

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

ANDRÉA DE SOUZA ALMEIDA

ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
DE MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS ATRAVÉS DA
ANÁLISE DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE
MERCÚRIO

SÃO CARLOS
2022

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

ANDRÉA DE SOUZA ALMEIDA

**ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
DE MADEIRAS TROPICAIS BRASILEIRAS ATRAVÉS DA
ANÁLISE DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE
MERCÚRIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

São Carlos
2022



Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Andréa de Souza Almeida, realizada em 16/02/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (UFES)

Prof. Dr. Rodrigo Teixeira Santos Freire (UFSJ)

Profa. Dra. Marilia da Silva Bertolini (UNESP)

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

À memória de minha mãe Sandra e do meu sogro José Eduardo, os quais lutaram bravamente para eu ter uma boa educação, sempre incentivando meus estudos, e me dando a base para que hoje eu possa continuar honrando todos os seus ensinamentos. Meu eterno amor e gratidão.

À minha irmã Amanda e meu pai Valmir, pelo apoio.

À minha avó Maria Ruth, por todo apoio e carinho.

Ao meu marido Gabriel, por ser a luz da minha vida e por todo apoio e incentivo proporcionados a mim, sempre com muito amor, perseverança e companheirismo.

À minha amiga Perla de Carli Lima, minha irmã de coração que conheci no LaMEM, que sempre me amparou e me incentivou bravamente em toda a elaboração deste trabalho. Minha eterna gratidão.

Ao prof. Dr. André Luis Christoforo, por todo ensinamento e apoio proporcionado para a realização deste trabalho. Meus agradecimentos por toda orientação e ajuda.

Ao prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, por abrir as portas do LaMEM para que este trabalho fosse realizado, por todo ensinamento, ajuda e amizade.

Aos professores Pedro de Alcântara Gutemberg Segundinho e Rodrigo Teixeira dos Santos Freire pelas considerações realizadas no Exame de Qualificação e pelos valiosos ensinamentos.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, que contribuíram substancialmente para a minha formação acadêmica.

RESUMO

ALMEIDA, A. S. **Estimativa das propriedades físico-mecânicas de madeiras tropicais brasileiras através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio**. 2022.101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

Os ensaios de caracterização completa da madeira requerem equipamentos caros, de grande porte e encontrados em grandes centros de pesquisa e, além disso, necessitam de tempo e de mão de obra qualificada. Dessa forma, a caracterização mínima e a simplificada se constituem em uma ferramenta muito utilizada na elaboração de projetos, pois tornam o trabalho mais fácil, rápido e de menor custo. Dentre as propriedades da madeira, a densidade aparente se apresenta como um estimador confiável das demais propriedades utilizadas no dimensionamento de projetos de estruturas de madeira. Assim, muitos pesquisadores analisaram a interação do valor da densidade da madeira com as demais propriedades através de equações empíricas e obtiveram bons resultados. Dentre os fatores anatômicos, a porosidade é preponderante na influência sobre o valor da densidade da madeira. Além disso, a porosidade também está diretamente relacionada com a permeabilidade (grande influenciadora no processo de tratamento preservante e na produção de painéis), propriedades térmicas e dielétricas, estabilidade dimensional e resistência mecânica das madeiras. Tendo em vista a grande influência da porosidade em propriedades importantes das madeiras e a busca por modelos matemáticos cada vez mais precisos, este trabalho visou gerar modelos de regressão multivariáveis para a estimativa das propriedades físico-mecânicas de madeiras tropicais brasileiras em função ora da porosidade, obtida através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, ora da densidade aparente e ora por ambas as propriedades, com a finalidade de gerar equações com elevados graus de precisão. Para tal, serão investigadas oito espécies de madeiras tropicais, sendo elas: Cedro-Amazonense (*Cedrela spp.*), Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianensis*), Cupiúba (*Goupia glabra*), Jatobá (*Hymenaea spp.*), Angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Champanhe (*Dipteryx odorata*). Para as oito espécies, foram realizadas as caracterizações completas de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997), obtidos os valores médios para as porosidades através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio e, por fim, foi elaborada a análise estatística para a obtenção dos modelos de regressão multivariáveis. Como resultado, as estimativas das propriedades de $f_{c,0}$, $f_{v,0}$, $f_{s,0}$, $E_{c,0}$, E_M e $E_{t,0}$, considerando a densidade aparente e a porosidade como variáveis livres [$f(\rho_{12\%}; Po)$], apresentaram coeficientes de determinação maiores quando comparados aos modelos considerando ou apenas a densidade aparente ou apenas a porosidade como estimadora dessas propriedades. A $f_{t,90}$ foi possível apenas considerando a porosidade como variável independente, onde apresentou R^2 igual a 51,91%. A

dificuldade em estimar a $f_{s,0}$ e a $f_{t,90}$ pode ser parcialmente explicada por questões anatômicas da madeira, mostrando o quanto a porosidade foi determinante no sucesso da estimativa da $f_{t,90}$. Por fim, o fator da anatomia considerada pela porosidade, aprimorou os modelos de regressão multivariáveis na estimativa das propriedades de $f_{H,0}$ e E_M , pois são propriedades que sofrem grande influência dos fatores anatômicos considerados pelos valores médios de porosidade das espécies de madeira.

Palavras-chave: Estimativa das propriedades da madeira. Porosidade. Densidade aparente. Modelos de Regressão.

ABSTRACT

ALMEIDA, A. S. **Estimation of the physical-mechanical properties of Brazilian tropical woods through the analysis of porosimetry by mercury intrusion.** 2022. 101 f. Thesis (PhD in Civil Engineering) – Civil Engineering Department, Federal University of São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP, Brazil, 2022.

Full wood characterization tests require expensive and large equipment, found only in research centers and, moreover, require time and skilled labor. Thus, the minimal and simplified characterization are a tool widely used in the design of projects, as they make work easier, faster and cheaper. Among the properties of wood, the bulk density presents itself as a reliable estimator of the other properties used in the design of timber structure projects. As a result, many researchers have analyzed the interaction of the wood density value with the other properties through empirical equations and obtained good results. Among the anatomical factors, porosity is preponderant in influencing the value of wood density. In addition, porosity is also directly related to permeability (a major influence on the preservative treatment process and in the production of wood panels), thermal and dielectric properties, dimensional stability and mechanical strength of timber. Considering the great influence of porosity on important properties of wood and the search for mathematical models that are increasingly accurate, this study aims to generate multivariable regression models for the estimation of the physical-mechanical properties of Brazilian tropical woods as a function of porosity, obtained through the analysis of porosimetry by mercury intrusion, sometimes of the bulk density and sometimes for both properties, with the purpose of generating equations with a high degree of precision. For this purpose, eight species of tropical wood will be investigated, namely: Cedro-Amazonense (*Cedrela spp.*), Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianensis*), Cupiúba (*Goupia glabra*), Jatobá (*Hymenaea spp.*), Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) and Champagne (*Dipteryx odorata*). For the eight species, complete characterizations were carried out according to ABNT NBR 7190 (1997), the average values for porosities were obtained through the analysis of porosimetry by mercury intrusion and, finally, the statistical analysis was carried out to obtain of the multivariable regression models. As a result, the estimates of the properties of $f_{c,0}$, $f_{v,0}$, $f_{s,0}$, $E_{c,0}$, E_M and $E_{t,0}$, considering the bulk density and porosity as free variables [$f(\rho_{12\%}; Po)$], showed higher coefficients of determination when compared to models considering either only apparent density or only porosity as an estimator of these properties. The $f_{t,90}$ was possible only considering the porosity as an independent variable, where it presented R^2 equal to 51,91%. The difficulty in estimating $f_{s,0}$ and $f_{t,90}$ can be partially explained by anatomical issues of the wood, showing how much porosity was crucial in the success of estimating $f_{t,90}$. Finally, the anatomy factor considered by porosity improved the multivariable regression models

in estimating the properties of $f_{H,0}$ and E_M , as they are properties that are strongly influenced by the anatomical factors considered by the average porosity values of wood species.

Keyword: Estimation of wood properties. Porosity. Bulk density. Regression Models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da molécula de celulose.	20
Figura 2 - Aspectos moleculares das microfibrilas.	21
Figura 3 - Modelo estrutural para a lignina para a angiosperma <i>Fagus sylvatica</i>	21
Figura 4 - Açúcares componentes das hemiceluloses.	22
Figura 5 - Estrutura celular da madeira.	24
Figura 6 - Tipos de células da madeira. a) Elementos Vasculares, b) Células de Parênquima axial, c) Células de Parênquima Radial, d) Fibras.	25
Figura 7 - Tipos de textura.	26
Figura 8 - Parede celular a camadas de crescimento: (a) corte transversal; (b) vista lateral. ..	26
Figura 9 - Estrutura macroscópica da madeira.	27
Figura 10 - Direções principais da madeira.	28
Figura 11 - Corte transversal da madeira de Cedroarana. (A) parênquima com aumento de 40x. (B) Presença de tilo.	36
Figura 12 - Ensaios de compressão perpendicular (a) e de tração paralela (b) às fibras da madeira de Cupiúba.	65
Figura 13 - Imagem do equipamento Micromeritics Poresizer - 9320.	66
Figura 14 - Ajuste da Equação 28 aos dados.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência das coníferas previstas pela NBR 7190/1997.	30
Tabela 2 - Classes de resistência das dicotiledôneas previstas pela NBR 7190/1997.	30
Tabela 3 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie Cedrela spp.....	35
Tabela 4 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie Cedrela spp..	35
Tabela 5 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie Cedrelinga cateniformis.	37
Tabela 6 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie Cedrelinga cateniformis.....	37
Tabela 7 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades de resistência e de rigidez (corrigidos para UR=12% umidade), densidade aparente a 12% de umidade, e tenacidade à fratura para a espécie Cedrelinga cateniformis.	38
Tabela 8 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades de resistência e de rigidez (corrigidos para UR=12% umidade), densidade aparente a 12% de umidade, e tenacidade à fratura para a espécie Erisma uncinatum Warm.	40
Tabela 9 - Valores médios (Xm) da literatura para as propriedades de retração total radial (RTR) e retração total tangencial (RTT) para a espécie Erisma uncinatum Warm.	40
Tabela 10 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie Erisma uncinatum Warm.....	41
Tabela 11 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da Erisma uncinatum Warm.....	41
Tabela 12 - Valores médios (Xm) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Quarubarana.	42
Tabela 13 - Valores médios (Xm) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Tatajuba.....	43
Tabela 14 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie Bagassa guianensis.....	43
Tabela 15 - Valores médios (Xm) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie Bagassa guianensis.	44

Tabela 16 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie <i>Goupia glabra</i>	45
Tabela 17 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da <i>Goupia glabra</i>	45
Tabela 18 - Valores médios (\bar{X}_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Cupiúba.	46
Tabela 19 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie <i>Hymenaea stilbocarpa</i> Hayne.	47
Tabela 20 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie <i>Hymenaea stilbocarpa</i> Hayne.	48
Tabela 21 - Valores médios (\bar{X}_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Jatobá (<i>Hymenaea</i> spp.).	48
Tabela 22 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie <i>Dinizia excelsa</i> Ducke.	49
Tabela 23 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie <i>Dinizia excelsa</i> Ducke.	50
Tabela 24 - Valores médios (\bar{X}_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie <i>Dipteryx odorata</i>	51
Tabela 25 - Valores médios (\bar{X}_m) para algumas propriedades de resistência e de rigidez da <i>Dipteryx odorata</i>	51
Tabela 26 - Valores médios (\bar{X}_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Champagne (Cumaru).	52
Tabela 27 - Valores médios para a porosidade de 10 espécies tropicais brasileiras.	62
Tabela 28 – Propriedades físicas e mecânicas investigadas.	65
Tabela 29 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cedro-Amazonense.	69
Tabela 30 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cedroarana.	71
Tabela 31 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cambará.	72
Tabela 32 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Tatajuba.	74
Tabela 33 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de	

Cupiúba.....	75
Tabela 34 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Jatobá.	77
Tabela 35 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Angelim-vermelho.	78
Tabela 36 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Champanhe (Cumaru).	80
Tabela 37 - Coeficientes obtidos com base nas relações entre valores de rigidez e entre os valores característicos de resistência por espécie e para o conjunto envolvendo todas as espécies.	81
Tabela 38 - Valores estimados da porosidade pela Equação 28 sobre os resultados da densidade aparente da pesquisa de Duarte et al. (2020b).	83
Tabela 39 - Resultados dos modelos de regressão considerando a densidade aparente como estimadora das demais propriedades.	84
Tabela 40 - Valores estimados da resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras pela equação $f_{v,0} = 1.981 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0.563) + 21.958$ sobre os resultados da densidade aparente da pesquisa de Christoforo et al. (2020).	85
Tabela 41 - Valores estimados de propriedades mecânicas pela densidade aparente média da pesquisa de Christoforo et al. (2017) com base nos modelos da Tabela 39.	86
Tabela 42 - Resultados dos modelos de regressão considerando a porosidade como estimadora das demais propriedades.	87
Tabela 43 - Valores estimados das propriedades abordadas na pesquisa de Christoforo et al. (2017) com base nos modelos da Tabela 42.	88
Tabela 44 - Resultados dos modelos de regressão linear múltipla.	89
Tabela 45 - Coeficientes de determinação dos modelos dependentes da densidade aparente, da porosidade e de ambas as propriedades conjuntamente.	90

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
1.2 Justificativas	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 A madeira como material para construção civil.....	17
2.2 Origem e classificação das árvores	19
2.2.1 Composição química da madeira.....	19
2.2.1 Estrutura microscópica da madeira.....	23
2.2.3 Estrutura macroscópica da madeira	27
2.3 Propriedades físicas e mecânicas da madeira.....	29
2.4 Propriedades das madeiras tropicais analisadas	34
2.4.1 Cedro Amazonense (<i>Cedrela spp.</i>).....	34
2.4.2 Cedroarana (<i>Cedrelinga cateniformis</i> Ducke).....	36
2.4.3 Cambará (<i>Erisma uncinatum</i> Warm).....	38
2.4.4 Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i>).....	42
2.4.5 Cupiúba (<i>Goupia glabra</i>)	44
2.4.6 Jatobá (<i>Hymenaea spp.</i>).....	46
2.4.7 Angelim Vermelho (<i>Dinizia excelsa</i> Ducke).....	48
2.4.8 Champanhe (<i>Dipteryx odorata</i>).....	50
2.5 Estimativas das propriedades da madeira.....	52
2.6 Porosidade e densidade da madeira.....	57
2.7 Análise de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	59
2.8 Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Caracterização completa das espécies investigadas	64
3.2 Porosidade	66
3.3 Modelos de Regressão.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material versátil e renovável que vem sendo amplamente utilizado na construção civil desde os primórdios da humanidade (SCHWEINGRUBER, 2007; PATACHIA; CROITORU, 2016). Além de ser um material de origem natural, alia boas propriedades como elevada resistência mecânica, baixo peso próprio e custos reduzidos de produção. Por consequência, a madeira é eleita como um dos materiais mais vantajosos para a aplicação em estruturas e, no Brasil, é um material muito utilizado em estruturas de pontes, passarelas, coberturas e pisos (ALMEIDA *et al.*, 2016; DUARTE *et al.*, 2020a).

Segundo o Sistema Nacional Brasileiro (2016), a área total de florestas nativas brasileiras é de 485,8 milhões de hectares. Em 2016, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBA-2017), foi computada uma área de 7,84 milhões de hectares de florestas plantadas brasileiras (CHRISTOFORO *et al.*, 2020a). Segundo Steege *et al.* (2016), a Floresta Amazônica possui cerca de 16 mil espécies de madeiras tropicais e, dentro dessa variedade, por volta de 4 mil espécies ainda não foram catalogadas.

Porém, no Brasil, mesmo com a grande disponibilidade do material e grande potencial do setor madeireiro proveniente da grande implantação de áreas certificadas, a madeira não atinge o percentual de utilização em construções alcançado por países desenvolvidos como os EUA, Canadá, Noruega e Suécia, entre outros. Esses países têm utilizado amplamente a madeira em construções residenciais e demais áreas, pois investem fortemente em políticas públicas de incentivo ao uso de produtos derivados de madeira. Isso decorre da grande busca pela utilização de produtos renováveis na construção civil, visando à sustentabilidade e a diminuição da geração de resíduos no canteiro de obras (ERIKSSON *et al.*, 2012).

No Brasil, o baixo consumo da madeira em estruturas é consequência do grande preconceito gerado pela falta de informações tecnológicas a respeito do potencial de utilização desse material em aplicações estruturais (WANG; TOPPINEN; JUSLIN, 2014). Assim, o processo de caracterização completa das espécies de madeira, onde se obtém todos os valores das suas propriedades físicas e mecânicas, é a primeira etapa na elaboração de projetos estruturais bem dimensionados, o que possibilita a compreensão do comportamento dos materiais frente às diferentes condições de serviço (MADEJ; SZCZERBA, 2016; DUARTE *et al.*, 2020b).

Porém, os ensaios de caracterização da madeira requerem equipamentos caros, de

grande porte e, geralmente, encontrados em grandes centros de pesquisa. Além disso, necessitam de tempo e de mão de obra qualificada (CHRISTOFORO *et al.*, 2020a). Dessa forma, a caracterização mínima e a simplificada, onde são utilizadas relações matemáticas entre as propriedades de resistência e rigidez, se constituem em uma ferramenta muito utilizada na elaboração de projetos por tornarem o trabalho mais fácil, rápido e barato (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016).

Dentre as propriedades da madeira, a densidade aparente é eleita como uma das propriedades mais importantes, pois se apresenta como um estimador confiável das demais propriedades utilizadas no dimensionamento de projetos de estruturas de madeira. A ABNT NBR 7190/1997: Projeto de estruturas de madeira, determina as classes de resistências das madeiras de acordo com a resistência característica à compressão paralela às fibras, a qual é influenciada significativamente pela densidade aparente (SILVA *et al.*, 2018; MORANDO *et al.*, 2019; VARANDA *et al.*, 2019; DUARTE *et al.*, 2020b).

Tendo em vista a grande influência da densidade nas propriedades da madeira, bem como a necessidade de gerar equações e métodos simplificados de caracterização, pesquisadores analisaram a interação do valor da densidade da madeira com as demais propriedades através de equações empíricas (ALMEIDA *et al.*, 2015). Dentre os fatores anatômicos, a porosidade é preponderante na influência sobre o valor da densidade da madeira. Além disso, a porosidade também está diretamente relacionada com a permeabilidade (grande influenciadora no processo de tratamento preservante e na produção de painéis), propriedades térmicas e dielétricas, estabilidade dimensional e resistência mecânica das madeiras (DING *et al.*, 2008; PLOETZE e NIEMZ, 2010; ZAUER *et al.*, 2013).

A técnica de intrusão de mercúrio é uma técnica simples e muito utilizada para determinar a porosidade e estimar o comportamento dos materiais cerâmicos (LORENTE-AYZA *et al.*, 2017; NICKERSON *et al.*, 2019). Nos últimos anos, essa técnica vem sendo amplamente empregada na obtenção da porosidade de compósitos à base de madeira e outros produtos lignocelulósicos, pois fornece informações precisas de distribuição, volume e área de superfície dos poros. Com esses dados, é possível obter a densidade e, por essa razão, a técnica se apresenta como uma das mais adequadas para a compreensão da anatomia de diferentes espécies de madeira (MOURA *et al.*, 2005; GIGAC *et al.*, 2017; DUARTE *et al.*, 2020a; DUARTE *et al.*, 2020b).

A possibilidade de obtenção de uma equação empírica que relacionasse a porosidade com a densidade aparente de madeiras tropicais brasileiras foi avaliada por Duarte *et al.*

(2020b). Tendo em vista os bons resultados oferecidos pela técnica de intrusão de mercúrio para a obtenção da porosidade, os autores utilizaram tal técnica para obtenção dessa propriedade de 10 espécies com densidades entre 0,4 e 1,1 g/cm³. Através de análise estatística com a aplicação de modelo de regressão linear, conseguiram desenvolver uma equação relacionando a densidade com a porosidade com fator de determinação (R^2) igual a 0,88, valor que permitiu considerar a porosidade como bom estimador da densidade aparente e sugeriram mais pesquisas a fim de refinar as correlações obtidas.

Como a madeira é um material de origem natural e suas propriedades são fortemente influenciadas pelas características anatômicas, são imprescindíveis estudos que visam definir a interação entre as propriedades através de equações empíricas em busca de simplificação para obtenção das mesmas (ALMEIDA *et al.*, 2015). Neste contexto, pesquisadores como Dias e Lahr (2004), Araújo (2007), Almeida *et al.* (2014), Almeida *et al.* (2015), Cavalheiro *et al.* (2016), Christoforo *et al.* (2020a), entre outros, avaliaram a possibilidade de estimar diversas propriedades da madeira através da densidade (variável independente) com a aplicação de modelos de regressão e obtiveram bons resultados.

Cabe destacar que a elaboração da revisão de literatura foi embasada em trabalhos encontrados através de base de dados como *Web of Science*, Portal Capes Periódicos, *Scopus*, *Engineering Village*, *Google scholar* e páginas de revistas nacionais que contemplam estudos sobre estruturas de madeira, madeiras e seus derivados.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo gerar modelos de regressão multivariáveis para a estimativa das propriedades físico-mecânicas de madeiras tropicais brasileiras em função dos valores de porosidade, da densidade, e por ambas as propriedades.

1.2 Justificativas

A relevância deste trabalho justifica-se sob diversos aspectos, como: a necessidade de obtenção de equações e métodos simplificados de caracterização, a grande influência da densidade e da porosidade nas propriedades físico-mecânicas e no engenheiramento da madeira, o sucesso na obtenção do valor de porosidade de materiais lignocelulósicos através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, a consideração da porosidade como bom estimador da densidade aparente, a possibilidade do uso de modelos de regressão para a estimativa das propriedades da madeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta conceitos sobre a utilização da madeira na construção civil, morfologia e química da madeira, propriedades físico-mecânicas da madeira, características das madeiras tropicais analisadas, método de análise de porosimetria por intrusão de mercúrio e estimativas das propriedades da madeira.

2.1 A madeira como material para construção civil

A madeira, material de origem biológica, é utilizada como material de construção civil desde os primórdios da humanidade. Por ser um material renovável, sustentável, reutilizável, e possuir boas propriedades físicas e mecânicas, a madeira é eleita como um dos materiais mais vantajosos para ser utilizado na construção civil. Porém, grande parte dos usuários finais mostram grande preconceito quanto à utilização da madeira devido à falta de informações tecnológicas sobre o seu grande potencial de utilização (WANG; TOPPINEN; JUSLIN, 2014).

O setor da construção civil é um dos maiores poluidores do meio ambiente e, com o aumento da conscientização ambiental, a utilização da madeira no setor vem sendo incentivada por muitos países desenvolvidos como Canadá, EUA, Noruega, Suécia, Austrália, entre outros. Dessa forma, ampliou-se a utilização da madeira e de produtos derivados à base de madeira como material estrutural nesses países (WANG; TOPPINEN; JUSLIN, 2014).

Segundo Wang, Toppinen e Juslin (2014) e Christoforo *et al.* (2020a), além da produção da madeira utilizada na construção civil requerer menos energia quando comparada à produção do aço, concreto e alvenaria, a sua utilização em edificações proporciona boa eficiência energética. Isso se deve à sua boa propriedade isolante, o que favorece menor consumo energético durante o ciclo de vida da construção. Edifícios de aço e concreto chegam a incorporar e consumir de 12 a 20% a mais de energia que os de madeira, que também se destacam na diminuição de resíduos, já que edifícios de aço e concreto produzem de 6 a 16% mais resíduos sólidos, tanto na produção quanto na construção.

No Brasil, há a predominância de habitações de concreto e alvenaria, técnicas tradicionais e baseadas em matérias-primas não renováveis. Com a adoção de incentivos fiscais, disseminação das informações técnicas sobre a madeira e capacitação profissional, há a possibilidade de reversão desse quadro. As edificações de madeira requerem menos tempo

de execução, são limpas e, com a adoção de políticas públicas para a construção de moradias sociais com esse material, estariam acessíveis a todas as classes sociais. Desse modo, o Brasil estaria apto a atingir o máximo do potencial de utilização da madeira na construção, como alguns países europeus e da América do norte (ARAUJO *et al.*, 2018).

O setor da construção civil brasileira permanece estagnado há 20 anos e ainda estão sendo desenvolvidas políticas públicas que visam inovar o segmento. As políticas socioeconômicas de habitação estão exercendo maior influência sobre a evolução das tecnologias de construção, como o incentivo da utilização da madeira em edificações (CASTRO; KRUGER, 2013; ARAUJO *et al.*, 2019). Além de componentes de edificação como coberturas e pisos, a madeira pode ser utilizada em estruturas de pontes e passarelas (ALMEIDA *et al.*, 2016; DUARTE *et al.*, 2020a).

O *Light Wood Frame* é um sistema construtivo ainda em desenvolvimento no Brasil, onde a Tecverde Engenharia, em parceria com a FIEP/SENAI, iniciou a implantação desse sistema construtivo em Curitiba-PR, no ano de 2008. Esse tipo de construção atende às exigências de sustentabilidade que vêm tomando força nos últimos anos e, por consequência, apresenta grande potencial de disseminação pelo país, o qual vem investindo em áreas de certificação de espécies de rápido crescimento (SILVA *et al.*, 2016).

O Brasil possui uma vasta área de florestas nativas e, atualmente, conta também com florestas de espécies plantadas e certificadas para usos comerciais e industriais, o que possibilitou o cultivo em larga escala de espécies de rápido crescimento. Assim, intensificou-se a economia brasileira com o comércio da madeira reflorestada, utilizada como matéria-prima na construção civil, fabricação de painéis compósitos estruturais e não estruturais, móveis, bem como em estruturas pré-fabricadas de madeira (SANTOS *et al.*, 2020).

Segundo Beech *et al.* (2017), existem 60.065 espécies conhecidas pela ciência e países como o Brasil, Colômbia e Indonésia são detentores das maiores quantidades de espécies. Dentre estes países, o Brasil é detentor de maior variedade de espécies com um total de 8.715 espécies arbóreas, seguido pela Colômbia com 5.776 espécies e a Indonésia com 5.142 espécies.

Com a grande diversidade de espécies tropicais brasileiras e com a incorporação de áreas de reflorestamento no país, a caracterização física e mecânica das espécies tropicais brasileiras que ainda não foram caracterizadas é primordial para que se atinja todo o seu potencial de utilização (CHRISTOFORO *et al.*, 2017). Neste contexto, o conhecimento da morfologia da madeira e suas características vêm sendo abordados por muitos pesquisadores com a finalidade de oferecer suporte técnico para o seu uso e, consequentemente, impulsionar

o emprego desse material em áreas importantes como o da construção civil.

2.2 Origem e classificação das árvores

A madeira é um produto retirado das árvores que se constitui em um tecido orgânico estrutural denominado de tecido lenhoso. Tal estrutura é empregada como sistema de suporte e transporte de nutrientes pelas árvores, desde as raízes até as folhas, onde há ocorrência da fotossíntese. Por ser um produto natural e de origem biológica, a madeira se constitui em um material heterogêneo e anisotrópico. Assim, devem ser consideradas as diferentes espécies de madeira e as suas respectivas alterações no tecido lenhoso para que sejam conhecidas todas as suas características (SCHEWEINGRUBER, 2007; PATACHIA; CROITORU, 2016).

As árvores pertencem ao grupo das Fanerógamas ou Espermatófitos, e são definidas como vegetais completos com raízes, copa, folhas, flores e sementes. Por sua vez, o grupo das Fanerógamas é dividido conforme a germinação e o crescimento: em árvores endógenas (germinação interna), que compreende as árvores tropicais ocas; e exógenas (germinação externa), que o crescimento é identificado pela adição de novas camadas externas do lenho e são aproveitadas pelo setor da construção civil (BAUER, 1994; CHRISTOFORO *et al.*, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2019a).

O grupo das árvores exógenas, por sua vez, divide-se em dois grupos devido às diferenças morfológicas e anatômicas: Gminospermas e Angiospermas. O grupo das Gminospermas compreende as coníferas, como o Pinheiro do Paraná e o Pinho, conhecidas como “*softwoods*” (madeiras moles) por possuir, em geral, a madeira branda e são espécies características de climas frios e temperados. Já as Angiospermas se dividem em Monocotiledôneas e Dicotiledôneas, sendo estas últimas as conhecidas “*hardwoods*” (madeiras duras) ou folhosas, que abrangem a quase a totalidade das espécies tropicais brasileiras como a Peroba, Jatobá, Aroeira, entre outras (CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003; CHRISTOFORO *et al.*, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2019a).

2.2.1 Composição química da madeira

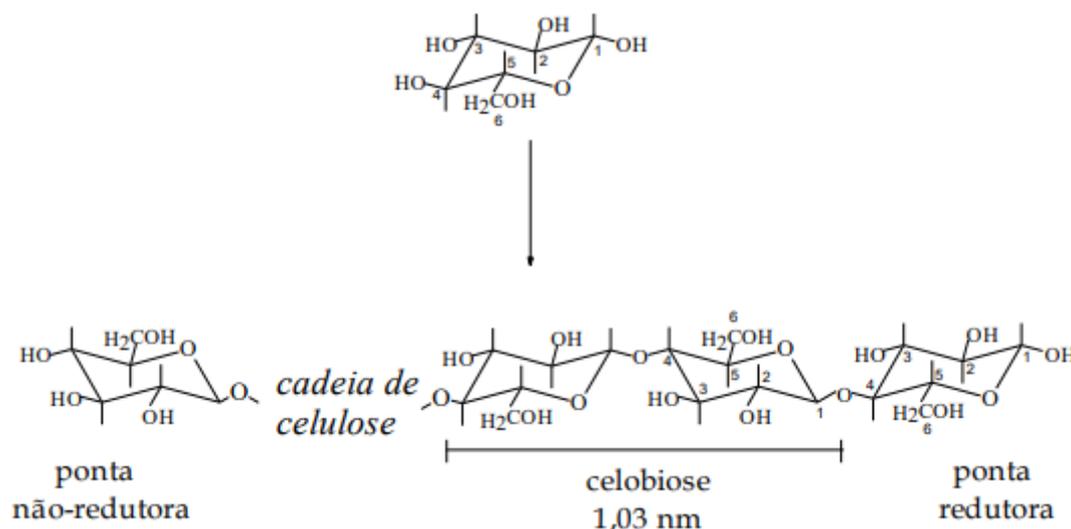
A composição química da madeira é constituída por aproximadamente 60% de substâncias como a holocelulose (celulose α , celulose β , celulose γ), poliose e lignina, e 25% em óleos, resinas, açúcares, amidos, taninos, substâncias nitrogenadas, sais inorgânicos e ácidos graxos, que estão contidos nas cavidades celulares e são produzidos pelas

modificações das mesmas (BAUER, 1994; UOSTARINEN; HAKKARAINEN, 2019).

Todas as células da madeira são compostas por substâncias orgânicas constituídas por carbono, oxigênio e hidrogênio, denominadas de hidrocarbonetos. As celulosas β e γ são pequenas moléculas de polissacarídeos somadas à pectose (monossacarídeo). Já a celulose α , é a base estrutural das paredes celulares da madeira, possui elevado peso molecular e é encontrada na parede secundária dos elementos anatômicos da madeira (SILVA, 2012).

A celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais e é composta por moléculas de glicose unidas por meio de ligações glicosídicas do tipo β ($1 \rightarrow 4$), resultando em um polímero de elevada massa molecular com fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$ (MARABEZI, 2009; DUARTE, 2017). A Figura 1 apresenta uma molécula de celulose.

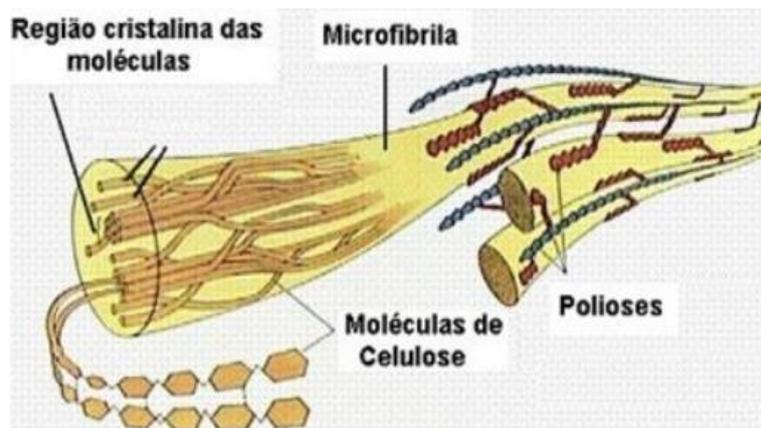
Figura 1 – Representação da molécula de celulose.



Fonte: Adaptado de Fengel e Wegener (1984) e Duarte (2017).

Os grupos OH presentes na molécula de celulose podem formar dois tipos de ligações de hidrogênio: intramolecular, onde as ligações de hidrogênio ocorrem entre grupos de OH de uma mesma cadeia e tornam a molécula mais rígida, e a ligação intermolecular, que envolvem grupos de OH entre moléculas vizinhas e permitindo a formação de uma estrutura tridimensional. Assim, a celulose é dita como higroscópica por reagir com as moléculas de água (FENGEL E WEGENER, 1984; DUARTE, 2017). A associação de um grupo de cadeias de celulose “envolvidas” por cadeias de celulose é denominada de microfibrila, conforme Figura 2 (CALIL JR, LAHR, DIAS 2003).

Figura 2 – Aspectos moleculares das microfibrilas.

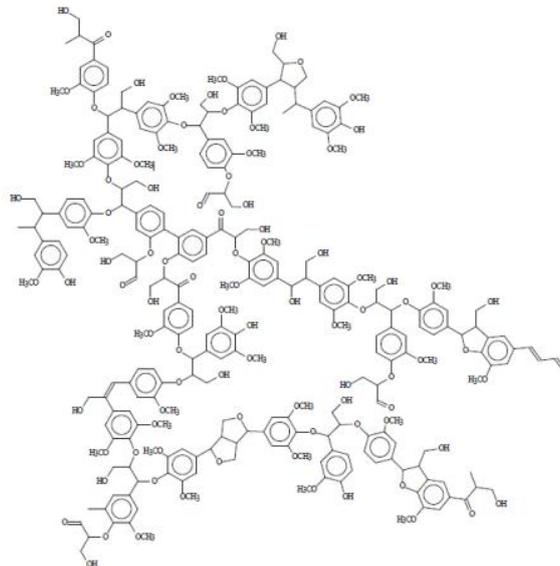


Fonte: Severiano (2010).

A lignina é um polímero tridimensional complexo, amorfo e de elevado peso molecular, está intimamente ligado à celulose e é responsável pela aglutinação dos elementos celulares proporcionando rigidez. Além disso, diferentemente da celulose, a lignina é impermeável, pouco elástica, insensível à umidade e à temperatura, e confere resistência ao ataque de organismos xilófagos (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

Segundo Marabezi (2009) e Duarte (2017), a lignina é formada através da polimerização desidrogenativa dos álcoois p-cumarílico (unidade p-hidroxifenila), coniferílico (unidade guaiacila) e sinapílico (unidade siringila). Durante o crescimento celular, a lignina é o último componente incorporado à parede celular. A Figura 3 apresenta o modelo estrutural da lignina proposto por Nimz para as Angiospermas (folhosas).

Figura 3 – Modelo estrutural para a lignina para a angiosperma *Fagus sylvatica*.

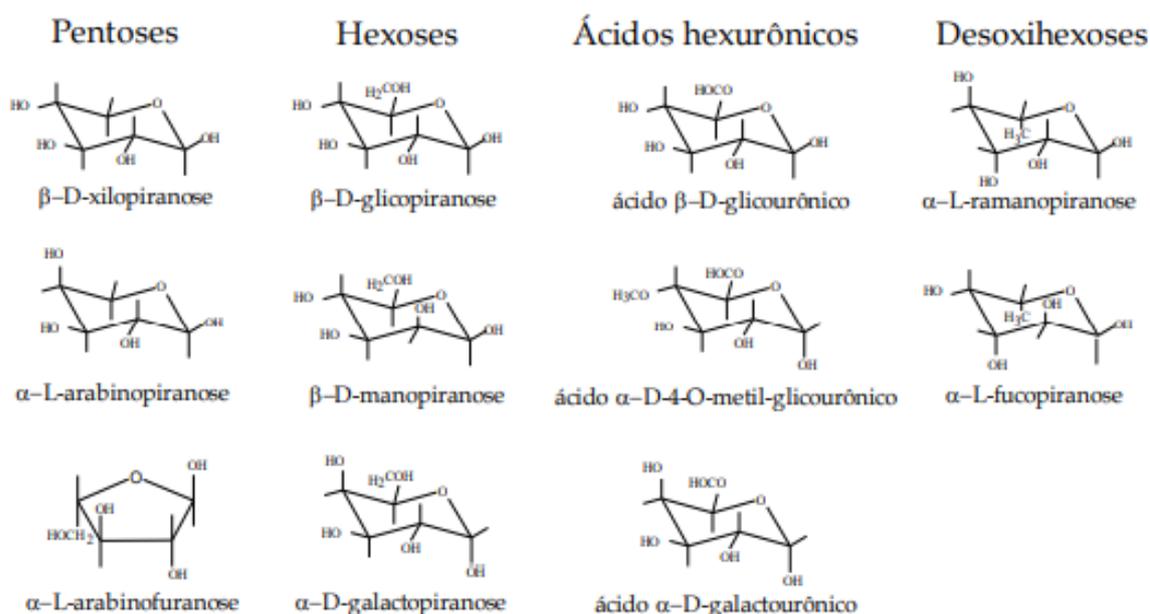


Fonte: Adaptado de Fengel e Wegener (1984) e presente em Duarte (2017).

As polioses (ou hemiceluloses) são misturas de diferentes polímeros de menor peso molecular que a celulose, atuam como uma “matriz” para as cadeias de celulose e são os componentes mais hidrofóbicos das paredes celulares que constituem a madeira. As estruturas de cadeias de celulose envolvidas pelas polioses são denominadas de microfibrilas (CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

Segundo Freitas (2015) e Duarte (2017), as hemiceluloses são polissacarídeos de baixa massa molecular quando comparada à celulose, possuem ramificações e são constituídas por monômeros diferentes, onde se destacam as pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e desoxihexoses, além de grupos acetila e ácidos urônicos como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Açúcares componentes das hemiceluloses.



Fonte: Adaptado de Fengel e Wegener (1984) e presente em Duarte (2017).

Segundo Tsoumis (2000), a celulose e os demais constituintes químicos estão contidos na madeira nas seguintes proporções (em porcentagem do peso seco da madeira): celulose de 40 a 50 por cento (aproximadamente o mesmo em madeiras macias e duras), hemiceluloses 20 por cento em madeiras macias e de 15 a 35 por cento em madeiras duras, lignina de 25 a 35 por cento em madeiras macias e de 17 a 25 por cento em madeiras duras e substâncias pécicas em proporções pequenas. Além disso, a madeira contém extrativos (gommas, gorduras, resinas, ceras, açúcares, óleos, alcalóides e taninos) em diferentes

quantidades (geralmente entre 1 a 10%, podendo chegar a 30% ou mais). Tais extrativos são inclusões nas cavidades e paredes celulares e podem ser removidos sem alterar a estrutura da madeira.

Os extrativos são resultados do metabolismo das plantas que produz substâncias orgânicas de baixa massa molar e de diversas classes de compostos como: compostos aromáticos (fenólicos), terpenos, ácidos graxos saturados e insaturados, proteínas e flavonoides (BALOGH, 1989; DUARTE, 2017).

Segundo Tsoumis (2000), aos principais extrativos são: resina e tanino. A resina é produzida pelas células epiteliais de árvores vivas e os taninos são substâncias fenólicas contidas na madeira.

Muitas madeiras tropicais são ricas em extrativos e o teor dessas substâncias na madeira pode ter influência positiva ou negativa. Os extrativos proporcionam durabilidade à madeira, conferem cor e odor que afetam a pintura, o envernizamento e a aderência de cola. Também interferem na fabricação de papel e celulose, gerando problemas como contaminação da resina ou outros extrativos e até problemas de saúde como bronquite, dermatite, entre outros (TSOUMIS, 2000).

Além dos extrativos, as cinzas também constituem a química da madeira e são de origem inorgânica, constituem a parede celular, possuem baixo peso molecular e são em sua maioria sais e óxidos de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) (MARABEZI, 2009; DUARTE, 2017).

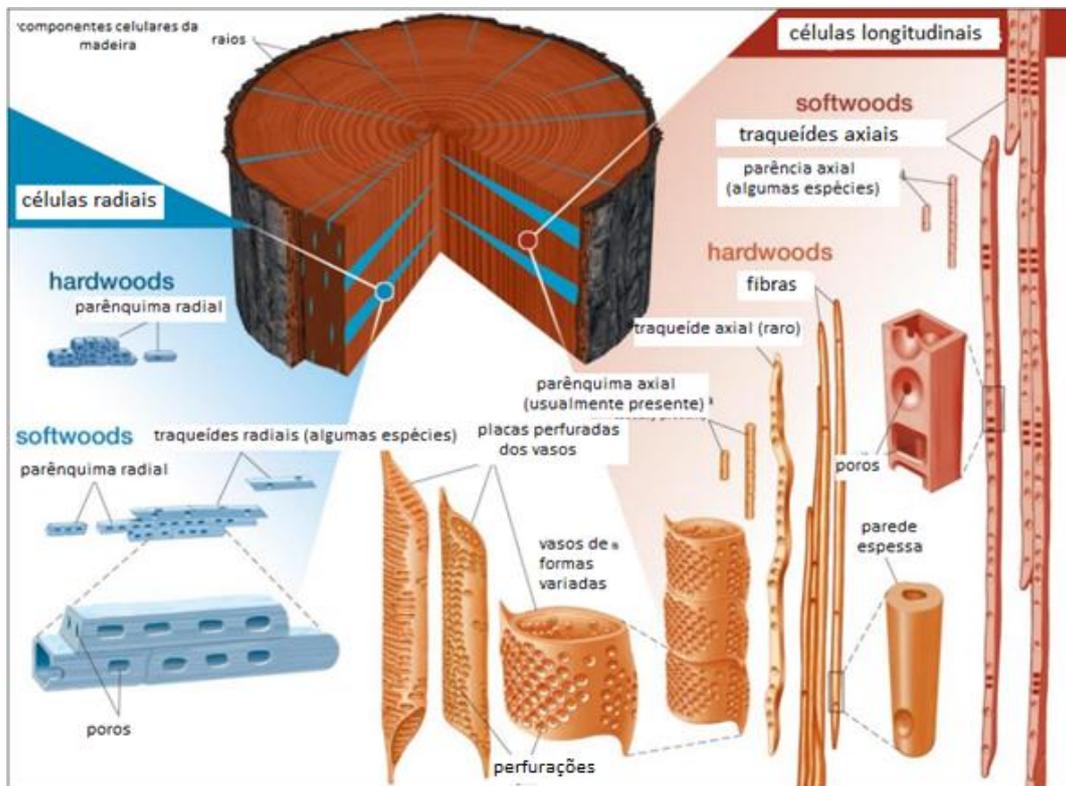
2.2.1 Estrutura microscópica da madeira

O lenho é constituído por uma variedade de estruturas anatômicas celulares que possibilitam a auto sustentação, condução de seiva e armazenamento de reservas nutritivas. Pela variedade destas estruturas no tecido lenhoso, a madeira apresenta anisotropia no comportamento físico e mecânico (BAUER, 1994; LUOSTARINEN; HAKKARAINEN, 2019). Como as propriedades dependem da heterogeneidade e anisotropia das espécies, o entendimento da estrutura microscópica se torna imprescindível para o completo entendimento das propriedades físico-mecânicas.

A madeira é uma estrutura capilar composta por fibras e, nas Dicotiledôneas, 80% do seu volume é composto por fibras longitudinais e 20% por células radiais (MOREY, 1980; ALMEIDA *et al.*, 2019a). Segundo Patachia e Croitoru (2016), espécies diferentes de madeira possuem estruturas microscópicas do lenho diferentes. A Figura 5 apresenta a

composição celular de espécies características das Coníferas e Dicotiledôneas.

Figura 5 - Estrutura celular da madeira.



Fonte: Adaptado de Tsoumis (2000) e Patachia e Croitoru (2016).

Por meio de um microscópio se pode afirmar que a madeira é composta por pequenas unidades denominadas células. Os tipos básicos de células são chamados de traqueídeos, vasos, fibras e parênquima. As *softwoods* são constituídas por traqueídeos e parênquima, e as *hardwoods* por vasos, fibras e parênquima. Apenas algumas espécies de madeira dura possuem traqueídeos. Estes são considerados um tipo de célula primitiva que dá origem aos vasos e às fibras (TSOUMIS, 2000).

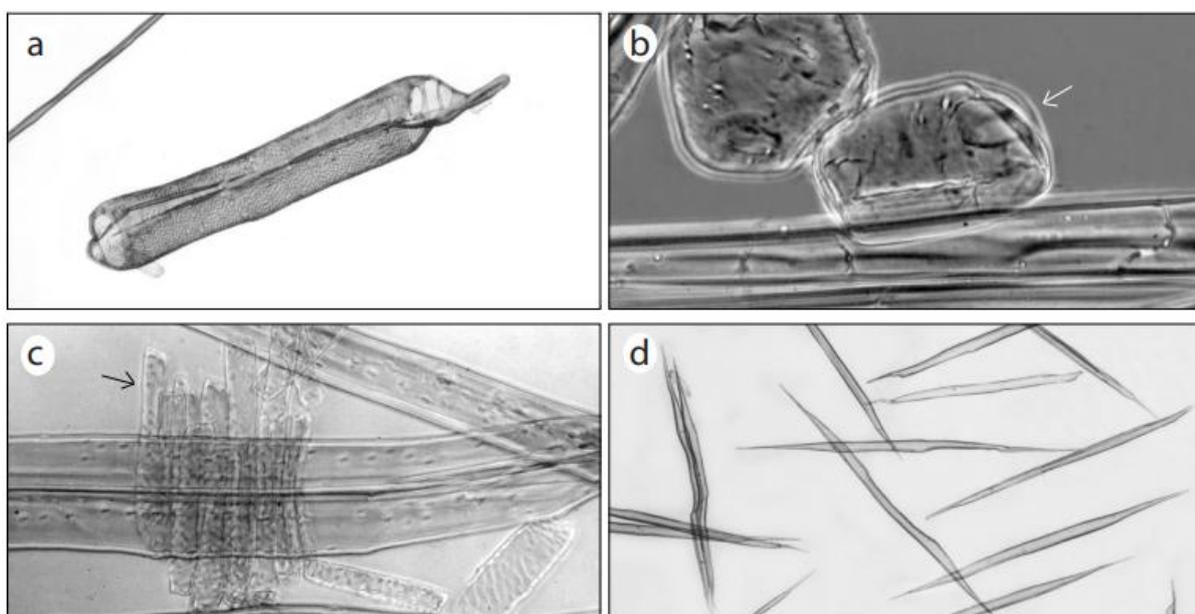
Segundo Coradin e Camargos (2002) e conforme a Figura 6 apresenta:

- Elementos vasculares (vasos): são células cilíndricas, alongadas no sentido axial e, devido à ausência das paredes transversais ou à presença de parte delas, as extremidades dos vasos são perfuradas, formando longos tubos por onde circulam a água e os nutrientes utilizados no metabolismo da árvore. Macroscopicamente, é usual utilizar o termo poro ao referir-se à seção transversal dos vasos.
- Células de Parênquima axial: geralmente, são células menores, com paredes mais finas que as fibras e os elementos vasculares, porém com dimensão maior no sentido

longitudinal, com a função de reservar alimentos.

- Células de Parênquima Radial (raios): possuem a mesma função das células do parênquima axial, mas diferem destas por se disporem no lenho com o comprimento maior no sentido radial, sendo perpendiculares aos demais elementos da madeira.
- Fibras: são células alongadas e de extremidades afiladas, com paredes geralmente espessas e maior dimensão no sentido do eixo da árvore. São responsáveis pela sustentação mecânica da planta.

Figura 6 - Tipos de células da madeira. a) Elementos Vasculares, b) Células de Parênquima axial, c) Células de Parênquima Radial, d) Fibras.



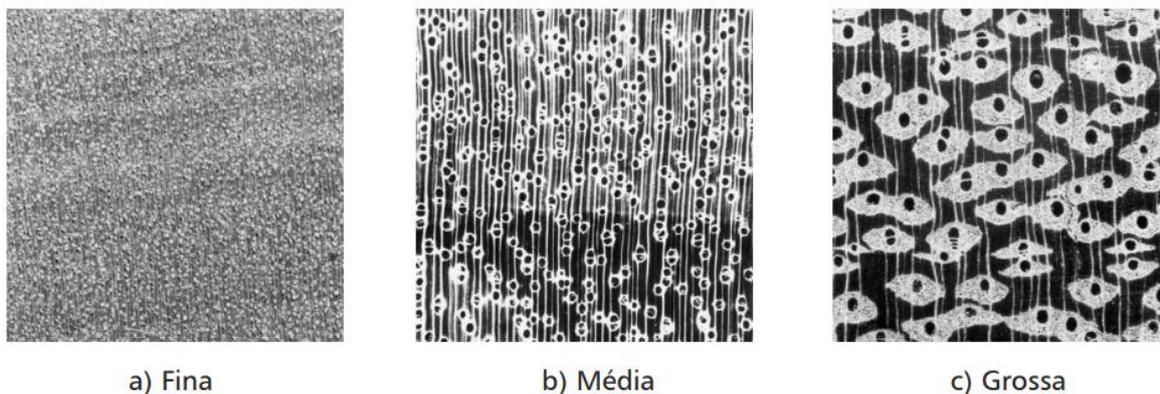
Fonte: Coradin e Camargos (2002).

Ainda segundo Coradin e Camargos (2002), para madeira de folhosas são apresentados os tipos a seguir definidos:

- Textura fina: poros com diâmetro tangencial inferior a 100 μm e parênquima invisível a olho nu ou escasso. Ex.: peroba - *Aspidosperma polyneuron* Müll. (Figura 7a).
- Textura média: poros com diâmetro tangencial de 100 a 300 μm e parênquima visível ou invisível a olho nu. Ex.: muiratinga - *Maquira sclerophylla* (Ducke) C.C.Berg. (Figura 7b).
- Textura grossa: poros com diâmetro tangencial superior a 300 μm . Ex.: fava amargosa - *Vatairea guianensis* Aubl., ou madeiras com raios muito largos a extremamente largos. Quando o parênquima axial é muito abundante pode ser considerada também

como tendo textura grossa, mesmo quando os diâmetros dos vasos são inferiores a 300 μm . (Figura 7c).

Figura 7 – Tipos de textura.

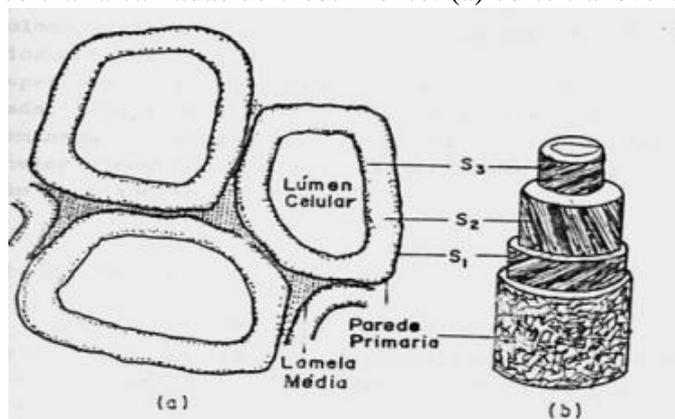


Fonte: Coradin e Camargos (2002).

A estrutura das paredes celulares pode ser analisada através de raios-X, Microscopia de polarização ou eletrônica, entre outras técnicas. As paredes celulares são cristalinas e compostas por uma parede primária externa fina e uma parede secundária consideravelmente mais espessa que é composta por três camadas (TSOUMIS, 2000). Segundo Calil Jr, Lahr e Dias (2003), o espaço interno dos elementos anatômicos, como são chamados os elementos (células) constituintes da madeira, são denominados de lúmen celular, ou apenas lúmen.

Segundo Tsoumis (2000), as menores unidades elementares visíveis das paredes celulares são as microfibrilas, que ao microscópio eletrônico se assemelham a cordas, e possuem diâmetro entre 10-30 nanômetros e comprimento indeterminado. A orientação das microfibrilas variam sendo possível a distinção de três camadas (S_1 , S_2 e S_3) conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Parede celular a camadas de crescimento: (a) corte transversal; (b) vista lateral.



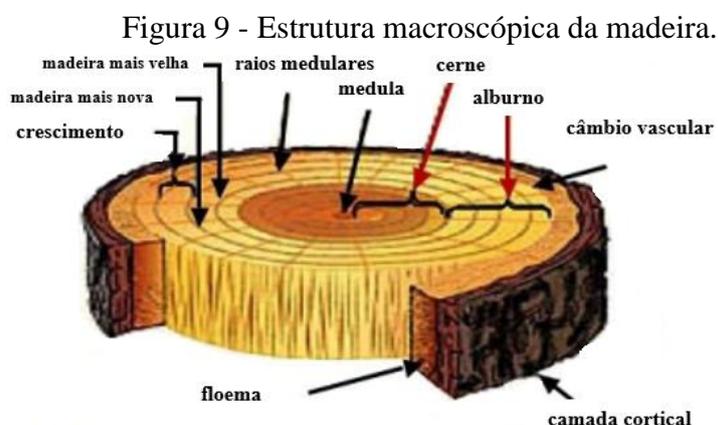
Fonte: Lahr (1990).

Devido às diferenças na composição e arranjo celular a estrutura da madeira varia entre as espécies. Tal variação influencia a aparência e as propriedades, possibilitando uma ampla escolha de madeiras para diversos fins. A variação também ocorre entre árvores de uma mesma espécie devido às influências ambientais e genéticas. Pode-se citar o comprimento das células, a proporção do lenho tardio, o ângulo das microfibrilas e a proporção da celulose como os componentes que variam consideravelmente na composição da madeira (TSOUMIS, 2000).

O ângulo microfibrilar pode variar entre as espécies e dentro de uma mesma espécie e, dentro de uma árvore, nos sentidos medula-casca e base-topo. Essa propriedade elementar da madeira representa a orientação da fração cristalina da celulose na parede celular das fibras (ANDERSSON *et al.* 2000; FERREIRA *et al.*, 2018). O ângulo microfibrilar tem grande influência em propriedades mecânicas da madeira, como rigidez, e propriedades físicas como a retratibilidade sendo observadas ainda diferenças entre os principais grupos vegetais como angiospermas e gimnospermas, 5° a 20° e de 10° a 30°, respectivamente (BOYD, 1980; FERREIRA *et al.*, 2018).

2.2.3 Estrutura macroscópica da madeira

Macroscopicamente, a árvore é composta pela raiz, caule (tronco) e copa. Através do tronco é obtida a madeira natural utilizada como material de construção. Conforme a Figura 9 apresenta, a partir da seção transversal do tronco, é possível distinguir as seguintes partes: casca (camada cortical e floema), câmbio vascular, lenho (cerne e alburno), medula, e raios medulares (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

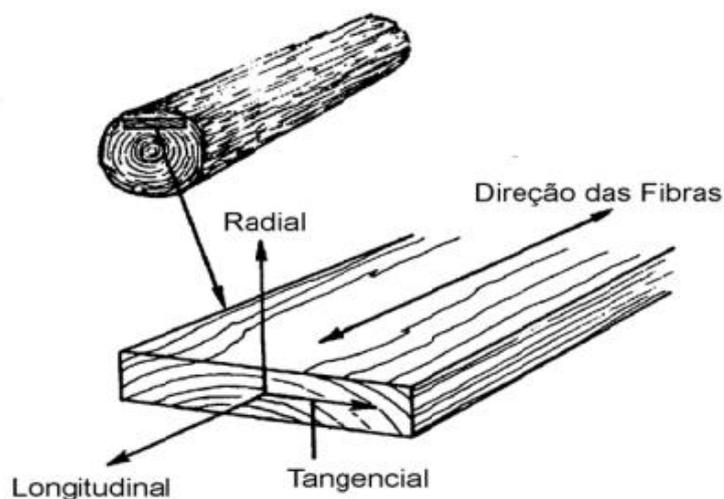


Fonte: Adaptado de Tsoumis (2000) e Patachia e Croitoru (2016).

A casca protege o lenho e tem como função transportar a seiva elaborada (produzida pela fotossíntese) das folhas para o tronco. O estrato da casca que protege o lenho é formado por um tecido morto conhecido como camada cortical. A camada que constitui a casca que tem a função de transporte de seiva elaborada é formada por um tecido vivo, mole e úmido, denominado de floema (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

O câmbio é uma fina camada entre o lenho e a casca constituído por um tecido de células em permanente transformação (tecido meristemático). É tão vital para o crescimento da árvore quanto o floema, pois é onde ocorre a transformação dos açúcares e amidos em celulose e lignina. Essa transformação possibilita o crescimento da árvore através dos anéis anuais de crescimento, que registram a idade da árvore e são referência para a consideração da anisotropia da madeira. Portanto, na avaliação do desempenho físico-mecânico são considerados nos ensaios as três direções principais, como apresenta a Figura 10 (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

Figura 10 - Direções principais da madeira.



Fonte: Ritter (1990).

O lenho é responsável pela sustentação e resistência da árvore, bem como pelo transporte da seiva bruta a partir da raiz até as folhas. É a seção útil do tronco utilizada como matéria prima nas indústrias moveleiras e na construção civil e é composto pelo alburno e pelo cerne. Geralmente, o alburno possui cor mais clara, conduz a seiva bruta por ascensão capilar, é constituído por células vivas e também contribui para a resistência mecânica. O cerne, ao contrário do alburno, é mais denso, compacto, resistente e, por ser um tecido morto e não conter seiva, tecido e açúcares como o alburno, tem maior resistência ao ataque de

organismos xilófagos (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

A medula é identificada pelo núcleo central da seção transversal do tronco da árvore, é mole, esponjosa e, muitas vezes, já apresenta apodrecimento. Em geral, evita-se a presença da medula em peças de madeira serrada, pois representa um defeito devido à sua falta de resistência e durabilidade (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

Os raios medulares possuem como função principal o transporte e armazenamento de nutrientes. São desenvolvimentos transversais e radiais de células lenhosas que contribuem para o impedimento do fenômeno da retração na madeira, que ocorre devido às variações de umidade, variando entre o ponto de saturação ao ar e a condição seca em estufa (BAUER, 1994; CALIL JR; LAHR; DIAS, 2003).

2.3 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

A NBR 7190/1997: Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi elaborada a partir de trabalhos realizados por pesquisadores da Escola Politécnica e da Escola de Engenharia de São Carlos, ambas da Universidade de São Paulo. Tal normativa fixa as condições gerais que devem ser seguidas durante a execução e dimensionamento de projetos com estruturas de madeira, como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbramentos. Para os projetos que são compostos parcialmente ou totalmente por madeira, de acordo com cada caso em particular, também devem ser obedecidas as recomendações das demais normas complementares para projetos de estruturas.

Ainda, a norma em vigência discorre sobre a obtenção das propriedades físicas e mecânicas da madeira, dados que são de extrema importância para a elaboração de projetos com o uso parcial ou total desse material que, por ser heterogêneo e anisotrópico, possui diversas particularidades de acordo com o lote e com a espécie. As propriedades físicas e mecânicas são obtidas conforme os métodos de ensaio contidos no Anexo B “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas” da referida norma.

A resistência característica à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) é calculada a partir das resistências individuais de cada corpo de prova utilizado no ensaio de compressão paralela às fibras. Essa propriedade é utilizada para a classificação da madeira em classes de resistência, conforme mostram as Tabelas 1 e 2, com a finalidade de empregar madeiras com propriedades padronizadas na elaboração de projetos estruturais.

Tabela 1 - Classes de resistência das coníferas previstas pela NBR 7190/1997.

Coníferas					
(Valores na condição padrão de referência de 12% de umidade)					
Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
C20	20	4	3500	400	500
C25	25	5	8500	450	550
C30	30	6	14500	500	600

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 2 - Classes de resistência das dicotiledôneas previstas pela NBR 7190/1997.

Dicotiledôneas					
(Valores na condição padrão de referência de 12% de umidade)					
Classes	f_{c0k} (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ kg/m ³	$\rho_{aparente}$ kg/m ³
D20	20	4	9500	500	650
D30	30	5	14500	650	800
D40	40	6	19500	750	950
D60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

Onde f_{c0k} é a resistência característica à compressão paralela às fibras, f_{vk} é a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras, $E_{c0,m}$ é o módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras, $\rho_{bas,m}$ é a densidade básica e $\rho_{aparente}$ é a densidade aparente.

Os procedimentos para a caracterização das espécies de madeira podem ser executados de acordo com os três tipos de caracterização estipulados pela ABNT NBR 7190/1997: completa, mínima e simplificada. Nas caracterizações mínima e simplificada, há o uso de relações matemáticas entre as propriedades de resistência e rigidez, o que torna o trabalho mais fácil, barato e rápido (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016).

Tanto as propriedades físicas quanto as propriedades mecânicas da madeira devem ser corrigidas para um teor de umidade igual a 12%, definido como a umidade de equilíbrio da

madeira, bem como a umidade padrão utilizada pela ABNT NBR 7190/1997. A densidade aparente é uma propriedade física facilmente determinada através da razão entre a massa e o volume da amostra a 12% de umidade e, por essa razão, vários autores encontraram relações entre a densidade aparente e as propriedades de resistência e de rigidez das espécies de madeira (CHRISTOFORO *et al.*, 2020a).

A caracterização completa da madeira serrada, prescrita pelo Anexo B da ABNT NBR 7190/1997, determina as seguintes propriedades físicas e mecânicas:

- Resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);
- Resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$);
- Resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$);
- Resistência à tração normal às fibras ($f_{t,90}$), considerada nula para projeto estrutural;
- Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);
- Resistência de embutimento paralelo ($f_{e,0}$) e normal ($f_{e,90}$) às fibras;
- Resistência ao fendilhamento ($f_{s,0}$);
- Densidade básica ($\rho_{bas,m}$), essa propriedade é definida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado;
- Densidade aparente ($\rho_{aparente}$).

Ainda, o Anexo B da normativa especifica os ensaios normalizados para a obtenção das seguintes propriedades:

- Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras ($E_{c,0}$);
- Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras ($E_{t,0}$);
- Módulo de elasticidade convencional no ensaio de flexão estática (E_M);
- Tenacidade (W).

Para projeto estrutural, a caracterização mínima de espécies pouco conhecidas deve ser executada por meio da determinação da resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, densidade básica e densidade aparente. Já na caracterização simplificada das resistências de espécies usuais, na falta da determinação experimental, permite-se a adoção das seguintes relações para os valores característicos das resistências (Equações 1 a 7):

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

$$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0 \quad (\text{Equação 2})$$

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

$$\frac{f_{e0,k}}{f_{c0,k}} = 1,0 \quad (\text{Equação 4})$$

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

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

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

Nas equações 1 a 7, $f_{c0,k}$ é a resistência característica à compressão paralela às fibras, $f_{t0,k}$ é a resistência característica à tração paralela às fibras, $f_{tM,k}$ é a resistência característica à tração na flexão, $f_{c90,k}$ é a resistência característica à compressão normal às fibras, $f_{e0,k}$ é a resistência característica ao embutimento paralelo às fibras, $f_{e90,k}$ é a resistência característica ao embutimento normal às fibras e $f_{v0,k}$ é a resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras.

Ainda na caracterização simplificada das resistências para espécies usuais, admite-se um coeficiente de variação de 18% para os esforços normais e de 28% para esforços tangenciais. Para a rigidez, a caracterização simplificada pode ser feita apenas na compressão paralela às fibras, admitindo-se as seguintes relações (Equação 8 a 11):

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

$$E_{c,90} = \frac{1}{20} E_{c,0} \quad (\text{Equação 9})$$

$$E_M = 0,85 E_{c,0}, \text{ para as coníferas} \quad (\text{Equação 10})$$

$$E_M = 0,90 E_{c,0}, \text{ para as dicotiledôneas} \quad (\text{Equação 11})$$

Nas equações de 8 a 11, $E_{c0,m}$ é o módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras, $E_{t0,m}$ é o módulo de elasticidade médio na tração paralela às fibras, $E_{c,90}$ é o módulo de elasticidade na compressão normal às fibras e E_M é o módulo de elasticidade na flexão.

Pela determinação das propriedades da madeira exigir equipamentos caros e de grande porte, geralmente encontrados em grandes centros de pesquisa, além de depender consideravelmente de tempo e de mão de obra qualificada, a caracterização mínima e a

simplificada se constituem em uma ferramenta muito utilizada na elaboração de projetos de estruturas de madeira (CHRISTOFORO *et al.*, 2020a).

Através da propriedade física de densidade da madeira, é possível estimar as suas propriedades mecânicas, conferindo alto valor de importância às propriedades de densidade das espécies de madeira (LOGSDON; CALIL JUNIOR, 2002; ALMEIDA *et al.*, 2014; CHRISTOFORO *et al.*, 2016). Assim, é possível a classificação das espécies de madeira de acordo com as suas densidades, o que possibilita o planejamento de programas de secagem da madeira para que sejam minimizados os defeitos ocasionados pelo processamento (SILVEIRA *et al.*, 2013; CHRISTOFORO *et al.*, 2016).

Destaque também é dado ao conhecimento das propriedades físicas da madeira referentes à sua estabilidade dimensional, como a retração radial (RR), retração tangencial (RT), retração longitudinal (RL), retração volumétrica (RV) e o coeficiente de anisotropia (CA). Esses parâmetros são fundamentais para a elaboração de projetos bem dimensionados e com maior racionalização de material (ALMEIDA *et al.*, 2015; CHRISTOFORO *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016).

Além da normativa ABNT NBR 7190/1997, a norma americana NDS/2001 e a europeia EUROCODE 5/2004 também recomendam equações simplificadas como as Equações 12, 13 e 14, que calculam a resistência ao embutimento da madeira de acordo com as normas citadas, respectivamente.

$$f_{e,0} = f_{c,0} \quad (\text{Equação 12})$$

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

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

Nas Equações 12, 13 e 14, ρ_k é a densidade característica da madeira. Além dessas equações, as normas ABNT NBR 7190/1997, EUROCODE 5/2004 e NDS 2001 também prescrevem modelos matemáticos simplificados para a obtenção da resistência ao embutimento normal às fibras, como apresentado nas equações 15, 16 e 17, conforme recomendações das normas brasileira, europeia e americana, respectivamente.

$$f_{e,90} = 0,25 \cdot f_{c,0} \cdot \alpha_e \quad (\text{Equação 15})$$

$$f_{e,90} = \frac{0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k}{k_{90}} \quad (\text{Equação 16})$$

$$f_{e,90} = 212 \cdot (0,001 \cdot \rho_{ap})^{1,45} \cdot d^{-0,5} \quad (\text{Equação 17})$$

Nas equações 15, 16 e 17, α_e é determinado de acordo com o pino metálico utilizado na estrutura de madeira e k_{90} é um parâmetro definido pela norma EUROCODE 5/2004 considerando a densidade da madeira.

2.4 Propriedades das madeiras tropicais analisadas

Nesta seção, serão apresentadas as principais aplicações das madeiras tropicais brasileiras, bem como as propriedades das espécies tropicais analisadas na presente pesquisa, sendo elas comercialmente conhecidas por: Cedro Amazonense, Cedroarana, Cambará, Tatajuba, Cupiúba, Jatobá, Angelim Vermelho e Champanhe (Cumarú).

2.4.1 Cedro Amazonense (*Cedrela spp.*)

O nome científico da madeira de Cedro Amazonense é *Cedrela spp.* e, popularmente, também é conhecida por: Cedro-Amargo, Cedro-Amargoso, Cedro-Batata, Cedro-Branco, Cedro-do-Amazonas, Cedro-Rosa, Cedro-Verdadeiro e Cedro-Vermelho. No Brasil, a maior ocorrência dessa espécie se concentra na Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo (IPT, 2022).

O cerne e o alburno da madeira de Cedro Amazonense são diferenciados pela coloração, onde o cerne se apresenta com tom de bege rosado. A sua densidade é considerada baixa, possui grã direita e textura de média a grossa. O parênquima, os raios e os vasos são visíveis a olho nu. O parênquima axial se constitui em faixas marginais afastadas e contrastadas. Os raios são finos, em pequena quantidade e os vasos são dispostos em anéis semiporosos, obstruídos por óleo-resina ou substância branca. As camadas de crescimento são definidas e individualizadas pelo parênquima marginal e pela distribuição dos vasos em anéis semiporosos (IPT, 2022).

A durabilidade da madeira de Cedro Amazonense é classificada como moderada ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos). A durabilidade do cerne varia entre as espécies do gênero, por exemplo, a espécie *Cedrela fissilis* não tem boa resistência ao ataque de cupins subterrâneos e cupins-de-madeira-seca, enquanto outras apresentam boa resistência. Além disso, é uma madeira com baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos marinhos. A sua durabilidade é inferior a 12 anos de serviço quando em contato

com o solo. No tratamento preservativo, consegue-se atingir o tratamento de 100% do alburno, já o cerne apresenta baixa permeabilidade à estas substâncias (IPT, 2022).

É uma madeira de fácil trabalhabilidade e apresenta bom acabamento, porém em alguns casos pode ocorrer a exudação de resina na superfície. A secagem é fácil tanto ao ar quanto por estufa, não ocorrendo empenamentos e rachaduras com facilidade. É frequentemente aplicada em condições leves na construção civil, como em esquadrias, lambris, painéis, guarnições, forros, entre outros. Além disso, são produzidos móveis de boa qualidade e essa espécie é indicada para confecção de chapas compensadas devido à sua densidade baixa, bem como para decorações, instrumentos musicais, entre outros (IPT, 2022).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores encontrados na literatura para algumas das suas propriedades.

Tabela 3 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Cedrela spp.*

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	0,53
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,44
Retração Radial (%)	4,00
Retração Tangencial (%)	6,10
Retração Volumétrica (%)	11,60

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 4 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie *Cedrela spp.*

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	39,10	28,00
f_M (MPa)	81,20	62,80
$f_{v,0}$ (MPa)	-	7,10
E_M (MPa)	-	8336
$E_{c,0}$ (MPa)	-	9630
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	-	3138
$f_{t,90}$ (MPa)	-	5,10
f_s (MPa)	-	0,60

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

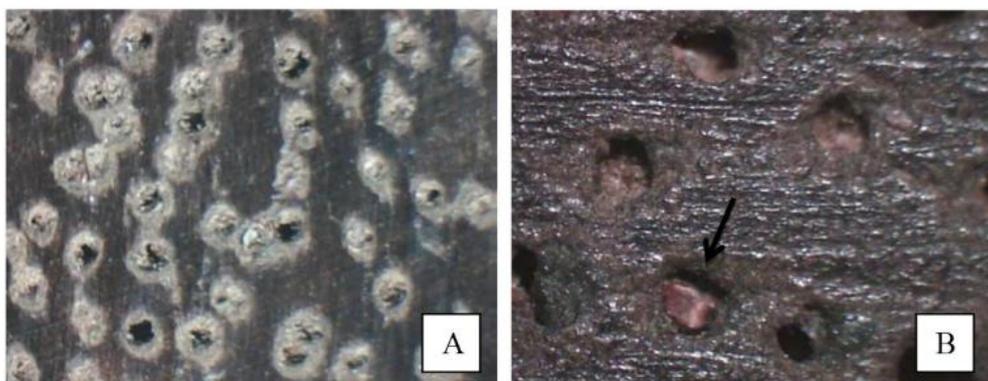
2.4.2 Cedroarana (*Cedrelinga cateniformis* Ducke)

A Cedroarana é uma madeira tropical brasileira de maior ocorrência na Amazônia, Pará, Rondônia, e Mato Grosso. O seu nome científico é *Cedrelinga cateniformis* Ducke e é comumente conhecida por: cedrarana, cedro-branco, cedroarana, cedrorana e taperibá-açu. O cerne e o albúrnio não são diferenciados pela cor (bege-rosada), possui densidade baixa, grã ondulada e textura grossa (IPT, 2022).

Possui durabilidade moderada ao ataque de fungos apodrecedores e de cupins, onde a durabilidade se apresenta inferior a 12 anos de serviço quando em contato com o solo (IPT, 2022). O tratamento com soluções hidrossolúveis preservativas pode ser realizado com auxílio de autoclave. O tratamento com CCA-A não altera os valores das propriedades da madeira de Cedroarana e é satisfatoriamente executado através de vácuo-pressão (ALMEIDA *et al.*, 2019b), o mesmo acontece com o tratamento com o preservativo hidrossolúvel CCB (ALMEIDA *et al.*, 2019c).

O parênquima axial, paratraqueal vasicêntrico, confluyente e aliforme losangular de expansões curtas, consegue ser visualizado apenas com o auxílio de lente. Os raios são finos, lembram uma estratificação, e também não são ser visíveis a olho nu, sendo eles perceptíveis pela ondulação na face e no topo. A porosidade é difusa, com presença de vasos solitários e múltiplos com a presença de tilos, conforme Figura 4. Os vasos são grandes, em pouca quantidade, disposição difusa e conseguem ser vistos a olho nu. As camadas de crescimento são indistintas (FERNANDES *et al.*, 2017; IPT, 2022).

Figura 11 – Corte transversal da madeira de Cedroarana. (A) parênquima com aumento de 40x. (B) Presença de tilo.



Fonte: Fernandes *et al.* (2017).

A secagem da madeira de Cedroarana é satisfatória quando realizado o empilhamento correto e realizado em local aberto, ocasionando poucos defeitos na peça. É uma madeira fácil de ser aplainada, serrada, pregada e aparafusada, recebendo bom acabamento (IPT, 2022). Nas Tabelas 5, 6 e 7, constam os valores tirados da literatura para algumas propriedades da espécie.

Tabela 5 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Cedrelinga cateniformis*.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,52
ρ_{verde} (g/cm ³)	0,90
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,44
Retração Radial (%)	4,80
Retração Tangencial (%)	7,90
Retração Volumétrica (%)	11,80

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 6 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie *Cedrelinga cateniformis*.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,12}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	46,60	40,60
f_M (MPa)	77,80	70,80
E_M (MPa)	12847	12258
$f_{c,90}$ (MPa)	3,60	3,20
$f_{v,0}$ (MPa)	7,20	6,70
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	3962	3932
$f_{H,90}$ (N/cm ²)	3785	3570
$f_{t,90}$ (MPa)	4,50	4,40

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 7 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades de resistência e de rigidez (corrigidos para UR=12% umidade), densidade aparente a 12% de umidade, e tenacidade à fratura para a espécie *Cedrelinga cateniformis*.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,54
$f_{c,0}$ (MPa)	41,36
$f_{c,90}$ (MPa)	4,54
$f_{t,0}$ (MPa)	67,20
$f_{t,90}$ (MPa)	4,35
f_M (MPa)	71,43
$f_{V,0}$ (MPa)	10,44
$f_{s,0}$ (MPa)	0,51
$f_{H,0}$ (MPa)	508,98
$f_{H,90}$ (MPa)	346,06
$E_{c,0}$ (MPa)	9352
$E_{t,0}$ (MPa)	7527
E_M (MPa)	11048
T (N.m)	62,85

Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2019c).

2.4.3 Cambará (*Erismia uncinatum* Warm)

O nome científico da madeira de Cambará, também conhecida por Cedrinho, é *Erismia uncinatum* Warm. É uma dicotiledônea que, além de ser matéria prima para a produção de móveis, chapas compensadas e embalagens, é muito utilizada na construção civil em aplicações leves como em esquadrias (portas, venezianas, caixilhos), ripas, molduras, guarnições, forros, lambris, andaimes, fôrmas para concreto e pontaltes (IPT, 2022).

Apresentando uma densidade aproximada de 0,620 g/cm³, essa madeira também é indicada para a produção de madeira laminada colada (MLC), pois possui boa compatibilidade com os adesivos utilizados nesse tipo de estrutura, como o fenol-resorcinol e a resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona (ZANGIÁCOMO, 2003;

LAHR *et al.*, 2016).

A boa compatibilidade gerada entre o adesivo e a superfície da madeira de Cambará no MLC é explicada por sua porosidade difusa, que apresenta grandes poros/vasos visíveis a olho nu, solitários e múltiplos de dois a três, que são obstruídos por tilos, e por possuir textura superficial de média a grossa (IPT, 2022). Além da boa interação química proporcionada pela ligação do poliol da resina com a celulose da madeira, todas essas características anatômicas macroscópicas conferem boa interação física entre o adesivo e a superfície da madeira.

Na madeira de Cambará, o parênquima axial é visível a olho nu, em faixas largas e longas, tangenciando os vasos. Seus raios são visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial, são em pouca quantidade e finos. Além disso, as suas camadas de crescimento são indistintas e o floema incluso está presente nas faixas do parênquima. O cerne e o alburno são distintos pela cor, onde o cerne se apresenta castanho avermelhado, e possui grã direita a reversa (IPT, 2022).

É uma madeira com boa trabalhabilidade, porém a superfície de acabamento é felpuda. A secagem é fácil tanto ao ar quanto na estufa, não apresentando ocorrência significativa de defeitos. Porém, se a secagem ocorrer em condições drásticas de temperatura, podem ocorrer defeitos como empenamentos, rachaduras e endurecimento superficial (IPT, 2022).

Essa espécie se concentra na região Amazônica, com destaque de ocorrência para o Pará, e possui baixa durabilidade natural quanto ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos). O tratamento com soluções preservativas hidrossolúveis é realizado de forma satisfatória através de processos envolvendo vácuo-pressão (IPT, 2022). Os valores das suas propriedades físico-mecânicas não se alteram significativamente após o tratamento com os preservativos hidrossolúveis mais comumente utilizados no Brasil, como o CCB (Borato de Cobre Cromatado) (ALMEIDA *et al.*, 2019c) e o CCA-A (Arseniato de Cobre Cromatado tipo A) (ALMEIDA *et al.*, 2019b).

Os valores para as propriedades físicas e mecânicas da *Erismia uncinatum* Warm, encontrados por Lahr *et al.* (2016), Almeida *et al.* (2019c) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022) são apresentados nas tabelas 8, 9, 10, e 11.

Tabela 8 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades de resistência e de rigidez (corrigidos para UR=12% umidade), densidade aparente a 12% de umidade, e tenacidade à fratura para a espécie *Erisma uncinatum* Warm.

Propriedades	Almeida <i>et al.</i> (2019c)	Lahr <i>et al.</i> (2016)
	X_m	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,73	0,68
$f_{c,0}$ (MPa)	70,54	34,00
$f_{c,90}$ (MPa)	7,20	7,00
$f_{t,0}$ (MPa)	68,22	45,00
$f_{t,90}$ (MPa)	2,62	4,90
f_M (MPa)	97,06	63,00
$f_{V,0}$ (MPa)	12,48	14,00
$f_{s,0}$ (MPa)	0,44	0,80
$f_{H,0}$ (MPa)	79,58	51,00
$f_{H,90}$ (MPa)	51,50	67,00
$E_{c,0}$ (MPa)	14403	12967
$E_{t,0}$ (MPa)	13611	12764
E_M (MPa)	15601	12376
T (N.m)	55,24	33,39

Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2019c) e Lahr *et al.* (2016).

Tabela 9 - Valores médios (X_m) da literatura para as propriedades de retração total radial (RTR) e retração total tangencial (RTT) para a espécie *Erisma uncinatum* Warm.

Propriedades	X_m
Retração total radial (%)	5,83
Retração total tangencial (%)	10,55

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

Tabela 10 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Erismia uncinatum* Warm.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	0,59
ρ_{verde} (g/cm ³)	1,11
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,48
Retração Radial (%)	3,30
Retração Tangencial (%)	7,70
Retração Volumétrica (%)	12,50

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 11 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da *Erismia uncinatum* Warm.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	42,20	33,70
f_M (MPa)	80,20	72,50
E_M (MPa)	10395*	9365
$E_{c,0}$ (MPa)	-	12101
$f_{V,0}$ (MPa)	-	7,40
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	-	3844
$f_{t,90}$ (MPa)	-	4,20
$f_{s,0}$ (MPa)	-	0,50

*propriedade determinada com densidade aparente da madeira igual a 12%.

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

A norma ABNT NBR 7190/1997 também apresenta os valores médios para algumas das propriedades da *Erismia uncinatum* Warm (Tabela 12). Esses dados estão contidos no Anexo E “Valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de reflorestamento”. Neste anexo, a *Erismia uncinatum* é denominada de Quarubarana, outro nome popular dessa madeira.

Tabela 12 - Valores médios (X_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Quarubarana.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,54
$f_{c,0}$ (MPa)	37,80
$f_{t,0}$ (MPa)	58,10
$f_{t,90}$ (MPa)	2,60
$f_{v,0}$ (MPa)	5,80
$E_{c,0}$ (MPa)	9067

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

2.4.4 Tatajuba (*Bagassa guianensis*)

Bagassa guianensis é o nome científico dado à madeira de Tatajuba, também conhecida por Amaparirana, Amarelão, Bagasseira, entre outros nomes populares. É uma madeira tropical brasileira de maior ocorrência na Amazônia, Acre, Maranhão, Mato Grosso, Pará e Rondônia. O cerne e o alburno são distintos pela cor, onde o cerne se apresenta amarelo-dourado com algumas tonalidades mais escuras de castanho-amarelado. Possui grã revessa, textura média, densidade média e é moderadamente dura ao corte (IPT, 2022).

Seu parênquima axial não consegue ser visualizado nem mesmo através de lente. Os raios são visíveis a olho nu no topo, porém na face tangencial é visível apenas sob lente. Seus vasos também podem ser vistos a olho nu, são de dimensões medianas a grandes, oferecendo uma porosidade difusa para a madeira. Tais vasos são, em maioria, solitários e obstruídos por tilos. As camadas de crescimento são ligeiramente distintas e separadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras (IPT, 2022).

Quanto à durabilidade natural ao ataque de organismos xilófagos, o cerne é naturalmente resistente ao ataque de fungos de podridão-branca e parda, com durabilidade superior a sete anos quando testada na Amazônia. É moderadamente resistente ao ataque de perfuradores marinhos, com vida útil superior a 25 anos quando em contato com o solo. Assim, devido à sua elevada densidade e dificuldade de penetração de líquidos, a madeira de Tatajuba é de difícil tratamento com soluções preservativas, mesmo utilizando o processo de vácuo-pressão, apresentando maiores dificuldades com tratamento com soluções preservantes de creosoto (oleossolúvel) (IPT, 2022).

Apresenta boa trabalhabilidade, tanto com ferramentas manuais quanto mecânicas, produzindo um bom acabamento. Porém, não é fácil martelar pregos na sua superfície, sendo recomendado que faça a furação prévia. A secagem ao ar é lenta e sem a ocorrência de defeitos, porém apresenta leve tendência ao empenamento, torcimento e encanoamento quando secada em estufa (IPT, 2022).

Na construção civil, pode ser utilizada para compor estruturas mais pesadas, como dormentes ferroviários, cruzetas, estacas, tesouras, vigas, caibros. Além disso, proporciona boa qualidade em aplicações mais leves como em batentes, janelas, painéis, lambris e forros. Nas Tabelas 13, 14 e 15 são apresentados valores para algumas das suas propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 13 - Valores médios (X_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Tatajuba.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,94
$f_{c,0}$ (MPa)	79,50
$f_{t,0}$ (MPa)	78,80
$f_{t,90}$ (MPa)	3,90
$f_{v,0}$ (MPa)	12,20
$E_{c,0}$ (MPa)	19583

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 14 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Bagassa guianensis*.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	0,82
ρ_{verde} (g/cm ³)	1,11
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,68
Retração Radial (%)	5,50
Retração Tangencial (%)	7,10
Retração Volumétrica (%)	11,40

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 15 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie *Bagassa guianensis*.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	79,70	54,40
f_M (MPa)	138,20	100,00
E_M (MPa)	-	15857
$E_{c,0}$ (MPa)	-	17304
$f_{v,0}$ (MPa)	-	11,50
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	-	7208
$f_{t,90}$ (MPa)	0,80*	4,50
$f_{s,0}$ (MPa)	-	0,50

*propriedade determinada com densidade aparente da madeira igual a 12%.

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

2.4.5 Cupiúba (*Goupia glabra*)

Goupia glabra é o nome científico dado à Cupiúba, também conhecida popularmente por copiúba, cachaceiro, copiúva, cupiúva-rosa, peniqueiro, vinagreiro, entre outros. É uma madeira tropical brasileira com maior ocorrência na Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia (IPT, 2022).

O cerne e o alburno possuem a mesma coloração castanho-avermelhado, possui superfície sem brilho, densidade alta, grã irregular, textura média e camadas de crescimento indistintas. O parênquima axial e os raios podem ser vistos apenas com o auxílio de lente. Já os vasos são visíveis a olho nu, oferecendo uma porosidade difusa e obstruídos por óleo-resina (IPT, 2022).

A madeira de Cupiúba tem alta resistência natural ao ataque de organismos xilófagos, como os fungos de podridão parda e branca, e cupins-de-madeira-seca. Porém, não é resistente ao ataque de agentes xilófagos marinhos. A sua durabilidade consegue ultrapassar 12 anos de serviço quando em contato com o solo. Possui moderada permeabilidade às soluções preservativas, como o creosoto (oleossolúvel) e o CCA (hidrossolúvel). O grau de retenção atingido por um preservativo oleossolúvel é de 200 kg/m³ a 300 kg/m³, ou seja, até 300 kg de preservativo por m³ de madeira tratada (IPT, 2022).

A madeira de Cupiúba apresenta fácil trabalhabilidade ao ser serrada, aplainada,

colada e parafusada, porém, o uso de pregos sem a furação prévia pode provocar rachaduras e, em geral, recebe bom acabamento. Por apresentar rachaduras na tora, não é uma madeira recomendada para a fabricação de compensados. A superfície aceita bem acabamentos como tinta, verniz, emassamento e polimento. A secagem ao ar é lenta e não causa sérios defeitos na peça, já na secagem em estufa, há a ligeira incidência de defeitos (IPT, 2022).

É uma madeira utilizada na construção civil, como em estruturas com grande solicitação de esforços como pontes, postes, mourões, cruzetas, esteios, escoras, vigas e caibros. Também é bem aproveitada em ripas e partes secundárias de estruturas. Como outros usos, pode-se destacar cabos de ferramentas, embarcações e embalagens (IPT, 2022). Alguns valores encontrados na literatura para as propriedades da espécie *Goupia glabra* são apresentadas nas Tabelas 16, 17 e 18.

Tabela 16 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Goupia glabra*.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	0,87
ρ_{verde} (g/cm ³)	1,13
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,71
Retração Radial (%)	4,80
Retração Tangencial (%)	9,10
Retração Volumétrica (%)	16,10

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 17 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da *Goupia glabra*.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	67,20	50,80
f_M (MPa)	96,70	122,10
E_M (MPa)	-	13690
$E_{c,0}$ (MPa)	-	17142
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	-	6266
$f_{t,90}$ (MPa)	-	6,80
f_s (MPa)	-	0,90

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 18 - Valores médios (X_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Cupiúba.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0.838
$f_{c,0}$ (MPa)	54,40
$f_{t,0}$ (MPa)	62,10
$f_{t,90}$ (MPa)	3,30
$f_{v,0}$ (MPa)	10,40
$E_{c,0}$ (MPa)	13627

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

2.4.6 Jatobá (*Hymenaea spp.*)

A madeira de Jatobá também é conhecida por nomes populares como: copal, courbaril, jataíba, jatobazinho, jutaí, quebra machado, entre outros. O seu nome científico é *Hymenaea spp.*, denominação para o gênero que é constituído por várias espécies, como a *Hymenaea courbaril* L., *Hymenaea intermedia* Ducke, *Hymenaea oblongifolia* Huber, *Hymenaea parvifolia* Huber e *Hymenaea stilbocarpa* Hayne (IPT, 2022).

O Jatobá é encontrado em quase todas as matas nativas brasileiras e a espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne tem ocorrência desde o estado do Piauí até o Paraná, já a espécie *Hymenaea courbaril* L. é a mais presente na Amazônia. No comércio, todas essas variações de espécies possuem o mesmo valor, pois apresentam grande semelhança entre os valores de suas densidades de massa e a anatomia. Por essa razão, essas madeiras podem ser generalizadas como *Hymenaea spp.* e serem agrupadas para análise (IPT, 2022).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022), o cerne varia entre as colorações castanho-amarelado ao castanho-avermelhado, podendo ser diferenciado do alburno, que é branco-amarelado. A densidade dessa madeira é alta, é dura ao corte, possui grã regular a irregular, textura média e superfície pouco lustrosa.

Ainda de acordo com a mesma autoria, essa madeira possui parênquima axial visível a olho nu, em forma de faixas marginais associadas ao paratraqueal vasicêntrico ou aliforme. Os raios conseguem ser visualizados no topo sem o auxílio de lente, porém na face lateral é necessário a utilização da lente para visualizar a pouca quantidade de raios. Os vasos são visíveis a olho nu, são de dimensão mediana e em pouca quantidade. Além disso, possui

porosidade difusa, em vasos solitários e múltiplos, obstruídos por óleo-resina. As camadas de crescimento são distintas e individualizadas pelo parênquima marginal.

Quanto à sua durabilidade natural, a espécie *Hymenaea courbaril* L. é altamente resistente aos fungos de podridão branca e parda e térmitas, porém é suscetível aos perfuradores marinhos. Já a espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne, quando em contato com o solo, apresenta vida média inferior a 9 anos e, por essa razão, é considerada com durabilidade moderada. Em ensaios laboratoriais, a mesma espécie apresenta resistência de média a alta contra os organismos xilófagos. A madeira *Hymenaea* sp., ensaiada em ambiente marinho, apresenta pouca resistência contra perfuradores marinhos. O cerne da madeira de Jatobá demonstra ser impermeável ao tratamento com substâncias preservativas, mesmo com o auxílio de autoclave, pois possui alta densidade (IPT, 2022).

É uma madeira moderadamente fácil de trabalhar e pode ser aplainada, colada, parafusada e pregada. O acabamento é de boa qualidade e permite pintura, verniz e lustre. Porém, apresenta determinada resistência ao toronar e faquear. Ao ar, em local protegido da luz solar direta e com boa ventilação, a secagem é realizada com poucas deformações nas peças. Deve-se tomar cuidado para o tempo de secagem não ocorra muito depressa, pois assim podem ser ocasionados defeitos como rachaduras e defeitos (IPT, 2022).

Por ser uma madeira de boa qualidade e de alta densidade, pode ser utilizada em muitas aplicações na construção civil, como em dormentes ferroviários, cruzetas, vigas, caibros e tesouras (aplicações pesadas). Como aplicações leves, por apresentar bom acabamento, é utilizada em esquadrias (portas, janelas e batentes), em guarnições, rodapés, painéis, forros, entre outras aplicações. Além disso, móveis de alta qualidade são confeccionados com o Jatobá, sendo referência nesse setor (IPT, 2022). As Tabelas 19, 20, e 21 apresentam os valores médios para as propriedades já analisadas na literatura.

Tabela 19 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	0,96
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,80
Retração Radial (%)	3,10
Retração Tangencial (%)	7,20
Retração Volumétrica (%)	10,70

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 20 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie *Hymenaea stilbocarpa* Hayne.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	82,20	67,00
f_M (MPa)	151,80	131,60
E_M (MPa)	-	14837
$E_{c,0}$ (MPa)	-	17691
$f_{V,0}$ (MPa)	-	17,50
$f_{H,0}$ (N/cm ²)		11180
$f_{t,90}$ (MPa)	-	13,10
$f_{s,0}$ (MPa)	-	1,50

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 21 - Valores médios (X_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Jatobá (*Hymenaea spp.*).

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	1,074
$f_{c,0}$ (MPa)	93,30
$f_{t,0}$ (MPa)	157,50
$f_{t,90}$ (MPa)	3,20
$f_{V,0}$ (MPa)	15,70
$E_{c,0}$ (MPa)	23607

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

2.4.7 Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke)

O nome científico da madeira de Angelim Vermelho é *Dinizia excelsa* Ducke e também é conhecida pelos seguintes nomes: Angelim, Angelim-falso, Angelim-ferro, Angelim-pedra, faveira-carvão, entre outros. O desenvolvimento dessa madeira se concentra na Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Rondônia (IPT, 2022).

As suas camadas de crescimento são ligeiramente separadas por zonas fibrosas tangenciais mais escuras e por linhas de parênquima marginal. O cerne e o alburno possuem

quase a mesma cor castanho-avermelhado e é uma madeira de densidade alta, dura ao corte, possui grã direita a irregular, e de textura média a grossa. O parênquima axial e os vasos são visíveis a olho nu, já os raios só conseguem ser analisados através de lentes. O parênquima é paratraqueal aliforme de extensão losangular e os vasos são de dimensões medianas, em pouca quantidade, obstruídos por óleo-resina ou substância esbranquiçada, e porosidade difusa (IPT, 2022).

O cerne dessa madeira possui alta resistência natural ao ataque de organismos xilófagos, com média de durabilidade maior que 8 anos quando utilizadas como estacas no solo. Por ser de alta densidade, o cerne não é tratável com nenhuma substância preservativa, nem mesmo com o auxílio da autoclave. Seca relativamente bem ao ar, porém apresenta moderada tendência ao torcimento e leve tendência ao colapso (IPT, 2022).

Dentre as suas aplicações, destaca-se a construção civil que emprega essa madeira em pontes, postes, estacas, esteios, cruzetas, dormentes ferroviários, obras portuárias, piers, vigas e caibros. Percebe-se a adoção em estruturas que sofrem com a incidência de cargas elevadas, pois é uma madeira de alta resistência e durabilidade (IPT, 2022). Nas tabelas 22 e 23, estão os valores retirados da literatura para algumas de suas propriedades.

Tabela 22 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Dinizia excelsa* Ducke.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	1,09
ρ_{verde} (g/cm ³)	1,26
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,83
Retração Radial (%)	4,20
Retração Tangencial (%)	6,60
Retração Volumétrica (%)	14,60

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 23 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para algumas propriedades de resistência e de rigidez da espécie *Dinizia excelsa* Ducke.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	80,90	65,20
f_M (MPa)	138,10	99,70
E_M (MPa)	-	14013
$f_{V,0}$ (MPa)	17,70*	13,10
$f_{H,0}$ (N/cm ²)	14318*	9993
$f_{H,90}$ (N/cm ²)	13543*	10866

*propriedade determinada com densidade aparente da madeira igual a 12%.

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

2.4.8 Champanhe (*Dipteryx odorata*)

A madeira de Champanhe recebe muitos nomes populares como: Cumaru, Camaruferro, Cambaru, Cambaru-ferro, Champanha, Cumbari, entre outros. É uma espécie tropical brasileira, seu nome científico é *Dipteryx odorata*, e sua maior ocorrência acontece na Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. O cerne é castanho-claro-amarelado e consegue ser identificado pela sua coloração. As camadas de crescimento são poucas distintas e marcadas por zonas fibrosas (IPT, 2022).

Possui alta densidade, é dura ao corte, possui grã reversa, textura fina à média, aspecto fibroso atenuado e uma superfície pouco lustrosa. O parênquima axial é paratraqueal aliforme de extensão losangular, ocasionalmente confluyente e pode ser visualizado apenas com o auxílio de lente. Seus raios são finos, numerosos, estratificados e podem ser vistos sob lente no topo e na face tangencial. Os vasos são visíveis a olho nu, são em pouco número, de pequena dimensão, geminados, obstruídos por óleo resina e oferecem porosidade difusa (IPT, 2022).

Essa espécie possui alta resistência natural contra o ataque de organismos xilófagos (fungos apodrecedores e cupins), apresentando durabilidade superior a 12 anos de serviço quando em contato com o solo. Porém, apresenta baixa resistência aos organismos xilófagos marinhos. É uma madeira difícil de ser tratada até com o auxílio de vácuo-pressão, o cerne não é tratável nem com os preservativos oleosos como o creosoto, nem com os hidrossolúveis como o CCA (IPT, 2022).

É uma madeira difícil de ser trabalhada e perfurada, porém consegue ser bem acabada através de torneamento. Por ser uma madeira de natureza oleosa, apresenta dificuldade em ser colada. Tem pequena tendência a rachaduras superficiais e é relativamente fácil de secar ao ar. A secagem artificial é lenta e não ocasiona defeitos na peça (IPT, 2022).

É aplicada na construção civil em estruturas de pontes, postes, mourões, estacas, esteios, cruzetas, vigas e caibros. Além destas aplicações pesadas, pode ser utilizada em esquadrias e estruturas leves internas residenciais. Por possuir alta densidade, é uma madeira de ótima qualidade para fabricação de móveis (IPT, 2022). Os valores retirados da literatura para as propriedades físicas e mecânicas são mostradas nas Tabelas 24, 25 e 26.

Tabela 24 - Valores médios (X_m) encontrados na literatura para as propriedades físicas da espécie *Dipteryx odorata*.

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,15}$ (g/cm ³)	1,09
$\rho_{básica}$ (g/cm ³)	0,91
Retração Radial (%)	5,30
Retração Tangencial (%)	8,20
Retração Volumétrica (%)	13,60

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 25 - Valores médios (X_m) para algumas propriedades de resistência e de rigidez da *Dipteryx odorata*.

Propriedades	X_m ($\rho_{ap,15}$)	X_m (ρ_{verde})
$f_{c,0}$ (MPa)	94,20	59,30
f_M (MPa)	178,30	123,80
E_M (MPa)	-	18547
$E_{c,0}$ (MPa)	-	19306
$f_{V,0}$ (MPa)		14,20
$f_{H,0}$ (N/cm ²)		9787
$f_{t,90}$ (MPa)		7,50
$f_{s,0}$ (MPa)		1,10

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022).

Tabela 26 - Valores médios (X_m) segundo a ABNT NBR 7190/97 para propriedades de resistência e de rigidez para a madeira de Champagne (Cumarú).

Propriedades	X_m
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	1,09
$f_{c,0}$ (MPa)	93,20
$f_{t,0}$ (MPa)	133,50
$f_{t,90}$ (MPa)	2,90
$f_{v,0}$ (MPa)	10,70
$E_{c,0}$ (MPa)	23002

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190/1997.

2.5 Estimativas das propriedades da madeira

Nesta seção, serão apresentadas pesquisas que correlacionaram as propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira com a propriedade de densidade como variável independente, visando à obtenção de equações simplificadas. Segundo Almeida *et al.* (2015), como a madeira é um material de origem natural e suas propriedades são fortemente influenciadas pelas características anatômicas, são imprescindíveis estudos que visam definir, com mais precisão, a interação entre as propriedades através de equações empíricas.

Dias e Lahr (2004) analisaram 40 espécies de madeiras tropicais brasileiras em busca de equações simplificadas para obtenção dos valores das propriedades de resistência e de rigidez a partir dos valores de densidade aparente. Para isso, utilizaram a análise de regressão linear simples e, como resultado, foi possível observar dependência entre o valor de densidade aparente e as seguintes propriedades avaliadas: $f_{t,0}$; $f_{c,0}$; f_v ; f_M ; $E_{c,0}$; $E_{t,0}$; E_M ; $f_{H,0}$; $f_{H,90}$ e T. Os coeficientes de determinação (R^2) para as relações entre estas propriedades e a densidade aparente ficaram entre 0,62773 e 0,92249, comprovando que a densidade aparente tinha relação com as propriedades estudadas. Quanto mais próximo de 1, melhor é a regressão, porém, devido à alta variabilidade que as peças de madeira da mesma espécie apresentam, esses valores puderam ser considerados como uma boa estimativa.

Ainda, Dias e Lahr (2004) avaliaram a relação entre a densidade aparente e a retratibilidade radial total, retratibilidade tangencial total, resistência à tração normal às fibras e resistência ao fendilhamento. As relações obtidas apresentaram coeficientes de determinação (R^2) baixos, o que evidenciou baixa relação entre a densidade aparente e essas

propriedades. Assim, os autores recomendaram mais estudos na área com a inserção de novos parâmetros para ajustar as equações de estimativas das propriedades.

Araújo (2007) avaliou correlações entre as propriedades físicas de 163 espécies de madeiras tropicais brasileiras com a finalidade de elaborar equações que permitiriam estimá-las a partir de algumas propriedades. Para isso, utilizaram análises de regressão expressas pelo coeficiente de correlação linear de Pearson para analisar as correlações entre a densidade básica, que foi utilizada como variável independente, e as demais propriedades das espécies de madeira. Obtiveram melhores ajustes para as relações funcionais que relacionaram a densidade básica com $f_{c,0}$, f_M , $E_{c,90}$, $E_{s,0}$, E_M , $f_{H,0}$, $f_{H,90}$ e os piores ajustes com $f_{t,90}$, f_v , retração tangencial (RT) e radial (RR). Os autores concluíram que os piores ajustes se deram para as propriedades que são influenciadas significativamente por fatores como a anatomia e presença de extrativos.

Almeida *et al.* (2014) avaliaram a possibilidade de estimar a tenacidade da madeira através da densidade aparente. Para isso, utilizou-se modelos de regressão polinomial (linear, quadrática e cúbica) e foram analisadas seis espécies de madeira, sendo elas: Angico, Eucalipto, Jatobá, Paricá, Pinus e Teca. Foram obtidas boas estimativas das tenacidades através das densidades aparentes, principalmente quando aplicado o modelo de regressão cúbica.

Almeida *et al.* (2015) avaliaram a correlação entre a densidade seca e o coeficiente de retração volumétrica em três espécies de madeiras tropicais: *Cedrella* sp., *Cassia ferruginea* e *Vataireopsis araroba*. Para isso, estas espécies foram avaliadas separadamente e em grupo para uma melhor compreensão da correlação. Os resultados mostraram uma correlação linear entre a densidade seca e o coeficiente de retração volumétrica nas três espécies juntas, porém não foi encontrada uma correlação com a análise das espécies separadas. Assim, eles concluíram a necessidade de maiores estudos com um maior número de espécies para generalizar com mais propriedade os resultados obtidos.

Cavalheiro *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de estimar a estabilidade dimensional (retração e coeficiente de anisotropia) da madeira em função da densidade. Para isso, foram utilizados modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmica e geométrica) e as densidades básica e aparente como variáveis independentes. Foram analisadas as seguintes espécies de madeira dos grupos das coníferas: *Pinus* sp.; *Pinus oocarpa*; e dicotiledôneas: Paricá (*Schizolobium amazonicum*); Jatobá (*Hymenaea* sp.) e *Lyptus* ®. Os resultados indicaram a ausência de um padrão de comportamento entre a densidade e a retração, bem

como entre a densidade e o coeficiente de anisotropia (para madeiras duras), impossibilitando estabelecer relações significativas na adoção da densidade como estimador destas propriedades físicas da madeira.

Ainda de acordo com Cavalheiro *et al.* (2016), existem diferenças nas características anatômicas entre as espécies e isso pode ser o fator responsável inexistência de padrão de comportamento entre as densidades e as propriedades de estabilidade dimensional. Seus resultados mostraram viabilidade somente na correlação entre as densidades (básica e aparente) onde o modelo linear forneceu as melhores configurações para os dois grupos de madeiras (coníferas e dicotiledôneas).

Christoforo *et al.* (2016) procuraram estimar a retração total (radial, tangencial e volumétrica) e os coeficientes de anisotropia (radial, tangencial e volumétrico) através da densidade aparente de cinco espécies de madeira, sendo elas: Cedro Doce [C20]; Canafístula [C30]; Angelim Araroba [C40]; Mandioqueira [C50]; Angelim Vermelho [C60]. Tais espécies foram escolhidas na tentativa de abranger todas as classes de resistência para o grupo das dicotiledôneas. Para isso, foram utilizados modelos de regressão polinomial (linear, quadrática, cúbica) e exponencial. Conseguiram uma boa estimativa a partir da densidade e a aplicação do modelo de regressão exponencial para obtenção das retrações tangenciais e volumétricas.

Ainda de acordo com Christoforo *et al.* (2016), a madeira de Cedro Doce apresentou uma excelente estimativa para o coeficiente de anisotropia e as demais espécies apresentaram bons resultados nessa estimativa. Os autores atentaram para a importância de novas pesquisas abordando expressões gerais para estimar as propriedades de estabilidade dimensional a partir da propriedade de densidade aparente das espécies de madeira.

Almeida *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de obtenção da resistência à compressão paralela às fibras através da densidade aparente. Para tal, utilizaram os modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico na análise das três espécies de madeiras tropicais brasileiras: Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.) Os resultados estatísticos mostraram que não é possível estimar a resistência à compressão paralela às fibras através das densidades aparentes das espécies de madeira investigadas.

Chen e Guo (2016) obtiveram os valores de densidade e propriedades mecânicas das madeiras de *Cunninghamia lanceolata* Lamb. Hook e *Ulmus rubra* através de ensaios não destrutivos (resistógrafo e “*stress wave method*”). No ensaio com o resistógrafo, é obtida a amplitude de resistência à perfuração da broca na peça (F) de madeira e, por meio do “*stress*

wave method”, obtém-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_D). Correlacionaram os parâmetros gerados pelas técnicas não destrutivas com os valores obtidos por meio de ensaios de flexão estática ($E_M; f_M$), de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) e densidade. Com modelos de regressão lineares (p-valor < 5%), obtiveram como resultado boas correlações entre: ρ e F, E_M e E_D , f_M e E_D e $f_{c,0}$ e E_D . Sugerindo que os métodos não destrutivos utilizados foram eficazes, em conjunto, na avaliação das propriedades estudadas.

Aquino *et al.* (2017) avaliaram relações entre 27 propriedades mecânicas, densidade, coeficientes de retratibilidade, teor de umidade, coeficientes de anisotropia e ponto de saturação das fibras para as espécies *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. e *Q. laurina* Humb. & Bonpl. Como resultado, obtiveram boas relações entre as propriedades mecânicas com a densidade, ponto de saturação das fibras e com os coeficientes de retratibilidade das madeiras. A densidade se destacou como a melhor variável utilizada nas equações geradas a partir dos modelos de regressão aplicados, apresentando boa precisão através da análise de variância (ANOVA).

Chen e Guo (2017) estudaram a viabilidade de obtenção das propriedades mecânicas e da densidade para a espécie *Abies fabri* (Mast.) Craib através de ensaios não destrutivos (resistógrafo e “*stress wave method*”) e análises de confiabilidade. Para isso, realizaram testes destrutivos de acordo com a norma chinesa para a obtenção das propriedades da madeira e testes não destrutivos para obtenção dos parâmetros a serem relacionados. Através das análises de regressão e de variância, obtiveram correlações lineares significativas entre os parâmetros não destrutivos com as propriedades avaliadas na pesquisa ($\rho, E_M, f_M, f_{c,0}$).

Hodousek *et al.* (2017) utilizaram os métodos não destrutivos de ensaios com base em vibração longitudinal (*Timber Grader* e acelerômetro) para obtenção dos módulos de elasticidade dinâmico para as madeiras de *Cupressus lusitanica* e *Populus x canadensis* com a finalidade de, posteriormente, correlacionar e comparar esses valores com o módulo de elasticidade na flexão estática obtido por meio de ensaio destrutivo, determinado por meio da EM 408 (2012). A dependência entre os valores foi avaliada por modelos de regressão linear, onde foram geradas equações que correlacionaram os módulos dinâmicos e os estáticos com elevados coeficientes de determinação ($81\% \leq R^2 \leq 87\%$). A diferença entre os valores para o módulo de elasticidade dinâmico e estático foi de 1,1% a 2,4% para a espécie *Populus x canadensis* e de 12,7% a 15,5% para a espécie *Cupressus lusitanica*.

Cavalheiro *et al.* (2018) avaliaram a possibilidade de estimar o módulo de elasticidade na flexão estática de peças estruturais de *Shizolobium amazonicum* Herb em função da

vibração transversal e da densidade. Para isso, foram estimados os módulos de elasticidade na flexão estática de acordo com a ABNT NBR 7190/1997 e de acordo com FAKOPP Enterprise. Foram utilizados modelos de regressão linear e quadrática para estimar o módulo obtido de acordo com a norma brasileira em função do módulo gerado no ensaio de vibração transversal. Além disso, foi gerado um modelo de regressão multivariada para a consideração da densidade da madeira. Os modelos de regressão propostos apresentaram um coeficiente de determinação próximo de 60%.

Dias *et al.* (2019) estudaram a influência da densidade aparente nos valores de retração radial e tangencial das espécies de madeira. Para isso, foram avaliadas quarenta e três espécies de madeiras tropicais brasileiras e aplicados modelos de regressão linear e exponencial, com avaliação da significância e ajuste através da análise de variância (ANOVA). Como resultado, foi comprovada baixa dependência entre essas variáveis, não admitindo correlação entre a densidade aparente e as retrações radiais e tangenciais das espécies.

Almeida *et al.* (2019a) avaliaram a possibilidade de obtenção de uma equação analítica que relacionasse o teor de umidade da madeira, o ponto de saturação das fibras (FSP), a densidade básica e densidade seca (relação entre peso seco e volume seco) para obtenção da densidade aparente da madeira. Avaliaram um total de vinte espécies de madeiras tropicais brasileiras para verificação da previsibilidade da equação que foi proposta. Através da análise de variância (ANOVA) foi comprovada a equivalência dos resultados experimentais e dos estimados de ρ_{12} , mostrando que a equação desenvolvida foi estatisticamente adequada para obtenção de uma estimativa rápida dos parâmetros físicos dessas espécies de madeira.

Christoforo *et al.* (2020a) investigaram a possibilidade de estimar, através da densidade aparente, as propriedades da madeira obtidas em ensaios de ruptura frágil. Foram analisadas espécies ainda pouco conhecidas como: Cambará, Cedro, Cedroarana, Copaíba, Angelim-araroba, Castelo, Oiticica-amarela, Guarucaia, Guaicara e Garapa. Estas espécies foram escolhidas com a finalidade de cobrir todas as classes de resistência estabelecidas pela ABNT NBR 7190/1997. Apenas a propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras pôde ser estimada pela densidade aparente, com um R^2 acima de 50%. A resistência à tração normal às fibras e a resistência ao cisalhamento apresentaram baixa precisão e qualidade de ajuste.

Christoforo *et al.* (2020b) avaliaram a possibilidade de estimar a tenacidade através do valor da densidade aparente (ρ_{ap}), da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$) ou do módulo de ruptura na flexão estática (f_M). Para tal, foram testadas 36 espécies de madeiras tropicais brasileiras e aplicados modelos de regressão exponencial e polinomial (linear, quadrática e cúbica) para gerar as equações simplificadas. Os resultados apresentaram significância e representatividade em todos os ajustes realizados, onde a função polinomial cúbica foi a mais indicada na estimativa da tenacidade.

Duarte *et al.* (2020b) avaliaram a possível correlação entre a densidade aparente de 10 espécies de madeiras tropicais e a porosidade, que foi determinada através da técnica por intrusão de mercúrio. Para isso, escolheram as seguintes espécies com densidades entre 0,4 e 1,1 g/cm³: Tatajuba; Roxinho; Cambará; Cedroarana; Cumarú; Cupiúba; Caixeta; Cedro; Sucupira e Cajueiro. Através de análise estatística, conseguiram desenvolver uma equação relacionando a densidade com a porosidade (Equação 12) com R² igual a 0,88, valor que permitiu considerar a porosidade como bom estimador da densidade.

$$AD = -1,18P + 1,34 \quad \text{(Equação 12)}$$

Na Equação 12, AD é a densidade aparente e P a porosidade. Porém, ainda segundo Duarte *et al.* (2020b), devido à ocorrência de obstruções dos poros na execução da técnica por intrusão de mercúrio, a validade da hipótese poderia invalidar a equação de correlação obtida através dessa análise. Assim, sugeriram pesquisas futuras que contemplassem um maior número de espécies de madeira.

2.6 Porosidade e densidade da madeira

Pesquisadores como Ding *et al.* (2008), Ploetze e Niemz (2010), Zauer *et al.* (2013), entre outros, comprovaram que os valores de porosidade das espécies de madeira estão diretamente relacionados com a densidade, permeabilidade, condutividade térmica, estabilidade, propriedades dielétricas e resistência mecânica. Assim, como a madeira é um material poroso, a sua estrutura porosa influencia significativamente no seu comportamento.

Ding *et al.* (2008) avaliaram os efeitos da porosidade e da estrutura dos poros da madeira na propriedade física de densidade. Para tal, estudaram cinco espécies de madeiras duras e uma espécie de madeira macia, e, para analisar a anatomia das espécies, utilizaram a técnica de impregnação com metacrilato de metila para tal, que, para avaliação do seu grau de

precisão, foi comparada com a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio. Como resultado, apresentaram a técnica de impregnação utilizada como eficaz para avaliar a estrutura anatômica da madeira e concluíram que a porosidade é o principal determinante na taxa de impregnação de polímeros na madeira, apresentando alta relação com a densidade das espécies de madeira.

Plötze e Niemz (2010) estudaram a distribuição da porosidade e do tamanho dos poros de madeiras macias e duras através da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio. Concluíram que a porosidade e a densidade são parâmetros determinantes de propriedades como vazão, adsorção e impregnabilidade, condutividade térmica e resistência à tração e à flexão. Não encontraram variação no valor de $1,5 \text{ g/cm}^3$ na densidade da parede celular das espécies analisadas, concluindo que não houve relação entre a densidade aparente e a densidade da parede celular das espécies analisadas. A partir de curvas de distribuição de tamanho de poros, foram distinguidas quatro faixas de tamanhos divididas em três grupos: macroporos (raio $58-2 \mu\text{m}$ e $2-0,5 \mu\text{m}$), mesoporos (500-80 nm) e microporos (80-1,8 nm).

De acordo com a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), a área de medição dos poros (forma) é classificada da seguinte maneira: poros abertos, que se comunicam com a superfície externa, poros de transporte, que permite o fluxo de um fluido e pode ter braços que não contribuem para o transporte denominados de gaiola, e poro fechado significando um orifício isolado. Quanto à dimensão dos poros, a IUPAC classifica os microporos com dimensões menores que 2 nm, mesoporos entre 2 nm e 50 nm, e macroporos com dimensões maiores que 50 nm (JANG *et al.*, 2018).

Zauer *et al.* (2013) avaliaram a técnica de picnometria a gás para obtenção da porosidade da madeira e a sua relação com a densidade. Para tal, analisaram amostras gêmeas termicamente modificadas de *Picea abies* (L.) Karst., *Acer pseudoplatanus* L. e *Fraxinus excelsior* L.. Concluíram que a técnica é adequada para este fim, possui relação com a densidade que, de acordo com as análises, influenciou significativamente todas as propriedades físicas e os processos tecnológicos avaliados, como a secagem por troca de solventes e processos térmicos de tratamento.

A partir desses estudos, é possível afirmar que a anatomia da madeira e a porosidade influenciam significativamente nos valores das propriedades físico-mecânicas. Isso permitiu que a densidade fosse tomada como uma das principais características na classificação das classes de resistências da madeira de acordo com a ABNT NBR 7190/1997, e que estudos com a finalidade de avaliar a estrutura porosa das espécies de madeira fossem elaborados por

diversos pesquisadores.

2.7 Análise de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica simples muito utilizada para avaliar o comportamento de materiais cerâmicos através da determinação da porosidade (LORENTE-AYZA *et al.*, 2017; NICKERSON *et al.*, 2019). A técnica também fornece bons resultados na determinação da porosidade de materiais lignocelulósicos e previsão do seu comportamento, fornecendo informações como a distribuição, volume e área de superfície dos poros. Com esses dados, é possível obter a densidade, e por essa razão a técnica vem sendo adequada para a determinação da anatomia de diferentes espécies de madeiras e compósitos à base de madeira (MOURA *et al.*, 2005; GIGAC *et al.*, 2017; DUARTE *et al.*, 2020a; DUARTE *et al.*, 2020b).

Segundo Webb e Orr (1997) e Gigac *et al.* (2017), a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio se baseia na propriedade do mercúrio não molhar a grande maioria das substâncias. Dessa forma, não penetra nos poros através da capilaridade, sendo necessária a aplicação de pressão em proporção inversa ao diâmetro dos poros, após a amostra a ser analisada passar pelo vácuo antes de ser envolvida pelo mercúrio.

Segundo Schneider e Wagner (1974) e Plötze e Niemz (2010), o volume de mercúrio que entra dentro dos poros está relacionado ao volume destas estruturas anatômicas, sendo a pressão aplicada diretamente relacionada às suas dimensões. Através da técnica, é possível a medição do volume total de mercúrio intrusado, área total da superfície, tamanho e distribuição do tamanho do poro e densidade aparente. Porém, não é possível a medição de poros fechados ou que possuam um raio inferior a 1,8 nm. A técnica utiliza pequenas amostras, onde é aplicada pressão gradualmente crescente, possibilitando o ajuste da taxa de aumento da pressão aplicada no processo.

De acordo com Webb e Orr (1997) e Gigac *et al.* (2017), o mercúrio líquido apresenta alta energia superficial de $485 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ e exibe alto ângulo de contato variando entre 130° e 140° , dependendo de fatores como superfície da amostra e pureza do mercúrio. É possível monitorar a quantidade de substância introduzida nos espaços vazios da amostra de acordo com a pressão aplicada. Os dados são fornecidos através de um gráfico de volume de mercúrio intrusado *versus* variação de pressão (convertida em tamanho médio de poro).

De acordo com Jang *et al.* (2018), através da técnica é obtido o diâmetro médio dos

poros, conforme é calculado pela equação de Washburn (Equação 14):

$$D = \frac{-(4\gamma \cdot \cos \theta)}{\Delta p} \quad (\text{Equação 14})$$

Na Equação 14, D é o diâmetro do poro assumido como cilíndrico em mm, γ é a tensão superficial do mercúrio em mN/m, θ ângulo de contato do mercúrio em graus ($^{\circ}$) e p a variação de pressão em N/m².

Também existe o método de extrusão denominado de técnica de porosimetria por fluxo capilar, que mede o tamanho do poro através da medição da pressão no momento em que o líquido utilizado como umectante é extrudado pela pressão do ar, aplicada depois que o poro é umedecido pelo líquido umectante que possui propriedade de penetrar facilmente nos poros devido à baixa tensão de superfície (JANG *et al.*, 2018).

Almeida e Hernández (2007) estudaram a influência da porosidade na dessorção de umidade de duas madeiras temperadas (*Fagus grandifolia* Ehrhart e *Betula alleghaniensis* Britton) e cinco madeiras tropicais (*Cariniana domestica* (C. Martius) Miers; *Brosimum alicastrum* Swartz; *Robinia coccinea* Aublet; *Aspidosperma macrocarpon* C. Martius e *Cedrelinga cateniformis*). Para obter a análise da estrutura porosa das madeiras estudadas, foi realizada a caracterização pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio e por análise anatômica quantitativa. Neste estudo, a técnica de intrusão de mercúrio se mostrou como uma ferramenta importante na avaliação da percolação de fluidos nas madeiras. Através da análise anatômica quantitativa, foi possível explicar os primeiros passos da drenagem e penetração do mercúrio na madeira.

Gigac *et al.* (2017) utilizaram as técnicas de porosimetria de fluxo capilar e porosimetria por intrusão de mercúrio para determinar a distribuição e as dimensões dos poros dos papéis utilizados na superfície de papelões ondulados e comparar as técnicas. Através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, conseguiram analisar o volume, diâmetro e distribuição dos poros do material lignocelulósico. Já através da porosimetria de fluxo capilar, obtiveram resultados mais interessantes sobre distribuição do fluxo e permeabilidade ao ar.

Li *et al.* (2017) utilizaram a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio para analisar o tamanho e distribuição dos poros presentes no cerne e no alburno da madeira de *Pinus sylvestris* L. antes e depois de passar pelos processos de compressão e tratamento térmico. A análise de porosimetria por intrusão de mercúrio possibilitou uma boa análise da

anatomia da madeira, mostrando as modificações na distribuição, formato e dimensões dos poros do cerne e do alburno antes e depois dos processos realizados.

Jang *et al.* (2018) compararam a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio com as técnicas de porosimetria por fluxo capilar na análise da anatomia da madeira de dez espécies de madeiras da Coreia. Concluíram que, através da intrusão de mercúrio, consegue-se medir todos os volumes dos poros da madeira, bem como dos microporos nas direções longitudinais e transversais (como lúmens de células cortadas), obtendo a média de valor para o tamanho de poro inferior ao da técnica por fluxo capilar por também medir as dimensões dos microporos,

Vitas *et al.* (2019) utilizaram a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio para obter a porosidade e analisar a influência na deslignificação ácida da madeira de faia, pois os tratamentos de deslignificação podem alterar a densidade e a química da madeira. Realizaram uma caracterização estrutural e analisaram a porosidade através da técnica de intrusão de mercúrio. Concluíram que a madeira de faia nativa é caracterizada pela presença de macro, meso e microporos e a deslignificação alterou a porosidade, aumentando a importância dos macroporos na distribuição do tamanho médio dos poros. Também mostraram que a porosidade é diretamente dependente do processo de secagem aplicado.

Dentre os resultados de porosidade obtidos através desta técnica na literatura, cita-se Varanda (2016) que obteve as propriedades porosimétricas das madeiras de Angelim Vermelho (*Dinizia excelsa*), Cumaru (*Dipterix odorata*) e Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), que apresentaram porosidade de 22,60%, 32,40% e 34,50%, respectivamente. Duarte *et al* (2020b) também encontrou valores para as propriedades de 10 espécies de madeira, conforme apresenta a Tabela 27.

Tabela 27 - Valores médios para a porosidade de 10 espécies tropicais brasileiras.

Espécie	Porosidade
Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i>)	0,3160
Roxinho (<i>Peltogyne recifencis</i>)	0,2962
Cambará (<i>Erismia uncinatum</i> Warm)	0,4610
Cedroarana (<i>Cedrelinga catenaeformis</i>)	0,7204
Cupiuba (<i>Goupia glabra</i>)	0,4036
Cumarú (<i>Dipteryx odorata</i>)	0,3663
Caixeta (<i>Simarouba versicolor</i>)	0,7325
Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)	0,7329
Sucupira (<i>Bowdichia nítida</i>)	0,4466
Cajueiro (<i>Anacardium</i> sp.)	0,6595

Fonte: Adaptado de Duarte *et al.* (2020b).

2.8 Conclusões da Revisão Bibliográfica

A literatura apresenta o grande potencial brasileiro no mercado madeireiro e a importância de se conhecer as propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira para elaboração de projetos estruturais bem dimensionados e racionalizados. Porém, na grande maioria das vezes, a realização da caracterização completa da madeira é inviável por necessitar de equipamentos caros, mão de obra especializada e de demasiado tempo. Dessa forma, destaca-se a necessidade de obtenção de equações e métodos simplificados de caracterização.

Também é apresentada a grande influência da densidade nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras e a grande busca por pesquisadores na obtenção de correlações entre as propriedades. Através desses estudos, foi possível a obtenção de equações empíricas e estatisticamente testadas que correlacionassem a densidade aparente, que é obtida de forma simples, e as demais propriedades da madeira, constituindo em equações simplificadas e que facilitam o levantamento dos valores das propriedades necessárias para o projeto de estruturas.

Ainda, a literatura apresenta o grande número de pesquisas que utilizaram a análise de porosimetria por intrusão de mercúrio para obtenção do valor de porosidade de materiais lignocelulósicos. Além disso, foi destacada a consideração da porosidade como um bom

estimador da densidade aparente e a possibilidade do uso de modelos de regressão para a estimativa das propriedades da madeira tomando a densidade aparente como variável independente.

Assim, por meio da literatura apresentada, pode-se concluir que não foram encontradas na literatura equações empíricas, com elevados graus de precisão, que estimem as propriedades a partir da densidade aparente e da porosidade como variáveis independentes, a partir apenas da porosidade e, por fim, que estime a porosidade a partir da densidade com alta precisão. Isso facilitaria a obtenção dos valores médios da porosidade das madeiras e auxiliaria processos que envolvem o processamento das madeiras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados na presente pesquisa com a finalidade de estabelecer correlação entre a densidade aparente e a porosidade, de avaliar a utilização ora da densidade e ora da porosidade para a estimativa das propriedades das espécies de madeiras. Para tal, a seção será dividida nas seguintes etapas: Caracterização completa das espécies investigadas, Porosidade e Modelos de regressão.

3.1 Caracterização completa das espécies investigadas

No presente trabalho, foram analisadas oito espécies de madeiras tropicais brasileiras: Cedro-Amazonense (*Cedrela spp.*), Cedroarana (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke), Cambará (*Erisma uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianensis*), Cupiúba (*Goupia glabra*), Jatobá (*Hymenaea spp.*), Angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e Champanhe (*Dipteryx odorata*). Todos os ensaios realizados para a determinação das propriedades físico-mecânicas foram executados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

As oito espécies investigadas foram provenientes de lotes homogêneos devidamente estocados. As caracterizações completas dessas espécies foram obtidas conforme recomenda o Anexo B “Determinação das propriedades das madeiras para projeto de estruturas”, da ABNT NBR 7190 (1997). Os valores das propriedades de resistência e de rigidez foram corrigidos para a umidade padrão de referência de 12%, conforme prescrito na referida normativa.

Ainda de acordo com a norma, foram fabricados e testados doze corpos de provas por espécie e para cada tipo de ensaio realizado para a determinação das propriedades avaliadas (Tabela 28). Dessa forma, foram obtidas 1632 determinações (8 espécies \times 12 amostras \times 17 propriedades), além dos valores da porosidade (P_o), que será explicado mais detalhadamente em tópico específico, em que foram realizadas duas determinações por espécie de madeira investigada.

Na Figura 12 são ilustrados os ensaios de tração na direção paralela e compressão perpendicular às fibras da madeira de Cupiúba na Máquina Universal de Ensaio AMSLER, que possui capacidade de 25 toneladas e onde foram realizados todos os ensaios mecânicos

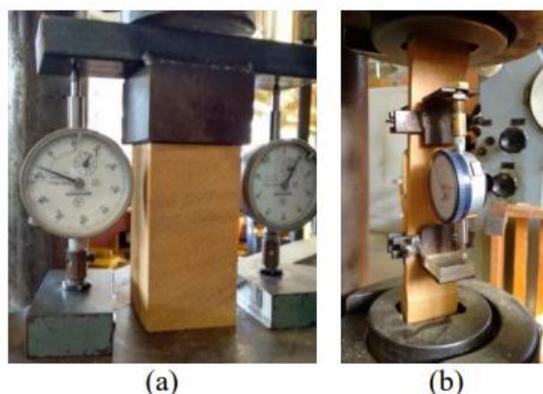
abordados neste trabalho.

Tabela 28 – Propriedades físicas e mecânicas investigadas.

Sigla	Propriedade
$\rho_{ap,12}$	Densidade aparente
RRT	Retratilidade radial total
RTT	Retratilidade tangencial total
$f_{c,0}$	Resistência à compressão na direção paralela às fibras
$f_{t,0}$	Resistência à tração na direção paralela às fibras
$f_{t,90}$	Resistência à tração na direção perpendicular às fibras
$f_{v,0}$	Resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras
$f_{s,0}$	Resistência ao fendilhamento
f_M	Resistência convencional na flexão estática
$E_{c,0}$	Módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras
$E_{t,0}$	Módulo de elasticidade longitudinal na tração paralela às fibras
E_M	Módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática
$f_{H,0}$	Dureza paralela às fibras
$f_{H,90}$	Dureza perpendicular às fibras
W	Tenacidade
$f_{c,90}$	Resistência convencional na compressão perpendicular às fibras
$E_{c,90}$	Módulo de elasticidade na compressão perpendicular às fibras

Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Ensaio de compressão perpendicular (a) e de tração paralela (b) às fibras da madeira de Cupiúba.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Porosidade

Os ensaios para a determinação da porosidade foram conduzidos no equipamento Micromeritics Poresizer, modelo 9320, capacidade de pressão de 200 MPa (Figura 13). Tal equipamento pertence ao Instituto de Física de São Carlos, USP. Foram adotadas, por disponibilidade do equipamento, duas amostras de 1x1 cm² por lote de espécie. Os parâmetros utilizados no ensaio consistiram em: mercúrio com tensão superficial 0,494 g/cm²; densidade 13,533 g/mL; ângulo de contato do avanço e retrocesso 130°; tempo de equilíbrio entre a baixa e alta pressão 10s. Adotou-se 130° para o ângulo de contato do avanço e retrocesso, sugerido pelo *software* do equipamento Micromeritics.

Figura 13 - Imagem do equipamento Micromeritics Poresizer - 9320.



Fonte: A autoria Própria.

3.3 Modelos de Regressão

Modelos de regressão (lineares e não lineares) a uma variável livre e a dois (β_0, β_1) e a três ($\beta_0, \beta_1, \beta_2$) parâmetros, expressos pelas Equações de 15 a 22, serão utilizados para relacionar a densidade aparente ($\rho_{12\%}$) e a porosidade (P_o), possibilitando estimar a porosidade se conhecido o valor médio da densidade aparente da madeira, além de ser considerada ora a densidade aparente e ora a porosidade como variáveis independentes utilizadas na estimativa das 16 demais propriedades (Y) investigadas na presente pesquisa.

$$Y = \beta_0 \cdot X + \beta_1 \quad (15)$$

$$Y = \beta_0 \cdot \ln(X + \beta_1) + \beta_2 \quad (16)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(X) \quad (17)$$

$$Y = \beta_0 \cdot X^{\beta_1} + \beta_2 \quad (18)$$

$$Y = \beta_0 \cdot X^{\beta_1} \quad (19)$$

$$Y = \beta_0 \cdot e^{\beta_1 \cdot X} \quad (20)$$

$$Y = (\beta_0 + \beta_1 \cdot X)^2 \quad (21)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X^2 + \beta_2 \cdot X^3 \quad (22)$$

Espera-se que as madeiras menos densas apresentem maior porosidade e, dependendo da qualidade dos ajustes obtidos, a porosidade poderá ser estimada com o uso apenas do ensaio de densidade. A porosidade consiste em um indicativo da maior ou da menor suscetibilidade de uma determinada espécie de madeira em receber tratamentos preservativos, entre outros, e a estimativa dessa propriedade pela densidade aparente se apresenta importante pela simplicidade envolvida na sua determinação (balança digital e paquímetro).

O erro percentual absoluto médio (MAPE - Equação 23) será utilizado como critério (menor erro) para a escolha do modelo mais preciso (1 entre 8) por propriedade estimada, sendo obtidos ainda o coeficiente de variação da regressão (CV - Equação 24) e o coeficiente de determinação (R^2 - Equação 25), sendo que esse último medirá a qualidade do ajuste.

$$MAPE(\%) = 100 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left\| \frac{Y_{predito_i} - Y_{dados_i}}{Y_{dados_i}} \right\| \quad (23)$$

$$CV(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{predito_i} - Y_{dados_i})^2}{n}}}{\bar{Y}_{dados}} \quad (24)$$

$$R^2(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{predito_i} - Y_{dados_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{dados_i} - \bar{Y}_{dados})^2} \right) \quad (25)$$

Das Equações de 23 a 25, n é o número considerado de amostras, $Y_{predito_i}$ é o valor estimado pelo modelo de regressão, Y_{dados_i} é o valor determinado experimentalmente e \bar{Y}_{dados} é o valor médio dos resultados determinados experimentalmente.

Testados os modelos dependentes de uma única variável livre ($\rho_{12\%}$ ou Po), que possibilitará identificar quem melhor explica uma determinada propriedade ($\rho_{12\%}$ ou Po), com o objetivo de ajustes de melhor precisão, modelos de regressão linear múltipla serão usados (Equação 26), sendo Y as propriedades estimadas.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho_{12\%} + \beta_2 \cdot Po \quad (26)$$

Cabe destacar que os modelos de regressão, avaliados com o auxílio do *software* Mathcad ® versão 15, serão gerados com base nos valores médios de cada propriedade por espécie, reduzindo assim a variabilidade nas propriedades e proporcionando a efetiva busca por tendência de comportamento (ALMEIDA, *et al.*, 2017), e que para o uso dos mesmos faz-se necessário respeitar os valores médios extremos (menor e maior) encontrados por propriedade.

Adicionalmente, de posse de alguns valores característicos de resistência e de valores de rigidez, as relações expressas pelas Equações 1 a 3, 7 e 12 para madeiras folhosas poderão ser avaliadas para cada espécie de madeira (obtenção dos coeficientes), sendo utilizado o modelo de mínimos quadrados da Equação 27 para a estimativa dos coeficientes considerando o conjunto de todas as espécies.

$$Y = \beta_0 \cdot X \quad (27)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os valores médios experimentais obtidos (X_m), os coeficientes de variação (CV), os valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios e as resistências características ($f_{w,k}$).

Todos os valores médios experimentais obtidos são apresentados para as oito espécies nas Tabelas 29 a 36, com as respectivas comparações com os valores da literatura encontrados em portais de revistas eletrônicas, *Web of Science*, Portal Capes Periódicos, *Scopus*, *ReserachGate*, *Engeneering Villagge*, entre outros.

Tabela 29 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cedro-Amazonense.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	$f_{w,k}$ (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,58	2,26	0,56	0,60	---
RRT (%)	3,77	8,95	2,98	4,23	---
RTT (%)	6,08	10,36	5,11	7,34	---
$f_{c,0}$ (MPa)	46,33	5,39	42,00	51,00	46,64
$f_{t,0}$ (MPa)	92,00	23,7	61,00	128,00	64,40
$f_{t,90}$ (MPa)	3,95	12,09	3,20	5,00	3,70
$f_{v,0}$ (MPa)	14,29	10,79	11,40	17,30	13,20
$f_{s,0}$ (MPa)	0,95	13,68	0,80	1,20	0,81
f_M (MPa)	92,00	8,58	75,00	100,00	83,16
$E_{c,0}$ (MPa)	12952	14,76	10574	16685	---
$E_{t,0}$ (MPa)	12628	8,64	10700	14066	---
E_M (MPa)	12743	6,92	11082	14003	---
$f_{H,0}$ (MPa)	61,83	7,19	56,00	71,00	---
$f_{H,90}$ (MPa)	40,33	6,37	37,00	45,00	---
W (daN.m)	0,29	13,98	0,24	0,38	---
$f_{c,90}$ (MPa)	11,33	20,72	8,00	15,00	8,00
$E_{c,90}$ (MPa)	564	22,95	411	832	---
Po (%)	65,90	---	---	---	---

Fonte: Autoria Própria.

Os valores de RRT e de RTT obtidos experimentalmente foram bem próximos aos

valores encontrados na literatura apresentados na Tabela 3 (IPT, 2022) de 4% para retração radial e de 6,1% para retração tangencial. Os valores experimentais obtidos de $\rho_{ap,12}$, $f_{c,0}$, f_M , $f_{v,0}$, $f_{s,0}$, $f_{H,0}$, $E_{c,0}$ e E_M foram superiores aos valores da literatura apresentados nas Tabelas 3 e 4, e o valor médio obtido experimentalmente para $f_{t,90}$ foi inferior ao valor literário. Tais diferenças são possíveis devido às variações nos lotes e nos teores de umidade das amostras de madeira.

Como apresentado anteriormente, a ABNT NBR 7190 (1997) define que para a caracterização da espécie de madeira seja considerada adequada, os valores médios para os esforços de $f_{c,0}$ e $f_{t,0}$ devem apresentar valores de CV que não ultrapassem o valor de 18%, e o CV para esforços tangenciais ($f_{v,0}$) não deve ultrapassar 28%.

Apenas $f_{t,0}$ obteve coeficiente de variação maior que o valor admitido pela normativa, o que não faz com que o lote analisado tenha que ser descartado, pois tais valores foram estipulados como máximo pela normativa foram estimados de acordo com os resultados da época, sendo possível obter valores de CV para os esforços normais e tangenciais maiores.

Como o valor do coeficiente de variação deve ser utilizado nas estimativas dos valores de cálculo, recomenda-se que o engenheiro responsável seja comunicado e, por essa razão, é importante o uso de valores médios nos modelos de regressão ao invés dos amostrais com a finalidade de reduzir a variabilidade nas propriedades e proporcionar a efetiva busca por tendências de comportamentos.

O valor de porosidade experimental foi inferior ao valor obtido por Duarte et al. (2020) de 73,29%. Como a técnica traz imprecisões devido à ocorrência de obstruções dos poros pela intrusão de mercúrio, o valor experimental de 65,9% é considerado uma boa estimativa. De acordo com f_{c0k} obtido, a madeira se encontra na classe C40 segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 30 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cedroarana.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,57	7,44	0,50	0,64	---
RRT (%)	3,51	25,23	2,08	5,20	---
RTT (%)	6,45	17,54	4,37	7,95	---
f _{c,0} (MPa)	41,52	22,77	27,10	53,70	29,05
f _{t,0} (MPa)	61,85	26,89	46,30	93,10	49,94
f _{t,90} (MPa)	3,08	36,19	1,20	5,00	2,11
f _{v,0} (MPa)	11,96	26,20	6,90	17,20	8,40
f _{s,0} (MPa)	0,58	24,08	0,40	0,80	0,46
f _M (MPa)	60,73	18,36	40,70	85,20	45,54
E _{c,0} (MPa)	10394	12,81	8484	12913	---
E _{t,0} (MPa)	10967	15,03	8113	13304	---
E _M (MPa)	10119	10,71	8404	12324	---
f _{H,0} (MPa)	58,3	31,21	31,80	85,60	---
f _{H,90} (MPa)	35,85	18,65	24,30	44,70	---
W (daN.m)	0,46	37,97	0,06	0,78	---
f _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
E _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
Po (%)	66,80	---	---	---	---

Fonte: Autorial Própria.

O valor médio obtido experimentalmente para $\rho_{ap,12}$ foi próximo dos valores encontrados na literatura e apresentados nas Tabelas 5 (IPT, 2022) e 7 (Almeida *et al.*, 2019c), de 0,52 e 0,54 respectivamente. Os valores de RRT e RTT experimentais foram menores que os apresentados pela Tabela 5.

De acordo com os valores apresentados da Tabela 6 (IPT, 2022), os valores obtidos experimentalmente para f_{c,0} e f_M foram menores que os valores de 46,60 MPa e de 77,80, respectivamente e a espécie se enquadrou na classe de resistência C30. Já a f_{v,0} obtida experimentalmente foi maior que o apresentado pela mesma fonte, onde f_{v,0} é igual a 7,20 MPa.

Comparando os valores médios experimentais com os valores apresentados na Tabela 7 (Almeida *et al.*, 2019c), os valores experimentais seguiram o padrão de valores encontrados

para a espécie por Almeida et al. (2019), com variações dentro do esperado devido à anisotropia e heterogeneidade da madeira.

Em relação aos CVs obtidos para os esforços normais, tanto a $f_{c,0}$ e a $f_{t,0}$ ultrapassaram o valor de 18%. Já a $f_{v,0}$ respeitou o limite de 28%. O valor médio encontrado na literatura para a porosidade foi de 72,04% (Tabela 27), ligeiramente superior ao valor obtido experimentalmente para a porosidade, o que é possível devido às possíveis obstruções nos poros ocasionado pela técnica, levando a variações nos valores desta propriedade.

Tabela 31 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cambará.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,56	4,17	0,53	0,61	---
RRT (%)	3,70	14,06	2,89	4,68	---
RTT (%)	7,10	11,54	5,34	7,95	---
$f_{c,0}$ (MPa)	43,44	12,84	35,22	52,33	38,94
$f_{t,0}$ (MPa)	63,65	23,91	41,31	86,66	44,51
$f_{t,90}$ (MPa)	3,12	35,05	1,76	4,88	2,18
$f_{v,0}$ (MPa)	7,86	24,60	5,32	10,76	5,16
$f_{s,0}$ (MPa)	0,70	24,33	0,50	1,11	0,50
f_M (MPa)	93,57	18,09	71,88	122,22	75,46
$E_{c,0}$ (MPa)	10380	16,72	8372	13262	---
$E_{t,0}$ (MPa)	10612	22,61	7626	14498	---
E_M (MPa)	9905	17,53	7728	12560	---
$f_{H,0}$ (MPa)	52,75	17,05	37,69	64,76	---
$f_{H,90}$ (MPa)	40,43	16,12	29,86	49,45	---
W (daN.m)	0,58	32,13	0,32	0,88	---
$f_{c,90}$ (MPa)	6,14	24,01	4,29	8,47	5,06
$E_{c,90}$ (MPa)	520	17,78	370	645	---
Po (%)	64,20	---	---	---	---

Fonte: Autoria Própria.

A $\rho_{ap,12}$ obtida na presente pesquisa foi inferior aos valores de 0,73 g/cm³ (Almeida et al., 2019c) e 0,68 g/cm³ (Lahr et al., 2016) encontrados na literatura e apresentados na Tabela 8. Os valores de RRT e RTT obtidos foram inferiores aos encontrados por Lahr et al.

(2016) e mais próximos dos valores apresentados na Tabela 10 (IPT, 2022), onde os valores para RRT e RTT são 3,30% e 7,70%, respectivamente.

Ainda de acordo com a Tabela 8, os valores encontrados para $f_{c,0}$, $f_{t,0}$, $f_{t,90}$, $f_{s,0}$ e $f_{H,0}$ estão entre os valores encontrados por Almeida *et al.* (2019c) e Lahr *et al.* (2016). As propriedades de $f_{v,0}$, f_M , $f_{H,90}$, $f_{c,90}$, $E_{c,0}$, E_M e $E_{t,0}$ obtidas foram inferiores e a tenacidade experimental obtida foi superior aos valores literários.

Os valores da literatura apresentados na Tabela 11 (IPT, 2022) são para as madeiras com teor de umidade igual a 15% e no estado verde. Os valores para o $f_{c,0}$ da Tabela 31 é maior que o valor da literatura para a madeira verde e próximo ao valor de 42,40 para a madeira a 15% de umidade. A $f_{v,0}$ experimental foi próxima ao valor de 7,40 MPa apresentado na tabela 11 para a madeira verde. Já a f_M obtida experimentalmente foi consideravelmente superior aos valores apresentados na Tabela 11 (80,20 MPa para madeira a 15% e 72,50 para a madeira verde).

A Tabela 12 apresentou os valores retirados da ABNT NBR 7190 (1997) e os valores médios para $f_{c,0}$, $f_{t,0}$ e $f_{v,0}$. $E_{c,0}$ obtidos experimentalmente foram maiores aos valores literários de 37,80, 58,10, 5,80 MPa e 9067 MPa, respectivamente. Os CVs para o esforço normal $f_{c,0}$ e tangencial obedeceram ao limite de 18% e 28% respectivamente. Já a $f_{c,0}$ ultrapassou o limite estipulado pela normativa em vigor. De acordo com o $f_{c0,k}$ obtido, a madeira se encontra na classe D40 segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

O valor médio experimental encontrado para a porosidade foi superior ao valor de 46,10% obtido por Duarte *et al.* (2020b), apresentado na Tabela 27. Essa diferença pode ser explicada pelas diferenças entre os lotes, proveniente da elevada anisotropia e heterogeneidade das madeiras, ocasionando em diferenças consideráveis nos valores obtidos para as propriedades quando ensaiados diferentes lotes das mesmas espécies de madeira.

Tendo em vista os valores obtidos e as discussões até o momento geradas, convém destacar a importância da padronização das classes de resistências das madeiras, como preconiza a ABNT NBR 7190 (1997) e mencionada anteriormente na presente pesquisa. Também é conveniente destacar, além da utilização de valores médios para as propriedades, a utilização dos diferentes coeficientes de modificação nos cálculos estruturais de madeira, que possuem a finalidade de garantir as condições necessárias para o projeto.

Tabela 32 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Tatajuba.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,94	6,07	0,83	1,06	---
RRT (%)	4,28	10,80	3,54	5,37	---
RTT (%)	5,78	10,24	5,01	7,03	---
f _{c,0} (MPa)	80,16	18,56	45,2	99,40	60,06
f _{t,0} (MPa)	92,92	22,49	48,00	126,50	65,16
f _{t,90} (MPa)	3,96	30,23	1,90	6,10	2,77
f _{v,0} (MPa)	19,97	8,11	17,1	23,00	18,48
f _{s,0} (MPa)	0,89	18,8	0,60	1,20	0,64
f _M (MPa)	110,58	21,78	69,40	156,40	83,82
E _{c,0} (MPa)	18238	15,11	10566	21138	---
E _{t,0} (MPa)	17319	12,05	14292	21940	---
E _M (MPa)	18114	16,00	13697	24828	---
f _{H,0} (MPa)	119,25	18,17	80,90	141,10	---
f _{H,90} (MPa)	88,41	16,27	68,30	116,70	---
W (daN.m)	1,02	30,39	0,66	1,66	---
f _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
E _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
Po (%)	35,8	---	---	---	---

Fonte: Autoria Própria.

O valor médio obtido na presente pesquisa para a densidade aparente da madeira de Tatajuba foi igual ao apresentado na Tabela 13 baseada na ABNT NBR 7190 (1997) e maior ao apresentado na Tabela 14 (IPT, 2022) que apresentou o valor para $\rho_{ap,15}$ de 0,82 g/cm³. Pode-se ver que as RRT e RTT obtidas experimentalmente foram inferiores aos valores de 5,50 e 7,10% apresentados para a retração radial e tangencial na Tabela 14.

Comparando os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas com os apresentados na Tabela 13, exceto o valor de E_{c,0} que ficou entre os valores apresentados nas Tabelas 13 e 15, todos os valores obtidos nesta pesquisa foram superiores. O f_{c,0} obtido foi próximo ao valor apresentado na Tabela 15 (IPT, 2022) de 79,70 MPa para a madeira a 15% de umidade e superior ao valor de 54,40 apresentado na mesma tabela para a madeira verde. O valor de f_{v,0} obtido experimentalmente foi superior ao valor de 11,50 MPa (Tabela 15).

Os valores experimentais para $f_{v,0}$, $f_{H,0}$ e E_M foram superiores aos valores referentes à madeira verde exibidos na Tabela 15 e dentro das variações esperadas devido às diferenças nos lotes ensaiados. De acordo com f_{c0k} obtido, a madeira se encontra na classe C60 segundo a ABNT NBR 7190 (1997). Em relação ao valor médio encontrado para f_M , este se apresentou inferior ao valor de 138,20 MPa da Tabela 15 na condição de 15% de umidade e superior ao valor de 100,00 MPa para madeira verde. O valor médio experimental para $f_{t,90}$ foi igual ao apresentado pela normativa de madeira em vigor na tabela 13.

Os CVs obtidos para os esforços normais ultrapassaram o valor de 18%, sendo o CV da $f_{c,0}$ o que mais se aproximou desse limite. O CV obtido para o esforço de cisalhamento obedeceu ao apresentado na normativa em vigor. O valor médio experimental de porosidade foi ligeiramente superior ao valor de 31,60% obtido por Duarte *et al.* (2020b).

Tabela 33 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Cupiúba.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	0,85	2,77	0,81	0,88	---
RRT (%)	4,60	9,61	3,86	5,32	---
RTT (%)	7,58	6,93	6,78	8,53	---
$f_{c,0}$ (MPa)	57,36	14,07	48,50	74,10	51,04
$f_{t,0}$ (MPa)	70,71	19,25	49,30	90,30	50,06
$f_{t,90}$ (MPa)	3,58	25,34	2,40	5,10	2,57
$f_{v,0}$ (MPa)	16,70	18,37	10,20	20,70	13,20
$f_{s,0}$ (MPa)	0,72	23,38	0,49	1,01	0,50
f_M (MPa)	75,01	15,12	59,8	93,10	60,00
$E_{c,0}$ (MPa)	12970	15,35	9964	16162	---
$E_{t,0}$ (MPa)	12767	26,30	7843	18275	---
E_M (MPa)	13217	14,75	10010	16777	---
$f_{H,0}$ (MPa)	97,06	15,51	69,30	117,40	---
$f_{H,90}$ (MPa)	66,35	16,89	53,80	82,19	---
W (daN.m)	0,61	37,76	0,36	1,02	---
$f_{c,90}$ (MPa)	---	---	---	---	---
$E_{c,90}$ (MPa)	---	---	---	---	---
Po (%)	40,6	---	---	---	---

Fonte: Autorial Própria.

A densidade aparente apresentada na Tabela 33 foi próximo ao valor de $0,838 \text{ g/cm}^3$ apresentado na Tabela 18 baseada na ABNT NBR 7190 (1997) e do valor de $0,87 \text{ g/cm}^3$ apresentado na Tabela 16 (IPT, 2022) para a madeira com 15% de umidade. O valor de RRT experimental foi próximo ao valor de 4,80% e o valor encontrado para RTT foi inferior ao valor médio de 9,10% apresentado na Tabela 16.

Comparando os valores médios experimentais para as propriedades mecânicas obtidas nesta pesquisa com os apresentados na Tabela 18, os valores médios obtidos para $f_{c,0}$, $f_{t,0}$, $f_{v,0}$ e $E_{c,0}$ foram superiores aos valores para as mesma propriedades com valores iguais a 54,50, 62,10, 10,40 e 13627 MPa, respectivamente.

Com base na Tabela 17 (IPT, 2022), os valores para $f_{c,0}$ (67.2 MPa) e f_M (96.70 MPa) para a madeira de Cupiúba a 15% de umidade se apresentaram superior aos experimentais. Os valores literários para a madeira verde para as propriedades de $f_{c,0}$, f_M , $f_{t,90}$, $f_{s,0}$, E_M e E_c se mostraram superiores.

O esforço de cisalhamento respeitou ao limite de CV igual a 28%, $f_{t,0}$ excedeu e $f_{c,0}$ respeitou o limite de 18% para o CV de esforços normais de acordo com a ABNT NBR 7190 (1997). O valor médio experimental obtido para a porosidade igual ao valor de 40% obtido por Duarte *et al.* (2020b), apresentado na Tabela 27. De acordo com f_{c0k} obtido, a madeira se encontra na classe C40 segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 34 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Jatobá.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	1,08	3,61	1,03	1,14	---
RRT (%)	3,63	18,01	2,19	4,66	---
RTT (%)	6,71	10,44	5,16	7,55	---
f _{c,0} (MPa)	93,37	11,24	75,40	105,40	79,86
f _{t,0} (MPa)	141,43	18,71	110,50	179,30	111,00
f _{t,90} (MPa)	2,71	43,47	1,10	5,10	1,90
f _{v,0} (MPa)	28,09	14,39	20,90	35,10	25,52
f _{s,0} (MPa)	0,85	33,09	0,5	1,3	0,60
f _M (MPa)	152,78	18,38	86,00	195,1	106,98
E _{c0} (MPa)	21403	13,62	16283	25359	---
E _{t0} (MPa)	20718	8,26	17149	22724	---
E _M (MPa)	20865	7,99	18301	24667	---
f _{H,0} (MPa)	166,03	8,38	139,50	188	---
f _{H,90} (MPa)	128,64	10,23	103,90	158,6	---
W (daN.m)	2,17	13,27	1,83	2,88	---
f _{c,90} (MPa)	19,75	15,88	14,00	26	16,94
E _{c,90} (MPa)	1117	15,14	896	1523	---
Po (%)	22,40	---	---	---	---

Fonte: Autoria Própria.

O valor médio obtido experimentalmente para $\rho_{ap,12}$ foi próximo ao valor de 1,074 g/cm³ apresentado na Tabela 21 (NBR 7190, 1997) e do valor de 0,96 g/cm³ para a madeira a 15% contido na Tabela 19 (IPT, 2022), que também apresentou valor médio para RRT de 3,10% e de RTT de 7,20%, podendo-se concluir que o valor médio apresentado para RRT e RTT experimentais foram superior e inferior, respectivamente, aos valores da literatura citada.

Com base na Tabela 21 que foi baseada na ABNT NBR 7190 (1997), pode-se notar que o valor médio experimental para f_{c,0} foi igual ao da literatura, para f_{t,0}, f_{t,90} e E_{c,0} foram inferiores aos valor de 157,50, 3,20 e 23607 MPa, respectivamente, e f_{v,0} foi superior ao valor de 15,70 MPa presente na mesma tabela.

Já com base na Tabela 20 baseada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

(2022), o $f_{c,0}$ experimental foi superior aos valores de 82,20 e 67,00 MPa, para a madeira a 15% de umidade e madeira verde, respectivamente. O valor médio obtido para f_M foi próximo ao valor de 151,80 MPa (madeira a 15% de umidade) e superior ao valor de 131,60 MPa (madeira verde). Os valores de $f_{v,0}$, $f_{H,0}$, E_M e $E_{c,0}$ presentes na Tabela 34 também foram superiores aos valores, respectivamente, de 17,50, 111,80, 14837 e 17691 MPa (Tabela 20).

Os coeficientes de variação apresentados na Tabela 34 para $f_{c,0}$ e $f_{v,0}$ respeitaram os limites de 18 e 28% estipulado pela norma. Apenas o CV para $f_{t,0}$ foi próximo a esse limite, permitindo considerar a caracterização adequada. O valor médio experimental para a Porosidade foi inferior ao valor encontrado por Varanda (2016) de 34,50%. De acordo com f_{c0k} obtido, a madeira se encontra na classe C60 segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 35 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Angelim-vermelho.

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	1,13	9,75	0,95	1,25	---
RRT (%)	5,10	11,81	4,40	6,54	---
RTT (%)	8,38	7,97	7,44	9,68	---
$f_{c,0}$ (MPa)	77,53	7,54	66,30	90,30	72,38
$f_{t,0}$ (MPa)	104,90	32,96	58,80	198,00	77,00
$f_{t,90}$ (MPa)	4,84	28,43	2,80	8,10	3,59
$f_{v,0}$ (MPa)	18,64	23,19	12,10	26,20	13,07
$f_{s,0}$ (MPa)	0,91	11,93	0,70	1,00	0,77
f_M (MPa)	110,17	13,55	86,60	128,80	89,98
$E_{c,0}$ (MPa)	16695	17,82	9494	209355	---
$E_{t,0}$ (MPa)	17024	17,11	12842	22730	---
E_M (MPa)	16500	6,76	14721	18283	---
$f_{H,0}$ (MPa)	145,80	13,65	101,40	165,40	---
$f_{H,90}$ (MPa)	136,98	14,56	97,50	159,90	---
W (daN.m)	1,98	34,86	1,01	3,01	---
$f_{c,90}$ (MPa)	25,53	8,98	21,30	29,84	23,19
$E_{c,90}$ (MPa)	1251	28,48	1076	1398	---
Po (%)	16,40	---	---	---	---

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os valores literários retirados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022) e apresentados na Tabela 22, o valor médio experimental obtido para $\rho_{ap,12}$ foi próximo ao valor de $1,09 \text{ g/cm}^3$ referente à madeira de Angelim-vermelho a 15% de umidade. Ainda, os valores médios experimentais obtidos para RRT e RTT foram superiores aos valores de 4,2% para retração radial e 6,6% para retração tangencial da mesma literatura.

Em comparação com os valores das propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 23 também baseada nos valores contidos no portal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, o $f_{c,0}$ experimental foi inferior ao valor de 80,90 MPa (15% de umidade) e superior a 65,20 MPa (madeira verde). O f_M experimental foi inferior a 138,10 MPa (15% de umidade) e superior a 99,70 MPa (madeira verde), como se pode verificar na Tabela 23. Ainda, os valores médios experimentais para $f_{v,0}$, $f_{H,0}$, $f_{H,90}$ e E_M foram superiores aos valores retirados da mesma literatura, respeitando as variações esperadas devido às diferenças nos lotes estudados.

Os esforços de $f_{c,0}$ e $f_{v,0}$ experimentais apresentaram CV dentro dos limites apresentados pela normativa em vigor, apenas o CV referente ao valor da $f_{t,0}$ superou o valor máximo de 18%. O valor experimental médio para a Porosidade foi inferior ao valor de 22,60% encontrado por Varanda (2016). De acordo com f_{c0k} obtido, a madeira se encontra na classe C60 segundo a ABNT NBR 7190 (1997).

Tabela 36 - Valores para as propriedades físico-mecânicas e de porosidade para a madeira de Champanhe (Cumaru).

Sigla	X_m	CV (%)	Min	Max	f_{w,k} (MPa)
$\rho_{ap,12}$ (g/cm ³)	1,09	3,08	1,04	1,14	---
RRT (%)	3,95	20,85	2,97	5,33	---
RTT (%)	6,38	16,94	4,78	7,95	---
f _{c,0} (MPa)	93,16	5,45	84,90	102,50	96,58
f _{t,0} (MPa)	122,31	20,54	87,30	173,30	90,20
f _{t,90} (MPa)	2,85	19,71	2,10	4,00	2,10
f _{v,0} (MPa)	17,84	16,69	11,20	21,80	14,08
f _{s,0} (MPa)	0,89	18,80	0,60	1,20	0,64
f _M (MPa)	164,81	19,01	92,20	216,00	128,70
E _{c,0} (MPa)	23002	10,94	18480	26550	---
E _{t,0} (MPa)	22119	8,91	18426	26101	---
E _M (MPa)	18114	16,00	13697	24828	---
f _{H,0} (MPa)	119,25	18,17	80,90	141,10	---
f _{H,90} (MPa)	88,41	16,27	68,30	116,70	---
W (daN.m)	1,02	30,39	0,66	1,66	---
f _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
E _{c,90} (MPa)	---	---	---	---	---
Po (%)	19,60	---	---	---	---

Fonte: Autorial Própria.

O valor médio experimental obtido para a propriedade de $\rho_{ap,12}$ foi igual aos valores apresentados nas Tabelas 24 e 26, baseadas no portal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2022) e na ABNT NBR 7190 (1997), respectivamente. Os valores médios experimentais obtidos para RRT e RTT foram inferiores aos valores de 5,3% e 8,2%, respectivamente, contemplados pela Tabela 24.

Com base na Tabela 25 (IPT, 2022), o valor médio obtido experimentalmente para f_{c,0} foi próximo ao valor de 94,20 (15% de umidade) e consideravelmente superior ao valor de 59,30 MPa (madeira verde). O valor médio experimental de f_M, f_{s,0} e E_M foram inferiores aos valores literários e os valores para f_{v,0} e f_{H,0} experimentais foram maiores que os valores de 14,20 MPa e 97,87 MPa (madeira verde) presente na Tabela 25.

De acordo com a Tabela 26, o valor experimental obtido para f_{c,0} e f_{t,90} foram muito

próximos aos do valores apresentados na literatura, $f_{t,0}$ experimental foi inferior ao valor de 133,50 MPa, $f_{v,0}$ experimental foi maior que o valor de 10,70 MPa e $E_{c,0}$ experimental foi igual ao valor literário apresentado. Somente o CV do esforço normal $f_{t,0}$ superou o valor limite estipulado pela ABNT NBR 7190 (1997). De acordo com $f_{c,0k}$ obtido, a madeira se encontra na classe C60 segundo a ABNT NBR 7190 (1997). O valor médio experimental para a propriedade de porosidade foi inferior ao encontrado por Varanda (2016).

Não foram encontradas pesquisas que abordassem a caracterização completa das seguintes espécies de madeira: Cedro-Amazonense, Tatajuba, Cupiúba, Jatobá, Angelim-Vermelho e Champanhe. Assim, não foi possível realizar maiores comparações.

Na Tabela 37 são apresentados os coeficientes obtidos com base nas relações (Equações 1 a 3, 7 e 12) entre valores de rigidez e entre os valores característicos de resistência por espécie e para o conjunto envolvendo todas as espécies investigadas na presente pesquisa.

Tabela 37 - Coeficientes obtidos com base nas relações entre valores de rigidez e entre os valores característicos de resistência por espécie e para o conjunto envolvendo todas as espécies.

Relações	Espécies de madeira							otm	
	Jat	Ch	A	T	Ca	Ce	Cup		Ce-A
$\frac{E_M}{E_{c0}} = 0,90$	0,97	1,04	0,99	0,99	0,95	0,97	1,02	0,98	1,00
$\frac{f_{c0,k}}{f_{t0,k}} = 0,77$	0,72	1,07	0,94	0,92	0,87	0,58	1,02	0,72	0,86
$\frac{f_{tM,k}}{f_{t0,k}} = 1,0$	0,96	1,43	1,17	1,29	1,7	0,91	1,2	1,29	1,19
$\frac{f_{v0,k}}{f_{c0,k}} = 0,12$	0,32	0,15	0,18	0,31	0,13	0,29	0,26	0,28	0,23
$\frac{f_{c90,k}}{f_{c0,k}} = 0,25$	0,21	0,2	---	---	0,13	---	---	0,17	0,20

*Onde, Jat é Jatobá, Ch é Champanhe, A é Angelim-vermelho, T é Tatajuba, Ca é Cambará, Ce é Cedroarana, Cup é Cupiúba, Ce-A é Cedro-amazonense e otm é coeficiente ótimo.

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos resultados apresentados para os coeficientes na Tabela 37, é possível afirmar que os coeficientes das relações estabelecidas na norma brasileira para madeiras folhosas fornecem boa precisão na estimativa das propriedades. O coeficiente ótimo mostrou

que a relação entre $f_{c90,k}$ e $f_{c0,k}$ é a que apresentou maior precisão nos resultados, e a relação entre as propriedades de $f_{tM,k}$ e $f_{t0,k}$ apresentou menor precisão em comparação às demais relações abordadas pela ABNT NBR 7190 (1997).

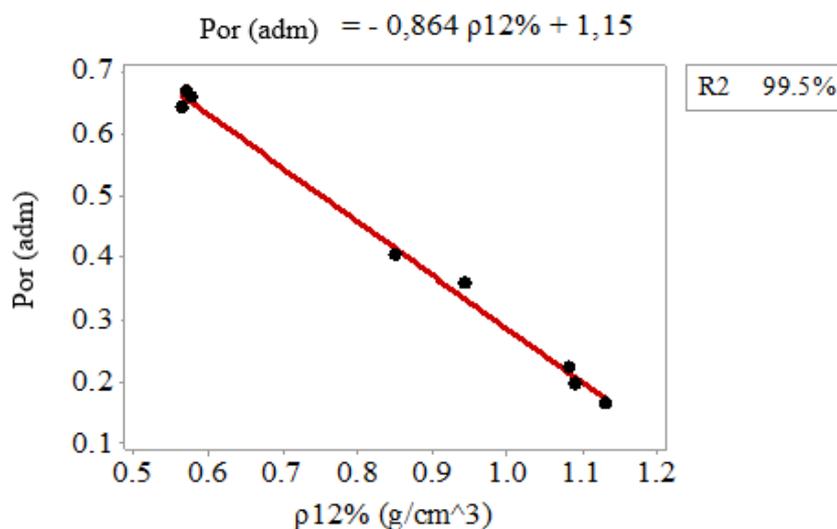
Ainda, cabe destacar, que são relações conservadoras e que os valores médios que foram obtidos confirmam os possíveis equívocos gerados pelos métodos anteriores utilizados, mostrando a dificuldade de se estimar propriedades de ruptura frágil, pois esse tipo de deformação leva à imprecisão. As técnicas da ABNT NBR 7190 (1997) também possuem incertezas que podem ser até maiores que as da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio.

O melhor ajuste obtido para a estimativa da porosidade (Por - adimensional) em função da densidade aparente ($\rho_{12\%}$ - g/cm³) é expressa pela Equação 28, onde se considerou o conjunto de todas as espécies de madeira investigadas (com densidades entre 0.56 a 1.13 g/cm³). Destaca-se que o coeficiente de variação (CV), o erro percentual absoluto médio (MAPE) e o coeficiente de determinação (R^2) foram iguais a 3,31%, 2,73% e 99,54%, respectivamente, ficando evidente a excelente precisão obtida na estimativa da Por pela $\rho_{12\%}$.

A Figura 14 ilustra o ajuste da Equação 28 ao conjunto de pares ordenados formados pelos valores médios de $\rho_{12\%}$ e porosidade (Por).

$$\text{Por} = -0,864 \cdot \rho_{12\%} + 1,15 \quad (28)$$

Figura 14 - Ajuste da Equação 28 aos dados.



Duarte *et al.* (2020b) determinaram a relação entre densidade aparente e porosidade para dez espécies de madeira, conforme Tabela 38 (folhosas). Os autores utilizaram um

modelo de regressão linear ($\rho_{12\%} = -1,18 \cdot Po + 1,34$) associado a um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,88, o que evidenciou a boa relação entre a densidade aparente e a porosidade.

Considerando os resultados da densidade aparente das espécies de madeira do trabalho de Duarte *et al.* (2020b), a Equação 28 aqui obtida foi utilizada para a estimativa dos valores da porosidade encontrados pelos referidos autores. Estes valores são exibidos na Tabela 38, sendo Er o erro percentual relativo (Equação 29), em que Po^{real} e Po^{aprox} consistem nos valores experimental e aproximado, respectivamente.

$$Er(\%) = 100 \cdot \left\| \frac{Po^{real} - Po^{aprox}}{Po^{real}} \right\| \quad (29)$$

Tabela 38 - Valores estimados da porosidade pela Equação 28 sobre os resultados da densidade aparente da pesquisa de Duarte et al. (2020b).

Espécies	Duarte <i>et al.</i> (2020b)		Equação (28)	Equação (29)
	$\rho_{12\%}$ (g/cm ³)	Po (%)	Po^{aprox} (%)	Er (%)
Tatajuba	0,95	31,60	32,92	4,18
Roxinho	0,94	29,62	33,78	14,06
Cambará	0,70	46,10	54,52	18,26
Cedroarana	0,57	72,04	65,75	8,73
Cupiúba	0,86	40,36	40,70	0,83
Caixeta	0,41	73,25	79,58	8,64
Cedro	0,50	73,29	71,80	2,03
Sucupira	0,79	44,66	46,74	4,67
Cajueiro	0,55	65,95	67,48	2,32

Fonte: Autoria Própria.

Da Tabela 38, cabe destacar ainda que mesmo as densidades aparentes obtidas do trabalho de Duarte *et al.* (2020b) para as espécies de madeira de Caixeta (0,41 g/cm³) e Cedro (0,50 g/cm³) sendo inferiores ao menor valor médio de densidade de 0,56 g/cm³ para a madeira de Cambará obtido da presente pesquisa, os valores do erro são relativamente pequenos.

Na Tabela 39 são apresentados os modelos de regressão, os erros quadráticos médios (MAPE) e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos considerando a densidade aparente

como estimadora das demais propriedades, sendo que o coeficiente de variação (CV) variou entre 2,81% a 19,50%.

Tabela 39 - Resultados dos modelos de regressão considerando a densidade aparente como estimadora das demais propriedades.

Modelos	MAPE (%)	R² (%)
$Rrt = -1.731 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{12\%}^{-10.5337} + 4.3139$	7,36	37,15
$Rtt = 6.552 \cdot \rho_{12\%}^2 - 9.886 \cdot \rho_{12\%} + 10.121$	9,67	8,61
$f_{c0} = (3.65 + 5.199 \cdot \rho_{12\%})^2$	8,05	88,52
$f_{t0} = 223.418 \cdot \rho_{12\%}^2 - 281.199 \cdot \rho_{12\%} + 159.19$	1,54	66,91
$f_{t90} = 0.037 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0.563) + 3.633$	1,99	5,96
$f_{v0} = 1.981 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0.563) + 21.958$	9,90	69,56
$f_s = 0.218 \cdot \rho_{12\%} + 0.607$	11,10	19,53
$f_M = 271.768 \cdot \rho_{12\%}^2 - 343.993 \cdot \rho_{12\%} + 188.68$	18,63	61,10
$E_{c0} = 1.694 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12\%} + 1.349 \cdot 10^4$	12,01	75,62
$E_{t0} = 1.792 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12\%}^{0.862}$	9,51	78,88
$E_M = 1.854 \cdot 10^4 + 1.407 \cdot 10^4 \cdot \ln(\rho_{12\%})$	12,19	73,90
$f_{H0} = (2.639 + 8.702 \cdot \rho_{12\%})^2$	5,60	95,22
$f_{H90} = 264.11 \cdot \rho_{12\%}^2 - 268.88 \cdot \rho_{12\%} + 105.55$	3,23	99,99
$W = 8.887 \cdot \rho_{12\%}^2 - 11.718 \cdot \rho_{12\%} + 4.226$	16,14	93,99
$f_{c90} = 3.437 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0.559) + 25.197$	4,99	95,75
$E_{c90} = 1.237 \cdot 10^3 \cdot \rho_{12\%} - 188.76$	3,12	98,49

Fonte: Autoria Própria.

Analisando os resultados apresentados pela Tabela 39, pode-se afirmar que a densidade aparente foi uma boa estimadora das propriedades de $f_{c,0}$, $f_{t,0}$, $f_{v,0}$, f_M , $E_{c,0}$, $E_{t,0}$, E_M , $f_{H,0}$, $f_{H,90}$, W , $f_{c,90}$ e $E_{c,90}$, pois os coeficientes de determinação (R^2) foram todos acima de 50% e alcançaram valores altos e significativos, como na determinação da $f_{H,90}$ que obteve R^2 igual a 99,99%. Já para as propriedades de RRT, RTT, $f_{t,90}$ e $f_{s,0}$ a estimativa a partir das densidades aparentes resultou em coeficientes de determinação baixos, podendo-se afirmar que não foi uma boa estimadora para estas propriedades.

Na pesquisa de Christoforo *et al.* (2020), a $f_{t,90}$ e a $f_{s,0}$ também não puderam ser

estimadas pela densidade aparente. A dificuldade em estimar a $f_{s,0}$ e a $f_{t,90}$ pode ser parcialmente explicada por questões anatômicas da madeira, pois são propriedades onde o fator da anatomia da madeira são determinantes em seus resultados. A baixa dependência entre a densidade aparente e as retratibilidades, como mostraram Dias *et al.* (2019), foi confirmada na presente pesquisa, onde não foi possível admitir correlação entre a densidade aparente e as retrações radial e tangencial das espécies.

Considerando os resultados da densidade aparente das espécies de madeira do trabalho Christoforo *et al.* (2020), a equação $f_{v,0} = 1,981 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0,563) + 21,958$ aqui obtida (Tabela 39) foi utilizada para a estimativa dos valores da resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras ($f_{v,0}$) encontrados pelos referidos autores. Isso é ilustrado na Tabela 40, sendo Er o erro percentual relativo (Equação 29).

Tabela 40 - Valores estimados da resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras pela equação $f_{v,0} = 1,981 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0,563) + 21,958$ sobre os resultados da densidade aparente da pesquisa de Christoforo *et al.* (2020).

Espécies	Christoforo <i>et al.</i> (2020)		$f_{v,0} = 1,981 \cdot \ln(\rho_{12\%} - 0,563) + 21,958$	Equação (29)
	$\rho_{12\%}$ (g/cm ³)	$f_{v,0}$ (MPa)	$f_{v,0}^{\text{aprox}}$ (MPa)	Er (%)
Cambará	0,57	11,97	12,13	1,32
Cedrorana	0,59	12,61	14,8	17,39
Guaicara	1,08	19,35	20,65	6,72
Oiticica-amarela	0,75	17,33	18,64	7,54
Cedro	0,58	14,60	13,89	4,89
Castelo	0,79	21,71	19,02	12,39
Copaíba	0,67	14,93	17,53	17,42
Garapa	0,91	19,22	19,86	3,34
Guarucuia	0,88	19,81	19,68	0,65

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos resultados da Tabela 40 para $f_{v,0}^{\text{aprox}}$, pode-se concluir que a equação gerada neste estudo a partir da densidade aparente se apresenta como boa estimadora para as resistências ao cisalhamento das espécies abordadas pela pesquisa de Christoforo *et al.* (2020), com densidades entre 0.57 e 1.08 g/cm³. Os maiores erros percentuais médios para as madeiras de Cedroarana podem ser explicados por possuírem células de parênquima tangenciando as células de crescimento que podem gerar maiores erros.

Na Tabela 41 são apresentados os resultados de várias propriedades mecânicas

estimadas (X^{aprox}) pelos melhores ajustes da Tabela 39 (densidade aparente como estimadora de propriedades) considerando os resultados experimentais (X^{exp}) médios provenientes da pesquisa de Christoforo *et al.* (2017), que realizaram a caracterização da madeira *Anadenanthera colubrine*, de densidade aparente média igual 0,71 g/cm³.

Tabela 41 - Valores estimados de propriedades mecânicas pela densidade aparente média da pesquisa de Christoforo *et al.* (2017) com base nos modelos da Tabela 39.

Propriedade	X^{exp.}	X^{aprox}	Er (%)
RRT (%)	3,12	4,25	36,22
RTT (%)	5,14	6,39	24,31
f _{c,0} (MPa)	44,00	53,89	22,49
f _{t,0} (MPa)	89,00	72,11	18,97
f _{t,90} (MPa)	6,10	3,56	41,61
f _{v,0} (MPa)	15,00	18,16	21,07
f _{s,0} (MPa)	1,10	0,76	30,75
f _M (MPa)	89,00	81,44	8,49
E _{c,0} (MPa)	14962	13376	10,6
E _{t,0} (MPa)	14745	13339	9,54
E _M (MPa)	15776	13721	13,03
f _{H,0} (MPa)	70,00	77,75	11,07
f _{H,90} (MPa)	61,00	48,14	21,08
W (daN·m)	0,38	0,39	1,22
E _{c,90} (MPa)	948,00	715,07	24,57

Fonte: Aatoria Própria.

Analisando os valores apresentados na Tabela 41, é possível verificar que os modelos de regressão gerados neste estudo, que consideram a densidade aparente como estimadora das propriedades, estimaram com precisão os valores para as propriedades investigadas por Christoforo *et al.* (2017).

Na Tabela 42 são apresentados os modelos de regressão, os erros quadráticos médios (MAPE) e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos considerando a porosidade como estimadora das demais propriedades, sendo que o coeficiente de variação (CV) variou entre 3,99% a 21,75%.

Tabela 42 - Resultados dos modelos de regressão considerando a porosidade como estimadora das demais propriedades.

Modelos	MAPE (%)	R² (%)
$Rrt = -0.032 \cdot \ln(Po - 0.164) + 3.867$	6,53	57,82
$Rtt = -0.049 \cdot \ln(Po - 0.164) + 6.506$	6,23	54,96
$f_{c0} = -37.751 \cdot Po^2 - 62.482 \cdot Po + 100.542$	8,96	86,78
$f_{t0} = 238.256 \cdot Po^2 - 306.386 \cdot Po + 170.093$	14,52	64,16
$f_{t90} = -0.04 \cdot \ln(Po - 0.164) + 3.258$	12,32	51,91
$f_{v0} = (5.145 - 2.563 \cdot Po)^2$	18,90	56,93
$f_s = -0.240 \cdot Po + 0.892$	11,46	17,71
$f_M = 247.386 \cdot Po^2 - 336.591 \cdot Po + 194.41$	19,67	58,81
$E_{c0} = 1.984 \cdot 10^3 \cdot Po^2 - 2.097 \cdot 10^4 \cdot Po + 2.403 \cdot 10^4$	13,14	73,46
$E_{t0} = -1.799 \cdot 10^4 \cdot Po + 2.2982 \cdot 10^4$	10,65	77,15
$E_M = -2.0166 \cdot 10^4 \cdot Po + 2.4045 \cdot 10^4$	13,45	72,89
$f_{H0} = (14.136 - 9.855 \cdot Po)^2$	8,06	92,09
$f_{H90} = 280.1527 \cdot Po^2 - 437.1193 \cdot Po + 204.701$	4,82	98,81
$W = 9.7984 \cdot Po^2 - 11.9491 \cdot Po + 4.046$	18,99	92,70
$f_{c90} = 182.2066 \cdot Po^2 - 184.9342 \cdot Po + 51.999$	12,77	95,77
$E_{c90} = 1.9342 \cdot 10^3 \cdot Po^2 - 3.1002 \cdot 10^3 \cdot Po + 1.7409 \cdot 10^3$	4,00	98,72

Fonte: A autoria Própria.

Apenas a propriedade de $f_{s,0}$ apresentou coeficiente de determinação (R^2) inferior a 50%, mostrando que a porosidade não foi boa estimadora para esta propriedade. Todas as demais propriedades aqui abordadas foram estimadas com precisão através dos modelos de regressão considerando apenas a porosidade como variável independente. Ao contrário dos modelos de regressão que consideram apenas a densidade aparente na estimativa, os modelos que consideraram a porosidade estimaram de maneira satisfatória as propriedades que são fortemente influenciadas pelas questões anatômicas, comprovando que a porosidade foi determinante em suas estimativas.

De maneira a testar os modelos de regressão que consideram apenas a porosidade como variável independente e estimando a porosidade a partir da equação aqui gerada, os resultados do trabalho de Christoforo *et al.* (2017) foram estimados pelas equações da Tabela 42. Os resultados das estimativas das propriedades com base nos modelos de regressão da

Tabela 42 são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Valores estimados das propriedades abordadas na pesquisa de Christoforo *et al.* (2017) com base nos modelos da Tabela 42.

Propriedade	X^{exp.}	X^{aprox}	Er (%)
RRT (%)	3,12	3,90	24,95
RTT (%)	5,14	6,55	27,52
f _{c,0} (MPa)	44,00	56,15	27,61
f _{t,0} (MPa)	89,00	74,29	16,53
f _{t,90} (MPa)	6,10	3,30	45,94
f _{v,0} (MPa)	15,00	14,21	5,26
f _{s,0} (MPa)	1,10	0,76	30,62
f _M (MPa)	89,00	85,03	4,46
E _{c,0} (MPa)	14962	13349	10,78
E _{t,0} (MPa)	14745	13329	9,6
E _M (MPa)	15776	13224	16,17
f _{H,0} (MPa)	70,00	78,29	11,84
f _{H,90} (MPa)	61,00	50,82	16,7
W (daN·m)	0,385	0,46	18,32
E _{c,90} (MPa)	948,00	634,39	33,08

Fonte: Aatoria Própria.

A Tabela 43 permite afirmar que as equações aqui geradas, onde se considera apenas a porosidade como estimadora, estimaram de maneira satisfatória as propriedades avaliadas por Christoforo *et al.* (2020). Assim, os modelos de regressão gerados na presente pesquisa podem ser utilizados na estimativa de outras espécies de madeira dentro da faixa de densidades considerada.

Na Tabela 44 são apresentados os modelos de regressão linear múltipla, os erros quadráticos médios (MAPE) e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos considerando a densidade aparente e a porosidade como estimadoras das demais propriedades, sendo que o coeficiente de variação (CV) variou entre 7,37% a 26,25%.

Tabela 44 - Resultados dos modelos de regressão linear múltipla.

Modelos	MAPE (%)	R² (%)
$Rrt = 12.870 - 8.55 \cdot Po - 6.181 \cdot \rho_{12\%}$	8,82	34,80
$Rtt = 48.118 - 36.67 \cdot Po - 30.694 \cdot \rho_{12\%}$	6,33	48,41
$f_{c0} = -238.92 + 204.204 \cdot Po + 259.676 \cdot \rho_{12\%}$	8,33	90,57
$f_{t0} = -373.531 + 344.22 \cdot Po + 387.445 \cdot \rho_{12\%}$	15,65	65,07
$f_{t90} = -0.177 + 2.874 \cdot Po + 2.929 \cdot \rho_{12\%}$	16,19	2,72
$f_{v0} = -205.305 + 179.172 \cdot Po + 173.9361 \cdot \rho_{12\%}$	10,52	82,04
$f_s = -2.235 + 2.472 \cdot Po + 2.355 \cdot \rho_{12\%}$	9,89	28,20
$f_M = 166.677 - 131.012 \cdot Po - 5.763 \cdot \rho_{12\%}$	20,37	55,84
$E_{c0} = -5.802 \cdot 10^4 + 5.164 \cdot 10^4 \cdot Po + 6.157 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12\%}$	11,09	78,06
$E_{t0} = -4.300 \cdot 10^4 + 3.922 \cdot 10^4 \cdot Po + 4.968 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12\%}$	9,38	80,76
$E_M = -4.703 \cdot 10^4 + 4.147 \cdot 10^4 \cdot Po + 5.352 \cdot 10^4 \cdot \rho_{12\%}$	10,71	76,05
$f_{H0} = -436.079 + 343.173 \cdot Po + 468.75 \cdot \rho_{12\%}$	5,36	96,47
$f_{H90} = 83.782 - 126.682 \cdot Po + 60.877 \cdot \rho_{12\%}$	9,11	96,24
$W = 6.823 - 6.669 \cdot Po - 2.74 \cdot \rho_{12\%}$	29,56	84,37
$f_{c90} = -29.262 + 19.562 \cdot Po + 44.133 \cdot \rho_{12\%}$	16,10	91,58
$E_{c90} = 1.748 \cdot 10^3 - 1.691 \cdot 10^3 \cdot Po - 187.422 \cdot \rho_{12\%}$	4,71	98,45

Fonte: Autoria Própria.

A partir da Tabela 44 é possível observar que a inclusão da densidade aparente nos modelos de regressão linear múltiplas influenciou negativamente as propriedades que são fortemente influenciadas pela anatomia da madeira, como as retratibilidades, $f_{s,0}$ e $f_{t,90}$, novamente comprovando a precisão que a consideração da porosidade na estimativa dessas propriedades proporciona.

Na Tabela 45 são apresentados os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos dependentes da densidade aparente [$f(\rho_{12\%})$] (Tabela 39), da porosidade [$f(Po)$] (Tabela 42) e de ambas as variáveis livres [$f(\rho_{12\%}; Po)$] (Tabela 44), possibilitando identificar os melhores modelos para a estimativa de cada propriedade.

Tabela 45 - Coeficientes de determinação dos modelos dependentes da densidade aparente, da porosidade e de ambas as propriedades conjuntamente.

Prop.	R² (%)	R² (%)	R² (%)
	[f (ρ_{12%})]	[f (Po)]	[f (ρ_{12%;} Po)]
RRT	37,15	5782	34,80
RTT	8,61	54,96	48,41
f _{c,0}	88,52	86,78	90,57
f _{t,0}	66,91	64,16	65,07
f _{t,90}	5,96	51,91	2,72
f _{v,0}	69,56	56,93	82,04
f _{s,0}	19,53	17,71	28,20
f _M	61,10	58,81	55,84
E _{c,0}	75,62	73,46	78,06
E _{t,0}	78,88	77,15	80,76
E _M	73,90	72,89	76,05
f _{H,0}	95,22	92,09	96,47
f _{H,90}	99,99	98,81	96,24
W	93,99	92,70	84,37
f _{c,90}	95,75	95,77	91,58
E _{c,90}	98,49	98,72	98,45

Fonte: Autoria Própria.

As retratibilidades puderam ser estimadas considerando apenas a porosidade como variável independente. As estimativas da $f_{t,0}$ através dos três modelos testados apresentaram coeficientes de determinação muito aproximados e significativos, sendo o modelo dependente apenas da densidade aparente o que apresentou melhor ajuste.

A resistência à tração normal às fibras pôde apenas ser estimada utilizando a porosidade como variável livre, onde apresentou R^2 superior a 50%, comprovando a dificuldade na sua estimativa e que a normativa brasileira é correta ao definir que se deve desconsiderar essa propriedade no dimensionamento estrutural. A resistência ao fendilhamento não pôde ser estimada através de nenhum dos modelos utilizados.

As demais propriedades avaliadas apresentaram bons coeficientes de determinação, podendo ser estimados através dos três modelos testados. A consideração da porosidade em

conjunto com a densidade aparente refinou a estimativa dessas propriedades através das equações empíricas utilizadas.

Além disso, é importante destacar o sucesso da obtenção da porosimetria para a obtenção das propriedades das espécies de madeira principalmente por sua rapidez e por utilizar pequenas amostras de madeira. Isso mostra o quanto a utilização da porosidade para a estimativa das propriedades físico-mecânicas se torna um processo mais simples por necessitar de um aparelho que é comumente encontrado em laboratórios, mais rápido que a realização dos ensaios de caracterização das madeiras e que é mais acessível economicamente, tanto por utilizar pequenas amostras de madeira quanto pela utilização do equipamento que mede a porosimetria ser mais barato que as demais máquinas de ensaios de madeiras.

5 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido neste trabalho sobre estimativa das propriedades físico mecânicas de madeiras tropicais brasileiras através da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio permite que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- A porosidade pôde ser estimada através da equação $Por = -0,864 \cdot \rho_{12\%} + 1,15$ gerada na presente pesquisa, com elevado grau de precisão e onde o coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,54%, provando que a densidade aparente estima com precisão a porosidade.
- A resistência na compressão paralela às fibras, que é destaque de importância na normativa brasileira em vigor ABNT NBR 7190 (1997), pois a partir da resistência característica à compressão paralela às fibras que é realizada a classificação da madeira em classes de resistência, foi bem estimada através da porosidade ($R^2 = 86,78$) e obteve a melhor estimativa considerando tanto a porosidade quanto a densidade apresentando $R^2 = 90,57$. Isso comprova que através do ensaio de porosimetria da madeira, que é realizado em um equipamento frequentemente encontrado em laboratórios, de menor custo, realizado em curto espaço de tempo e que não necessita de grande quantidade de amostras de madeira (apenas 3 pequenas amostras de área de $1 \times 1 \text{ cm}^2$), é possível a sua estimativa com elevado grau de precisão.
- As estimativas das propriedades de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$), resistência ao fendilhamento ($f_{s,0}$), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0}$), módulo de elasticidade longitudinal na flexão estática (E_M) e módulo de elasticidade na tração paralela às fibras ($E_{t,0}$), considerando a densidade aparente e a porosidade como variáveis livres [$f(\rho_{12\%}; Po)$], apresentaram coeficientes de determinação maiores quando comparados aos modelos considerando ou apenas a densidade aparente ou apenas a porosidade como estimadora dessas propriedades.
- A estimativa da resistência à tração normal às fibras ($f_{t,90}$) foi possível apenas considerando a porosidade como variável independente, onde apresentou (R^2) igual a 51,91%. A dificuldade em estimar a $f_{s,0}$ e a $f_{t,90}$ pode ser parcialmente explicada por questões anatômicas da madeira, mostrando o quanto a porosidade foi determinante no sucesso da estimativa da $f_{t,90}$.

- O fator da anatomia considerada pela porosidade, aprimorou os modelos de regressão multivariáveis na estimativa das propriedades de ($f_{H,0}$) e (E_M), pois são propriedades que sofrem grande influência dos fatores anatômicos considerados pelos valores médios de porosidade das espécies de madeira.
- As estimativas de propriedades que se caracterizam por um modo de ruptura frágil, devem considerar fatores anatômicos como porosidade para atingir o grau máximo de precisão.
- A resistência ao fendilhamento ($f_{s,0}$) apresentou coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 50%, não sendo possível a sua estimativa através das equações empíricas geradas. Além dessa propriedade, todas as demais propriedades puderam ser estimadas por um ou outro modelo de regressão gerado.
- As equações geradas na presente pesquisa podem também ser aplicadas para outras espécies de madeiras e melhoradas caso não haja a presença de tilos.
- Como sugestão para trabalhos futuros, devem ser realizados trabalhos que contemplem o assunto com as demais propriedades e espécies das madeiras, avaliando a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, que pode trazer variabilidade nos resultados devido à possível obstrução nos poros durante o processo, para que sejam obtidas equações simplificadas com elevados graus de precisão que estimem todas as propriedades das espécies de madeiras. Além disso, pesquisas que relacionem a espessura da parede celular com a porosimetria e as demais propriedades, pois certamente a técnica de porosimetria apresenta bons resultados para as madeiras que não apresentam tilos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Andréa de Souza *et al.* Influence of CCA-A preservative on physical-mechanical properties of brazilian tropical woods. **BioResources**, Raleigh, NC, USA, BioResources, v. 14, n. 2, p. 3030-3041, 2019b. DOI: 10.15376/biores.14.2.3030-3041.

ALMEIDA, Andréa de Souza *et al.* Influence of treatment with water-soluble CCB preservative on the physical-mechanical properties of brazilian tropical timber. **Materials Research**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 1-8, out. 2019c. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0688.

ALMEIDA, Diego Henrique de *et al.* Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 203-207, fev. 2014. DOI: 10.1590/s0100-67622014000100020.

ALMEIDA, Giana; HERNÁNDEZ, Roger E.. Influence of the pore structure of wood on moisture desorption at high relative humidities. **Wood Material Science And Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 33-44, mar. 2007. DOI: 10.1080/17480270701538383.

ALMEIDA, Tiago Hendrigo de *et al.* Correlation between dry density and volumetric shrinkage coefficient of three brazilian tropical wood species. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 50-63, 1 fev. 2015. DOI: 10.5923/j.ijme.20150501.01.

ALMEIDA, Tiago H. de *et al.* Density as estimator of dimensional dtability quantities of brazilian tropical woods. **Bioresources**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 6579-6590, 25 jul. 2017. DOI: 10.15376/biores.12.3.6579-6590.

ALMEIDA, Tiago Hendrigo de *et al.* Density as estimator of strength in compression parallel to the grain in wood. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 67-71, 1 jun. 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.01.

ALMEIDA, Tiago Hendrigo de *et al.* New analytical approach for estimating density of Brazilian tropical woods based on fundamental concepts. **Scientia Forestalis**, [s.l.], v. 47, n. 124, p. 686-695, 30 dez. 2019a. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). DOI: 10.18671/scifor.v47n124.10.

ANDERSSON, S. et al. Microfibril angle of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] compression wood: comparison of measuring techniques. **Journal Of Wood Science**, v.46, [s.n.], p.343-349, 2000.

AQUINO, Faustino Ruiz *et al.* Mechanical properties of wood of two Mexican Oaks: relationship to selected physical properties. **European Journal of Wood Products**, [s.l.], v.76, p. 69-77, 2017. DOI: 10.1007/s00107-017-1168-9.

ARAÚJO, Henrique José Borges de. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 399-416, 11 dez. 2007. Universidade Federal do Parana. DOI: 10.5380/rf.v37i3.9937

ARAÚJO, Victor A. de *et al.* Difficulties of wooden housing production sector in Brazil. **Wood Material Science & Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 87-96, 10 jun. 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1484513.

ARAÚJO, Victor A. de *et al.* Public support for timber housing production in Brazil. **Cerne**, [s.l.], v. 25, n. 4, p. 365-374, dez. 2019. DOI: 10.1590/01047760201925042652.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

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

BALOGH, D. T. **Efeito do solvent na obtenção de ligninas pelo processo organossolve**. 1989. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994.

BEECH, E. *et al.* GlobalTreeSearch: the first complete global database of tree species and country distributions: The first complete global database of tree species and country distributions. **Journal Of Sustainable Forestry**, [s.l.], v. 36, n. 5, p. 454-489, 23 mar. 2017. DOI: 10.1080/10549811.2017.1310049.

BOYD, J.D. Relationships between fibre morphology, growth strains and physical properties of wood. **Australian Forest Research**, v.10, n.4, p.337-360, 1980.

CALIL JR, Carlito; LAHR, Francisco Antonio Rocco; DIAS, Antonio Alves. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. São Carlos: Barueri Manole, 2003.

CASTRO, M. L.; KRUGER, P. G. von. Unidades de seleção tecnológica e inovação na construção habitacional no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 217-233, jul./set. 2013.

CAVALHEIRO, Raquel Schmitt *et al.* Density as estimator of shrinkage for some brazilian wood species. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 107-

112, 1 jun. 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.08.

CAVALHEIRO, Raquel Schmitt *et al.* Estimation of Modulus of Elasticity in Static Bending of Wood in Structural Dimensions as a Function of Longitudinal Vibration and Density. **Current Journal Of Applied Science And Technology**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 1-8, 17 fev. 2018. Sciencedomain International. DOI: 10.9734/cjast/2018/39531.

CHEN, Yongping; GUO, Wenjing. Mechanical Properties Evaluation of Two Wood Species of Ancient Timber Structure with Nondestructive Testing Methods. **Bioresources**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 6600-6612, 27 jun. 2016. BioResources. DOI: 10.15376/biores.11.3.6600-6612.

CHEN, Yongping; GUO, Wenjing. Nondestructive Evaluation and Reliability Analysis for Determining the Mechanical Properties of Old Wood of Ancient Timber Structure. **Bioresources**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 2310-2325, 6 fev. 2017. BioResources. DOI: 10.15376/biores.12.2.2310-2325.

CHRISTOFORO, André Luis *et al.* Apparent density as an estimator of wood properties obtained in tests where failure is fragile. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 40, n. 1, p. 105-112, fev. 2020a. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n1p105-112/2020.

CHRISTOFORO, André Luis *et al.* Characterization of tropical wood species for use in civil constructions. **Journal Of Civil Engineering Research**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 98-103, 1 jun. 2013. DOI: 10.5923/j.jce.20130303.02.

CHRISTOFORO, André L. *et al.* Estimation of wood toughness in Brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 40, n. 2, p. 232-237, abr. 2020b. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p232-237/2020.

CHRISTOFORO, André Luis *et al.* Full characterization of calycophyllum multiflorum wood specie. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 37, n. 4, p. 637-643, ago. 2017. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p637-643/2017.

CHRISTOFORO, André L. *et al.* Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrine* wood specie. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 376-384, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n2p376-384/2017.

CHRISTOFORO, André Luis *et al.* Shrinkage for some wood species estimated by density. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 23-27, 1 abr. 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160602.01.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação.** - Brasília: LPF, 28 p, 2002.

DIAS, Fabrício Moura *et al.* Influence of the apparent density on the shrinkage of 43 tropical

wood species. **Acta Scientiarum. Technology**, [S.L.], v. 41, n. 1, p. 30947, 12 mar. 2019. Universidade Estadual de Maringá. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i2.30947.

DIAS, Fabrício Moura; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, p. 102-113, jun 2004.

DING, Wei-dan *et al.* Relationship between wood porosity, wood density and methyl methacrylate impregnation rate. **Wood Material Science And Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 1-2, p. 62-70, mar. 2008. DOI: 10.1080/17480270802607947.

DUARTE, Bárbara Branquinho *et al.* Influence of Physical and Chemical Components on the Physical-Mechanical Properties of Ten Brazilian Wood Species. **Materials Research**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 1-10, 2020a. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2019-0325.

DUARTE, Bárbara Branquinho *et al.* Correlation between density and porosity from ten species of tropical wood. **Journal Of Engineering Research And Application**, [s.i.], v. 10, n. 3, p. 30-32, mar. 2020b. DOI: 10.9790/9622-1003023032.

DUARTE, Bárbara Branquinho. **Influência de componentes químicos em propriedades mecânicas da madeira**. 2017. 119 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

EN 408 + A1 (2012) “Estruturas de madeira - Madeira estrutural e madeira laminada colada - Determinação de algumas propriedades físicas e mecânicas”, Comitê Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

ERIKSSON, Ljusk Ola *et al.* Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework. **European Journal Of Forest Research**, [S.L.], v. 131, n. 1, p. 131-144, 24 fev. 2011. DOI: 10.1007/s10342-010-0463-3.

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

FENGEL, D; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: W. de Gruyter, 1894.

FERREIRA, Cassiana Alves *et al.* Biometria das fibras e ângulo microfibrilar em genótipos de Eucalipto. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 17, n. 3, jul./set., p. 352-358, 2018.

FERNANDES, Neila Cristina Lima *et al.* Características Físicas e Anatômicas de Cedrela odorata L. e Cedrelinga cateniformis Ducke. **Floresta e Ambiente**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-10,

11 dez. 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.100814.

FREITAS, J. F. **Estudo preliminar sobre a utilização da cana-de-açúcar e seus derivados para a produção de painéis hardboard**. 184 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

GIGAC, Juraj *et al.* Comparison of capillary flow porosimetry and mercury intrusion porosimetry in determination pore size distribution of papers. **Wood Research**, v. 62, n. 4, p 587-596, 2017.

HODOUSEK, Matej *et al.* Comparison of Non-Destructive Methods Based on Natural Frequency for Determining the Modulus of Elasticity of *Cupressus lusitanica* and *Populus x canadensis*. **Bioresources**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 270-282, 14 nov. 2016. DOI: 10.15376/biores.12.1.270-282.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Informações sobre madeiras. **IPT, 2022**. Disponível em:< https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira>. Data de Acesso: 02. Jan. 2022.

JANG, Eun-Suk *et al.* Comparison of the Mercury Intrusion Porosimerty, Capillary Flow Porometry and Gas Permeability of Eleven Species of Korean Wood. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v 46, n 6, p 681-691, 2018. DOI: 10.5658/WOOD.2018.46.6.681

LAHR, Francisco Antio Rocco. **Considerações a respeito da variabilidade de propriedades de resistência e de elasticidade da madeira**. São Carlos, 1990, 161 p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1990.

LAHR, Francisco Antonio Rocco *et al.* Full Characterization of *Erismia uncinatum* Warm Wood Specie. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 5, p.147-150, 1 out. 2016. DOI: 10.5923 / j.ijme.20160605.01

LI, Lili *et al.* Pore analysis of thermally compressed Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) by mercury intrusion porosimetry. **Holzforschung**, [S.L.], v. 72, n. 1, p. 57-63, 20 dez. 2017. Walter de Gruyter GmbH. DOI: 10.1515/hf-2017-0083.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, n.18, p.77-107, 2002.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço de cana-de-açúcar**. 124 f. Dissertação (Mestrado em físico-química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MORANDO, Tiago Capobianco *et al.* Characterization of the wood species *Qualea albiflora* for structural purposes. **Wood Research**, v. 64, n. 5, p 769-776, 2019.

MADEJ, Dominika; SZCZERBA, Jacek. Preparation of Al_2O_3 - CaAl_2O_9 - ZrO_2 composite ceramic material by the hydration and sintering of $\text{Ca}_7\text{ZrAl}_6\text{O}_{18}$ -reactive alumina mixture. **Ceramics - Silikaty**, [s.l.], p. 27-33, 30 mar. 2016. Institute of Rock Structure and Mechanics, AS CR. DOI: 10.13168/cs.2016.0004.

MOREY, P. R. **O crescimento das árvores**. São Paulo: EDUSP, 1980. 72 p.

MOURA, Maria José *et al.* Mercury intrusion porosimetry in pulp and paper technology. **Powder Technology**, [S.L.], v. 160, n. 2, p. 61-66, dez. 2005. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.08.033.

NICKERSON, Seth *et al.* Permeability of porous ceramics by X-ray CT image analysis. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 172, p. 121-130, jun. 2019. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.04.053.

PATACHIA, Silvia; CROITORU, Catalin. Biopolymers for wood preservation. **Biopolymers And Biotech Admixtures For Eco-efficient Construction Materials**, [s.l.], p. 305-332, 2016. Elsevier. DOI: 10.1016/b978-0-08-100214-8.00014-2.

PLOTZE, Michael; NIEMZ, Peter. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. **European Journal Of Wood And Wood Products**, [s.l.], v. 69, n. 4, p. 649-657, 27 nov. 2010. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s00107-010-0504-0.

RITTER, Michael A. **Timber bridges**. Madisson: USDA Forest Service, 1990.

SANTOS, S. N. C. dos *et al.* Surface properties and crystallinity of *Pinus taeda* and *Hymenaea stilbocarpa* treated at low temperatures in different grain directions. **Journal Of The Indian Academy Of Wood Science**, [s.l.], v. 17, p. 1-8, 1 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s13196-019-00253-w.

SCHWEINGRUBER, Fritz H. **Wood structure and environment**. Springer, Berlin, 2007.

SCHNEIDER, Adolf *et al.* Bestimmung der Porengrößenverteilung in Holz mit dem Quecksilber-Porosimeter. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 216-224, jun. 1974. DOI: 10.1007/bf02607257.

SEVERIANO, L. C. **Estudo do efeito da radiação gama sobre algumas propriedades físico-mecânicas de madeira usadas em patrimônios artísticos e culturais brasileiros**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Ciências da área de Tecnologia

Nuclear, Universidade de São Paulo, 2010.

SILVA, Carlos Eduardo Gomes da *et al.* Influence of the Procurement Site on Physical and Mechanical Properties of Cupiúba Wood Species. **Bioresources**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 4118-4131, 20 abr. 2018. BioResources. DOI: 10.15376/biores.13.2.4118-4131.

SILVA, Valdir Ribeiro da *et al.* Sistema Construtivo Inovador: Light Wood Frame a Sustentabilidade ao seu alcance. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 2, n. 2, p.99-107, jul./dez. 2016.

STEEGE, Hans Ter *et al.* The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 1-15, jul. 2016. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1038/srep29549.

TSOUMIS G T (2000). Wood: cellular composition of wood. Types of cells present in hardwoods and softwoods. Encyclopaedia Britannica Inc, Disponível em: <<http://www.britannica.com/media/full/603935/55253>>. Data de Acesso: 03 jun 2020.

UOSTARINEN, Katri; HAKKARAINEN, Katja. Chemical composition of wood and its connection with wood anatomy in *Betula pubescens*. **Scandinavian Journal Of Forest Research**, [S.L.], v. 34, n. 7, p. 577-584, 5 set. 2019. DOI: 10.1080/02827581.2019.1662939.

VARANDA, Luciano Donizeti. **Painéis de alta densidade para aplicação em pisos: produção e avaliação de desempenho**. 2016. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

VARANDA, Luciano Donizeti *et al.* Mechanical properties of accelerated aging particleboards. **Scientia Forestalis**, [S.L.], v. 47, n. 123, p. 571-578, 30 set. 2019. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). DOI: 10.18671/scifor.v47n123.18.

VITAS, Selin *et al.* Porosity and Pore Size Distribution of Native and Delignified Beech Wood Determined by Mercury Intrusion Porosimetry. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 416, 29 jan. 2019. MDPI AG. DOI: 10.3390/ma12030416.

WANG, Lei; TOPPINEN, Anne; JUSLIN, Heikki. Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the uk. : a study of expert perspectives from the UK. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 65, p. 350-361, fev. 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.023.

Webb, P.A., Orr, C. **Analytical methods in fine particle technology**. Micromeritics Instrument Corporation, 1th Ed., USA, 1997, 301 pp.

ZAUER, Mario *et al.* Toward improved understanding of the cell-wall density and porosity of wood determined by gas pycnometry. **Wood Science And Technology**, [s.l.], v. 47, n. 6, p. 1197-1211, 6 jul. 2013. Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s00226-

013-0568-1.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.