (2022), australiana AS 1720.2 (2006) e pelo IPT (2021).

Na Tabela 20 são apresentados os resultados dos valores característicos de resistência ($f_{w,k}$) e também a categorização das espécies de madeira de Eucalipto nas classes de resistência (CR) do grupo das folhosas da norma ABNT NBR 7190 (2022).

Tabela 20 - Valores característicos de resistência ($f_{w,k}$ - MPa).

Espécies	$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$	$f_{t90,k}$	$f_{v0,k}$	CR
<i>Cloeziana</i>	32,09	60,13	2,08	11,81	C30
<i>Camaldulensis</i>	37,60	68,18	3,63	13,84	C30
<i>Grandis</i>	23,21	41,86	1,74	6,94	C20
<i>Urophylla</i>	42,11	54,00	3,66	8,94	C40
<i>Paniculata</i>	45,07	120,55	3,35	16,81	C40
<i>Alba</i>	31,71	56,11	2,43	12,93	C30
<i>Tereticornis</i>	47,06	71,06	3,73	9,92	C40
<i>Microcorys</i>	39,29	82,43	3,29	11,68	C30
<i>Propinqua</i>	44,21	64,75	3,67	11,54	C40
<i>Saligna</i>	32,84	28,88	2,86	4,59	C30

$F_{c0,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras
 $F_{t0,k}$ = resistência característica à tração paralela às fibras
 $F_{t90,k}$ = resistência característica à tração normal às fibras
 $F_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
CR = classe de resistência

Fonte: O autor.

Da Tabela 20 verificamos que dentre as espécies deste estudo o *E. Tereticornis* foi o que apresentou maior valor característico de resistência à compressão paralela às fibras (47,06 MPa), seguido de *E. Paniculata*, *E. Propinqua* e *E. Urophylla*. Estas espécies, por apresentarem altas resistências, são recomendadas para uso em aplicações estruturais na construção civil. As madeiras de *E. cloeziana*, *E. camaldulensis*, *E. alba*, *E. microcorys* e *E. saligna* podem apresentar um bom desempenho como elementos de cobertura, vigas, caibros, ripas e outros usos que requeiram madeira com propriedades de resistência mediana e densidade elevada. Já a espécie *E. grandis* foi a que apresentou o menor valor característico de resistência à compressão paralela às fibras e, portanto, sua classe de resistência é a menor da norma brasileira (C20). Entretanto, sua madeira pode ser usada para produção de Madeira Lamelada Colada, MLC (SEGUNDINHO *et al.*, 2021), já que esse produto engenheirado de madeira busca mais soluções robustos e estáveis em suas propriedades.

5.3. Correlações entre as propriedades físicas e mecânicas e a anatomia

A Tabela 21 apresenta os resultados (r de Pearson) da correlação entre variáveis anatômicas para o conjunto composto pelas dez espécies de Eucalipto.

Tabela 21 - Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas.

	Dv	Frv	Hr	Lr	Lf	Df	Dlu
Frv	<u>-0,75</u>						
Hr	0,52	<u>-0,76</u>					
Lr	0,03	-0,54	<u>0,69</u>				
Lf	0,49	<u>-0,74</u>	<u>0,96</u>	<u>0,70</u>			
Df	0,47	<u>-0,71</u>	<u>0,96</u>	<u>0,77</u>	<u>0,95</u>		
Dlu	0,51	<u>-0,71</u>	<u>0,93</u>	<u>0,71</u>	<u>0,91</u>	<u>0,98</u>	
Epf	0,02	-0,32	0,56	0,57	0,60	0,50	0,33

Dv = diâmetro do vaso

Frv = frequência dos vasos

Hr = altura dos raios

Lr = largura dos raios

Lf = comprimento das fibras

Df = diâmetro das fibras

Dlu = diâmetro do lúmen

Epf = espessura da parede da fibra

* *Correlações consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância) encontram-se sublinhadas.*

Fonte: O autor.

Da Tabela 21 verifica-se que a frequência dos vasos se correlaciona significativamente com quase todas as variáveis anatômicas, exceto com a largura dos raios, apresentando valores negativos em todas elas, isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui. O diâmetro do vaso tem correlação significativa negativa apenas com a frequência dos vasos. As variáveis altura e largura dos raios possuem correlação significativa positiva com quase todas as demais variáveis, exceto com a espessura da parede da fibra, isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta o mesmo acontece com o valor da outra variável. A largura da fibra, o diâmetro da fibra e o diâmetro do lúmen se correlacionam significativamente e positivamente entre si. A espessura da parede da fibra não apresentou correlação significativa com as demais características anatômicas.

Segundo Carlquist (1991), os raios tendem a mudar de dimensão de acordo com o desenvolvimento da árvore. Estudos também mostram que largura dos raios está correlacionada com o volume dos raios (SCUKANEC; PETRIC, 1977), já a altura está correlacionada com o comprimento dos vasos (GIRAUD, 1980; FERREIRINHA, 1965). A correlação dos raios com os elementos de vasos pode ser explicada pela derivação de novos raios a partir da subdivisão de iniciais fusiformes (SCUKANEC e PETRIC, 1977). Outros estudos indicam a correlação entre o comprimento das fibras e a largura do raio. Isto ocorre pois, como citado anteriormente,

os raios tendem a aumentar de tamanho com a idade da árvore (SCUKANEC; PETRIC, 1977; FERREIRINHA, 1965; LARSON, 1994).

Na Tabela 22 são apresentados os resultados das análises de correlação envolvendo as variáveis anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Eucalipto.

Tabela 22 - Resultados obtidos das correlações entre as variáveis anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas das madeiras.

	ρ_{ap}	RRt	RTt	f_{c0}	f_{t0}
Dv	0,03	0,21	-0,22	0,19	0,41
Frv	-0,45	-0,35	0,25	-0,52	<u>-0,67</u>
Hr	<u>0,76</u>	0,40	-0,12	<u>0,89</u>	<u>0,89</u>
Lr	<u>0,78</u>	0,56	0,26	<u>0,76</u>	0,59
Lf	<u>0,68</u>	0,49	-0,01	<u>0,81</u>	<u>0,77</u>
Df	<u>0,69</u>	0,43	-0,04	<u>0,84</u>	<u>0,77</u>
Dlu	0,58	0,37	-0,08	<u>0,77</u>	<u>0,70</u>
Epf	<u>0,82</u>	0,47	0,16	<u>0,64</u>	<u>0,64</u>

	f_{t90}	f_{v0}	E_{c0}	E_{t0}
Dv	0,40	-0,08	0,34	0,51
Frv	-0,58	-0,18	<u>-0,63</u>	<u>-0,75</u>
Hr	<u>0,73</u>	<u>0,72</u>	<u>0,92</u>	<u>0,93</u>
Lr	<u>0,65</u>	0,62	<u>0,78</u>	<u>0,71</u>
Lf	<u>0,69</u>	<u>0,65</u>	<u>0,87</u>	<u>0,90</u>
Df	<u>0,67</u>	<u>0,68</u>	<u>0,87</u>	<u>0,88</u>
Dlu	0,60	0,61	<u>0,79</u>	<u>0,81</u>
Epf	0,61	<u>0,66</u>	<u>0,72</u>	<u>0,69</u>

Dv = diâmetro do vaso

CV = coeficiente de variação

Frv = frequência dos vasos

Hr = altura dos raios

Lr = largura dos raios

Lf = comprimento das fibras

Df = diâmetro das fibras

Dlu = diâmetro do lúmen

Epf = espessura da parede da fibra

ρ_{ap} = densidade aparente

RRt = retratibilidade radial total

RTt = retratibilidade tangencial total

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras

F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras

F_{t90} = resistência à tração normal às fibras

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

* Correlações consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância) encontram-se sublinhadas.

Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 22 pode-se observar que a densidade aparente da madeira apresenta correlação altamente significativa com a espessura da parede das fibras. Também apresentou correlações boas com a largura e altura dos raios e com o comprimento e o diâmetro da fibra. A resistência à compressão paralela às fibras apresentou correlações com a altura e largura dos raios, comprimento das fibras, diâmetro das fibras e espessura da parede das fibras. Já o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras apresentou correlação forte com a altura dos raios. Também apresentou correlações positivas com a largura dos raios, comprimento e diâmetro das fibras, diâmetro do lúmen e espessura de parede das fibras. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras mostrou boas correlações positivas com a altura dos raios, comprimento e diâmetro das fibras e também com a espessura de parede das fibras.

A resistência à tração paralela às fibras e a resistência à tração normal às fibras apresentaram boas correlações positivas com a altura e largura dos raios, comprimento das fibras, diâmetro das fibras, diâmetro do lúmen e espessura da parede das fibras. Já o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras foi o que apresentou a correlação mais forte com a altura dos raios. Também apresentou correlações positivas com a largura dos raios, comprimento e diâmetro das fibras, diâmetro do lúmen e espessura de parede das fibras, e correlação negativa com a frequência dos vasos.

As características do elemento de vaso não apresentaram boas correlações com as propriedades físicas e mecânicas das amostras, exceto para a correlação negativa entre a frequência de vasos e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, frequência de vasos e a resistência à tração paralela às fibras e entre a frequência de vasos e o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras.

As retratibilidades não apresentaram correlações que pudessem ser consideradas significativas. Poubel *et al.* (2011) também não encontraram correlações entre a contração volumétrica e a densidade em madeiras de *E. pellita*. As retratibilidades da madeira podem ser afetadas por vários outros fatores, tais como teor de umidade, teor de extrativos, dimensões da peça e taxa de secagem.

As correlações demonstradas na Tabela 22 também foram analisadas por outros autores. Melo *et al.* (2016) encontraram correlação negativa entre a densidade básica e a frequência dos vasos e correlação positiva entre a espessura das paredes das fibras e a densidade em amostras de *Eucalyptus*. Essa correlação negativa entre a densidade e a frequência dos vasos também foi observada por Tomazello Filho (1985).

As fibras são as principais responsáveis pela sustentação da madeira e resistência aos esforços mecânicos. De acordo com os estudos de Shimoyama (1990) em espécies de

Eucalyptus verificou-se que as características anatômicas exercem grande influência na densidade, destacando-se a espessura da parede das fibras e o diâmetro do lúmen. Aumentos no comprimento das fibras e na espessura da parede das fibras implicam em aumentos na densidade da madeira (BARRICHELO e BRITO, 1984). Abruzzi *et al.* (2013) e Poubel *et al.* (2011) analisando espécies de *Eucalyptus* também encontraram fortes correlações entre a densidade e o diâmetro do lúmen. Outros autores encontraram correlações altamente significativas entre as características das fibras e a densidade em madeiras de *Eucalyptus* (ZIEMINSKA *et al.*, 2013) e também em outras espécies (HAMDAN *et al.*, 2020). As fibras também se correlacionam fortemente com a resistência à compressão paralela às fibras e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Lima *et al.* (2014) caracterizando espécies de *Eucalyptus* encontraram correlação positiva entre a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e a frequência dos raios ($R^2 = 0,62$), uma vez que os raios ajudam a impedir o deslizamento das camadas de crescimento pela força cisalhante.

5.4. Correlações entre a densidade aparente e as propriedades mecânicas

Na Tabela 23 são apresentados os resultados das análises de correlação envolvendo a densidade aparente e as propriedades mecânicas das madeiras de Eucalipto.

Tabela 23 - Resultados obtidos das correlações entre a densidade aparente e as demais propriedades das madeiras.

	RRt	RTt	f_{c0}	f_{t0}	f_{t90}	f_{v0}	E_{c0}	E_{t0}
ρ_{ap}	0,45	0,10	<u>0,91</u>	<u>0,85</u>	<u>0,80</u>	<u>0,87</u>	<u>0,90</u>	<u>0,82</u>

ρ_{ap} = densidade aparente

RRt = retratibilidade radial total

RTt = retratibilidade tangencial total

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras

F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras

F_{t90} = resistência à tração normal às fibras

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

* Correlações consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância) encontram-se sublinhadas.

Fonte: O autor.

Da Tabela 23 verifica-se que a densidade aparente afeta significativamente as propriedades mecânicas de resistência à compressão paralela às fibras, de resistência à tração normal e paralela às fibras, de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, de módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e de módulo de elasticidade na tração paralela às fibras. Aumentos nos valores da densidade implicam em aumentos nas propriedades mecânicas acima citadas. Diversos autores também encontraram boas correlações entre a densidade e as propriedades mecânicas de várias espécies de madeiras, cabendo destacar os estudos de Chen e Guo (2017), Christoforo *et al.* (2017), Dias e Lahr (2004), Lahr *et al.* (2016), Almeida *et al.* (2016) e Missanjo e Matsumura (2016).

A Tabela 24 apresenta os modelos de regressão linear obtidos (densidade aparente como variável independente) das correlações consideradas significativas pela ANOVA.

Tabela 24 - Resultados dos modelos de regressão linear dependente da densidade aparente.

Modelo	R ² (%)
$f_{c0} = - 1,624 + 63,72 \cdot \rho_{ap}$	83,83
$f_{t0} = - 41,19 + 161,0 \cdot \rho_{ap}$	72,59
$f_{t90} = 0,442 + 4,472 \cdot \rho_{ap}$	64,03
$f_{v0} = 2,104 + 16,24 \cdot \rho_{ap}$	76,93
$E_{c0} = - 1553 + 20479 \cdot \rho_{ap}$	80,98
$E_{t0} = 1409 + 18274 \cdot \rho_{ap}$	67,50

ρ_{ap} = densidade aparente
 F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras
 F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras
 F_{t90} = resistência à tração normal às fibras
 F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
 E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras
 E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

Fonte: O autor.

O modelo de regressão para a resistência à compressão paralela às fibras dependente da densidade aparente apresentou um alto coeficiente de determinação, superior aos encontrados por outros autores (CHEN; GUO, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; DIAS; LAHR, 2004; LAHR *et al.*, 2016). O modelo para estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras também apresentou um alto valor de coeficiente de determinação, superior às demais pesquisas (CHEN; GUO, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2017).

Os modelos de regressão para a resistência à tração paralela às fibras dependente da densidade aparente, para a resistência à tração normal às fibras dependente da densidade aparente e para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras também apresentaram bons valores de coeficiente de determinação. Os valores de coeficiente de determinação destas propriedades foram superiores aos encontrados em estudos para outras espécies florestais na literatura (CHRISTOFORO *et al.*, 2017; AQUINO *et al.*, 2017).

Já o modelo de regressão para a estimativa da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras apresentou valor de $R^2 = 76,93\%$. Mendes (1984) realizou análises de regressão para estimar a resistência ao cisalhamento em função da densidade aparente e concluiu que o modelo linear apresenta resultados satisfatórios.

5.5. Modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos na estimativa de propriedades da madeira de Eucalipto

Na Tabela 25 são apresentados os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades dos vasos (D_v , F_{rv}) da estrutura anatômica das madeiras e também os resultados da ANOVA (5% de significância), resultados esses obtidos com o propósito principal de avaliar a influência combinada das variáveis D_v e F_{rv} .

Tabela 25 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos vasos.

Modelos	R ² (%)	Valor-p (Modelo)	Valor-p (Termos)	
			Dv	Frv
$\rho_{ap} = 1,596 - 3,86 \cdot Dv - 0,0233 \cdot Frv$	42,41	0,145	0,149	0,058
$RRt = 9,08 - 5,7 \cdot Dv - 0,094 \cdot Frv$	12,83	0,618	0,839	0,443
$RTt = 10,75 - 6,0 \cdot Dv + 0,052 \cdot Frv$	6,71	0,784	0,875	0,750
$f_{c0} = 90,8 - 174 \cdot Dv - 1,433 \cdot Frv$	36,89	0,200	0,349	0,098
$f_{t0} = 167,6 - 221 \cdot Dv - 3,71 \cdot Frv$	46,99	0,108	0,626	0,087
$f_{t90} = 5,60 - 2,6 \cdot Dv - 0,0852 \cdot Frv$	34,11	0,232	0,859	0,209
$f_{v0} = 25,08 - 51,9 \cdot Dv - 0,248 \cdot Frv$	14,62	0,575	0,366	0,321
$E_{c0} = 26453 - 40164 \cdot Dv - 473 \cdot Frv$	45,20	0,122	0,473	0,077
$E_{t0} = 23983 - 13738 \cdot Dv - 438 \cdot Frv$	56,76	0,053	0,774	0,063

Dv = diâmetro do vaso
Frv = frequência dos vasos
 ρ_{ap} = densidade aparente
RRt = retratibilidade radial total
RTt = retratibilidade tangencial total
F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras
F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras
F_{t90} = resistência à tração normal às fibras
F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras
E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

Fonte: O autor.

Da Tabela 25 verifica-se que não foi encontrada correlação significativa entre as características dos vasos e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Eucalipto.

5.6. Modelos de regressão dependentes das propriedades dos raios na estimativa de propriedades da madeira de Eucalipto

Na Tabela 26 são apresentados os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades dos raios (Hr, Lr) da estrutura anatômica das madeiras e também os resultados da ANOVA (5% de significância), resultados esses obtidos com o propósito principal de avaliar a influência combinada das variáveis Hr e Lr.

Tabela 26 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades dos raios.

Modelos	R ² (%)	Valor-p (Modelo)	Valor-p (Termos)	
			Hr	Lr
$\rho_{ap} = 0,455 + 1,256 \cdot Hr + 9,93 \cdot Lr$	70,40	0,014	0,185	0,131
$RRt = 5,30 + 0,7 \cdot Hr + 101,5 \cdot Lr$	32,21	0,257	0,951	0,246
$RTt = 11,45 - 21,4 \cdot Hr + 165 \cdot Lr$	25,10	0,364	0,232	0,182
$f_{c0} = 20,45 + 145,5 \cdot Hr + 389 \cdot Lr$	83,68	0,002	0,013	0,235
$f_{t0} = 9,0 + 524 \cdot Hr - 216 \cdot Lr$	79,56	0,004	0,006	0,819
$f_{t90} = 2,113 + 9,18 \cdot Hr + 30,5 \cdot Lr$	58,16	0,047	0,150	0,455
$f_{v0} = 8,94 + 31,3 \cdot Hr + 86 \cdot Lr$	55,62	0,058	0,149	0,532
$E_{c0} = 5041 + 48906 \cdot Hr + 132654 \cdot Lr$	89,02	0,000	0,004	0,143
$E_{t0} = 6213 + 56556 \cdot Hr + 54359 \cdot Lr$	88,45	0,001	0,002	0,522

Hr = altura do raio

Lr = largura do raio

ρ_{ap} = densidade aparente

RRt = retratibilidade radial total

RTt = retratibilidade tangencial total

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras

F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras

F_{t90} = resistência à tração normal às fibras

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

* Modelos considerados significativos pela ANOVA encontram-se em negrito.

Fonte: O autor.

Da Tabela 26 foram considerados significativos os modelos para estimativa da densidade aparente, da resistência à compressão paralela às fibras, da resistência à tração paralela às fibras, da resistência à tração normal às fibras, do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras. O modelo que apresentou melhor coeficiente de determinação foi o do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, onde o fator Hr de forma isolada também foi considerado significativo. O modelo para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras apresentou o segundo maior R² (88,45%) e verificou-se que o fator Hr de forma isolada também se mostrou significativo. O modelo ser significativo não implica que os termos componentes desse devem ser ambos significativos, como verificado nos modelos que estimam a resistência à compressão, a resistência à tração e a densidade aparente. Nesses modelos as variáveis isoladas não explicam as variações, entretanto a soma de ambas explica. Portanto, o modelo foi significativo.

5.7. Modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras na estimativa de propriedades da madeira Eucalipto

A Tabela 27 apresenta os modelos de regressão linear dependentes apenas das propriedades das fibras (Lf, Df, Dlu, Epf) da estrutura anatômica das madeiras e a Tabela 28 apresenta os resultados da ANOVA (5% de significância), cabendo destacar que o propósito principal dessa abordagem consistiu em investigar a influência combinada das variáveis Lf, Df, Dlu e Epf. A variável Epf não pôde ser estimada pelos modelos (impossibilidade na determinação do respectivo coeficiente do modelo pelo método dos mínimos quadrados) e, por isso, foi desconsiderada.

Tabela 27 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras.

Modelos	R ² (%)
$\rho_{ap} = 0,398 - 0,316 \cdot Lf + 66,9 \cdot Df - 52,2 \cdot Dlu$	82,90
$RRt = 4,03 + 1,88 \cdot Lf + 131 \cdot Df - 156 \cdot Dlu$	29,26
$RTt = 9,03 + 0,30 \cdot Lf + 167 \cdot Df - 204 \cdot Dlu$	5,27
$f_{c0} = 29,1 - 11,7 \cdot Lf + 2723 \cdot Df - 1724 \cdot Dlu$	78,23
$f_{t0} = 23,8 - 4,5 \cdot Lf + 6118 \cdot Df - 4469 \cdot Dlu$	67,93
$f_{t90} = 2,05 + 0,21 \cdot Lf + 166 \cdot Df - 137 \cdot Dlu$	55,91
$f_{v0} = 9,72 - 5,59 \cdot Lf + 978 \cdot Df - 690 \cdot Dlu$	64,78
$E_{c0} = 6183 - 1104 \cdot Lf + 863102 \cdot Df - 622554 \cdot Dlu$	87,48
$E_{t0} = 7222 + 2198 \cdot Lf + 585200 \cdot Df - 440765 \cdot Dlu$	86,32

Lf = comprimento da fibra
Df = diâmetro da fibra
Dlu = diâmetro do lúmen
 ρ_{ap} = densidade aparente
RRt = retratibilidade radial total
RTt = retratibilidade tangencial total
F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras
F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras
F_{t90} = resistência à tração normal às fibras
F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras
E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

* Modelos considerados significativos pela ANOVA encontram-se em negrito.

Fonte: O autor.

Tabela 28 - Resultados dos modelos de regressão dependentes das propriedades das fibras.

Prop. Estimada	Valor-p (Modelo)	Valor-p (Fatores)		
		Lf	Df	Dlu
ρ_{ap}	0,010	0,257	0,013	0,014
RRt	0,525	0,703	0,727	0,600
RTt	0,950	0,968	0,771	0,651
f_{c0}	0,021	0,575	0,122	0,197
f_{t0}	0,063	0,948	0,265	0,297
f_{t90}	0,153	0,929	0,372	0,352
f_{v0}	0,082	0,436	0,104	0,137
E_{c0}	0,004	0,830	0,061	0,079
E_{t0}	0,005	0,677	0,177	0,193

Lf = comprimento da fibra

Df = diâmetro da fibra

Dlu = diâmetro do lúmen

ρ_{ap} = densidade aparente

RRt = retratibilidade radial total

RTt = retratibilidade tangencial total

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras

F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras

F_{t90} = resistência à tração normal às fibras

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

Fonte: O autor.

Das Tabelas 27 e 28 apenas os modelos para estimativa da densidade aparente, da resistência à compressão paralela às fibras, do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras foram considerados significativos. O modelo que apresentou o melhor coeficiente de determinação foi o do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($R^2 = 87,48\%$), entretanto as variáveis isoladas não foram significativas. O modelo para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras apresentou o segundo maior coeficiente de determinação ($R^2 = 86,32\%$). Para o modelo de estimativa da densidade aparente a partir das características das fibras o valor de R^2 foi 82,90%, já para o modelo para estimativa da resistência à compressão paralela às fibras o coeficiente de determinação foi igual a 78,23%.

5.8. Modelos de regressão para estimativa de propriedades mecânicas da madeira de Eucalipto

As propriedades dos elementos de vasos (Dv, Frv) não foram consideradas significativas na estimativa das propriedades das madeiras de Eucalipto. Das propriedades dos raios (Hr, Lr), apenas a Hr foi considerada significativa na estimativa de algumas propriedades, sendo não significativo o Lr em todas as estimativas. Nenhuma das propriedades das fibras (Lf, Df, Dlu), de forma isolada, afetaram de forma significativa na estimativa dos valores das propriedades. Cabe destacar que a densidade aparente foi considerada significativa (modelos de regressão linear simples) em boa parte das propriedades mecânicas. Dessa forma, a ρ_{ap} e a Hr foram consideradas conjuntamente na tentativa de obtenção de equações de maior precisão, sendo tais modelos apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados dos modelos de regressão dependentes da densidade aparente e da altura dos raios.

Modelos	R ² (%)	Valor-p (Modelo)	Valor-p (Termos)	
			ρ_{ap}	Hr
$RR_t = 3,90 + 3,11 \cdot \rho_{ap} + 4,1 \cdot Hr$	21,55	0,428	0,531	0,781
$RT_t = 8,88 + 5,68 \cdot \rho_{ap} - 17,4 \cdot Hr$	10,85	0,669	0,422	0,409
$f_{c0} = 2,70 + 39,0 \cdot \rho_{ap} + 96,7 \cdot Hr$	92,95	0,000	0,009	0,020
$f_{t0} = -26,7 + 78,0 \cdot \rho_{ap} + 325 \cdot Hr$	86,55	0,001	0,095	0,031
$f_{t90} = 0,67 + 3,17 \cdot \rho_{ap} + 5,09 \cdot Hr$	67,95	0,019	0,129	0,386
$f_{v0} = 2,45 + 14,25 \cdot \rho_{ap} + 7,8 \cdot Hr$	77,77	0,005	0,027	0,624
$E_{c0} = 145 + 10772 \cdot \rho_{ap} + 38011 \cdot Hr$	94,15	0,000	0,012	0,005
$E_{t0} = 3602 + 5738 \cdot \rho_{ap} + 49084 \cdot Hr$	90,55	0,000	0,195	0,004

ρ_{ap} = densidade aparente

Hr = altura do raio

RR_t = retratibilidade radial total

RT_t = retratibilidade tangencial total

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras

F_{t0} = resistência à tração paralela às fibras

F_{t90} = resistência à tração normal às fibras

F_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

E_{c0} = módulo de elasticidade na resistência à compressão paralela às fibras

E_{t0} = módulo de elasticidade na resistência à tração paralela às fibras

* Modelos considerados significativos pela ANOVA encontram-se em **negrito**.

Fonte: O autor.

Da Tabela 29 verifica-se que o modelo para estimativa do módulo de elasticidade na

compressão paralela às fibras apresentou o maior valor de coeficiente de determinação ($R^2 = 94,15\%$), sendo a variável isolada Hr significativa. O modelo para estimativa da resistência à compressão paralela às fibras apresentou o segundo melhor R^2 ($92,95\%$). Já o modelo para estimativa do módulo de elasticidade na tração paralela às fibras apresentou $R^2 = 90,55\%$. O modelo para estimativa da resistência à tração paralela às fibras apresentou $R^2 = 86,55\%$ enquanto que o modelo para estimativa da resistência ao cisalhamento apresentou $R^2 = 77,77\%$. Para a estimativa da resistência à tração normal às fibras o valor do R^2 foi igual a $67,95\%$. Os modelos para estimativa das retratibilidades (RRt e RTt) não foram significativos pela ANOVA.

A partir dos resultados obtidos (Tabela 25 à Tabela 29), nota-se que os modelos de regressão para estimar os valores de f_{t90} apresentaram os menores valores de R^2 . Os valores de R^2 para a estimativa de f_{v0} , f_{c0} e f_{t0} foram ligeiramente superiores aos obtidos na estimativa de f_{i90} , com os maiores valores de R^2 obtidos para a estimativa de E_{c0} e E_{t0} . Esta constatação é explicada pelo fato de os valores de resistência serem mais afetados pela existência de defeitos decorrentes da anatomia da madeira, que não são adequadamente percebidos pela análise microscópica. No entanto, mesmo com essa abordagem, foi possível obter modelos de regressão significativos para a estimativa de E_{c0} , E_{t0} , f_{v0} , f_{c0} e f_{t0} , que são de notável relevância para os profissionais que lidam com o projeto de estruturas de madeira.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a viabilidade de se utilizar modelos de regressão de significativa precisão na estimativa de propriedades mecânicas da madeira de Eucalipto utilizando-se informações da leitura microscópica das estruturas anatômicas da madeira em conjunto com a densidade aparente.

Foram determinadas excelentes representatividades dos modelos de regressão para estimativa das propriedades mecânicas, considerando a altura dos raios e a densidade aparente, justificados pelos coeficientes de determinação, que foram iguais a 94,15, 92,95, 90,55, 86,55, 77,77 e 67,95% para estimativa do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na tração paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistência à tração normal às fibras, respectivamente. Os modelos para a estimativa das retratibilidades não foram significativos.

Verificou-se que a frequência dos vasos se correlaciona significativamente com quase todas as demais variáveis anatômicas, com exceção do comprimento dos raios. As características dos elementos dos raios possuem correlação significativa positiva com quase todas as variáveis analisadas, sendo fortemente correlacionada com o comprimento e o diâmetro das fibras. O diâmetro do lúmen apresenta forte correlação positiva com o diâmetro da fibra e o comprimento da fibra está fortemente correlacionado com o diâmetro da fibra.

A largura e altura dos raios apresentaram fortes correlações com a densidade aparente, a resistência à compressão paralela às fibras e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras. As características das fibras apresentaram boas correlações com as propriedades físicas e mecânicas analisadas, com exceção das retratibilidades. Em relação aos vasos, por sua vez, apenas a sua frequência teve correlação significativa com o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras.

Aumentos nos comprimentos das fibras e na espessura da parede das fibras implicam em aumentos na densidade da madeira. As fibras se correlacionam fortemente com a resistência à compressão paralela às fibras, a resistência à tração paralela e normal às fibras e a resistência ao cisalhamento. A frequência dos raios ajuda a impedir o deslizamento das camadas de crescimento pela força cisalhante.

Assim, os modelos de regressão propostos são extremamente importantes, pois possibilitam estimar algumas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus* utilizando os parâmetros anatômicos (altura dos raios) e a densidade aparente, facilmente obtidos em

qualquer laboratório de materiais, dispensando a infraestrutura tecnológica de alto custo disponível apenas em poucos centros de pesquisas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

- Novos modelos de regressão devem ser propostos para estimativa de outras propriedades mecânicas de interesse para o projeto estrutural de acordo com a ABNT NBR 7190:2022;
- Estudar outras espécies de Eucaliptos e espécies híbridas, com o intuito de aumentar os intervalos de valores dos parâmetros anatômicos e de densidade aparente;
- Estender o estudo para espécies silviculturais com frande quantidade de variedades, como o *Pinus* sp.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRUZZI, R. C.; DEDAVID, B. A.; PIRES, M. J. R.; FERRARINI, S.F. ABRUZZI, R. C.; DEDAVID, B. A.; PIRES, M. J. R.; FERRARINI, S.F. Relationship between density and anatomical of different species of *Eucalyptus* and identification of preservatives. **Materials Research**, v.16, n.6, p.1428-1438, 2013. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000148

AHMED, S.; AROCHO, I. Analyzes of cost comparison and effects of change orders during construction: Study of a mass timber and a concrete building project. **Journal of Building Engineering**, v33, 101856, 2021.

ALFONSO, V.A. Caracterização anatômica da madeira e casca das principais espécies de *Eucalyptus*, cultivadas no Estado de São Paulo. **Silvicultura**, v.8, p.720-725, 1983.

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

ALTOÉ, E. S.; ALVAREZ, C. E. A questão da durabilidade das edificações unifamiliares em tora de eucalipto no Espírito Santo: proposta de melhorias no sistema construtivo a partir de detalhamento na fase de projeto. **Hábitat Sustentable**, v. 1, n. 1, p. 40-50, 2011.

ALZATE, S. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, E. saligna Sm. E E. grandis x urophylla. **Scientia Forestalis**, n.68, p.87-95, 2005.

ANDRADE, C. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; SOUSA, L. C. Estimation of the mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy. **Cerne**, v. 16, n. 3, p. 291-298, 2010. DOI: 10.1590/S0104-77602010000300005

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. **Parte 3**: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeira de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15066**. Madeira e pasta celulósica – Determinação das dimensões de fibras – Método de microscopia óptica. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

AUSTRALIAN STANDARD, **AS 1720.2**. Timber structures. Part 2: Timber properties. Sydney, 2006.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *E. grandis*. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABCP**. São Paulo. Anais. São Paulo, 1984.

BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSTON, R. D.; KLEINIG, D. A.; McDONALD, M. W.; TURNER, J. D. **Forest trees of Australia**. 5th ed. Collingwood, Australia: CsiroPublishing; 2006.

BORGES, C. C. **Potencialidade do uso de cruzetas de madeira tratada**. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BOTELHO, JR, J. A. (2006) **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de edifícios antigos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

BOTOSSO, P. C. (2009) **Identificação macroscópica de madeiras: Guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento**. Colombo, PR: Embrapa Florestas.

BOUKHATEM, M. N.; AMINE, F. M.; KAMELI, A.; SAIDI, F.; WALID, K.; MOHAMED, S. B. Quality assessment of the essential oil from *Eucalyptus globulus* Labill of Blida (Algeria) origin. **International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy**, v. 17, n. 3, p. 303-315, 2014. DOI:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.36.303

BRISOLA, S. H.; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis* x *E. urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para indústria. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p.317-330, 2011.

BRYANT, P. H.; TRUEMAN, S. J. Stem anatomy and adventitious root formation in cuttings of *Angophora*, *Corymbia* and *Eucalyptus*. **Forests**, v. 6 n. 4, p. 1227-1238, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/f6041227>

BUENO, I.G.A.; PICOLI, E.A.T.; ISAIAS, R.M.S.; LOPES-MATTOS, K.L.B.; CRUZ, C.D.; KUKI, K. N.; ZAUZA, E.A.V. Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. **Current Plant Biology**, v.22, 100136, 2020.

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

CABI. **The CABI encyclopedia of forest trees**. London: CPIGroup, 2013. 532 p.

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

CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D.; BALLARIN, A.W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.70, p. 453-460, 2012.

- CARLQUIST, S. Anatomy of vine and liana stems: review and synthesis. In: PUTZ, F. E.; MOONEY, H. A. (Ed.). **The biology of vines**. Cambridge: Cambridge University Press., p. 53 – 71, 1991.
- CARRILLO I.; AGUAYO, M.G.; VALENZUELA, S.; MENDONÇA, R.T. Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus Globulus* genotypes with different wood density. **Wood Research**, v.60, p.1-10, 2015.
- CATELOTTI, K.; KINGSFORD, R. T.; BINO, G.; BACON, P. Inundation requirements for persistence and recovery of river red gums (*Eucalyptus camaldulensis*) in semi-arid Australia. **Biological Conservation** v.184, p. 346-356, 2015.
- CAVALHEIRO, R. S. **Aplicação de diferentes técnicas de microscopia para análises da região adesiva em madeira lamelada colada (MLC)**, 2018. 185 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- CHAUHAN, S. S.; AGGARWAL, P. Segregation of *Eucalyptus tereticornis* Sm. clones for properties relevant to solid wood products. **Annals of Forest Science** v. 68, p. 511–521, 2011.
- 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.
- CHENG, Y.; CHAN, A.H.C.; HOLLOWAY, D.; NOLAN, G. Anisotropic material behaviour under compression of *Eucalyptus nitens* with high moisture content. **Construction and Building Materials**, v.314, 124788, 2022.
- CHILE BIO. Brasil analiza la utilización de eucalipto genéticamente modificado. **ChileBio**, 2014. Disponível em: < <https://www.chilebio.cl/2014/08/20/brasil-analiza-la-utilizacion-de-eucalipto-geneticamente-modificado/>>. Acesso em: 8 de abril de 2022.
- 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

CRAWFORD, P. **Tree identification manual for the north-east Darling Downs region.**

Oakey: North East Downs Landcare Group, 2011. 91 p.

CORADIN, V.T.R.; CAMARGOS, J.A.A. **A Estrutura Anatômica da Madeira e Princípios para a sua Identificação.** - Brasília: LPF, 2002.

COUTO, N.G.; ALMEIDA, J.P.B.; GOVONE, J.S.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R. Relação entre a resistência ao cisalhamento e a resistência à compressão paralela às fibras de madeiras folhosas. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 319-327, 2020.

COSTA, A. **Coletâneas de Anatomia da Madeira.** Florianópolis: Universidade do Estado de Santa Catarina. UDESC, 2001. 42 p. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>>. Acesso em: 22 de março de 2022.

DARZI, S.; KARAMPOUR, H.; BAILLERES, H.; GILBERT, B.P.; MCGAVIN R.L. Experimental study on bending and shear behaviors of composite timber sandwich panels. **Construction and Building Materials**, v.259, 119723, 2020.

DE ARAUJO, V.; Timber construction as a multiple valuable sustainable alternative: main characteristics, challenge remarks and affirmative actions. **International Journal of Construction Management**. p.1-10, 2021.

DE ARAUJO, V.; VASCONCELOS, J.; GAVA, M.; CHRISTOFORO, A.; LAHR, F.; GARCIA, J. What does Brazil know about the origin and uses of tree species employed in the housing sector? Perspectives on available species, origin and current challenges. **International Forestry Review**, v.23, n.3, p.392-404, 2021.

DE ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

DELUCIS, R. A.; CADEMARTORI, P. H. G.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A. Decay resistance of four fast-growing eucalypts wood exposed to three types of fields. **MaderasCiencia y Tecnología**, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2016.

- DERIKVAND, M.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; JIAO, H.; CHAN, A.; NOLAN, G. Short-term and long-term bending properties of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. **Construction and Building Materials**, v.211, p.952-964, 2019.
- 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.
- DREW, D.M.; DOWNES, G.M.; BATTAGLIA, M. CAMBIUM, a process-based model of daily xylem development in *Eucalyptus*. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, n. 264, p. 395-406, 2010.
- DOI, B. T.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Does reverse growth dominance develop in old plantations of *Eucalyptus saligna*? **For Ecol Manage** v. 259, n. 9, p.1815–1818, 2010. DOI:10.1016/j.foreco.2009.05.031
- DUTT, D.; TYAGI, C. H. Comparison of various eucalyptus species for their morphological, chemical, pulp and paper making characteristics. **Indian Journal of Chemical Technology**, v. 18, n. 2, p. 145-151, Mar 2011.
- ELLI, E.F., SENTELHAS, P.C., FREITAS, C.H.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A. Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v.45, 117464, 2019.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistemas de Produção Embrapa. [Home page]. **EMBRAPA**, 2019. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 8 de setembro de 2021.
- FABROWSKI, F. J.; MUÑIZ, G. I. B; KAKASHIMA, T.; NISGOSKI, S.; KLOCK, U. Investigação da presença de óleo essencial em *Eucalyptus smithii* R. T. Baker por meio da anatomia do seu lenho e casca. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 95-106, 2003.
- FERNÁNDEZ, M.E.; BAROTTO, A.J.; MARTÍNEZ MEIER, A.; GYENGE, J.E.; TESÓN, N.; QUIÑONES MARTORELLO, A.S.; MERLO, E.; DALLA SALDA, G.; ROZENBERG, P.; MONTEOLIVA.S. New insights into wood anatomy and function relationships: How Eucalyptus challenges what we already know. **Forest Ecology and Management**, v.454, 117638, 2019

FERREIRA, M. **Escolha de espécies de eucalipto**. Piracicaba: IPEF, 1979. 17 p. (IPEF. Circular Técnica IPEF, 47).

FERREIRINHA, M. P. Appraisal of the variation in the micrographic fibre characteristics within and between trees of tropical hardwood species. **Garcia de Orta**, v.13, p.383-390, 1965.

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

FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z.; SPEGIORIN, L.; ROCHA, F.T. Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 179-191, dez. 2000.

FRIGOTTO, T.; NAVROSKI, M.C.; AGUIAR, N.S.; FELIPPE, D.; BORSOI, G.A.; PEREIRA, M.O.; LOVATEL, Q.C. Desempenho de espécies e procedências de *Eucalyptus* no Planalto Norte Catarinense, Brasil. **Scientia Forestalis**, v.48 (127), e3273, 2020.

GIRAUD, B. Correlations between wood anatomical characters in *Entandophragma utile*(Meliaceae). **IAWA Bull NS**, v.1, p.73-77, 1980.

GIUNTOLI, J.; BARREDO, J.I.; AVITABILE, V.; CAMIA, A.; CAZZANIGA, N.E.; GRASSI, G.; JASINEVICIUS, G.; JONSSON, R.; MARELLI L.; ROBERT, N.; AGOSTINI, A.; MUBAREKA, S. The quest for sustainable forest bioenergy: win-win solutions for climate and biodiversity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.159, 2022.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2ª aproximação)**. Belo Horizonte: PRODEPEF-Centro de Pesquisa Florestal do Cerrado, 1978. 66 p. (PNUD/FAO/IBDF/BRA-45. Série Técnica, 11).

GONÇALEZ, J. C.; BRENDA, L. C. S.; BARROS, J. F. M.; MACEDO, D. G.; JANIN, G.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hilleb Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329-341, 2006.

GONZAGA, A. L. **Madeira Uso e conservação**. Brasília, DF. Cadernos Técnicos nº 6. IPHAN/MONUMENTA, 246 p., 2006.

GUIMARÃES JR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; MORI, F. A. Seleção de clones de *Eucalyptus urophylla* para produção de compensados. **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 443-452, 2012. DOI: 10.1590/S0104-77602012000400017

GUIMARÃES JR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; MORI, F. A. Painéis compensado de eucalipto: estudo de caso de espécies e procedências. **Cerne**, v. 15, n. 1, p. 10-18, 2009.

GUIMARÃES ROSA, J. **Grande sertão: veredas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1956.

GUTIÉRREZ, G. L. **Atlas del eucalipto**. Información y ecología. Seville, Spain: Inia-Icona;1976.

HAMDAN, H.; NORDAHLIA, A.S.; ANWAR, U.M.K. *et al.* Anatomical, physical, and mechanical properties of four pioneer species in Malaysia. **J Wood Sci**, v.66, n.59, 2020. DOI.org/10.1186/s10086-020-01905-z

HAMÚ, D. Construindo cidades e protegendo florestas. In: ZENID, G. J. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo : SVMA / IPT, 2009. p. 5-6.

HEIDARI, A.; YOUNESI, H.; RASHIDI, A.; GHOREYSHI, A. Adsorptive removal of CO₂ on highly microporous activated carbons prepared from *Eucalyptus camaldulensis* wood: Effect of chemical activation. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n.2, p.579-588, 2014.

HILLS, W. E.; BROWN, A. G. **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: Csiro Publishing, 1931. 402 p.

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.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Relatório 2021** – Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 25 Março de 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Informações sobre madeiras**. IPT 2021. Disponível em:<https://www.ipt.br/informacoes_madeiras2.php>. Data de acesso: 18 de maio de 2021.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS (IAWA), List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin** 3, p. 219-332, 1989.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; PRATA, J. G.; TRIANOSKI, R.; SILVA, L. S. Evaluation of the use potential of nine species of genus *Eucalyptus* for production of veneers and plywood panels. **Cerne**, v.19, n2, p. 263–269, 2013. DOI:10.1590/S0104-77602013000200010

JONES, M.; ANDREAS, M.; STEFANO, L.; ALEXANDER, B.; SAB, J. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. **Materials and Design**, v.87, 108397, 2020.

JESUS, R.M.; VITAL, B.R. Comparação entre densidade de matrizes e de clones de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 82-90, 1986.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940. 523 p.

JUÍZO, C. G. F.; ROCHA, M. P.; BILA, N. F. Avaliação do rendimento em madeira serrada de eucalipto para dois modelos de desdobro numa serraria portátil. **Floram**, v.21, n.4, p. 543–550, 2014. DOI:10.1590/2179-8087.062213

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

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1968. v.1.

KUZMAN, M.K.; KLARIC, S.; BARCIC, A.P.; VLOSKY, R.P; JANAKIESKA, M.M.; GROŠELJ, P. Architect perceptions of engineered wood products: An exploratory study of selected countries in Central and Southeast Europe. **Construction and Building Materials**

v.179, p. 360-370, 2018.

LACLAU, J. P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J. P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input–output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 210, n. 1-3, p. 375-391, 2005. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.02.028

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

LAHR, F.A.R.; CHAHUD, E.; ARROYO, F.N.; CHRISTOFORO, A.L.; RODRIGUES, E.F.C.; ALMEIDA, J.P.B; AQUINO, V.B.M. Análise da representatividade e da densidade aparente como estimadoras do módulo de elasticidade da classe C60 da NBR7190:1997. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 139-146, 2022.

LAHR, F. A. R.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; ARAUJO, V. A.; VASCONSELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Physical-Mechanical Characterization of *Eucalyptus urophylla* Wood. **Eng. Agric.**, v. 37, n. 5, p. 900-906, 2017.

LAHR, F. A. R.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; ARAUJO, V. A.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L. Wood utilization of *Eucalyptus grandis* in structural elements: densities and mechanical properties. **Eng. Agric.**, v. 38, n. 5, p. 642-647, 2018.

LARSON, P.R. **The Vascular Cambium Development and Structure**; Springer: New York, NY, USA, pp. 363–451, 1994.

LAW, B.; CHIDEL, M. **Effects of logging on nectar-producing *Eucalypts* spotted gum and grey ironbark**. n. 07/138. Kingston: RIRDC, 2007. 61 p.

LEME, M.M.V.; VENTURINE, O.J.; LORA, E.E.S.; ALMEIDA, W.; ROCHA, M.H.; DIAS, T.A.C.; OLMO, O.A. Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from *Eucalyptus* in an industrial batch kiln. **Renewable Energy**, 180, p.232-244, 2021.

LI, C.; Weng, Q.; Chen, J.B.; Li, M.; Zhou, C.; Chen, S.; Zhou, W.; Guo, D.; LU, C.; Chen, J.C.; Xiang, D.; Gan, S. Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **New Forests**, v.48, p.33-49, 2017.

LI, S.; CHEN, F.; JIA, J.; LIU, Z.; GU, H.; YANG, L.; WANG, F.; YANG, F. Ionic liquid-mediated microwave-assisted simultaneous extraction and distillation of gallic acid, ellagic acid and essential oil from the leaves of *Eucalyptus camaldulensis*. **Separation and Purification Technology**, v. 168, p. 8-18, 2016.

LIANG, L.; WU, T.; FANG, G.; XU, F.; JIAO, J.; DENG, Y.; XIONG, Z. Predicting bleachability of Eucalyptus mechanical pulp by moisture content-dependent near-infrared spectroscopy. **Industrial Crops & Products**, v.180, 114730, 2022.

LIAO, Y.; TU, D.; ZHOU, J.; ZHOU, H.; YUN, H.; GU, J.; HU, C. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers. **Construction and Building Materials**, v.132, p.508-515, 2017.

LIMA, I.L.; LONGUI, E.L.; Freitas, M.L.M.; Zanatto, A.C.S.; Zanata, M.; Florsheim, S.M.B.; Bortoletto Jr., G. Physical-Mechanical and anatomical characterization in 26-year-old *Eucalyptus resinifera* wood. **Floresta e Ambiente**, v.21, p.91-98, 2014.

LIMA, I.L.; LONGUI, E.L.; SANTINI Jr., L.; GARCIA, J.N.; FLORSHEIM, S.M.B. Effect of fertilization on cell size in wood of *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 465-472, out./dez. 2010.

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, M.D.R.; BARROS JR, U.O.; ASSIS, M.R.; MELO, I.C.N.A.; FIGUEIREDO, I.C.R.; PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v48, 128, e3302, 2020.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003.

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](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.016)

MARCHESAN, R.; MATTOS, P. P.; SHIMIZU, J. Y. **Caracterização física, química e anatômica da madeira de *Eucalyptus microcorys* F. Muell.** Comunicado Técnico 133. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 5 p.

MARINI, L. J.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus* sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 147-158, 2021. DOI: [10.1590/s1678-86212021000100499](https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100499)

MARTINS, M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; GONÇALVES, M. T. T.; Y FILIPE, A. P. Simulação em uso dos pisos de madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbium maculata*. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 151-156, 2013.

MARTINS-CORDER, C.; MORI, E. S.; KAGEYAMA, P. Y.; LOPES, C. R. Estudo da variabilidade isoenzimática em *Eucalyptus urophylla* das Ilhas Flores. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. 43-49, 1996.

MELO, E.L.; SILVA, J.R.M.; NAPOLI, A.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; NASCIMENTO, D.F.R. Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbium citriodora*. **Scientia Forestalis**, v.44, p. 611-621, 2016. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.07](https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.07)

MENDES, A.P. (1984). **Resistência da madeira ao cisalhamento**. São Carlos, 1984. 157p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MENDES, L. M.; LOSCHI, F. A. P.; PAULA, L. E. R.; MENDES, R. F.; GUIMARÃES JR, J. B.; MORI, F. A. Potencial de utilização da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* na produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 69-75, 2011. DOI: [10.1590/S0104-77602011000100008](https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000100008).

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; MENDONÇA, L. L.; GUIMARÃES JR, J. B.; MORI, F. A. Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 329-336, 2014. DOI:

10.1590/01047760.201420021273

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

MONTEIRO, T. C., LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; ANDRADE, H. B. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 115, p. 493-505, 2017. DOI:

10.18671/scifor.v45n115.07

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS. 2000. 112p.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; ALVES, R. C. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural**, v.44, n.12, p.2186-2192, 2014.

MUGUNGA, C. P.; KOOL, D.; VAN WIJK, M. T.; MOHREN, G. M. J; GILLER, K. E. Water use by short rotation *Eucalyptus* woodlots in southern Rwanda. **Agroforestry Syst**, v. 89, n.6, p.1119–1139, 2015. DOI:10.1007/s10457-015-9843-5

NAHUZ, M. A. R. **Madeiras brasileiras e exóticas / Brazilian and exotic timber**. Caxias do Sul: Lettech Editora, 2007. 108 p

NEIVA, D.; FERNANDES, L.; ARAÚJO, S.; LOURENÇO, A.; GOMINHO, J.; SIMÕES, R.; PEREIRA, H. Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. **Ind. Crops. Prod**, v. 66, p 89-95, 2015. DOI:10.1016/j.indcrop.2014.12.016

NAVARATNAM, S.; HUMPHREYS, M.; MENDIS, P.; NGUYEN, K.T.Q.; ZHANG, G. Effect of roof to wall connection stiffness variations on the load sharing and hold-down forces of Australian timber-framed houses. **Structures**, v.27, p.141-150, 2020.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Ciência Florestal**, v.8, n.1, p.67-76, 1998.

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

NOGUEIRA, M. C. J. A.; ARAUJO, V. A.; VASCONCELOS, J. S.; PRATAVIERA, F.; VASCONCELOS, J. C.; CRUZ, J. N.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus alba* para construção civil. **Ci. Madeira**, v.10, n. 1, p. 71-77, 2019 a. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n1p71-77

NOGUEIRA, M. C. J. A.; ALMEIDA, D. H.; ARAUJO, V. A.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H.; LAHR, F. A. R. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus saligna* para estruturas de madeira. **Ambiente Constr.**, v.19, n. 2, p. 233-239, 2019 b.

NOGUEIRA, M. C. J. A.; ARAUJO, V. A., VASCONSELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Sixteen properties of *Eucalyptus tereticornis* wood for structural uses. **Biosci. J.**, v. 36, n. 2, p. 449-457, 2020.

NUBERG, I. K.; GUNN, B.; TAVUNE, M.; SUMAREKE, A.; KRAVCHUK, O. Evaluation of short-rotation coppicing fuelwood production systems for Papua New Guinea. **Biomass and Bioenergy**, v. 78, p. 126-139, 2015. DOI:10.1016/j.biombioe.2015.04.010

PAGEL, C.L.; LENNER, R.; WESSELS, C.B. Investigation into material resistance factors and properties of young, engineered *Eucalyptus grandis* timber. **Construction and Building Materials**, v.230, 117059, 2020.

PALERMO, G.P.; LATORRACA, J.V.; CARVALHO, A.M.; CALONEGO, F.W.; SEVERO, E.T.D. Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.73, p.775-780, 2015.

PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; TRINDADE, C.; RIBEIRO, G. T. **Cultivo de eucalipto: implantação e manejo.** Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2013.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4th ed. New York: McGraw Hill, 1980. 422 p.

PÁSZTOR, Y. P. C. Estudo comparativo do comportamento das espécies *Eucalyptus alba* Reinw e *E. decaiseana* Blune, na região de São Paulo. **IPEF**, n. 11, p. 1-16, 1975.

Disponível em <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr11/cap01.pdf>>. Data de acesso: 01 de fevereiro de 2022.

PEREIRA, P. I. G. **Avaliação de vigas de madeira de Castanho tendo por base a classificação visual e ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia Universidade do Moinho, 2015.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. p. 113.

PERRIN, M.; YAHYAOU, I.; GONG, X. Acoustic monitoring of timber structures: Influence of wood species under bending loading. **Construction and Building Materials**, v. 208 p. 125-134, 2019.

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

PIRALHO, M.; FLORES, D.; SOUZA, V. B.; QUILHÓ, T.; KNAPIC, S.; PEREIRA, H. Evaluation on paper making potential of nine *Eucalyptus* species based on wood anatomical features. **Industrial Crops and Products**. v. 54, p. 327-334, 2014.

PERES, M. L.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R. Vergamento da madeira de *Eucalyptus grandis* plasticizada por vaporização e cozimento. **Ambiente construído**, v. 15, n.2, p. 169-177, 2015.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; GONÇALVES, F. B.; MOTTA, J. P. Comportamento de adesão da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* proveniente de três condições de manejo. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 2, p. 323-330, 2012. DOI: 10.5902/198050985739

POONIA, P. K.; TRIPATHI, S. Moisture-related properties of *Eucalyptus tereticornis* after thermal modification. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, p.153-158, 2016.

POUBEL, D. S. et al. Estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v.18, n.2, p.117-126, 2011.

PRASETYO, A.; AISO, H.; ISHIGURI, F.; WAHYUDI, I.; WIJAYA, I.P.G.; OHSHIMA, J.; YOKOTA, S. Variations on growth characteristics and wood properties of three *Eucalyptus* species planted for pulpwood in Indonesia. **Tropics**, v.26, p. 59-69, 2017.

QUEIROZ, D. L.; ZANOL, K. M. R.; OLIVEIRA, E. B.; ANJOS, N.; MAJER, J. Feeding and oviposition preferences of *Ctenarytainaspatulata* Taylor (Hemiptera, Psyllidae) for *Eucalyptus spp.* and other Myrtaceae in Brazil. **Revista Brasileira de Entomologia**, v.54, p. 149–153, 2010.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V.F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n.92, p.411-418,2011.

REDMAN, A. L.; BAILLERES, H.; TURNER, I.; PERRÉ, P. Characterisation of wood-water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade. **Wood SciTechnol**, v.50, p. 739-757, 2016.

REZENDE, J. B.; PEREIRA, J. R.; BOTELHO, D. O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão territorial. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 1 – 7, 2013.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun. 2004.

ROCKWOOD, D. L. History and status of *Eucalyptus* improvement in Florida. **International Journal of Forestry Research**2012, p. 1–10, 2012.

SASS, J. E. **Botanical microtechnique**. 2nd ed. Ames: Iowa State College Press. 1951. 228 p.

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

SCUKANEC, V.; PETRIC, B. 1977. The relationship between wood ray shape and ray volume percentage in beech. **IAWA Bull**, v.3, p.57-59, 1977

SEGUNDINHO, P. G. A.; LAHR, F. A. R.; BERTOLINI, M. S.; REGAZZI, A. J.; CARREIRA, M. R. Variation of modulus of elasticity obtained through the static bending method considering the S/h ratio. **Wood Research**, v. 60, p. 189–200, 2015.

SEGUNDINHO, P.G.A.; OLIVEIRA, R.G.E.; GONÇALVES, F.G.; LOPES, N.F.; ALVES, R.C.; AZEVEDO, M.S. Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Matéria** (Rio J.), n. 26 v. 03 (2021). DOI <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13030>

SETTE JR, C. R.; OLIVEIRA; I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v. 36, n. 6, 2012. DOI: [10.1590/S0100-67622012000600019](https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600019)

SEVERO, E. T. D.; SANSIGOLO, C. A.; CALONEGO, F. W.; BARREIROS, R. M. Kraft pulp from juvenile and mature woods of *Corymbia citriodora*. **BioResources**. v. 8, n. 2, p. 1657-1664, 2013.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 179 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

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, D. E. M.; AZEVEDO, L. A. S.; POLTRONIERI, T. P. S. Evaluation of the resistance of eucalypt species to rust (*Puccinia psidii* Winter). **Summa Phytopathologica**, v. 40, n. 1, p. 54-62, 2014. DOI: [10.5380/rf.v34i1.2371](https://doi.org/10.5380/rf.v34i1.2371)

SILVA, J.C.; MATOS, J. L. M.; OLIVEIRA, J. T. S. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Floresta**, v.34, n.1, p.13-22, 2004.

- SHIMOYAMA, V.R.S. (1990). **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** Piracicaba. 93p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1990.
- SOARES, L.S.Z.R.; SILVA, D.A.L.; PANZERA, T.H.; DIAS, A.M.P.G.; LAHR, F.A.R. CHRISTOFORO, A.L. Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente. **Matéria** (UFRJ) v.26, n.03, 2021.
- SOBIER, H; MENZEMER, C.C.; SRIVATSAN, T.S. An investigation and understanding of the mechanical response of Palmyrah timber. **Materials Science & Engineering**, v.354, p.257-269, 2003.
- SOERIANEGARA, I.; LEMMENS, R. H. M. J. (Eds). **Plant Resources of South-East Asia: timber trees: minor commercial timbers.** Wageningen: PROSEA, 1993
- SOUSA JÚNIOR, W.P. **Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* e de *Eucalyptus urophylla* oriundas dos municípios de Turmalina e de Paraopeba (MG).** 2004. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- TALGATTI, M.; SILVEIRA, A.G.; BALDIN, T.; OLIVEIRA, L.H.; SANTINI, E.J.; PASA, D.L. Caracterização anatômica de clones comerciais de *Eucalyptus* para a produção de papel. **BIOFIX Scientific Journal**, v.5 n.1 p.65-70, 2020. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67625](https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67625)
- TRAINOR, C. R. New island records of *Eucalyptus alba sensulato* for Damar and Romang, Lesser Sundas, Indonesia. **Northern Territory Naturalist**, v. 23, p. 45-53, 2011.
- TREVISAN, R.; ROSA, M.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; GATTO, D. A. Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1385-1393, 2017.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Circular IPEF**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr.1985.

TORRES, P. M. A.; PAES, J. B.; NASCIMENTO, J. W. B.; BRITO, F. M. S. Caracterização físico mecânica da madeira jovem de *Eucalyptus camldulensis* para aplicação na arquitetura rural. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 109-117, 2016.

TURNBULL, J. W. **Geographic variation in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell.** 1979. Tese (Doutorado) – AustralianNationalUniversity, Canberra, Austrália, 1979.

VALLE, M. L. A.; SILVA, J. C.; DELLA LUCIA, R. M.; EVANGELISTA, W. V. Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 481-490, 2013. DOI: 10.5902/198050989292

WALLIS, N. K. **Australian timber handbook.** 3 ed. Sydney, Austrália: Angus & Robertson, 1970. 379 p.

WENTZEL, M.; KODDENBERG, T.; MILITZ, H. Anatomical characteristics of thermally modified *Eucalyptus nitens* wood in an open and closed reactor system. **Wood Material Science Engineering**, v.15, n.4, p.223-228, 2019.

ZANUNCIO, A.J.V.; CARVALHO, A.G.; CARNEIRO, A.C.O.; TOMAZELLO FILHO, M.; VALENZUELA, P.; GACITÚA, W.; COLODETTE, J.L. Anatomical, ultrastructural, physical and mechanical wood properties of two-year-old *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones. **Revista Árvore**, v.42, n.2, e420201, 2018.

ZBONAK, A.; BUSH, T.; GRZESKOWIAK, V. Comparison of tree growth, wood density and anatomical properties between coppiced trees and parent crop of six eucalyptus genotypes. **IUFRO - Improvement and Culture of Eucalypts**, p. 1-10, Durban, 2007.

ZIEMINSKA, K.; BUTLER, D.; GLEASON, S.; WRIGHT, I.; WESTOBY, M. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. **AoB Plants**, v.5, 2013.