

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

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ À COMPRESSÃO  
PARALELA ÀS FIBRAS PELA DUREZA E PELA DENSIDADE  
APARENTE DE ESPÉCIES DE MADEIRA PROVENIENTES DE  
FLORESTAS NATIVAS**

**Isabela Matias Pietrobon**

São Carlos  
2022

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

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ À COMPRESSÃO  
PARALELA ÀS FIBRAS PELA DUREZA E PELA DENSIDADE  
APARENTE DE ESPÉCIES DE MADEIRA PROVENIENTES DE  
FLORESTAS NATIVAS**

**Isabela Matias Pietrobon**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

**Área de Concentração:** Estruturas e Geotecnia

**Orientador:** Prof. Dr. André Luis Christoforo

**Coorientadora:** Profa. Dra. Marília da Silva Bertolini

São Carlos  
2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

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

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Isabela Matias Pietrobon, realizada em 16/02/2022.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Chahud (UFMG)

Prof. Dr. Marcelo de Araujo Ferreira (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

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

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem ele nada seria possível. Obrigada Senhor, por toda graça recebida nesse período e por sempre se fazer presente.

À minha família, Antonio José Pietrobon, Gislaine Candido Matias Pietrobon e Ingrid Matias Pietrobon, por todo apoio e pela oportunidade que me proporcionaram em seguir meus estudos na área que escolhi. Eterna gratidão por possibilitarem essa conquista.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Christoforo e minha coorientadora Marília da Silva Bertolini por toda atenção, carinho e esforços a mim prestados. Sou grata a Deus pela amizade que construímos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Chahud e Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira, pela disponibilidade em participarem das bancas de avaliação deste trabalho. Agradeço imensamente por toda contribuição.

A todos do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM – USP), em especial ao Prof. Dr. Francisco Antônio Rocco Lahr pela atenção, carinho e por todo conhecimento transmitido a mim. Grata a equipe do LaMEM que não mediram esforços para me auxiliar nesta conquista.

Agradeço também aos meus amigos, que me ajudaram em todas as dificuldades que encontrei nesta nova fase da minha vida.

Agradeço todo apoio prestado durante a produção deste estudo, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Por fim, agradeço ao PPGECiv pela oportunidade em cursar a pós-graduação.

## RESUMO

PIETROBON, I. M. **Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras pela dureza e pela densidade aparente de espécies de madeira provenientes de florestas nativas.** 2022. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2022.

Quando se utiliza madeira em estruturas, é necessário conhecer suas propriedades para fazer um dimensionamento estrutural seguro e econômico, utilizando o documento da ABNT NBR 7190 (1997). Entretanto, a realização dos ensaios de caracterização completa requer grandes máquinas com alto custos. Assim, a própria norma estima as propriedades em razão das várias propriedades necessárias ao desenvolvimento de um projeto estrutural. Portanto, esta pesquisa objetivou, considerando 15 espécies de madeira provenientes de florestas tropicais e igualmente divididas nas classes de resistência da norma, avaliar via modelos de regressão, a viabilidade ou a precisão do uso da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) e das durezas (paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ )) como estimadores da resistência ( $f_{c0}$ ) e da rigidez ( $E_{c0}$ ) a compressão na direção paralela às fibras. O modelo de regressão considerando a  $\rho_{ap}$  como estimador obteve os melhores ajustes através do modelo cúbico ( $R^2$  aj entre 73 e 91%), entretanto, os lineares também foram considerados significativos pela ANOVA. Considerando a  $f_{h0}$  como estimador, os melhores ajustes foram os modelos lineares com  $R^2$  aj de 93,98% ( $f_{c0}$ ) e 64,15% ( $E_{c0}$ ). Quando utilizou a  $f_{h90}$  como estimador, notou-se maior precisão na estimativa de  $f_{c0}$  ( $R^2$  aj = 89,53% - modelo quadrático) do que no  $E_{c0}$  ( $R^2$  aj = 61,59% - modelo linear), ambos significativos pela análise de variância. Na tentativa de utilizar os modelos de regressão múltipla obteve-se os melhores ajustes nos lineares, entretanto, comparando com os modelos de regressão de uma única variável, não obteve  $R^2$  aj significativamente superior. Para verificar a eficácia dos modelos de regressão, o erro absoluto da estimativa das propriedades de outras espécies de madeiras ficou compreendido entre 0,09 e 60%.

*Palavras-chave:* madeira; folhosa; densidade; dureza; compressão; modelos de regressão.

## ABSTRACT

PIETROBON, I. M. **Estimation of strength and stiffness to compression parallel to the fibers by hardness and apparent density of wood species from native forests.** 2022. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2022.

When using wood in structures, it is necessary to know its properties to make a safe and economical structural dimensioning, using the document of ABNT NBR 7190 (1997). However, carrying out the complete characterization tests requires large machines with high costs. Thus, the standard itself estimates the properties due to the various properties necessary for the development of a structural project. Therefore, this research aimed, considering 15 wood species from tropical forests and equally divided into the strength classes of the standard, to evaluate, via regression models, the feasibility or accuracy of the use of apparent density ( $\rho_{ap}$ ) and hardness (parallel ( $f_{h0}$ ) and perpendicular ( $f_{h90}$ )) as estimators of strength ( $f_{c0}$ ) and stiffness ( $E_{c0}$ ) to compression in the direction parallel to the fibers. The regression model considering the  $\rho_{ap}$  as an estimator obtained the best fit through the cubic model ( $R^2$  adj between 73 and 91%), however, the linear ones were also considered significant by the ANOVA. Considering  $f_{h0}$  as an estimator, the best fits were the linear models with  $R^2$  adj of 93,98% ( $f_{c0}$ ) and 64,15% ( $E_{c0}$ ). When  $f_{h90}$  was used as an estimator, greater precision was noted in the estimate of  $f_{c0}$  ( $R^2$  adj = 89,53% - quadratic model) than in  $E_{c0}$  ( $R^2$  adj = 61,59% - linear model), both significant by the analysis of variance. In an attempt to use the multiple regression models, the best linear fits were obtained, however, when compared with the regression models of a single variable, the  $R^2$  adj was not significantly higher. To verify the effectiveness of the regression models, the absolute error in estimating the properties of other wood species was between 0,09 and 60%.

*Keywords:* wood; hardwoods; density; hardness; compression; regression models.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Ilustração painel de MLCC (CLT) e MLC (Glulam).....	12
Figura 2 - Telhado do Richmond Olympic Oval, construído para eventos de patinação de velocidade nos Jogos Olímpicos de Inverno de 2010 em Vancouver, British Columbia, possui 2400 metros cúbicos de madeira laminada colada. ....	13
Figura 3 - Telhado de madeira laminada colada do museu de arte moderna e contemporânea Centro Pompidou de Metz, na França. ....	14
Figura 4 – Edifício Murray Grove em Londres (a) e a estrutura de concreto (cor vermelha) e painéis de CLT (cor verde) do Edifício <i>Stadthaus</i> em Londres (b). ....	14
Figura 5 - O Prédio Puukuokka, na Finlândia, é um dos primeiros do mundo feito com madeira com lâmina pré-fabricada.....	15
Figura 6 - O Edifício 25 King Street é o maior edifício comercial em madeira da Austrália, com 10 pavimentos e 45 metros de altura. A estrutura é feita de um misto de madeira laminada colada (Glulam) e madeira laminada cruzada (CLT).....	15
Figura 7 - A estrutura da cobertura da praça de alimentação do Shopping Iguatemi de Fortaleza é feita de madeira laminada colada.....	16
Figura 8 - Casas de Madeiras executadas pela empresa brasileira Brasil Casas de Madeira Maciça, que realiza projetos em madeira em diversas cidades do país. ....	17
Figura 9 - Corpo de prova utilizado para a determinação da densidade aparente.....	65
Figura 10 - Corpo de prova (a) e aparatos (b) utilizados na realização dos ensaios de compressão (b) na direção paralela às fibras.....	66
Figura 11 - Ensaios de dureza Janka nas direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras. ....	67
Figura 12 – Histograma das propriedades avaliadas (Fr – frequência). ....	72
Figura 13 – Gráficos dos melhores ajustes (modelos cúbicos) por propriedade considerando a densidade aparente como estimador. ....	80
Figura 14 – Gráficos dos melhores ajustes (modelos lineares) por propriedade considerando a dureza paralela às fibras como estimador.....	82
Figura 15 – Gráficos dos melhores ajustes por propriedade considerando a dureza perpendicular às fibras como estimador.....	83

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Propriedades relacionadas as classes de resistência para o grupo das folhosas pela ABNT NBR 7190 (1997).....	18
Tabela 2 – Nomes vulgares e científicos das espécies de madeira de interesse. ....	22
Tabela 3 - Propriedades físicas da Angelim pedra ( <i>Hymenolobium petraeum</i> ). ....	23
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da Angelim pedra ( <i>Hymenolobium petraeum</i> ).....	23
Tabela 5 – Valores médios de propriedades do Angelim pedra ( <i>Hymenolobium petraeum</i> ). ....	24
Tabela 6 – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) aos ensaios de flexão estática e compressão paralela as fibras, das amostras submetidas antes e após o tratamento térmico. ....	25
Tabela 7 - Propriedades físicas da Cafearana ( <i>Andira stipulacea</i> ). ....	27
Tabela 8 – Propriedades mecânicas da Cafearana ( <i>Andira stipulacea</i> ). ....	27
Tabela 9 – Valores médios de propriedades da Cafearana ( <i>Andira</i> spp). ....	27
Tabela 10 - Propriedades físicas da Caixeta ( <i>Simarouba Amara</i> ). ....	29
Tabela 11 – Propriedades mecânicas da Caixeta ( <i>Simarouba Amara</i> ). ....	29
Tabela 12 - Propriedades físicas do Cajueiro ( <i>Anacardium</i> sp.). ....	31
Tabela 13 – Propriedades mecânicas do Cajueiro ( <i>Anacardium</i> sp.). ....	31
Tabela 14 - Propriedades físicas do Cambará ( <i>Erismia uncinatum</i> ).....	33
Tabela 15 – Propriedades mecânicas da Cambará ( <i>Erismia uncinatum</i> ). ....	33
Tabela 16 – Valores médios de propriedades do Cambará ( <i>Erismia uncinatum</i> ). ....	34
Tabela 17 – Valores médios de algumas propriedades mecânicas do Cambará ( <i>Erismia uncinatum</i> ). ....	34
Tabela 18 – Valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de <i>Erismia uncinatum</i> . ....	35
Tabela 19 - Propriedades físico-mecânicas da Canela parda ( <i>Ocotea</i> sp.). ....	36
Tabela 20 - Propriedades físicas da Castanheira ( <i>Bertholletia excelsa</i> ).....	37
Tabela 21 – Propriedades mecânicas da Castanheira ( <i>Bertholletia excelsa</i> ). ....	37
Tabela 22 - Propriedades físicas do Cedro doce ( <i>Cedrela</i> sp.). ....	40
Tabela 23 – Propriedades mecânicas do Cedro doce ( <i>Cedrela</i> sp.). ....	40
Tabela 24 – Valores médios de propriedades do Cedro doce ( <i>Cedrela</i> sp.). ....	40
Tabela 25 - Propriedades físicas da Garapa ( <i>Apuleia leiocarpa</i> ). ....	43
Tabela 26 – Propriedades mecânicas da Garapa ( <i>Apuleia leiocarpa</i> ). ....	43
Tabela 27 – Valores médios de propriedades da Garapa ( <i>Apuleia leiocarpa</i> ). ....	43
Tabela 28 - Propriedades físicas do Garrote ( <i>Bagassa</i> sp.). ....	45
Tabela 29 – Propriedades mecânicas do Garrote ( <i>Bagassa</i> sp.). ....	45
Tabela 30 – Valores médios de propriedades da <i>Bagassa</i> sp.....	46



Tabela 31 – Valores aproximados das propriedades mecânicas da <i>Bagassa</i> sp. ....	47
Tabela 32 – Valores médios de propriedades da <i>Luetzelburgia</i> sp. ....	48
Tabela 33 – Propriedades mecânicas da espécie Guaiçara ( <i>Luetzelburgia</i> sp.) por Grobério e Lahr (2002). ....	48
Tabela 34 – Valores médios das propriedades físico-mecânicas da Guaiçara por Lahr <i>et al.</i> (2010). ....	49
Tabela 35 – Valores médios das propriedades mecânicas da madeira de Guaiçara por Moreira <i>et al.</i> (2017). ....	49
Tabela 36 – Valores médios das propriedades da espécie Quina rosa por Lahr <i>et al.</i> (2010). ....	50
Tabela 37 – Resultados das propriedades da espécie Quina Rosa por Wolenski <i>et al.</i> (2019). ....	51
Tabela 38 – Propriedades mecânicas da espécie Rabo de arraia ( <i>Vochysia</i> sp.) por Grobério e Lahr (2002). ....	52
Tabela 39 - Propriedades físicas do Roxinho ( <i>Peltogyne lecointei</i> ).....	53
Tabela 40 – Propriedades mecânicas do Roxinho ( <i>Peltogyne lecointei</i> ). ....	54
Tabela 41 – Propriedades mecânicas do Roxinho ( <i>Peltogyne lecointei</i> ) por Alves, Smits e Carrasco (2016).....	55
Tabela 42 – Valores médios das propriedades físicas da espécie <i>Peltogyne lecointei</i> por Rodrigues, Silveira e Castello (2014).....	55
Tabela 43 – Valores médios das propriedades mecânicas da espécie <i>Peltogyne lecointei</i> por Rodrigues, Silveira e Castello (2014).....	55
Tabela 44 - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C20 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).....	70
Tabela 45 - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C30 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).....	70
Tabela 46 - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C40 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).....	71
Tabela 47 – Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C50 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).....	71
Tabela 48 – Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C60 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).....	71
Tabela 49 – Resultados do teste de correlação de Pearson e da ANOVA.....	79
Tabela 50 – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador. ....	80
Tabela 51 – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador.....	81

Tabela 52 – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador. ....	82
Tabela 53 – Resultados dos modelos de regressão múltipla para a estimativa da $f_{c0}$ e do $E_{c0}$ em função da $\rho_{ap}$ e da $f_{h0}$ . ....	83
Tabela 54 – Resultados dos modelos de regressão múltipla para a estimativa da $f_{c0}$ e do $E_{c0}$ em função da $\rho_{ap}$ e da $f_{h90}$ . ....	83
Tabela 55 – Pesquisas que realizaram a caracterização das espécies de madeiras do grupo das folhosas e contém densidade aparente entre 0,3 g/cm <sup>3</sup> e 1,1 g/cm <sup>3</sup> . ....	84
Tabela 56 – Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador e seu respectivo erro de cálculo. ....	85
Tabela 57 - Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador e seu respectivo erro cometido na estimativa. ....	85
Tabela 58 - Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador e seu respectivo erro cometido na estimativa. ....	86

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS ESPÉCIES DE MADEIRA DE INTERESSE.....	22
2.1.1 <i>Angelim pedra (Hymenolobium petraeum)</i> .....	22
2.1.2 <i>Cafearana (Andira stipulacea)</i> .....	26
2.1.3 <i>Caixeta (Simarouba Amara)</i> .....	28
2.1.4 <i>Cajueiro (Anacardium sp.)</i> .....	30
2.1.5 <i>Cambará (Erisma uncinatum)</i> .....	32
2.1.6 <i>Canela parda (Ocotea sp.)</i> .....	36
2.1.7 <i>Castanheira (Bertholletia excelsa)</i> .....	37
2.1.8 <i>Cedro doce (Cedrela sp.)</i> .....	39
2.1.9 <i>Embireira (Guatteria sp.)</i> .....	42
2.1.10 <i>Garapa (Apuleia leiocarpa)</i> .....	42
2.1.11 <i>Garrote (Bagassa sp.)</i> .....	45
2.1.12 <i>Guaíçara (Luetzelburgia sp.)</i> .....	48
2.1.13 <i>Quina rosa (Chinchona sp.)</i> .....	50
2.1.14 <i>Rabo de arraia (Vochysia sp.)</i> .....	51
2.1.15 <i>Roxinho (Peltogyne lecointei)</i> .....	53
2.2 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE.....	55
2.3 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	59
2.4 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	62
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>64</b>
3.1 DENSIDADE APARENTE.....	65
3.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	66
3.3 DUREZA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS.....	67
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	68
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>

# 1. Introdução

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A madeira está presente na vida humana desde seus primórdios, seja como fonte de energia, sustento ou abrigo. Ela foi fundamental no desenvolvimento das civilizações, devido sua versatilidade e resistência, levando o homem a dominar o método de manipulação que permitiu sua utilização nas mais variadas funcionalidades. Por ser um material disponível e de fácil acesso, o homem desenvolveu estratégias para manipulação primária e com o passar dos anos, houve evolução dessas técnicas até conseguir as atuais tecnologias, que permitem realizar projetos cada vez mais complexos (CORDEIRO, SILVA e SOARES, 2017).

Na construção civil, a diversidade de possibilidade de utilização da madeira é devida a alguns fatores, tais como, facilidade de obtenção, origem de fontes renováveis, baixa demanda energética em seu processo produtivo, alta relação entre valores médios de resistência e densidade quando comparada a outros materiais (aço e concreto, por exemplo) (ALMEIDA, 2015; ALMEIDA *et al.*, 2016).

Diante da ampla versatilidade nas construções, a madeira pode agir de forma secundária na execução de uma obra, sendo utilizada em escoramentos, fôrmas, esquadrias, andaimes e até nos barracões da obra, mas também pode ser empregada de forma permanente em revestimento, cobertura, mobiliário, pilares, vigas, fundações etc. (CORDEIRO, SILVA e SOARES, 2017; ALMEIDA, ALMEIDA e CHRISTOFORO, 2018).

Em outros países, como Estados Unidos e Finlândia utilizam sistemas construtivos pré-fabricados com madeiras denominadas engenheiradas, como a Madeira Laminada Colada (MLC ou GLT), composta por lamelas de madeira coladas, e Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC ou CLT), consistindo em lamelas coladas em direções cruzadas, conforme Figura 1. E vale a pena ressaltar, que esses sistemas construtivos estão se popularizando na Europa, Canadá e Austrália (BARROS, 2020).

**Figura 1** - Ilustração painel de MLCC (CLT) e MLC (Glulam).



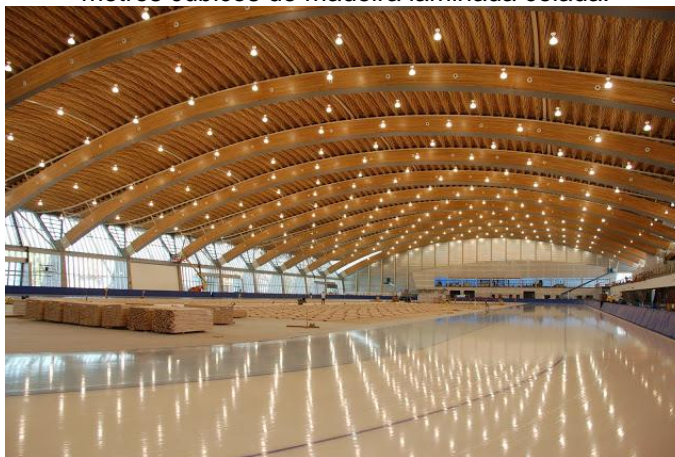
Fonte: BC FOCUS - <https://bcfocus.com/global-glued-laminated-timbers-and-cross-laminated-timbers-market-2020-analysis-types-applications-forecast-and-covid-19-impact-analysis-2025/>

As madeiras engenheiradas possuem resistência o suficiente para atingir vão livres de até 100 metros, edificações com mais de 15 pavimentos e foram classificadas como o único sistema construtivo de “carbono-negativo” no mundo, pois retiram mais gases do efeito estufa da atmosfera do que adicionam ao longo de toda a cadeia produtiva (BARROS, 2020). Na Europa, 30% das construções precisam utilizar a madeira nas edificações, com o intuito de diminuir a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera, indicando sua importância na construção sustentável (CORDEIRO, SILVA e SOARES, 2017).

Nos Estados Unidos, destaca-se o uso de Madeira em construções de novas residências, consumindo mais de um terço da produção deste país de madeira serrada (158 milhões de metros cúbicos), painéis estruturais e outros materiais não estruturais, como móveis, portas e acabamentos (HOWARD e JONES, 2016).

Nas Figuras Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 e Figura 6 contém edificações que foram construídas com madeiras engenheiras e estão distribuídas pelo mundo todo, como pode-se observar.

**Figura 2** - Telhado do Richmond Olympic Oval, construído para eventos de patinação de velocidade nos Jogos Olímpicos de Inverno de 2010 em Vancouver, British Columbia, possui 2400 metros cúbicos de madeira laminada colada.



Fonte: Blog Engenheiro Madeireiro - <http://engenheiriomadeireiro.blogspot.com/2018/07/a-madeira-laminada-colada-e-suas-curvas.html>

**Figura 3** - Telhado de madeira laminada colada do museu de arte moderna e contemporânea Centro Pompidou de Metz, na França.

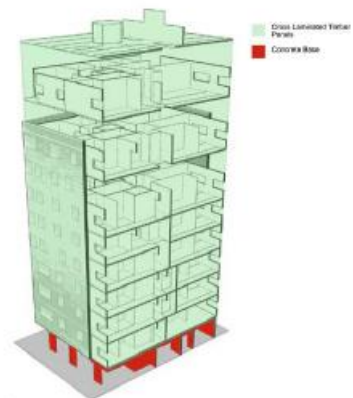


Fonte: Eng. Alan Dias - <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2012/08/centre-pompidou-metz-arquiteto-shigeru.html>

**Figura 4** – Edifício Murray Grove em Londres (a) e a estrutura de concreto (cor vermelha) e painéis de CLT (cor verde) do Edifício *Stadthaus* em Londres (b).



(a)



(b)

Fonte: Blake (2009)

**Figura 5** - O Prédio Puukuokka, na Finlândia, é um dos primeiros do mundo feito com madeira com lâmina pré-fabricada.



Fonte: Stant - <https://www.stant.com.br/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-quais-sao-as-melhores-aplicacoes/>

**Figura 6** - O Edifício 25 King Street é o maior edifício comercial em madeira da Austrália, com 10 pavimentos e 45 metros de altura. A estrutura é feita de um misto de madeira laminada colada (Glulam) e madeira laminada cruzada (CLT).



Fonte: Stant - <https://www.stant.com.br/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-quais-sao-as-melhores-aplicacoes/>

No Brasil, 7,28 milhões de hectares de florestas de diferentes biomas são certificados (FSC, 2021). Em relação à Floresta Amazônica, não existe um dado exato do número de espécies de árvores que possui, mas estima-se em torno de 16 mil espécies (CARDOSO *et al.*, 2017; DUARTE, 2017; STEEGE *et al.*, 2016).

Entretanto, no Brasil destaca-se a forte tradição da construção em alvenaria de tijolos de barro, que posteriormente, foi substituída pelo concreto armado. Este estilo de construção foi trazido pelos portugueses desde a colonização do país. Nas regiões com predomínio de povos europeus, Sul e Sudeste do país, houve influência em construções de madeira, devido ser regiões com clima mais ameno e este material é um ótimo isolante térmico (MEIRELLES *et al.*, 2005).

Em 1905, o governo da cidade de Curitiba proibiu a construção de casas de madeira na zona central da cidade, gerando no meio técnico preconceito neste estilo de construção. Assim, o uso de técnicas construtivas inapropriadas fez das estruturas de madeira sinônimos de pouca durabilidade, mas este paradigma vem sendo quebrado com o avanço tecnológico e técnicas apropriadas de construção (MEIRELLES *et al.*, 2005).

No Brasil, a utilização das madeiras engenheiradas ainda é tímida, mas vem aumentando gradativamente por ser um material sustentável, e por proporcionar a criação de estruturas em qualquer forma e tamanho com excelentes resultados, como pode-se observar na Figura 7 e Figura 8. Os painéis de madeira, com destaque para o painel OSB (*Oriented Strand Board*), vem ganhando força no mercado da construção civil no Brasil e no mundo, por ser um material com baixo peso próprio, renovável, elevada resistência mecânica e permite uma obra mais limpa e com duração significativamente baixa. (FINK, KOHLER e BRANDNER, 2018; ABIMCI, 2009; CORDEIRO; SILVA; SOARES, 2017).

**Figura 7** - A estrutura da cobertura da praça de alimentação do Shopping Iguatemi de Fortaleza é feita de madeira laminada colada.



Fonte: Blog Civilização Engenharia -

<https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2017/10/20/conheca-mais-sobre-a-maior-estrutura-de-madeira-do-brasil/>



**Figura 8** - Casas de Madeiras executadas pela empresa brasileira Brasil Casas de Madeira Maciça, que realiza projetos em madeira em diversas cidades do país.



Fonte: Stant - <https://www.stant.com.br/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-quais-sao-as-melhores-aplicacoes/>

De acordo com a Associação Brasileira das Incorporadoras Imobiliárias, ABRAINC, o déficit habitacional ficou em 7,79 milhões de moradias em 2019. Diante da vasta cobertura florestal do país e o déficit habitacional apresentado, é necessário repensar nas estruturas tradicionais de aço e concreto, e buscar inovações para atender a demanda das gerações que virão. Assim, pode-se considerar que o uso da madeira e produtos engenheirados à madeira apresentam uma ótima alternativa viável na construção de estruturas residenciais, a fim de atender a demanda habitacional existente no país (AQUINO, 2019; BARROS, 2020).

No Brasil, as estruturas de madeira são regidas pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que discorre sobre as condições gerais executivas, de projeto e de controle das estruturas de madeira.

Na referida norma ABNT NBR 7190 (1997), o dimensionamento das peças é feito de acordo com o método probabilístico dos Estados Limites, com o Estado Limite Último avaliando a perda de capacidade resistente e instabilidade em parte ou total da estrutura, e o Estado Limite de Utilização, que avalia as deformações e vibrações excessivas em parte ou total da estrutura.

Para facilitar os projetos estruturais de madeira, a Norma ABNT NBR 7190 (1997) especifica as classes de resistência, que enquadram as diversas espécies de madeira com base nos valores característico da resistência à compressão (propriedade de referência) na direção paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ), em que os valores divulgados de algumas propriedades associadas a essas classes de resistência são estabelecidas com base em um teor de umidade (U) de 12%. Para as madeiras do grupo das folhosas (madeiras duras), as classes de resistência são C20 ( $20 < f_{c0,k} \leq 30$  MPa), C30 ( $30 < f_{c0,k} \leq 40$  MPa), C40 ( $40 < f_{c0,k} \leq 60$  MPa) e C60 ( $f_{c0,k} > 60$  MPa), apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Propriedades relacionadas as classes de resistência para o grupo das folhosas pela ABNT NBR 7190 (1997).

Valores na condição padrão de referência, U = 12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$\rho_{bas}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )
C20	20	4	9500	500	650
C30	30	5	14500	650	800
C40	40	6	19500	750	950
C60	60	8	24500	800	1000

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7190 (1997)

Na Tabela 1,  $f_{c0,k}$  e  $f_{v0,k}$  consistem nos valores característicos de resistência à compressão e ao cisalhamento na direção paralela às fibras das madeiras, respectivamente,  $E_{c0}$  é o módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras,  $\rho_{bas}$  e  $\rho_{ap}$  são as densidades básica (massa seca da amostra / volume da madeira saturada) e aparente (massa a 12% de umidade / volume da madeira a 12% de umidade).

Além da Norma preconizar os critérios de dimensionamento, detalhamento das estruturas e ligações, ações atuantes e as classes de resistência existentes, ela também discorre sobre as questões relativas à sua caracterização, seja ela, completa, mínima ou simplificada, com métodos de ensaios para obtenção das propriedades físicas e mecânicas das madeiras (AQUINO, 2019).

Como estes ensaios de caracterização completa das espécies de madeira requerem máquinas de grande porte e custos elevados, que estão presentes apenas em grandes centros de pesquisa, ocasiona um receio entre os projetistas em utilizar este material, pois falta conhecimento das propriedades que acaba resultando em projetos superdimensionados, inviabilizando o uso da madeira em estruturas. Assim, a Norma ABNT NBR 7190 (1997) apresenta valores médios das propriedades de rigidez e resistência de algumas espécies de madeiras nativas e de florestamento, que são encontrados no Anexo E, e também relações de propriedades características de resistência e rigidez das madeiras, possibilitando uma estimativa dessas propriedades para fazer o uso adequado em projetos estruturais e evitar o superdimensionamento das estruturas.

Portanto, no contexto da estimativa de propriedades, a densidade aparente, propriedade de fácil determinação experimental, vem sendo utilizada na previsão de propriedades da madeira, como pode ser visto nas pesquisas de Almeida *et al.* (2016), Almeida *et al.* (2017), Christoforo *et al.* (2017), Yojo *et al.* (2019), Christoforo *et al.* (2020) e Lahr *et al.* (2021).

Os modelos para a estimativa de propriedades com base apenas na densidade aparente são limitados (massa/volume), pois não leva em consideração a anisotropia da madeira, por exemplo, tais estimativas resultam, geralmente, em dados imprecisos. Nesse sentido, é válido chamar a atenção de que é mais provável que propriedades mecânicas

possam ser mais bem estimadas com base em outras propriedades mecânicas, ou até estimadas pela combinação da densidade aparente e de alguma propriedade mecânica de referência.

A dureza, uma das propriedades mecânicas que permite estabelecer a empregabilidade da madeira na construção civil e na indústria moveleira (SORIANO *et al.*, 2019), é definida como a força máxima de compressão que atua em uma face do corpo de prova, quando ocorre a penetração de uma semiesfera (identador) de área diametral de 1,0 cm<sup>2</sup>. Quando avaliada em outros materiais, como as bases de ligas metálicas, é usual ser correlacionada (de forma empírica) ao limite de resistência à tração dos mesmos (PAVLINA e TYNE, 2008; GASKO e ROSENBER, 2011).

O ensaio de dureza é mais simples (aparatos e instrumentação) e mais rápido de ser executado do que o ensaio de compressão (obtenção da resistência e da rigidez), e inspirado nessas correlações empíricas investigadas considerando os materiais a base de ligas metálicas, é possível que haja forte correlação entre a resistência e a rigidez proveniente do ensaio de compressão paralela às fibras, cabendo destacar a relação intrínseca entre resistência e rigidez da madeira.

Vale a pena ressaltar que rigidez e dureza são propriedades diferentes, pois a rigidez define-se como medida de resistência de um material à deformação, isto é, expressa a dificuldade oferecida às deformações elástica daquele material (volume), já a dureza indica o quanto a superfície resiste a danos localizados causados por tensão ou impacto (superficial) (ABNT NBR 7190, 1997).

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo, com base na consideração de 15 espécies de madeira provenientes de florestas tropicais e igualmente divididas nas classes de resistência da norma brasileira (ABNT NBR 7190, 1997), avaliar, via modelos de regressão (uma e duas variáveis), a viabilidade ou a precisão do uso da densidade aparente e das durezas (nas direções paralela e perpendicular) como estimadores da resistência e da rigidez à compressão na direção paralela às fibras. De maneira a contribuir com a melhor representatividade dos modelos obtidos, os valores médios das propriedades avaliadas por espécie de madeira foram comparados com os valores médios de tais propriedades obtidas da literatura correlata, sendo tais equações aplicadas na estimativa das propriedades de resistência e de rigidez à compressão na direção paralela às fibras considerando-se outras espécies de madeira com resultados ( $\rho_{ap}$ ;  $f_{h0}$ ;  $f_{h90}$ ;  $f_{c0}$ ;  $E_{c0}$ ) divulgados na literatura correlata.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A estimativa das propriedades é considerada, pela própria norma brasileira NBR 7190 (1997), uma das alternativas necessárias ao desenvolvimento de um projeto estrutural, aliada as dificuldades inerentes (equipamentos disponíveis apenas em grandes centros de pesquisa) na execução dos ensaios. Nesse sentido, a densidade aparente (propriedade de fácil determinação experimental) tem sido utilizada por diversos pesquisadores como estimador de outras propriedades, entretanto, possui algumas limitações em razão dessa propriedade, por exemplo, não considerar os parâmetros anatômicos da madeira.

Dentre as propriedades mecânicas, as provenientes do ensaio de compressão (resistência e rigidez) na direção paralela às fibras consistem nas de maior relevância segundo a norma brasileira, e seu valor característico de resistência é responsável por enquadrar a espécie em uma determinada classe de resistência, cabendo destacar a necessidade de dispositivos adequados para controlar os deslocamentos na determinação da rigidez.

O ensaio de dureza se apresenta mais simples em termos de execução, e também em termos dos aparatos necessários quando comparado com o ensaio de compressão, além de demandar menor tempo de execução, o que impacta em custos com manutenção do equipamento, mão de obra e energia. Pelas correlações empíricas divulgadas na literatura entre dureza e limite de resistência à tração de ligas metálicas, é possível que haja correlação entre a dureza (nas direções paralela e normal) com a resistência e a rigidez à compressão na direção paralela às fibras da madeira, e que modelos combinando a densidade aparente com as durezas possam ser ainda mais precisos, o que motivou o desenvolvimento da presente pesquisa.

Por se tratar de 15 espécies de madeira e abrangendo a todas as classes de resistência da norma brasileira para o grupo das folhosas, os resultados (modelos de regressão) provenientes desse trabalho, ajustes com precisões desejadas, serviram como alternativa na previsão das propriedades de resistência e de rigidez à compressão. Destaca-se que a ênfase foi dada a estimativa das propriedades (resistência e rigidez) no ensaio de compressão paralela às fibras, mas é evidente que, se essas forem conhecidas, os modelos podem ser utilizados na estimativa dos valores de dureza.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho desenvolvido foi organizado em capítulos:

- Capítulo 2 [Revisão Bibliográfica]: Apresenta os trabalhos da literatura técnica e científica a respeito da caracterização e propriedades relacionadas as 15 espécies de madeiras utilizadas neste trabalho, como também a estimativa de propriedades em

função da densidade aparente e dureza, possibilitando encontrar resultados de propriedades mecânicas a serem comparados com os obtidos na presente pesquisa, evidenciando a contribuição proporcionada pelo presente trabalho em desenvolvimento;

- Capítulo 3 [Material e Métodos]: Apresenta metodologia empregada para a obtenção dos valores de resistência ( $f_{c0}$ ) e de rigidez ( $E_{c0}$ ) a compressão na direção paralela às fibras, assim como, os valores da densidade aparente ( $\rho_{12\%}$ ) e das durezas nas direções paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras das 15 espécies de madeiras utilizadas neste trabalho, que seguem diretamente as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Também foi apresentada a forma de análise estatística a ser utilizada para avaliar o nível de correlação entre as variáveis ( $f_{c0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $\rho_{12\%}$ ,  $f_{h0}$ ,  $f_{h90}$ ) e do uso dos modelos de regressão na estimativa das propriedades de resistência e de rigidez em função da densidade aparente;
- Capítulo 4 [Resultados e Discussão]: Apresenta os valores médios das propriedades físicas e mecânicas das 15 espécies de madeiras utilizadas neste trabalho, as discussões dos valores encontrados das propriedades de interesse com os da literatura correlata, os resultados da análise de variância sobre os níveis de correlação entre as variáveis ( $f_{c0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $\rho_{12\%}$ ,  $f_{h0}$ ,  $f_{h90}$ ), assim como, a possibilidade da estimativa das propriedades mecânicas em função da densidade aparente pelos modelos de regressão testados;
- Capítulo 5 [Conclusões]: Apresenta as conclusões sobre esta pesquisa.
- E por fim, expõem-se as referências utilizadas como base deste trabalho.

## 2. Revisão bibliográfica

A revisão da literatura teve como objetivo apresentar detalhes, características e valores de propriedades (caso sejam encontradas) das 15 espécies de madeira consideradas na geração dos modelos de regressão, assim como, evidenciar as pesquisas em que a densidade aparente e a dureza tenham sido utilizadas na estimativa de propriedades da madeira. Para realização da revisão da literatura, foi utilizada as seguintes bases para as pesquisas: Portal de Periódicos CAPES, Web of Science, Engineering Village, Scopus, Google Scholar, Google e páginas de diversas revistas nacionais e internacionais relacionadas a madeira e a estruturas de madeira.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS ESPÉCIES DE MADEIRA DE INTERESSE

As espécies de madeira consideradas no presente trabalho são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Nomes vulgares e científicos das espécies de madeira de interesse.

<b>Nome vulgar</b>	<b>Nome científico</b>
Angelim pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>
Cafearana	<i>Andira stipulacea</i>
Caixeta	Simarouba amara
Cajueiro	<i>Anacardium</i> sp.
Cambará	<i>Erisma uncinatum</i>
Canela parda	<i>Ocotea</i> sp.
Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i>
Cedro doce	<i>Cedrela</i> sp.
Embireira	<i>Gutteria</i> sp.
Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>
Garrote	<i>Bagassa</i> sp.
Guaçara	<i>Luetzelburgia</i> sp.
Quina rosa	<i>Chinchona</i> sp.
Rabo de arraia	<i>Vochysia</i> sp.
Roxinho	<i>Peltogyne lecointei</i>

#### 2.1.1 Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

A Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) é uma espécie tropical da Amazônia e possui ocorrência natural em alguns estados brasileiros: Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Essa espécie possui cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-avermelhado claro ou escuro, alburno castanho-pálido, brilho ausente, densidade média, textura grossa e aspecto fibroso. A sua anatomia macroscópica possui parênquima axial, raios

e vasos visíveis a olho nu. Quanto à durabilidade natural, é considerada uma madeira durável em relação a fungos apodrecedores, moderadamente resistente a brocas marinhas e resistentes a cupins-de-madeira-seca. Quanto a trabalhabilidade, é fácil de ser trabalhada, serrada, plainada e possui acabamento satisfatório. Em relação a secagem, se bem realizada, pode ser rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento, mas se for realizada ao ar livre é moderadamente difícil. A Tabela 3 e 4 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Angelim pedra (IPT, 2021).

**Tabela 3** - Propriedades físicas da Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*).

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,12}$	710
$\rho_{verde}$	1190
$\rho_{bas}$	590
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,1
Tangencial	6,3
Volumétrica	10,1

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

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 4** – Propriedades mecânicas da Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	52,3	38
$f_{c90}$ (MPa)	11,3	6,4
$f_M$ (MPa)	109,3	70,6
$E_M$ (MPa)	11572	9414
$f_{v0}$ (MPa)	12,3	10
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	7659	5325
$f_{h90}$ (N/cm <sup>2</sup> )	5786	5050
$f_{t90}$ (MPa)	3,8	4,2

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{c90}$  = resistência à compressão normal às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $E_M$  = módulo na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras;

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

O IPT (2021) disponibiliza características gerais, propriedades físicas e mecânicas obtidas conforme as premissas dos Ensaio físicos e mecânicos de madeira da ABNT NBR

6230 (1940), que atualmente foi cancelada e substituída pela ABNT NBR 7190 (1997). A ABNT NBR 6230 (1940) utilizava corpos de prova prismáticos de 2x2x3 cm para realizar os ensaios de caracterização deste material.

Na norma ABNT NBR 7190 (1997), em seu anexo E “Valores médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento”, consta os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas a espécie Angelim pedra (Tabela 5).

**Tabela 5** – Valores médios de propriedades do Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*).

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

$\rho_{ap,12}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 12%;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência à tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

A espécie Angelim pedra pode ser utilizada na construção civil em diversas maneiras, desde aplicações pesadas internas (vigas e caibros), até aplicações leves (portas, venezianas, caixilhos, forros, ripas, andaimes, fôrmas para concreto, entre outros). Também podem ser utilizados em mobiliário e artefatos diversos (IPT, 2021).

Ferreira *et al.* (2019) avaliaram o efeito térmico no comportamento das propriedades físicas (massa específica com teor de umidade de 12%, perda de massa, teor de umidade de equilíbrio e estabilidade dimensional) e mecânicas (flexão estática e compressão paralela às fibras) da madeira Angelim pedra. Para isso, as peças confeccionadas com dimensões de 25 x 9 x 1,7cm foram submetidas ao processo de termorreificação, sob diferentes temperaturas (180°C e 200°C) e tempo de exposição (variando de 2 a 4 horas), além das amostras testemunhas (sem tratamento térmico). Os resultados obtidos de massa específica da madeira *Hymenolobium petraeum* variaram entre 0,69 e 0,71g/cm<sup>3</sup> antes da termorreificação, e de 0,67 e 0,70g/cm<sup>3</sup> após o tratamento térmico. Portanto, puderam concluir que o tratamento térmico acarretou uma pequena perda de massa, de acordo com o aumento da temperatura e tempo de exposição. Entretanto, o processo resultou em melhorias na estabilidade dimensional dessa espécie, além de proporcionar uma redução no teor de umidade de equilíbrio das amostras. Em relação as propriedades mecânicas, não foram verificadas diferenças significativas (Tabela 6).



**Tabela 6** – Valores médios de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) aos ensaios de flexão estática e compressão paralela as fibras, das amostras submetidas antes e após o tratamento térmico.

Tempo - Temperatura (horas - °C)	Flexão Estática (MPa)		Compressão Paralela (MPa)	
	MOE	MOR	MOE	MOR
0 - 0	11107	67,18	14940	55,66
4 - 200	11093	67,09	14470	55,74

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2019)

Lullianelli e Tavares (2009) realizaram o ensaio mecânico de tração para caracterizar e comparar os compósitos PVC/pó de madeira, utilizando separadamente o cerne e o alburno, que são duas regiões distintas da madeira Angelim pedra. As madeiras passaram por um processo de beneficiamento que inclui moagem, peneiramento (40 - 80 *mesh*) e secagem em estufa na temperatura de 80°C por 48h para remoção do excesso de umidade. Para a realização do ensaio de tração, manusearam a Máquina Universal de Ensaio Instron, modelo 4204, seguindo as premissas da norma ASTM D 638 (célula de carga de 1 kN, garras para tensão com distância de 25,4mm e velocidade de separação das garras de 1mm/min). Os parâmetros analisados foram: módulo de elasticidade, tensão máximo, tensão de ruptura, alongamento na tensão máximo e alongamento na ruptura. Os resultados obtidos indicaram que as propriedades mecânicas dos compósitos preparados são dependentes do tipo e da proporção de madeira utilizada, mas, a proporção de madeira é o principal fator que afeta o desempenho mecânico dos parâmetros analisados. Observaram que conforme aumenta a proporção de madeira no compósito, tende a aumentar o módulo de elasticidade, diminui o alongamento na ruptura e não causa alteração significativa na resistência à tração. Em relação ao tipo de madeira adicionada, observaram pequenas diferenças nas propriedades mecânicas, mas os compósitos preparados com cerne apresentam propriedades ligeiramente melhores, quando comparados aos compósitos com alburno.

Rodrigues, Silveira e Castello (2014) analisaram as propriedades físico-mecânicas de madeiras da Amazônia Meridional através de métodos convencionais, entre essas espécies selecionadas estão: Roxinho (*Peltogyne lecointeii*), Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Jatobá (*Hymenaea courbaril*), Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) e Amescla (*Trattinnickia burseraefolia*). Para a determinação das propriedades físicas (massa específica, teor de umidade, coeficiente de contração tangencial e coeficiente de contração radial) foram seguidas as normas da COPANT, enquanto, para determinar as propriedades mecânicas [módulo de ruptura à flexão estática ( $f_M$ ), módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_{M0}$ ), resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) e resistência ao cisalhamento ( $f_{s0}$ )] foram utilizada a máquina universal de ensaios, com todos os procedimentos executados em concordância com as normas técnicas COPANT. Em relação a espécie Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), a massa específica ( $\rho_{bas}$ ) obtida foi de 0,59 g/cm<sup>3</sup>, que corrobora

com os dados apresentados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Pode-se observar também, que os valores obtidos das propriedades mecânicas para a espécie *Hymenolobium petraeum* ( $f_M = 109,98$  MPa;  $E_{M0} = 11498$  MPa;  $f_{c0} = 51,97$  MPa e  $f_{s0} = 11,16$  MPa) foram próximos dos valores encontrados pelo IPT.

Taques e Arruda (2016) verificaram o comportamento da madeira Angelim pedra submetida ao processo de usinagem para a produção de móveis. As peças de madeira selecionadas foram secas ao ar livre e armazenadas por aproximadamente três anos. Após essa etapa, escolheram aleatoriamente 36 peças com dimensões de 150 x 13,5 x 2,5 cm, comprimento, largura e espessura respectivamente, para os testes de usinagem de acordo com os equipamentos utilizados pela indústria moveleira (aplainamento, lixamento, broca e fendilhamento por prego). Foram selecionadas 8 peças de madeira aleatoriamente para determinação da umidade, de acordo com a Norma ABNT NBR 7190 (1997). Os resultados mostraram que a espécie Angelim pedra apresentou ótimo desempenho nos testes de lixamento, pois não apresentaram risco na superfície das peças e no broqueamento peças isentas de defeitos, com queima da madeira. No teste de fendilhamento por prego teve um bom desempenho, pois apresentou rachaduras com inserção do prego, e no teste de aplainamento um desempenho regular, apresentando arrancamento de grã, arrepiamento da superfície e arrancamento de cavaco. Assim, a madeira Angelim pedra responde com qualidade aos processos de usinagem no aplainamento, lixamento, broca e fendilhamento por prego, para confecção de móveis maciços com bom acabamento superficial, mostrando uma espécie de potencial para produção de produtos que requerem elevada qualidade em sua usinagem.

### 2.1.2 Cafearana (*Andira stipulacea*)

A madeira Cafearana (*Andira stipulacea*) possui algumas características: altura de 4 a 7 metros, troco tortuoso de 30 a 40 cm de diâmetro. É uma espécie tropical da Amazônia e possui ocorrência natural em alguns estados brasileiros: Bahia, Espírito Santo, sul de Roraima e Rio de Janeiro, na mata pluvial úmida da costa Atlântica. Sua madeira é pesada, macia e de média resistência mecânica (LORENZI, 1998 *apud* DIAS, 2000).

Essa espécie possui cerne na cor marrom rosado a marrom avermelhado, com veios claros que se observam na superfície tangencial e contém textura grossa. A durabilidade natural é considerada durável contra-ataques de fungos e é classificada como uma madeira resistente ao ataque de cupins. Quanto a trabalhabilidade, essa espécie possui tensões internas que afetam a serração, o aplainamento é satisfatório e o acabamento possui um bom comportamento, mas requer cuidados no lixamento (ITTO, 2021).

Na Tabela 7 e Tabela 8 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da *Andira stipulacea*.

**Tabela 7 - Propriedades físicas da Cafearana (*Andira stipulacea*).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,12}$	880
$\rho_{bas}$	770
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,7
Tangencial	7,3

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

Fonte: Adaptado de ITTO (2021)

**Tabela 8 – Propriedades mecânicas da Cafearana (*Andira stipulacea*).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>
	<b>U<sub>12%</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	74,4
$f_M$ (MPa)	144,3
$E_M$ (MPa)	15008,9
$f_{v0}$ (MPa)	9,2

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Fonte: Adaptado de ITTO (2021)

No anexo E da norma ABNT NBR 7190 (1997), contém os valores médios de algumas propriedades da espécie de madeira dicotiledôneas Cafearana (*Andira* spp) (Tabela 9).

**Tabela 9 – Valores médios de propriedades da Cafearana (*Andira* spp).**

<b>Propriedades</b>	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	677
$f_{c0}$ (MPa)	59,1
$f_{t0}$ (MPa)	79,7
$f_{t90}$ (MPa)	3,0
$f_{v0}$ (MPa)	5,9
$E_{c0}$ (MPa)	14098

$\rho_{ap,12}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 12%;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência à tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

A Cafearana pode ser utilizada de diversas maneiras, por exemplo: dormentes, vigas, tábuas, pisos, degraus, mobiliário, artefatos decorativos, embalagem, paletes, convés de barcos, carrocerias de caminhões, entre outros (ITTO, 2021).

Christoforo *et al.* (2014) investigaram a possibilidade de estimar a tenacidade pela densidade aparente e resistência à flexão utilizando modelos de regressão linear quadrático

e cúbico. Foram utilizadas 15 espécies de madeiras, igualmente distribuídas nas cinco classes de resistência (C20, C30, C40, C50 e C60), definidas pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). A espécie Cafearana (*Andira stipulacea*) se enquadra na classe de resistência C40, e os valores médios obtidos da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ), módulo de ruptura na flexão estática ( $f_M$ ) e tenacidade ( $W$ ) foram 670 kg/m<sup>3</sup>, 91 MPa e 86 J, respectivamente. Assim, após uma análise dos resultados dos modelos de regressão com o uso das 15 espécies de madeiras, mostraram ser representativos em todas as funções avaliadas, entretanto, revelou que o modelo polinomial quadrático em função da densidade aparente apresenta os melhores resultados. Portanto, a dureza da madeira pode ser estimada com o conhecimento dos resultados da densidade aparente com a equação quadrática obtida pelo ajuste de mínimos quadrados.

Dias *et al.* (2019) avaliaram a influência da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) nas retrações radial (TRS) e tangencial (TTS), considerando os resultados para 43 espécies de madeiras tropicais brasileiras, conforme as prescrições listadas no Anexo B da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Para correlacionar a densidade aparente com as porcentagens de encolhimento (radial e tangencial) das espécies de madeiras, foram aplicados modelos de regressão exponencial e linear. A espécie Cafearana (*Andira stipulacea*) obteve os seguintes valores médios da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ), porcentagem de retração radial (TRS) e porcentagem de retração tangencial (TTR): 680 kg/m<sup>3</sup>, 5,5% e 9,9%, respectivamente. Observaram que as 43 espécies apresentaram uma grande variação na densidade (entre 510 e 1160 kg/m<sup>3</sup>) para uma maior representatividade dos resultados utilizados nos modelos de regressão. Portanto, de acordo com os resultados obtidos dos modelos de regressão, é impossível admitir a existência de uma forte correlação entre a densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) e a porcentagem de retração radial e tangencial das 43 espécies de madeiras avaliadas.

### **2.1.3 Caixeta (*Simarouba Amara*)**

A Caixeta (*Simarouba Amara*) é uma espécie tropical da Amazônica, e possui ocorrência natural em outros estados brasileiros: Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Essa espécie possui cerne e alburno indistintos pela cor, esbranquiçado a levemente amarelado, brilho moderado, densidade baixa, macia ao corte, textura média a grossa e superfície lustrosa. A sua descrição anatômica macroscópica possui parênquima axial, raios e vasos visíveis a olho nu (IPT, 2021).

Quanto a durabilidade natural é considerada uma madeira suscetível à ação de fungos manchadores, apodrecedores e ao ataque de cupins. Já em relação a trabalhabilidade, é fácil de ser trabalhada, serrada, aplainada, pregada, parafusada e permite bom acabamento. A secagem pode ser feita ao ar livre, desde que a madeira esteja bem empilhada e coberta, e o

procedimento pode ser rápido, sem a ocorrência de defeitos, ou muito rápido com pequenos efeitos de torcimento médio (IPT, 2021).

A Tabela 10 e Tabela 11 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas dessa espécie.

**Tabela 10 - Propriedades físicas da Caixeta (*Simarouba Amara*).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,12}$	440
$\rho_{verde}$	1120
$\rho_{bas}$	370
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,8
Tangencial	6,8
Volumétrica	11,8

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

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 11 – Propriedades mecânicas da Caixeta (*Simarouba Amara*).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	33	19,5
$f_{c90}$ (MPa)	4,4	2,8
$f_M$ (MPa)	64	43,6
$E_M$ (MPa)	7257	6570
$f_{v0}$ (MPa)	7	6
$f_{t90}$ (MPa)	-	3,6

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{c90}$  = resistência à compressão normal às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

A Caixeta pode ser utilizada de diversas maneiras, desde aplicações leves na construção civil (guarnições, rodapés, forros, lambris), até no setor mobiliário e artefatos diversos (molduras para quadros, instrumentos musicais, cabos de vassoura, lâmina decorativas, artigos de esporte e embalagens) (IPT, 2021).

Cassiano *et al.* (2013) avaliaram as variações e estimativas da umidade de equilíbrio (UE) de sete espécies de madeira, dentre elas se enquadra a Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), nas condições climáticas do município de Sinop, Estado de Mato Grosso, no período de 10/04/2011 e 09/04/2012, em ensaios de campo. A Caixeta foi classificada no grupo de baixa massa específica (0,34 g/cm<sup>3</sup>), e comparada com as outras espécies, apresentou os

maiores valores de UE, alcançando 28,37%. Para esta espécie de madeira, os modelos de estimativa de UE de Simpson (1971) e Hailwood e Harrobin (equações de um hidrato) apresentaram valores de umidade de equilíbrio semelhantes em agrupamentos mensais, com erros de padrões de estimativa (SEE) e raiz quadrada do erro quadrático (RMSE) de 5,09 e 4,98%, respectivamente, com ajustamentos superiores a 98%.

Stangerlin *et al.* (2013) investigaram o emprego do ensaio de dureza Rockwell na caracterização da biodeterioração da madeira (apodrecimento acelerado), submetida ao ataque dos fungos apodrecedores *Trametes versicolor* (podridão branca) e *Gloeophyllum trabeum* (podridão parda). Observaram que a Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.) apresentou baixa durabilidade ao ataque de tais fungos, com maior susceptibilidade ao ataque de fungos de podridão branca, quando comparada as madeiras de Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jequitibá (*Cariniana micrantha*). E ressaltaram que a dureza é uma propriedade que pode ser estudada para os casos de madeiras submetidas à biodeterioração.

Teles (2014) avaliou o estado de sanidade de três espécies de madeiras, Caixeta (*Simarouba amara*), Tauari (*Couratari* sp.) e Cumaru (*Dipteryx odorata*), sem tratamento químico e tratadas quimicamente com o preservante Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) e submetidas a ensaios de intemperismo acelerado em laboratório. Observaram que, considerando seis diferentes tempos de exposição ao intemperismo acelerado (variando de zero a 1200 horas), a densidade aparente da Caixeta se manteve na ordem de 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

Freitas, Gonçalves e Del Menezzi (2016) avaliaram a influência do tratamento termomecânico nas propriedades colorimétricas e no módulo de elasticidade da madeira de espécie *Simarouba amara* Aubl., com a finalidade de utilizá-la no segmento de pisos. O tratamento foi realizado com prensa hidráulica dotada de resistência elétrica nas temperaturas de 180 e 200°C, pressão de 7,94 e 11,90 MPa e tempo de 30 minutos. Após o tratamento termomecânico, observaram que houve uma mudança significativa na cor e na propriedade de elasticidade da madeira, que ocasionaram de modo geral, uma melhora no módulo de elasticidade dinâmico, enquanto a variação da velocidade variou de acordo com cada tratamento apresentado, tendo-se valores mais baixos para os tratamentos com pressões maiores. Após os tratamentos, as cores da madeira aliadas à propriedade de elasticidade potencializaram essa espécie como opção para a indústria de pisos.

#### **2.1.4 Cajueiro (*Anacardium* sp.)**

O Cajueiro é uma espécie tropical da Amazônica e possui ocorrência natural em alguns estados brasileiros: Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. A madeira possui cerne e alburno indistintos pela cor, cerne branco-amarelado-claro a branco-amarelado-rosado, densidade baixa e textura média. A sua anatomia macroscópica possui parênquima axial e raios visíveis apenas sob lente e vasos visíveis a olho nu. Quanto à durabilidade

natural, é considerada uma madeira de baixa resistência ao ataque de organismos. Quanto a trabalhabilidade, essa espécie é fácil de ser trabalhada, serrada, aplainada, faqueada, torneada e parafusada, além disso, apresenta bom acabamento. Em relação a secagem, é classificada como fácil, quando realizada moderadamente lenta, com pequena tendência a ocorrência de rachaduras e empenamentos. (IPT, 2021).

A Tabela 12 e Tabela 13 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cajueiro.

**Tabela 12 - Propriedades físicas do Cajueiro (*Anacardium* sp.).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	520
$\rho_{verde}$	1040
$\rho_{bas}$	430
<b>Contração (%)</b>	
Radial	3,4
Tangencial	6,3
Volumétrica	10,3

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_{verde}$  = densidade acima do ponto de saturação das fibras;  $\rho_{bas}$  = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 13 – Propriedades mecânicas do Cajueiro (*Anacardium* sp.).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	-	29,3
$f_M$ (MPa)	68,9*	-
$f_{v0}$ (MPa)	7,7	6
$f_{h90}$ (N/cm <sup>2</sup> )	2246	1922
$f_{t90}$ (MPa)	-	2,4
$f_{s0}$ (MPa)	-	3,1

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

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras;  $f_{s0}$  = resistência ao fendilhamento paralelo às fibras; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

O Cajueiro pode ser utilizado de diversas maneiras, desde aplicações leves internas na construção civil (forros, guarnições, molduras), até em artigos esportivos, brinquedos, lâminas de utilidade geral, chapas compensadas e embalagens (IPT, 2021).

Duarte *et al.* (2020) correlacionaram a densidade aparente com teor de umidade a 12%, componente químico e parâmetros de porosidade com propriedades físicas e mecânicas

de 10 espécies de madeiras tropicais, usando modelos de regressão multivariável. As madeiras foram caracterizadas de acordo com a norma brasileira NBR 7190 (1997), os componentes químicos foram determinados pelo Método Klason e a porosidade por intrusão de mercúrio. A espécie Cajueiro (*Anacardium* sp.) apresentou maiores valores para a porosidade (aproximadamente 0,65%), valores baixos para a densidade aparente com teor de umidade a 12% (aproximadamente 0,55g/cm<sup>3</sup>), a retração radial total se enquadrou no grupo de 4% a 5% (aproximadamente 4%) e a retração tangencial total se enquadrou no grupo entre 6% e 8% (aproximadamente 6,8%). Outros valores médios (aproximados) obtidos com a caracterização dessa espécie de madeira: resistência à compressão paralela à fibra (42 MPa), resistência a tração paralela e perpendicular às fibras (90 MPa e 2,2 MPa, respectivamente), resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras (9,5 MPa), módulo de ruptura longitudinal na flexão estática (70 MPa), resistência a compressão perpendicular à fibra (7 MPa), dureza da fibra paralela e normal (55 MPa e 30 MPa, respectivamente) e módulo de elasticidade na flexão estática (13500 MPa). Portanto, com a utilização dos modelos de regressão multivariável conseguiram bons resultados e puderam concluir que a utilização dos parâmetros de densidade aparente, componente químico e porosidade reduzem os intervalos de tempo quanto comparado ao tempo de teste estipulado pela norma.

Freitas *et al.* (2017) investigaram, de forma preliminar, a possibilidade de produção de painéis de MDP utilizando as espécies de madeira Cajueiro e Amescla. Os painéis de MDP foram produzidos sob pressão de 4 MPa por 10 minutos a 100°C, e após a produção dos painéis, os corpos de provas foram obtidos para analisar as propriedades físicas e mecânicas, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 14810 (2006). Os valores encontrados para o módulo de rigidez à flexão (MOE), módulo de resistência à flexão (MOR) e densidade foram: Cajueiro (2.274 MPa, 18 MPa e 836 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente) e Amescla (2.727 MPa, 29 MPa e 855 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente). Assim, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios por se tratar de um estudo preliminar, pois essas duas espécies de madeiras de média densidade, apresentaram um bom desempenho para a produção em nível industrial de MDP.

### **2.1.5 Cambará (*Erisma uncinatum*)**

O Cambará (Cedrinho ou Quarubarana) (*Erisma uncinatum*) é uma espécie tropical amazônica e possui ocorrência natural em alguns estados brasileiros: Acre, Amapá, Mato Grosso, Pará e Rondônia. A madeira possui cerne e alborno distintos pela cor (cerne castanho avermelhado), sem brilho, densidade baixa e textura média a grossa. A anatomia macroscópica possui parênquima axial e vasos visíveis a olho nu e os raios são visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial. Em relação a durabilidade natural, a madeira Cambará apresenta baixa durabilidade ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos), e quanto a trabalhabilidade, é fácil de aplainar, serrar e lixar, mas apresenta superfície de



acabamento felpuda (difícil de dar acabamento). A secagem dessa espécie de madeira é classificada como fácil, tanto ao ar livre, quando em estufa, entretanto, em condições muito drástica de temperatura podem ocorrer empenamentos, rachaduras e endurecimento artificial (IPT, 2021).

A Tabela 14 e Tabela 15 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cambará.

**Tabela 14 - Propriedades físicas do Cambará (*Erisma uncinatum*).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	590
$\rho_{verde}$	1110
$\rho_{bas}$	480
<b>Contração (%)</b>	
Radial	3,3
Tangencial	7,7
Volumétrica	12,5

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_{verde}$  = densidade acima do ponto de saturação das fibras;  $\rho_{bas}$  = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 15 – Propriedades mecânicas da Cambará (*Erisma uncinatum*).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	42,2*	33,7
$f_M$ (MPa)	80,2*	72,5
$E_M$ (MPa)	10395	9365
$f_{v0}$ (MPa)	-	7,4
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	-	3844
$f_{t90}$ (MPa)	-	4,2
$f_{s0}$ (MPa)	-	0,5

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

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras;  $f_{s0}$  = resistência ao fendilhamento; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

No anexo E da norma ABNT NBR 7190 (1997) contém os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas a *Erisma uncinatum* (Tabela 16).

**Tabela 16** – Valores médios de propriedades do Cambará (*Erismia uncinatum*).

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

O Cambará pode ser utilizado na construção civil em aplicações leves em esquadrias (portas, venezianas, caixilhos), interna estrutural (ripas), interna de utilidade geral (lambris, molduras, guarnições, forros) e como uso temporário (andaimes, fôrmas para concreto e pontaletes). Também pode ser utilizado em mobiliários, embalagens, chapas compensadas e lâminas decorativas (IPT, 2021).

Zangiácomo e Lahr (2002) determinaram as propriedades físicas, de resistência e de rigidez de algumas espécies tropicais alternativas com densidade até 0,75 g/cm<sup>3</sup>, a 12% de umidade, conforme a norma ABNT NBR 7190 (1997). Dentre essas espécies analisadas, o Cedrinho (*Erismia uncinatum*) apresentou resultados satisfatórios com os valores da resistência à tração paralela às fibras (40,60 MPa), a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (8,37 MPa) e a resistência à tração normal às fibras (2,57 MPa). Segundo os autores, essa espécie apresenta potencial para ser utilizado na construção civil como MLC, sempre considerando o adesivo.

Arruda, Del Menezzi e Andrade (2015) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de quatro madeiras tropicais tratadas termomecanicamente em prensa hidráulica a 145°C, para a produção de pisos de madeira nobre. Foram realizados ensaios de flexão estática, dureza normal às fibras e compressão paralela às fibras. Para analisar o desempenho de madeiras tratadas e sem tratamento, os autores utilizaram os dados para a *Erismia uncinatum* do Serviço Florestal Brasileiro (SFB). De acordo com os resultados analisados, para todas as propriedades mecânicas estudadas, os valores obtidos para as madeiras termomecanicamente estudadas foram inferiores aos determinados pelo SFB (Tabela 17).

**Tabela 17** – Valores médios de algumas propriedades mecânicas do Cambará (*Erismia uncinatum*).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Arruda, Del Menezzi e Andrade (2015)*</b>	<b>SFB**</b>
$E_M$ (MPa)	10483	10795
$f_M$ (MPa)	62,24	87,54
$f_{h90}$ (N)	2613	3864

$f_{c0}$ (MPa)	44,91	49,75
----------------	-------	-------

\*Resultados para madeira termomecanicamente tratada; \*\*Valores de referência sem tratamento térmico.  
 $E_M$  = módulo na flexão estática;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras.

Fonte: Adaptado de Arruda, Del Menezzi e Andrade (2015).

Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017) realizaram a caracterização completa da espécie de madeira *Erismia uncinatum*, conforme a norma ABNR NBR 7190 (1997). De acordo com os autores, a densidade aparente com teor de umidade a 12% é igual a 680 kg/m<sup>3</sup>, a retratibilidade radial total (RRT) e a retratibilidade tangencial total (RTT) foram iguais a 5,83 e 10,55%, respectivamente. Os valores médios das propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18** – Valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas de *Erismia uncinatum*.

<b>Propriedades</b>	
$f_{c0}$ (MPa)	34
$f_{c90}$ (MPa)	7,0
$E_{c0}$ (MPa)	12967
$E_{c90}$ (MPa)	7095
$f_{t0}$ (MPa)	45
$f_{t90}$ (MPa)	4,9
$E_{t0}$ (MPa)	12764
$f_{v0}$ (MPa)	14
$f_{s0}$ (MPa)	0,8
$f_M$ (MPa)	63
$E_M$ (MPa)	12376
$f_{h0}$ (MPa)	51
$f_{h90}$ (MPa)	67
$T$ (N.m)	33,39

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

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017).

Ribeiro *et al.* (2016) estimaram os módulos de elasticidade estática ( $E_M$ ) e de ruptura ( $f_M$ ) das madeiras *Qualea brevipedicellata* e *Erismia uncinatum*, obtidos por ensaios destrutivos de flexão estática. Os autores utilizaram 20 corpos de prova nas dimensões 2 x 2 x 30cm de acordo com a norma COPANT 30:1-006 (1972). Para a espécie *Erismia uncinatum*, o valor médio determinado para  $E_M$  foi de 8103,68 MPa com coeficiente de variação de 16,28%, e o valor média de  $f_M$  foi de 68,9 MPa com coeficiente de variação de 15,18%.

### 2.1.6 Canela parda (*Ocotea* sp.)

A Canela parda possui uma grande variedade de nomes populares como, Canela preta, Louro preto, Canela ferrugem e Canela puante. Essa variedade de nomes está relacionada a região que está localizada a madeira, isto é, no estado do Amazonas até o estado da Bahia, essa espécie é conhecida como Louro, e da Bahia até o Sul do Brasil é chamada de Canela (REMADE, 2021).

Essa espécie de madeira contém as seguintes características: coloração que vai do amarelo-pardacento ao pardo-escuro, com manchas escuras, superfície lustrosa e áspera e a textura média. A classificação quanto as propriedades físico-mecânicas indicam uma madeira de características médias, com baixa resistência natural e ao ataque de fungos e insetos, conforme a Tabela 19 (REMADE, 2021).

**Tabela 19** - Propriedades físico-mecânicas da Canela parda (*Ocotea* sp.).

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
$\rho_{ap,15}$	590	
$\rho_{bas}$	480	
<b>Contração (%)</b>		
Radial	3,8	
Tangencial	9,9	
Volumétrica	15,2	
<b>Resistência Mecânica</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>15%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	28,34	46,68
$f_{v0}$ (MPa)	65,31	87,96
$f_{t90}$ (MPa)	6,18	-

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_{bas}$  = densidade básica; U<sub>15%</sub> = teor de umidade de 15%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência a compressão axial;  $f_{v0}$  = resistência a flexão estática;  $f_{t90}$  = resistência a tração normal; - = valor não tabelado.

Fonte: Adaptado de Remade (2021)

A secagem da Canela parda é feita de forma moderada, apresentando poucos defeitos, predominando empenamentos ou rachaduras. Já em relação a trabalhabilidade, essa espécie possui excelentes propriedades para trabalhos com máquinas e ferramentas manuais, dando bom acabamento (REMADE, 2021).

Assim, a *Ocotea* sp. pode ser empregada em diversas finalidades, como: acabamentos internos na construção civil (esquadrias, caixilhos, rodapés), móveis populares, embalagens leves, peças decorativas, construção naval e cutelaria (REMADE, 2021).

### 2.1.7 Castanheira (*Bertholletia excelsa*)

A Castanheira (*Bertholletia excelsa*) é uma espécie tropical amazônica e possui ocorrência natural em outros estados brasileiros: Amapá, Mato Grosso e Roraima. A madeira possui as seguintes características sensoriais: cerne castanho-claro levemente rosado, sem brilho, densidade média, macia ao corte e textura média. A anatomia macroscópica possui parênquima axial, raios e vasos visíveis a olho nu. Em relação a durabilidade natural, a madeira Castanheira demonstrou ser resistente ao ataque de fungos e insetos, e o cerne é muito resistente ao ataque de fungos apodrecedores (IPT, 2021).

Essa espécie é moderadamente difícil de ser trabalhada, mas apresenta superfície lisa de acabamento. A secagem é muito lenta, podendo apresentar rachaduras, encanoamentos, torcimentos e endurecimento superficial moderado (IPT, 2021).

A Tabela 20 e Tabela 21 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Castanheira.

**Tabela 20** - Propriedades físicas da Castanheira (*Bertholletia excelsa*).

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	750
$\rho_{verde}$	1.120
$\rho_{bas}$	630
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,3
Tangencial	8,4
Volumétrica	13,2

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_{verde}$  = densidade acima do ponto de saturação das fibras;  $\rho_{bas}$  = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 21** – Propriedades mecânicas da Castanheira (*Bertholletia excelsa*).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	58,3	36
$f_M$ (MPa)	116	76,8
$E_M$ (MPa)	12553	10101
$f_{v0}$ (MPa)	11,5	7,7
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	8071	5080
$f_{h90}$ (N/cm <sup>2</sup> )	6541	5178
$f_{t90}$ (MPa)	4,2	3,7

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka transversal às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

A Castanheira pode ser utilizada de diversas maneiras, desde aplicações leves na construção civil (portas, venezianas, forros, painéis, ripas), quanto em aplicações temporárias (andaimes, fôrmas para concreto, pontaletes). Essa espécie também pode ser utilizada em mobiliário, peças decorativas, chapas compensadas e embalagens (IPT, 2021).

Alves *et al.* (2013) utilizaram o método de resistência à perfuração da madeira para estimar a classificação de dureza Janka em três direções ortotrópicas (longitudinal, tangencial e radial) e a resistência ao cisalhamento de madeiras tropicais, com densidade de 650 a 1150 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade a 12%. Para obter correlações entre testes não destrutivos e destrutivos, foram utilizados sete tipos de madeira, dentre eles a espécie Castanheira (*Bertholletia excelsa*). Essa espécie de madeira foi classificada como sendo de média densidade, pois apresentou valor médio para densidade aparente igual a 696 kg/m<sup>3</sup>. Para a dureza de Janka, esse tipo de madeira obteve valores iguais a 55 MPa, 44 MPa e 46 MPa para direção longitudinal, transversal e radial respectivamente. Quanto à resistência ao cisalhamento, observou que os valores na direção longitudinal às fibras (13 MPa) é muito maior do que nas outras duas direções, transversal e radial as fibras, (5 MPa e 6 MPa, respectivamente). Assim, os autores puderam concluir que para a estimativa da dureza Janka, o método de resistência a perfuração da madeira exigiu boas correlações, com R<sup>2</sup> maior que 85%, e para a resistência ao cisalhamento obtiveram resultado um pouco menor, com valores intermediários de R<sup>2</sup>, variando de 59% a 75%.

Alves, Smits e Carrasco (2016) estimaram a densidade aparente e a dureza Janka de sete madeiras tropicais brasileiras, orientadas nas três direções: longitudinal, tangencial e radial, por meio do método não destrutivo de penetração. A umidade, densidade aparente com teor de umidade a 12% e a dureza Janka, nas três direções, foram determinadas seguindo as prescrições da NBR 7190 (1997). Dentre as espécies de madeiras ensaiadas está a Castanheira (*Bertholletia excelsa*), que obteve o menor valor de dureza Janka na direção longitudinal (55,29 MPa), transversal (44 MPa) e radial (45,70 MPa). Em relação a resistência a penetração para cada espécie de madeira e a direção de aplicação do corpo de prova, a espécie Castanheira apresentou maior valor na direção longitudinal (16 mm) e direção transversal (12,6 mm), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância. Assim, pode-se observar que mesmo notando que a resistência a penetração é inversamente proporcional à densidade aparente a 12% de umidade, pode-se afirmar que ela não se mostrou a única característica responsável, mas também a espécie de madeira, uma vez que, madeiras com altas densidades obtiveram altos valores de índices de penetração. Portanto, os autores puderam concluir que os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) entre a densidade aparente e a resistência a penetração foram de 76%, 68% e 59% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente, mostrando ser um método eficiente para estimar esta propriedade. Já para a dureza Janka, o método se mostrou adequado apenas para as

direções longitudinal e tangencial, com valores de  $R^2$  de 82% e 72%, respectivamente. E em contrapartida, não se mostrou adequado para a estimativa na direção radial, com valor de  $R^2$  de 42%.

Almeida *et al.* (2020) investigaram a equivalência estatística entre o módulo de elasticidade obtido na flexão, compressão e tensão paralela ao grão de trinta espécies diferentes de madeiras, e caso a equivalência não seja confirmada, foi necessário definir as correlações entre essas propriedades que dariam estimativas do módulo de elasticidade na compressão paralela ao grão ( $E_{c0}$ ) mais precisas. Todos os ensaios seguiram o procedimento do Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), com teor de umidade de 12%, e utilizou a máquina de teste universal AMSLER (capacidade de carga de 250 kN). Portanto, os valores médios obtidos experimentalmente das propriedades de rigidez do módulo de elasticidade da compressão paralela ao grão ( $E_{c0}$ ), da tração paralela ( $E_{t0}$ ) e flexão estática ( $E_M$ ) para a espécie Castanheira foram de 15441 MPa, 13021 MPa e 14044 MPa, respectivamente. Desse modo, os resultados da análise de variância mostraram que  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$  eram estatisticamente iguais, pois o valor de  $p$  foi superior ao nível de significância (valor de  $p \geq 0,05$ ). Entretanto, para a relação entre  $E_{c0}$  e  $E_M$ , o valor de  $p$  foi menor que o nível de significância, que indicaram que as médias do grupo de  $E_{c0}$  e  $E_M/0,90$  não eram estatisticamente equivalentes e não conseguiram estimar o valor de  $E_{c0}$  com precisão. Assim, foi utilizado modelos de regressão e o método dos mínimos quadrados como alternativa à equação  $E_{c0} = E_M/0,90$ , para formular equações que poderiam estimar  $E_{c0}$ . Todos os modelos (linear, exponencial, logarítmico e geométrico) foram significativos, mas o modelo geométrico apresentou o melhor ajuste ( $R^2 = 91,67\%$ ), e o método dos mínimos quadrados resultou em um coeficiente de 0,98, que foi 8,89% maior que o coeficiente (0,90) fornecido pela ABNT NBR 7190 (1997).

### 2.1.8 Cedro doce (*Cedrela sp.*)

O Cedro doce (*Cedrela sp.*) é uma espécie tropical da Amazônia e possui ocorrência natural em outros estados brasileiros: Acre, Amapá, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rondônia, Santa Catarina e São Paulo. Possui o cerne e alburno distintos pela cor, cerne bege rosado, superfície lustrosa, densidade baixa e textura média a grossa. A anatomia macroscópica é composta por parênquima axial, raios e vãos visíveis a olho nu. Quanto a durabilidade natural, é considerada moderadamente resistente ao ataque de organismos xilófagos (fungos e insetos). Já em relação a trabalhabilidade, é fácil de aplainar, serrar, lixar, furar, pregar, colar e tornear, apresentando bom acabamento. A secagem ao ar livre é rápida e com pouca ocorrência de defeitos, e a secagem em estufa é fácil e não ocorre empenamentos e rachaduras (IPT, 2021).

A Tabela 22 e Tabela 23 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Cedro doce.

**Tabela 22 - Propriedades físicas do Cedro doce (Cedrela sp.).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	530
$\rho_{bas}$	440
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,0
Tangencial	6,2
Volumétrica	11,6

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

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 23 – Propriedades mecânicas do Cedro doce (Cedrela sp.).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_{c0}$ (MPa)	39,1*	28
$E_M$ (MPa)	-	9630
$f_{v0}$ (MPa)	-	7,1
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	-	3138
$f_{t90}$ (MPa)	-	5,1

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

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

Na norma ABNT NBR 7190 (1997), em seu anexo E “Valores médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento”, consta os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas o Cedro doce (Tabela 24).

**Tabela 24 – Valores médios de propriedades do Cedro doce (Cedrela sp.).**

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

O Cedro doce pode ser utilizado em aplicações leves na construção civil (portas, venezianas, caixilhos, painéis, molduras, guarnições, forros), como também em mobiliário



(móveis finos e decorativos), chapas compensadas, embalagens, molduras para quadros, decoração, instrumentos musicais e embarcações (coberturas, pisos e forros) (IPT, 2021).

Christoforo *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de estimar a retração total (radial, tangencial e volumétrica), coeficiente de anisotropia e coeficiente de contração (radial, tangencial e volumétrico), usando modelos de regressão polinomial (linear, quadrático e cúbico) e exponencial, por densidade de cinco espécies de madeiras, classificada em cinco classes para dicotiledôneas, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). A espécie Cedro doce (C20) obteve os menores valores de: retração total volumétrica e radial; coeficiente de contração tangencial e volumétrico. Esse resultado é consistente, pois espécies de madeiras com densidade maior possui uma maior variação de dimensão, pois tem mais madeira por unidade de volume. Assim, os autores puderam concluir, que a madeira Cedro doce apresenta excelente qualidade, devido apresentar encolhimento do coeficiente de anisotropia inferior a 1,5, podendo ser utilizado em móveis, esquadrias, equipamentos esportivos e outras utilidades.

Couto *et al.* (2020) investigaram, com o auxílio dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, a relação entre essas propriedades, considerando dez espécies de madeira distribuídas nas classes de resistência do grupo das folhosas (madeiras duras). Com os valores médios característicos das propriedades obtidos experimentalmente, possibilitaram estimar e avaliar as relações entre as resistências, com o auxílio do método dos mínimos quadrados. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Amsler (capacidade de carga de 250 kN) com corpos de prova com teor de umidade de 12%, e o carregamento aplicado foi de maneira crescente monotônica de 10 MPa/min com dois ciclos de cargas e descarga para o ensaio de compressão paralela as fibras e a taxa de 2,5 MPa/min para o ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Para a madeira do Cedro doce (*Cedrela sp.*), a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras apresentou valor médio de 9,1 MPa, sendo superior ao apresentado pela NBR 7190 (1997) (5,6 MPa), e o valor médio de resistência a compressão paralela às fibras obtido foi de 30,8 MPa, sendo próximo ao que a NBR 7190 (1997) apresenta (31,5 MPa). Assim, o valor encontrado para a relação entre a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e a resistência à compressão paralela às fibras nesse estudo, considerando o conjunto de todas as espécies, foi de 84,16% superior ao valor proposto pela NBR 7190 (1997), isto quer dizer que ao apresentar uma relação com valor inferior, é possível afirmar que a norma brasileira está conservadora, fazendo que haja um superdimensionamento dos elementos, e conseqüentemente, maior gastos de material e aumento do peso próprio das estruturas.

Christoforo *et al.* (2020) investigaram, com base na Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997), modelos de regressão baseados em análise de variância (ANOVA), a possibilidade

de estimar, por meio da densidade aparente, as propriedades de resistência da madeira obtidas em testes onde a falha é considerada frágil. Foram analisadas dez espécies de madeiras pertencentes ao grupo das madeiras duras, abrangendo todas as classes de força estabelecidas na norma ABNT NBR 7190 (1997). A espécie *Cedrela* sp. obteve os seguintes resultados médios aproximados: densidade aparente com teor de umidade a 12% (0,59 g/cm<sup>3</sup>), resistência à tração normal as fibras (3,90 MPa) e resistência ao cisalhamento paralelo as fibras (14 MPa). Conforme os modelos de regressão, a espécie *Cedrela* sp. apresentou o modelo significativo pela ANOVA (p-valor < 0,05), que consistia na relação  $f_{t90} = f(\rho_{ap})$ , com modelo de regressão geométrico e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) igual a 42,93%.

### 2.1.9 Embireira (*Guatteria* sp.)

A espécie de madeira Embireira (*Guatteria* sp.) pertence à família *Annonaceae* e subfamília *Annonoideae*, que possui uma variedade de nomes populares, como: Embira, Cortiça, Envira e Envira-pindaíba (RIBEIRO, 2013).

A *Guatteria* sp. possui 13 a 16 metros de altura, diâmetro não foi registrado, ramos jovens densos e textura média. A ocorrência natural está presente em alguns estados brasileiros como, Amazônia, Pará e Acre. Em relação ao habitat, é encontrado em florestas não inundada, em zonas argilosas e solo arenoso com elevações de até 300 metros (MASS e WESTRA, 2011).

Por se tratar de uma espécie pouco conhecida, não foi encontrado muitos dados na literatura.

### 2.1.10 Garapa (*Apuleia leiocarpa*)

A espécie de madeira Garapa (*Apuleia leiocarpa*) pode ser encontrada através de outros nomes populares: amarelinho, barajuba, garapeia, gema-de-ovo, grapiapúnha, jataí-amarelo, muirajuba, muiratuá. É uma espécie tropical da Amazônia e Mata Atlântica, e possui ocorrência natural em vários outros estados brasileiros: Acre, Amapá, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Rondônia e São Paulo. As características sensoriais são notáveis por cerne e alburno distintos pela cor, cerne variando de bege-amarelado a castanho-amarelado, superfície lustrosa e lisa ao tato, densidade média, dura ao corte e textura média. A anatomia macroscópica é composta de parênquima axial e vasos visíveis a olho nu, e raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial (IPT, 2021).

Quanto a durabilidade natural, essa espécie apresenta resistência moderada ao ataque de fungos apodrecedores. Já em relação a trabalhabilidade, é fácil de ser trabalhada desde que se use ferramentas apropriadas, devido à presença de sílica, entretanto, cola bem

e proporciona bom acabamento. A secagem ao ar livre é difícil, e a secagem em estufa deve ser lenta e bem controlada para evitar alta incidência de defeitos (IPT, 2021).

A Tabela 25 e Tabela 26 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas da Garapa.

**Tabela 25 - Propriedades físicas da Garapa (*Apuleia leiocarpa*).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	830
$\rho_{bas}$	670
<b>Contração (%)</b>	
Radial	4,4
Tangencial	8,5
Volumétrica	14,0

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_{bas}$  = densidade básica.  
Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 26 – Propriedades mecânicas da Garapa (*Apuleia leiocarpa*).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_M$ (MPa)	125,3*	93,8
$f_{c0}$ (MPa)	54,3*	37,3
$E_M$ (MPa)	-	14107
$f_{v0}$ (MPa)	-	12,7
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	-	7.257
$f_{t90}$ (MPa)	-	9,6

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

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

Na norma ABNT NBR 7190 (1997), em seu anexo E “Valores médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento”, consta os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas a *Apuleia leiocarpa* (Tabela 27).

**Tabela 27 – Valores médios de propriedades da Garapa (*Apuleia leiocarpa*).**

<b>Propriedades</b>	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	892
$f_{c0}$ (MPa)	78,4
$f_{t0}$ (MPa)	108

$f_{t90}$ (MPa)	6,9
$f_{v0}$ (MPa)	11,9
$E_{c0}$ (MPa)	18359

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

A madeira Garapa pode ser utilizada de diversas formas na construção civil, tanto em aplicações pesadas (pontes, estacas, dormentes ferroviários, postes, vigas, caibros), quanto em aplicações leves (portas, venezianas, caixilhos, guarnições, forros, rodapés, tábuas, degraus de escada). Essa espécie também pode ser utilizada em móveis decorativos, cabos de ferramentas e transporte (IPT, 2021).

Alves *et al.* (2013) aplicaram o método de resistência à perfuração a madeira para estimar a classificação da dureza Janka e a resistência ao cisalhamento de sete espécies de madeiras duras tropicais. Para validação dos testes não destrutivos, testes destrutivos, com teor de umidade da madeira a 12%, foram realizados para determinar densidade aparente, resistência ao cisalhamento e dureza Janka em três direções ortotrópicas da madeira (longitudinal, tangencial e radial). A espécie Garapa apresentou os seguintes resultados: densidade aparente a 12% de umidade (946 kg/m<sup>3</sup>), dureza Janka longitudinal (101 MPa), tangencial (103 MPa) e radial (109 MPa), e resistência ao cisalhamento longitudinal (18 MPa), tangencial (8 MPa) e radial (9 MPa). Assim, pode-se verificar que quase não há diferença na dureza Janka nas 3 direções ortotrópicas, e a maior resistência ao cisalhamento é na direção longitudinal as fibras. E os resultados obtidos com a estimativa da dureza Janka através do método de resistência à perfuração em madeiras exibiu boas correlações, com R<sup>2</sup> maior que 85%, e para a resistência ao cisalhamento obteve valores intermediários de R<sup>2</sup>, variando de 59 a 75%.

Alves, Pizzol e Carrasco (2017) estimaram o módulo de elasticidade de sete madeiras brasileiras pelo método de propagação de ondas ultrassônicas utilizando o aparelho de ultrassom James V Mk II com transdutor de 180 kHz. A determinação do teor de umidade a 12%, densidade aparente e módulo de elasticidade à compressão seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997). A madeira Garapa foi classificada como sendo de alta densidade aparente (946 kg/m<sup>3</sup>), e apresentou os maiores valores para o módulo de elasticidade na direção tangencial (1048 MPa) e radial (1483 MPa). Em relação aos módulos de elasticidade longitudinal e tangencial, e entre os módulos de elasticidade tangencial e radial, as médias não se diferenciaram estatisticamente na maioria das vezes, pelo teste de Tukey. Assim, o método utilizado mostrou ser eficiente para estimar as constantes de rigidez da madeira nas direções normais a fibra, e para a frequência de 180 kHz, os valores de R<sup>2</sup> foram 75,7%, 79,7% e 50,7% para as direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

Jankowska *et al.* (2015) *apud* Teixeira *et al.* (2019) avaliaram o efeito do intemperismo acelerado na resistência a abrasão da madeira Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Tatajuba (*Bagassa guianensis*). Com densidade aparente (a 12% de teor de umidade) entre 0,82 e 0,905 g/cm<sup>3</sup>, essas espécies de madeira apresentaram dureza Janka entre 499 e 773 kgf/cm<sup>2</sup> e, desgaste à abrasão, entre 14 e 39 mg/100 ciclos.

### 2.1.11 Garrote (*Bagassa* sp.)

A madeira Garrote (*Bagassa* sp.) pode ser encontrada através de outros nomes populares: tatajuba, amaparirana, amarelão, amarelo, bagaceira e cachaceiro. É uma espécie tropical da Amazônia e possui ocorrência natural em outros estados brasileiros: Acre, Maranhão, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Suas características sensoriais são notáveis por cerne e alburnos distintos pela cor, cerne amarelo-dourado, escurecendo para castanho-amarelado, brilho moderado, densidade média, moderadamente dura ao corte e textura média. A anatomia macroscópica é composta por parênquima axial invisível mesmo sob lente, entretanto, os raios e vasos são visíveis a olho nu (IPT, 2021).

Em relação a durabilidade natural, essa espécie apresenta cerne resistente ao ataque de fungos de podridão-branca e parda. Quanto a trabalhabilidade, é fácil de ser trabalhada, com ferramentas manuais e mecânicas, proporcionando ótimo acabamento. A secagem ao ar é lenta e sem ocorrência de defeitos, mas a secagem em estufa apresenta leve tendência ao empenamento, torcimento e encanoamento (IPT, 2021).

A Tabela 28 e Tabela 29 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Garrote.

**Tabela 28** - Propriedades físicas do Garrote (*Bagassa* sp.).

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	820
$\rho_{bas}$	683
<b>Contração (%)</b>	
Radial	5,5
Tangencial	7,1
Volumétrica	11,4

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

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 29** – Propriedades mecânicas do Garrote (*Bagassa* sp.).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Umidade</b>	
	<b>U<sub>12%</sub></b>	<b>U<sub>verde</sub></b>
$f_M$ (MPa)	138,2*	100

$f_{c0}$ (MPa)	79,7*	54,4
$E_M$ (MPa)	-	15857
$f_{v0}$ (MPa)	-	11,5
$f_{h0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	-	7208
$f_{t90}$ (MPa)	0,8	4,5

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

$U_{12\%}$  = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%;  $U_{verde}$  = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência à tração normal às fibras.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

Na norma ABNT NBR 7190 (1997), em seu anexo E “Valores médios Usuais de Resistência e Rigidez de algumas Madeiras Nativas e de Reflorestamento”, consta os valores médios de algumas propriedades para madeiras de espécies dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas a *Bagassa* sp. (Tabela 30).

**Tabela 30** – Valores médios de propriedades da *Bagassa* sp.

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

A madeira Garrote pode ser utilizada em diversos lugares na construção civil, tanto em aplicações pesadas (dormentes ferroviários, estacas, defensas, tesouras, vigas e caibros), quanto em aplicações leves (batentes, janelas, painéis, lambris, forros, assoalhos). Essa espécie também pode ser encontrada em mobiliários (móveis decorativos), lâminas decorativas, adornos, embarcações e cabos de ferramentas (IPT, 2021).

Carvalho, Christoforo e Lahr (2018) criaram um modelo teórico, a partir da definição de critérios para a quantificação do efeito de fadiga em peças estruturais de madeira serrada em geral, que permita com segurança e confiabilidade se fornecer, no momento do projeto, valores de resistência e rigidez muito próximos dos valores reais com que o elemento estrutural irá trabalhar ao longo de sua vida útil. Utilizaram 5 espécies de madeira tropicais do grupo das folhosas, dentre elas a espécie Tatajuba (*Bagassa* sp.) pertencente a classe de resistência C50, e observaram que para um número de ciclos de 0, 450 e 4500 ciclos, e ainda, para frequências de 0 e 0,5 Hz, não houve diferença significativa nos valores das variáveis estudadas (módulo de elasticidade na flexão estática e módulo de ruptura na flexão estática),

resultando em valores equivalentes do módulo de elasticidade e da tensão na flexão. Entretanto, para o número de ciclos de 4500 e frequência de 1,0 Hz, diferenças estatísticas significativas foram observadas, denotando reduções significativas ainda maiores de ambas as propriedades. Portanto, os valores dos coeficientes de determinação obtidos na estimativa dos valores do  $E_M$  e da  $f_M$  indicam imprecisão na previsão de 41,79% e 48,91%, respectivamente, estimativas essas que podem ser melhoradas com a consideração do conjunto envolvendo as cinco espécies de madeira adotadas nessa pesquisa.

Duarte *et al.* (2020) correlacionaram densidade aparente, componente químico e parâmetros de porosidade com propriedades físicas e mecânicas de dez espécies de madeiras tropicais, usando modelos de regressão multivariável. A espécie Tatajuba, também conhecida como Garrote, apresentou maiores valores para densidade aparente e menores valores para a porosidade, e os seguintes valores para retração radial total (entre 4 e 5%) e retração tangencial total (menor que 6%). Na Tabela 31 consta os valores das propriedades mecânicas obtidas.

**Tabela 31** – Valores aproximados das propriedades mecânicas da *Bagassa* sp.

Propriedades	
$f_{c0}$ (MPa)	85
$f_{t0}$ (MPa)	90
$f_{t90}$ (MPa)	4,4
$f_{v0}$ (MPa)	18,5
$f_{s0}$ (MPa)	0,99
$f_M$ (MPa)	110
$f_{c90}$ (MPa)	16
$f_{h0}$ (MPa)	125
$f_{h90}$ (MPa)	92
$E_{c0}$ (MPa)	19761
$E_{c90}$ (MPa)	950
$E_{t0}$ (MPa)	19000
$E_M$ (MPa)	19200

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência a tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência a tração perpendicular às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{s0}$  = resistência a fissuração;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{c90}$  = resistência a compressão perpendicular às fibras;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em compressão paralela às fibras;  $E_{c90}$  = módulo de elasticidade longitudinal em compressão normal às fibras;  $E_{t0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em tensão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática.

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

Assim, os valores  $f_{c0}$ ,  $f_{t0}$ ,  $f_{t90}$ ,  $f_{v0}$  e  $E_{c0}$  obtidos por Duarte *et al.* (2020) foram coerentes com os valores do Anexo E da norma brasileira para a espécie Tatajuba, e as ligeiras diferenças são comuns em relação a diferentes lotes da espécie.

### 2.1.12 Guaiçara (*Luetzelburgia* sp.)

A espécie de madeira Guaiçara (*Luetzelburgia* sp.) pode ser encontrada através de outros nomes populares: Pau ripa, Guajuçara, Guaissara e Guajussara. Possui ocorrência natural em alguns estados brasileiros como Minas Gerais, São Paulo e Paraná, e é considerada uma madeira pesada, moderadamente durável e decorativa (LORENZI, 1992).

No Anexo E da ABNT NBR 7190 (1997), consta os valores médios das propriedades de resistência e rigidez de madeiras dicotiledôneas nativas e de reflorestamento, entre elas está a Guaiçara (Tabela 32).

**Tabela 32** – Valores médios de propriedades da *Luetzelburgia* sp.

<b>Propriedades</b>	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	825
$f_{c0}$ (MPa)	71,4
$f_{t0}$ (MPa)	115,6
$f_{t90}$ (MPa)	4,2
$f_{v0}$ (MPa)	12,5
$E_{c0}$ (MPa)	14624

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190 (1997)

De acordo com o estudo realizado por Grobério e Lahr (2002), a madeira de Guaiçara pode ser empregada na construção civil de diversas formas, desde aplicações pesadas externas (fabricação de pontes, dormentes ferroviários, estacas, torres de observação, cruzetas, escoras), até aplicações pesadas internas (tesouras, treliças, plataformas e escadas), e pode ser encontrada também em assoalhos domésticos e industriais. Os autores determinaram os seguintes valores para as propriedades físicas dessa espécie de madeira: densidade aparente com teor de umidade a 12% (1090kg/m<sup>3</sup>), contração radial (4,43%) e contração tangencial (6,54%). Na Tabela 33, consta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas.

**Tabela 33** – Propriedades mecânicas da espécie Guaiçara (*Luetzelburgia* sp.) por Grobério e Lahr (2002).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
$f_{c0}$ (MPa)	71,4
$f_{t0}$ (MPa)	116,5
$f_{t90}$ (MPa)	4,2
$f_{v0}$ (MPa)	20,8
$f_{s0}$ (MPa)	0,7
$f_M$ (MPa)	122,2
$f_{h0}$ (MPa)	120



$f_{h90}$ (MPa)	111,3
$E_{c0}$ (MPa)	15301,7
$E_{t0}$ (MPa)	16304,7
$E_M$ (MPa)	15126,4
W (N.m)	22,82

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência a tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência a tração perpendicular às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{s0}$  = resistência a fissuração;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em compressão paralela às fibras;  $E_{t0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em tensão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Grobério e Lahr (2002)

Lahr *et al.* (2010) investigaram, via modelos de regressão, a correlação da dureza da madeira nas direções paralela ( $f_{h0}$ ) e normal ( $f_{h90}$ ) às fibras, em função da densidade aparente com teor de umidade a 12% ( $\rho_{ap,12\%}$ ). Foram estudadas 16 espécies de madeiras tropicais de alta densidade (superior a 850 kg/m<sup>3</sup>). Considerando o agrupamento das espécies, os autores puderam concluir que há correlação entre  $f_{h0}$  e  $\rho_{ap,12\%}$  ( $f_{h0} = 183\rho_{ap,12\%} - 56$ ), e entre  $f_{h90}$  e  $\rho_{ap,12\%}$  ( $f_{h90} = 193\rho_{ap,12\%} - 83$ ), sendo o modelo de regressão linear simples o que forneceu os melhores ajustes, com R<sup>2</sup> igual a 77% obtido na estimativa de  $f_{h90}$ . Na Tabela 34 consta os valores das propriedades físicas e mecânicas obtidas da madeira Guaiçara.

**Tabela 34** – Valores médios das propriedades físico-mecânicas da Guaiçara por Lahr *et al.* (2010).

<b>Propriedades físico-mecânicas</b>	
$\rho_{ap,12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1080
$f_{h0}$ (MPa)	118
$f_{h90}$ (MPa)	111

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2010)

Moreira *et al.* (2017) correlacionaram a tenacidade e resistência ao impacto em função do módulo de elasticidade e da resistência a compressão paralela às fibras de 10 espécies de madeiras tropicais, seguindo as premissas da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). As correlações desenvolvidas entre as propriedades foram feitas através de modelos de regressão, avaliados de acordo com a análise de variância (ANOVA). Em relação a espécie de madeira Guaiçara (*Luetzelburgia* sp.), os resultados encontrados pelos autores são demonstrados na Tabela 35.

**Tabela 35** – Valores médios das propriedades mecânicas da madeira de Guaiçara por Moreira *et al.* (2017).

<b>Propriedades mecânicas</b>	
$f_{c0}$ (MPa)	71
$f_{bw}$ (MPa)	44,98
$E_{c0}$ (MPa)	15301

W (N.m)	17,99
---------	-------

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{bw}$  = resistência ao impacto;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras; W = tenacidade.

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

### 2.1.13 Quina rosa (*Chinchona* sp.)

A espécie de madeira Quina rosa é originária do território brasileiro e está localizada em lugares onde a umidade prevaleça, como a Mata Atlântica e a Floresta Amazônica (CULTURA MIX, 2019). Pode ser conhecida através de diversos nomes populares, que possuem uma palavra em comum, “quina”, e essa espécie pertence à família das Rubiaceas. Sua descrição macroscópica no plano transversal é composta por poros visíveis a olho nu, porosidade difusa e parênquima axial visível sob lente de 10x (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Esta espécie se caracteriza como uma planta de grande copa e tronco baixo, sendo bastante utilizada para ornamentação de áreas externas. Por mais que sua aparência é destinada a parte decorativa, a Quina rosa possui diversos usos medicinais, pois é muito benéfica para a saúde da população (ARBOUL, 2020; CULTURA MIX, 2019).

Sua madeira possui um tom rosa-alaranjado, bem característico dessa espécie, e pode chegar a medir de 20 a 30 metros de altura. Assim, a Quina Rosa é bastante utilizada na construção civil e também em embarcações, móveis, artigos domésticos, brinquedos, compensados e outros (ARBOUL, 2020).

Lahr *et al.* (2010b) realizaram a caracterização completa, seguindo as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), de três espécies tropicais provenientes do Norte do Mato Grosso: Abuí (*Pouteria* sp.), Quina rosa (*Chinchona* sp.) e Tatajuba (*Bagassa guianensis*). Na Tabela 36 consta os resultados das propriedades determinadas da espécie Quina rosa (*Chinchona* sp.).

**Tabela 36** – Valores médios das propriedades da espécie Quina rosa por Lahr *et al.* (2010).

<b>Propriedades</b>	
$\rho_{ap,12}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,84
$f_{c0}$ (MPa)	59
$f_{t0}$ (MPa)	117
$f_{t90}$ (MPa)	3
$f_{v0}$ (MPa)	15
$f_{s0}$ (MPa)	0,7
$f_M$ (MPa)	112
$f_{h0}$ (MPa)	94
$f_{h90}$ (MPa)	71
$E_{c0}$ (MPa)	33089

$E_{t0}$ (MPa)	24462
$E_M$ (MPa)	25549

$\rho_{ap,12}$  = densidade aparente com teor de umidade a 12%;  $f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência a tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência a tração perpendicular às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{s0}$  = resistência a fissuração;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em compressão paralela às fibras;  $E_{t0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em tensão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática.

Fonte: Adaptado de Lahr *et al.* (2010b)

Wolenski *et al.* (2019) estimaram o valor característico à tração ( $f_{t0,k}$ ) na direção paralela às fibras para 40 espécies de madeira do grupo das folhosas, associando tal valor ao modelo probabilístico mais adequado (Modelos Normal, LogNormal, Weibull e Exponencial). Na sequência, o conjunto formado pelos valores característicos de cada espécie foi relacionado com um modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na análise de variância (ANOVA). Vale a pena ressaltar, que as propriedades mecânicas de resistência tiveram seus valores corrigidos para o teor de umidade de 12%, como prediz a norma brasileira NBR 7190 (1997). Em relação a espécie de madeira Quina rosa, a melhor aderência pelo maior P-valor encontrado dentre as quatro funções foi o Modelo Normal. Na Tabela 37 encontra-se os resultados obtidos pelos autores.

**Tabela 37** – Resultados das propriedades da espécie Quina Rosa por Wolenski *et al.* (2019).

<b>Propriedades</b>	
CR	C60
$f_{t0,k}$ (MPa)	81,65
$f_{t0,k}^{Prob}$ (MPa)	72,37
$f_{t0,k}^{Mod}$ (MPa)	76,59

CR = classe de resistência;  $f_{t0,k}$  = resistência característica a tração paralela às fibras via norma;  $f_{t0,k}^{Prob}$  = resistência característica a tração paralela às fibras via função probabilística;  $f_{t0,k}^{Mod}$  = resistência característica a tração paralela às fibras via modelo de regressão.

Fonte: Adaptado de Wolenski *et al.* (2019)

#### 2.1.14 Rabo de arraia (*Vochysia* sp.)

A espécie Rabo de arraia (*Vochysia* sp.) também conhecida como Quaruba-jasmineira, pertence à família *Vochysiaceae*, e possui ocorrência natural em toda a região Amazônica brasileira. Esta madeira apresenta cerne bege-rosado, raios visíveis a olho nu na face transversal (topo) e na face tangencial apenas sob lente. Em relação a durabilidade natural, apresenta baixa resistência ao ataque fúngico quando em contato com o solo e em ensaios de laboratório (MAINIERI, 1983 *apud* GROBÉRIO, 2000).

Segundo Lorenzi (1998) *apud* Dias (2000), a árvore Rabo de arraia pode atingir uma altura de 8 a 20 metros, com tronco ereto e cilíndrico, de 40 a 60 cm de diâmetro. Sua madeira é moderadamente pesada, macia e pouco resistente.

Grobério e Lahr (2002) estudaram 21 espécies de madeiras tropicais, objetivando determinar a partir das propriedades físico-mecânicas, suas possíveis aplicações na construção civil. A espécie de madeira Rabo de arraia (*Vochysia* sp) apresentou densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) de 720 kg/m<sup>3</sup>, retratibilidade radial total (RR) de 3,69% e retratibilidade tangencial total (RT) correspondente a 7,24%. Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas para a espécie estão apresentados na Tabela 38.

**Tabela 38** – Propriedades mecânicas da espécie Rabo de arraia (*Vochysia* sp.) por Grobério e Lahr (2002).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
$f_{c0}$ (MPa)	57,5
$f_{t0}$ (MPa)	68,9
$f_{t90}$ (MPa)	2,4
$f_{v0}$ (MPa)	14,9
$f_{s0}$ (MPa)	0,5
$f_M$ (MPa)	79,3
$f_{h0}$ (MPa)	85,4
$f_{h90}$ (MPa)	50,8
$E_{c0}$ (MPa)	13979,8
$E_{t0}$ (MPa)	13688,9
$E_M$ (MPa)	13858,4
W (N.m)	73,7

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;  $f_{t0}$  = resistência a tração paralela às fibras;  $f_{t90}$  = resistência a tração perpendicular às fibras;  $f_{v0}$  = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{s0}$  = resistência a fissuração;  $f_M$  = módulo de ruptura na flexão estática;  $f_{h0}$  = dureza Janka paralela às fibras;  $f_{h90}$  = dureza Janka normal às fibras;  $E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em compressão paralela às fibras;  $E_{t0}$  = módulo de elasticidade longitudinal em tensão paralela às fibras;  $E_M$  = módulo de elasticidade na flexão estática; W = tenacidade.

Fonte: Adaptado de Grobério e Lahr (2002)

Christoforo *et al.* (2020b) avaliaram, por meio de modelos de regressão exponencial e polinomial (linear, quadrático e cúbico), a possibilidade de estimar a tenacidade em função da densidade aparente com teor de umidade a 12%, resistência à compressão paralela ao grão e módulo de ruptura na flexão estática. Foram ensaiadas 36 espécies de madeira tropicais, conforme as premissas da norma ABNT NBR 7190 (1997). A madeira Rabo de arraia apresentou os seguintes valores para cada propriedade analisada: tenacidade (74 N.m), densidade aparente com teor de umidade a 12% (720 kg/m<sup>3</sup>), resistência à compressão paralela ao grão (57,5 MPa) e módulo de ruptura na flexão estática (79,3 MPa). Portanto, os autores puderam concluir que ao utilizar modelos de regressão para estimativa da madeira a

tenacidade, mostrou-se significativa em todos os casos, ou seja, a tenacidade da madeira pode ser estimada em função da densidade aparente, resistência à compressão paralela as fibras e o módulo de ruptura na flexão estática, pois todas as propriedades apresentaram  $R^2$  acima de 70%.

### 2.1.15 Roxinho (*Peltogyne lecointeii*)

A madeira Roxinho, também conhecida como Pau-roxo (*Peltogyne lecointeii*), é classificada como uma espécie tropical da Amazônia e possui ocorrência natural nos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará e Rondônia. Essa espécie apresenta cerne e alborno distintos pela cor, cerne roxo podendo escurecer com o tempo, alborno bege claro, brilho moderado a acentuado, densidade alta, dura ao corte e textura fina a média. A anatomia macroscópica é composta por parênquima axial e vasos visíveis a olho nu e raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial (IPT, 2021).

Em relação a durabilidade natural, a madeira roxinho é considerada de alta resistência ao ataque de organismos xilófagos (apodrecedores e cupins-de-madeira-seca). Quanto à trabalhabilidade, é moderadamente difícil de ser trabalhada manualmente ou com máquinas, devido à dureza e exsudação de resina quando aquecidas pelas ferramentas, e apresenta bom acabamento (regular na plaina e excelente na lixa, torno e broca) proporcionando um polimento lustroso. A secagem ao ar livre é fácil e moderada, com pequena incidência de rachaduras e empenamentos, e quando a secagem é realizada em estufa, considera-se rápida e com poucos defeitos (IPT, 2021).

As Tabela 39 e Tabela 40 apresentam, respectivamente, valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas do Roxinho.

**Tabela 39 - Propriedades físicas do Roxinho (*Peltogyne lecointeii*).**

<b>Densidade (<math>\rho</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
$\rho_{ap,15}$	890
$\rho_v$	-
$\rho_{bas}$	740
<b>Contração (%)</b>	
Radial	3,5
Tangencial	6,5
Volumétrica	10,7

$\rho_{ap,15}$  = densidade aparente ao teor de umidade de 15%;  $\rho_v$  = densidade acima do ponto de saturação das fibras;  $\rho_{bas}$  = densidade básica.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

**Tabela 40** – Propriedades mecânicas do Roxinho (*Peltogyne lecointei*).

Propriedades Mecânicas	Umidade	
	U <sub>12%</sub>	U <sub>verde</sub>
f <sub>M</sub> (MPa)	184,5*	144,8
E <sub>M</sub> (MPa)	-	17721
f <sub>c0</sub> (MPa)	84,1*	64
E <sub>c0</sub> (MPa)	-	20565
f <sub>v0</sub> (MPa)	-	14,9
f <sub>h0</sub> (N/cm <sup>2</sup> )	-	9728
f <sub>t90</sub> (MPa)	0,8	8,3
f <sub>s0</sub> (MPa)	-	1,1

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

U<sub>12%</sub> = teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%; U<sub>verde</sub> = teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras; f<sub>M</sub> = módulo de ruptura na flexão estática; E<sub>M</sub> = módulo de elasticidade na flexão estática; f<sub>c0</sub> = resistência à compressão paralela às fibras; E<sub>c0</sub> = módulo de elasticidade na compressão paralela; f<sub>v0</sub> = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f<sub>h0</sub> = dureza Janka paralela às fibras; f<sub>t90</sub> = resistência à tração normal às fibras; ; f<sub>s0</sub> = resistência ao fendilhamento.

Fonte: Adaptado de IPT (2021)

A espécie Roxinho pode ser utilizada na construção civil em diversas aplicações, como: pesadas externas (dormentes ferroviários, cruzetas, esteios e estacas), pesadas internas (tesouras, vigas e caibros), leves em esquadrias (porta, batentes e janelas), leves internas (painéis, lambris e forros) e em assoalhos (tábuas, tacos e parquetes). Também pode ser empregada em mobiliários de alta qualidade (móveis decorativos), embarcações, lâminas decorativas, cabos de ferramentas, transporte, peças torneadas, decoração e adornos (IPT, 2021).

Alves, Smits e Carrasco (2016) utilizaram o método não destrutivo de penetração para estimar a densidade aparente e a dureza Janka de sete madeiras tropicais orientadas nas direções longitudinal, tangencial e radial. Para o ensaio não destrutivo foi utilizado o aparelho Pilodyn 6J, e a umidade, densidade aparente e dureza Janka nas três direções foram determinadas seguindo as prescrições da NBR 7190 (1997). A espécie Roxinho apresentou um dos maiores valores para a dureza Janka na direção longitudinal (116,36 MPa), e um dos menores valores para o índice de penetração na direção longitudinal (10,6 mm). Na Tabela 41 consta os valores médios da densidade aparente com teor de umidade a 12%, dureza de Janka e resistência a penetração nas três direções.

**Tabela 41** – Propriedades mecânicas do Roxinho (*Peltogyne lecointei*) por Alves, Smits e Carrasco (2016).

Densidade $\rho_{ap,12}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Dureza Janka			Resistência à penetração		
	D <sub>L</sub> (MPa)	D <sub>T</sub> (MPa)	D <sub>R</sub> (MPa)	Direção Longitudinal (mm)	Direção Tangencial (mm)	Direção Radial (mm)
933	116,36	107,25	108,52	10,6	9,6	9,9

$\rho_{ap,12}$  = densidade aparente com teor de umidade a 12%; D<sub>L</sub> = direção longitudinal; D<sub>T</sub> = direção tangencial; D<sub>R</sub> = direção radial.

Fonte: Adaptado de Alves, Smits e Carrasco (2016)

Rodrigues, Silveira e Castello (2014) avaliaram as propriedades físico-mecânicas de cinco espécies de madeiras da Amazônia Meridional através de métodos convencionais. A determinação das propriedades físicas seguiu as normas COPANT, já para as propriedades mecânicas foi utilizada a máquina universal de ensaios conforme as premissas das normas técnicas COPANT. Os valores médios dos resultados obtidos nas análises das propriedades físicas e mecânicas para a espécie *Peltogyne lecointei* estão apresentados na Tabela 42 e Tabela 43, respectivamente.

**Tabela 42** – Valores médios das propriedades físicas da espécie *Peltogyne lecointei* por Rodrigues, Silveira e Castello (2014).

Densidade básica $\rho_{bas}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de Contração	
	C <sub>t</sub> (%)	C <sub>r</sub> (%)
810	8,1	5

$\rho_{bas}$  = densidade básica; C<sub>t</sub> = coeficiente de contração tangencial; C<sub>r</sub> = coeficiente de contração radial.

Fonte: Adaptado de Rodrigues, Silveira e Castello (2014)

**Tabela 43** – Valores médios das propriedades mecânicas da espécie *Peltogyne lecointei* por Rodrigues, Silveira e Castello (2014).

f <sub>M</sub> (MPa)	E <sub>M0</sub> (MPa)	f <sub>c0</sub> (MPa)	f <sub>s0</sub> (MPa)
186,09	17989	92	18,76

f<sub>M</sub> = módulo de ruptura à flexão estática; E<sub>M0</sub> = módulo de elasticidade à flexão estática; f<sub>c0</sub> = resistência à compressão paralela às fibras; f<sub>s0</sub> = resistência ao cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Rodrigues, Silveira e Castello (2014)

## 2.2 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

A caracterização da madeira consiste em determinar suas propriedades físicas, de resistência e rigidez através de ensaios normalizados, entretanto, grande parte desses ensaios utilizam equipamentos de alto custo e grande porte, disponíveis apenas em grandes

centros de pesquisas. Porém, o ensaio de densidade aparente é de fácil determinação, pois utiliza equipamentos simples na sua execução (DIAS e LAHR, 2004).

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) estima (via modelos matemáticos de regressão) as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função da densidade, pois é uma propriedade de fácil obtenção e possui certa relevância frente a outras propriedades da madeira (DIAS e LAHR, 2004; CHRISTOFORO *et al.*, 2014). Assim, encontrado um bom ajuste (considerando várias amostras de uma mesma espécie de madeira) e determinada a densidade dessa espécie, os modelos de regressão que estabelecem a relação entre as propriedades de resistência e de rigidez da madeira com a densidade possibilitarão ao projetista um pré-dimensionamento mais preciso e de maior confiabilidade (SILVA *et al.*, 2018).

Almeida *et al.* (2014) avaliaram, com o uso de modelos de regressão polinomial, a possibilidade da estimativa da tenacidade em função da densidade aparente de seis espécies de madeiras, Teca (*Tectona grandis*) [C20], Paricá (*Schizolobium amazonicum*) [C20], Pinus (*Pinus oocarpa Shiede*) [C20], Eucalipto (*Corymbia citriodora*) [C40], Jatobá (*Hymenaea* sp.) [C60] e Angico (*Anadenanthera falcata*) [C60], pertencentes as classes de resistência C20, C40 e C60 do grupo das folhosas (ABNT NBR 7190, 1997). Os modelos de regressão utilizados foram o polinomial linear, quadrático e cúbico, todos avaliados pela análise de variância (ANOVA). Todos os modelos de regressão para estimativa da tenacidade mostraram ser significativos pela ANOVA, mas o modelo cúbico forneceu o melhor resultado na estimativa da tenacidade, cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi igual a 84,70%, o que evidencia ser possível estimar da tenacidade das madeiras avaliadas com o conhecimento da densidade aparente.

Christoforo *et al.* (2014) investigaram a possibilidade de estimar a tenacidade pela densidade aparente e resistência à flexão estática, utilizando modelos de regressão, para 15 espécies de madeiras igualmente distribuídas nas classes de resistência C20 (Cedro doce, Cedrona e Quarubarana), C30 (Canafístula, Cedro amargo e Cupiúba), C40 (Branquilho, Cafearana e Louro preto), C50 (Castelo, Angico preto e Catanudo) e C60 (Garapa, Champanhe e Sucupira) da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997), para o grupo das folhosas. Os modelos de regressão utilizados foram os polinomiais linear, quadrático e cúbico, que foram avaliados através da análise de variância (ANOVA). De acordo com os resultados dos modelos de regressão, todos foram considerados significativos pela ANOVA. Para a determinação da tenacidade em função da densidade aparente e resistência à flexão estática, ambos obtiveram o melhor resultado com o modelo de regressão polinomial quadrático, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação: 67,80% e 58,70%. Assim, os autores puderam concluir que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos pela tenacidade em função



da densidade aparente mostrou-se mais preciso, indicando que é a melhor estimativa para a tenacidade das madeiras analisadas.

Almeida *et al.* (2016b) avaliaram a possibilidade de estimar a resistência à compressão paralela ( $f_{co}$ ) através da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) das seguintes madeiras tropicais brasileiras: Canafístula (*Cassia ferruginea*); Angelim araroba (*Vataireopsis araroba*) e Castelo (*Gossypiospermum* sp.), pertencentes as classes de resistência C30, C40 e C60 da norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Os modelos de regressão utilizados consistiram no linear, exponencial, logarítmico e geométrico, todos fundamentados na análise de variância (ANOVA). Para as madeiras de Canafístula e Castelo, os melhores ajustes foram obtidos com o modelo de regressão geométrico, que resultaram em coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 48,57% e 52,84%, respectivamente. E para a madeira Angelim araroba, o melhor ajuste obtido foi através do modelo de regressão linear ( $R^2 = 14,89\%$ ). Para as três espécies de madeiras consideradas em um único grupo, o melhor ajuste obtido foi o modelo de regressão linear, embora exibindo um coeficiente de determinação de apenas 17,88%. Portanto, os autores puderam concluir que a densidade aparente não se apresenta como um bom estimador da resistência a compressão paralela das madeiras investigadas.

Cavalheiro *et al.* (2016) analisaram a possibilidade de estimar a retratibilidade (longitudinal, radial, tangencial e volumétrica) e o coeficiente de anisotropia em função da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) e básica ( $\rho_{bas}$ ) utilizando modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, considerando as espécies de madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum*), Jatobá (*Hymenaea* sp.) and Lyptus® do grupo das folhosas, e as madeiras de *Pinus* sp. e de *Pinus oocarpa* do grupo das coníferas, com base na ABNT NBR 7190 (1997). A densidade aparente também foi utilizada na estimativa da densidade básica e com o uso dos mesmos modelos de regressão. Tanto para as madeiras pertencentes ao grupo das coníferas quanto para as folhosas, o único ajuste considerado significativo (modelo linear) pela ANOVA, consistiu na relação entre densidade aparente e densidade básica, exibindo valores para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 91,72% e 83,36%, respectivamente. Com relação às estimativas de retratibilidade e do coeficiente de anisotropia ora em função da densidade aparente, ora em função da densidade básica, os modelos gerados foram considerados significativos pela análise de variância, o que evidencia a impossibilidade da estimativa dessas propriedades em função da densidade da madeira, pois as diferenças entre as características anatômicas das espécies de madeira analisadas, podem ser responsáveis pela inexistência de padrões de comportamento.

Christoforo *et al.* (2016) avaliaram a possibilidade de estimar a retratibilidade (radial, tangencial e volumétrica), coeficiente de anisotropia e coeficiente de contração (radial, tangencial e volumétrico), usando modelos de regressão polinomial (linear, quadrático e cúbico) e exponencial, em função da densidade aparente considerando as espécies de

madeira Cedro doce (*Cedrela* sp.), Canafístula (*Cassia ferrugínea*), Angelim araroba (*Vatairea opsisararoba*), Mandioqueira (*Qualea* sp.) e Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), pertencentes as classes de resistência C20, C30, C40, C50 e C60, respectivamente, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 7190 (1997). Os autores utilizaram modelos de regressão polinomiais e exponenciais, ambos fundamentados na análise de variância (ANOVA). Para o conjunto envolvendo todas as espécies de madeira, os melhores ajustes foram de retrações tangenciais e volumétricas, ambas utilizando modelos de regressão exponencial, justificadas pelos maiores valores dos coeficientes de determinação obtidos, sendo 51,20% para a estimativa da retração tangencial e de 54,60% para a estimativa da retração volumétrica.

Almeida *et al.* (2017) analisaram a possibilidade de estimar a densidade básica, densidade anidra (teor de umidade a 0%), encolhimento em três direções (axial, radial e tangencial), coeficiente de anisotropia, taxa de retração volumétrico e taxa de inchaço volumétrico, a partir da densidade aparente com teor de umidade a 12% ( $\rho_{ap,12\%}$ ), utilizando modelos de regressão linear, exponencial, geométrico e logarítmico. Os modelos de regressão foram avaliados por meio de uma análise de variância (ANOVA), considerando o nível de significância de 5%. De acordo com os resultados do conjunto envolvendo todas as espécies de madeira, o melhor ajuste considerando a densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) como estimador da densidade básica e densidade anidra foi o modelo geométrico com coeficiente de determinação de 72,9% e 99,7%, respectivamente. Em relação aos resultados obtidos considerando a densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) como estimador dos parâmetros de estabilidade dimensional, o valor do coeficiente de determinação mais significativo foi 19,58% utilizando modelo de regressão geométrico. Assim, os autores puderam concluir que a densidade variável não é um bom estimador da estabilidade dimensional da madeira.

Christoforo *et al.* (2020) investigaram, com o auxílio de modelos de regressão fundamentados na análise de variância (ANOVA), a possibilidade de estimar, por meio da densidade aparente, propriedades da madeira obtidas em testes onde a falha é considerada frágil, permitindo a estimativa de propriedades de dez espécies de madeira pertencentes ao grupo das folhosas (Cambará, Cedro, Cedrorana, Copaíba, Angelim-araroba, Castelo, Oiticica-amarela, Guarucaia, Guaicara e Garapa), abrangendo todas as classes de resistência estabelecidas na norma ABNT NBR 7190 (1997). Os autores utilizaram modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico. Os resultados obtidos com os modelos de regressão para as dez espécies de madeiras analisadas neste estudo, indicaram que a única propriedade que pode ser estimada em função da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) é a resistência ao cisalhamento paralelo ao grão ( $f_{v0}$ ), sendo o modelo logarítmico o melhor ajuste ( $R^2 = 51,27\%$ ). A baixa qualidade dos coeficientes de determinação das outras propriedades analisadas ( $f_{190}$  e  $f_{s0}$ ) pode ser parcialmente explicado pela anatomia da madeira.

## 2.3 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

No Brasil, a determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira é realizada com base no Anexo B da ABNT NBR 7190 (1997), que apresenta os métodos de ensaios para determinação de propriedades das madeiras para projetos de estruturas. Três métodos distintos podem ser utilizados para realizar a caracterização das propriedades de resistência da madeira (caracterização completa, mínima e simplificada), e dois métodos para caracterizar as propriedades de rigidez (completo e simplificado) deste material.

Devido às dificuldades para realizar os ensaios de caracterização completa da madeira, as relações entre as propriedades de resistência ou rigidez, são de suma importância para sua aplicação em projetos estruturais. Contudo, mesmo as relações lineares sendo simplificadas, os resultados reais obtidos via experimentação podem ser coerentes ou não. Assim, diversos pesquisadores buscaram investigar as relações entre propriedades físico-mecânicas da madeira, utilizando modelos de regressão (linear, exponencial, logarítmico, geométrico, polinomial, entre outros) que pudessem melhor descrever a correlação entre as propriedades investigadas (ALMEIDA, 2019).

Como se sabe, dentre todas as propriedades físico-mecânicas da madeira, a densidade é a propriedade de mais fácil obtenção. Entretanto, tem-se estudado relações entre outras propriedades, bem como relações entre propriedades determinadas por métodos de ensaios destrutivos e não destrutivos (ALMEIDA, 2019).

Carrilo *et al.* (2011) avaliaram a correlação entre densidade básica, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) de 14 espécies (Gavia, Huizache, Hizache chino, Brasil, Anacachuita, Chapote blanco, Chapote obscuro, Ebano, Tenaza, Barreta, Leucaena, Palo verde, Mezquite e Coma) de madeira nativas do Nordeste do México. O modelo de regressão linear utilizando a densidade básica como variável independente na estimativa do MOE e MOR mostrou-se significativo com P-valor menor que 0,05, e os valores dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) foram 67% e 50%, respectivamente. O modelo significativo de melhor ajuste ( $R^2 = 87\%$ ) em relação ao conjunto das espécies, foi obtido através da correlação do MOR em função do MOE, com modelo de regressão linear.

Segundinho *et al.* (2013) determinaram e correlacionaram o módulo de elasticidade dinâmico obtidos através de ensaios de vibração transversal ( $E_{Mvt}$ ) com o módulo de elasticidade estático ( $E_M$ ), o módulo de ruptura ( $f_M$ ), a resistência à compressão ( $\sigma_{cp}$ ) e o módulo de elasticidade paralelo ( $E_{cp}$ ) de vigas de madeira laminada colada (MLC) da espécie Cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.), com classe de resistência C30 das folhosas, segundo a NBR 7190 (1997). De acordo com os modelos de regressão linear investigados, o de melhor ajuste ocorreu na estimativa do  $E_M$  em função do  $E_{Mvt}$ , com  $R^2$  igual a 86% e significativo ao

nível de 1% de probabilidade (P-valor < 0,01). Dessa forma, os autores concluíram que o  $E_{Mvt}$  é um bom estimador do  $E_M$ .

Baar, Tippner e Rademacher (2015) analisaram a relação entre o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR), ambos provenientes do ensaio de flexão estático de três pontos, e também investigaram a relação entre o MOE e os módulos de elasticidade determinados por meio de técnicas dinâmicas e não destrutiva [ $E_{fr}$  (*flexural resonance method*),  $E_{lr}$  (*longitudinal resonance method*) e  $E_u$  (*ultrasound method*)]. De acordo com os resultados obtidos considerando o agrupamento das espécies [Doussié (*Azelia bipindensis*), Merbau (*Intsia bijuga*), Wengé (*Millettia laurentii* De Wild.), Muiracatiara (*Astronium graveolens* Jacq.) e Zebrano (*Microberlinia brazzavillensis*)], os modelos de regressão lineares foram significativos e com bons ajustes para as relações entre MOE e  $E_{fr}$  ( $R^2 = 87\%$ ),  $E_{lr}$  ( $R^2 = 86\%$ ) e  $E_u$  ( $R^2 = 83\%$ ), assim como na estimativa do MOR em função do MOE ( $R^2 = 73\%$ ).

Matos e Molina (2016) analisaram a relação entre as resistências ao cisalhamento e à compressão paralela as fibras ( $f_{v0,k}/f_{c0,k}$ ) propostas pela norma brasileira ABNR NBR 7190 (1997), para as madeiras coníferas ( $f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,15$ ) e dicotiledôneas ( $f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,12$ ). Os autores utilizaram as madeiras de *Pinus elliotti* e *Eucalyptus saligna*. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que para as dicotiledôneas (*Eucalyptus saligna*) a relação determinada foi de 0,130 (valor muito próximo da relação proposta pela norma brasileira), enquanto para as coníferas (*Pinus elliotti*), a relação obtida foi de 0,292 (aproximadamente 48% maior que a relação proposta pela norma brasileira).

Moreira *et al.* (2017) correlacionaram a tenacidade (W) e a resistência ao impacto na flexão ( $f_{bw}$ ) da madeira em função da resistência ( $f_{c0}$ ) e do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (MOE) de dez espécies de madeiras tropicais brasileiras com diferentes classes de resistência [Cedro (*Cedrella* sp.), Cambará rosa (*Erismia uncinatum* Quente), Cedrorana (*Cedrelinga cateniformis*), Catanudo (*Calophyllum* sp.), Cupiúba (*Goupia glabra*), Angelim Saia (*Parkia* spp.), Tatajuba (*Bagassa guianensis* Aubl.) Guaiçara (*Luetzelburgia* sp.), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke)], com o auxílio de modelos de regressão linear, exponencial, logarítmico e geométrico, fundamentados na ANOVA. Em relação aos resultados obtidos por espécie, o melhor modelo de regressão encontrado nesta pesquisa foi o logarítmico na determinação da W em função da  $f_{c0}$  e  $f_{bw}$  em função da  $f_{c0}$ , ambos com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 61,75% e P-valor de 0,0024, correspondente a madeira de Cedroarana. Considerando as espécies agrupadas, o modelo de melhor ajuste foi o linear, obtido na estimativa da W por meio da  $f_{c0}$  ( $R^2 = 37,42\%$  e P-valor = 0,0000).

Chen e Guo (2017), por meio de modelos de regressão linear, investigaram a possibilidade da estimativa da densidade verde ( $\rho_{verde}$ ), da resistência à compressão paralela

às fibras (UCS), do módulo de elasticidade na flexão estática (MOE) e do módulo de ruptura (MOR) em função das propriedades provenientes dos ensaios não destrutivos [módulo de elasticidade dinâmico ( $E_D$ ) e amplitude de resistência ( $F$ )], da madeira *Abies fabri* (Mast.). Os autores puderam concluir que todas as relações investigadas ( $\rho$  em função de  $F$ , MOE em função de  $E_D$ , MOR em função de  $E_D$  e UCS em função de  $E_D$ ) foram significativas, sendo que o melhor ajuste ocorreu na estimativa do MOE, com  $R^2$  igual a 63,50%.

Lahr *et al.* (2017) determinaram a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ) e transversal ( $G$ ), através de ensaios de flexão estática a três e quatro pontos, de acordo com as premissas da norma brasileira NBR 7190 (1997). Para atingir o objetivo proposto, utilizaram cinco espécies de madeiras tropicais [Cedrinho (*Erismia uncinatum*), Peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*), Canafístula (*Cassia ferrugínea*) e Jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*)], distribuídas nas classes de resistência C20 a C60 respectivamente. Com base nos métodos dos mínimos quadrados, a regressão linear mostrou que não é possível estimar o módulo de cisalhamento ( $G$ ) pelo módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ), pois o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o P-valor é igual a 31,70% e 0,483, e os autores determinaram a relação  $E = 35 \cdot G$ , com coeficiente 75% superior ao presente na relação ( $E=20 \cdot G$ ), prescrita pela norma brasileira.

Hein e Brancheriau (2018) determinaram a relação entre o módulo de ruptura (MOR) obtido por ensaios de flexão estática a três pontos ( $MOR_{3p}$ ) e quatro pontos ( $MOR_{4p}$ ), em madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Além disso, os autores desenvolveram relações entre o  $MOR_{3p}$  e o  $MOR_{4p}$  com a densidade ( $\rho$ ) e os módulos de elasticidade dinâmicos [longitudinal ( $E_L$ ) e na flexão ( $E_F$ )], obtidos através de ensaios não destrutivos (*acoustic resonance*). Assim, os valores obtidos das relações de regressão lineares investigadas ( $MOR_{3p}$  em função da  $\rho$ ,  $MOR_{4p}$  em função da  $\rho$ ;  $MOR_{3p}$  em função da  $E_L$ ,  $MOR_{4p}$  em função da  $E_L$ ,  $MOR_{3p}$  em função da  $E_F$ ,  $MOR_{4p}$  em função da  $E_F$ ), a que obteve melhor ajuste foi a relação de  $MOR_{4p}$  em função da  $E_F$ , com  $R^2$  igual a 65%.

Christoforo *et al.* (2019) estudaram as relações entre a resistência característica a compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) com as resistências características à tração paralela ( $f_{t0,k}$ ) e ao cisalhamento ( $f_{v0,k}$ ). As estimativas das relações entre as resistências características foram avaliadas pelo método dos mínimos quadrados, considerando um nível de significância de 5% de acordo com a ANOVA. Agrupando as espécies analisadas (Cambará rosa, Cedro amazense, Guarucaia, Cupiúba e Roxinho), os coeficientes ( $\alpha$ ) determinados pelos autores resultaram em 0,96 e 0,23, respectivamente para as relações  $f_{c0,k} = \alpha \cdot f_{t0,k}$  e  $f_{v0,k} = \alpha \cdot f_{c0,k}$ , sendo 25% e 92% maiores que os coeficientes das equações ( $f_{c0,k}/f_{t0,k} = 0,77$  e  $f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,12$ ) prescritas pela ABNT NBR 7190 (1997), mostrando que são adequados e favoráveis à segurança das estruturas.

Yojo *et al.* (2019) analisaram as relações entre a densidade aparente a 15% de teor de umidade ( $\rho_{ap,15}$ ), as resistências à flexão ( $f_M$ ) e compressão axial ( $f_{c0}$ ) em função da dureza Janka considerando 43 espécies de eucalipto no estado verde. A equação de regressão adotada para relacionar a  $\rho_{ap,15}$  e as  $f_M$  e  $f_{c0}$  com a dureza Janka foi uma função exponencial (linearizada com o seu logaritmo). De acordo com os resultados das estimativas da  $\rho_{ap,15}$ ,  $f_M$  e  $f_{c0}$  em função da dureza Janka, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram de 83,69%, 79,57% e 82,52%, respectivamente, indicando uma forte correlação destas propriedades com a dureza Janka e possibilitando sua utilização como critério de previsão destas propriedades.

## 2.4 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No contexto da literatura apresentada, as quinze espécies de madeiras selecionadas para o desenvolvimento deste trabalho se enquadram nas mais diversas aplicações à construção civil, com considerável diferença nas propriedades físico-mecânicas (densidade, resistência, módulo de elasticidade, módulo de ruptura e dureza) das madeiras do grupo das folhosas.

Vale a pena evidenciar, que nem todas as espécies de madeiras analisadas neste trabalho possuem resultados divulgados na literatura, isto é, 13,33% das espécies possuem resultados desconhecidos de suas propriedades, assim, não será possível comparar todos os resultados que foram obtidos.

Portanto, com o intuito de facilitar a caracterização das propriedades físico-mecânicas das madeiras, devido à grande complexidade para realizar os ensaios de caracterização completa deste material, a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) permite a adoção de correlações para a estimativa de propriedades físicas e mecânicas. Assim, foram apresentadas diversas pesquisas em relação à estimativa de propriedades da madeira, que comprovam a viabilidade de aplicações de novas técnicas para obtenção de tais propriedades.

Já mencionado anteriormente, a densidade aparente é uma propriedade de fácil determinação, pois não necessita de equipamentos caros e complexos na sua execução. Assim, há várias pesquisas na literatura que utilizam modelos de regressão polinomiais para estimar outras propriedades da madeira em função da densidade aparente, o que reforça o uso dessa relação no nosso trabalho. E pode-se observar com os trabalhos citados, que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variaram, e muito, de acordo com o grupo de espécies considerado e também com a propriedade estimada.

Em relação a estimativa de propriedades em função de outras propriedades mecânicas, há poucos trabalhos encontrados na literatura que buscam investigar essas relações entre propriedades da madeira. E consegue-se analisar que apenas 10% dos trabalhos citados

utilizam modelos de regressão polinomiais para estimar outras propriedades mecânicas da madeira em função da dureza.

Assim, um trabalho que avaliará, via modelos de regressão polinomiais, a precisão do uso da densidade aparente e das durezas como estimadores da resistência e da rigidez à compressão na direção paralela às fibras de quinze espécies de madeiras provenientes de florestas tropicais e igualmente divididas nas classes de resistência da norma brasileira, será de suma importância na compreensão do desempenho de madeiras utilizadas em estruturas na construção civil.

### 3. Material e Métodos

As espécies de madeira (Tabela 2) provenientes de lotes homogêneos e oriundas de empresas do ramo madeireiro localizadas na região da cidade de São Carlos (SP) foram devidamente estocadas nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), proporcionando as peças teor de umidade próximo de 12%, assim como recomenda a norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997).

As premissas e os métodos de ensaio da norma brasileira foram seguidos para a obtenção dos valores de resistência ( $f_{c0}$ ) e de rigidez ( $E_{c0}$ ) à compressão na direção paralela às fibras assim como os valores da densidade aparente ( $\rho_{12\%}$ ) e das durezas nas direções paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras. Detalhes da execução das experimentações são apresentados nos subitens 3.1 (densidade aparente), 3.2 (compressão paralela às fibras) e 3.3 (dureza).

Cabe destacar, para cada uma das 15 espécies de madeira aqui consideradas, foram fabricados 12 corpos de prova (ABNT NBT 7190, 1997) para a determinação dos valores das densidades aparente, 12 para a obtenção dos valores de resistência e de rigidez à compressão na direção paralela às fibras e 12 para a determinação dos valores de dureza nas direções paralela e perpendicular, o que resultou em 540 amostras e em 900 determinações experimentais ao todo.

Rompido os corpos de prova (máquina universal de ensaios AMSLER, com capacidade de carga de 25 toneladas), o teor de umidade (U) dos mesmos no momento dos ensaios foi obtido por meio do medidor de umidade por contato Marrari M5 ( $10,22 \leq U \leq 12,54\%$ ). Com posse do teor de umidade das amostras, os valores de resistência a compressão na direção paralela às fibras ( $f_{c0}$ ), durezas [paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras] e do módulo de elasticidade ( $E_{c0}$ ) à compressão na direção paralela às fibras foram corrigidos para o teor de umidade de 12% ( $f_{c0,12}$ ;  $f_{h0,12}$ ;  $f_{h90,12}$ ;  $E_{c0,12}$ ) com o auxílio das Equações 1 e 2 (ABNT NBR 7190, 1997), respectivamente, em que  $f_{w,U}$  e  $E_{c0,U}$  consistem nas resistências e na rigidez das amostras associadas ao teor de umidade U.

$$E_{c0,12} = E_{c0,U} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad (1)$$

$$f_{w,12} = f_{w,U} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot (U - 12)}{100} \right] \quad (2)$$



Com base nos valores corrigidos da resistência à compressão na direção paralela às fibras ( $f_{c0,12}$ ), a Equação 3 (ABNT NBR 7190, 1997) foi utilizada para a determinação do valor característico ( $f_{c0,k}$ ) para a categorização das madeiras nas classes de resistência do grupo das folhosas (Tabela 1), em que  $f_1, f_2$  a  $f_n$  denotam os valores da resistência à compressão ( $f_{c0,12}$ ) em ordem crescente dos  $n$  corpos de prova testados ( $n=12$  por espécie de madeira avaliada).

$$f_{c0,k} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} f_1 \\ 0.7 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \\ 1.1 \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} \right) - f_{n/2} \right] \end{array} \right. \quad (3)$$

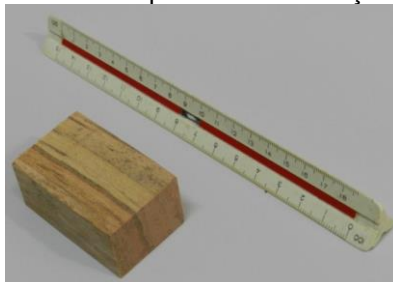
### 3.1 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente da madeira ( $\rho_{ap}$ ) ou massa específica convencional é obtida da razão entre a massa da amostra a 12% de teor de umidade ( $m_{12\%}$ ) pelo seu respectivo volume ( $v_{12\%}$ ), assim como expressa pela Equação 4.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} \quad (4)$$

As amostras (Figura 9) para a determinação da densidade aparente possuem dimensões 2x3x5 cm, e devem conter pelo menos cinco anéis de crescimento. Os equipamentos utilizados na sua obtenção consistiram em paquímetro digital e balança eletrônica. O paquímetro digital utilizado na medição da densidade apresenta precisão de 0,01 milímetros, e a balança digital utilizada possui sensibilidade de 0,001 gramas.

**Figura 9** - Corpo de prova utilizado para a determinação da densidade aparente.



Fonte: Próprio autor (2021)

### 3.2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

O objetivo do ensaio de compressão paralela às fibras consiste em determinar a resistência e a rigidez à compressão da madeira de um lote de 12 m<sup>3</sup> considerado homogêneo.

Define-se a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) como a razão entre a máxima força de compressão ( $F_{c0,máx}$ ) obtida do ensaio pela área da seção transversal da amostra, assim como expressa a Equação 5.

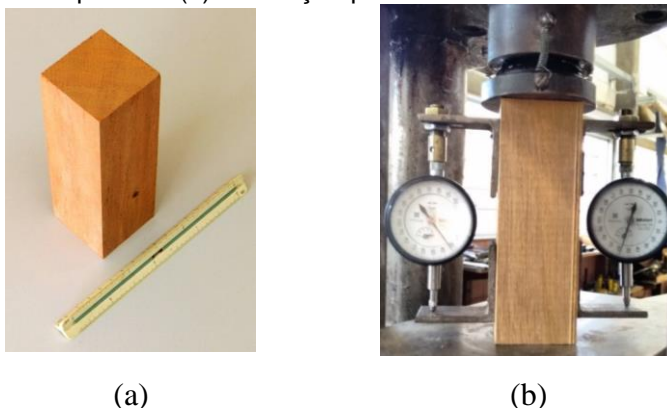
$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{área} \quad (5)$$

A rigidez ou o módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) é obtido da inclinação do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, expressa pela Equação 6, em que  $\sigma_{10\%}$  e  $\sigma_{50\%}$  e  $\varepsilon_{10\%}$  e  $\varepsilon_{50\%}$  correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência  $f_{c0}$  medidas no terceiro ciclo de carregamento.

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (6)$$

Para a determinação da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras, a norma brasileira estabelece que o corpo de prova padrão seja prismático, de seção transversal quadrada 5x5 cm de lado e 15 cm de comprimento na direção das fibras (Figura 10a), com precisão dimensional exigida de 0,1mm.

**Figura 10** - Corpo de prova (a) e aparatos (b) utilizados na realização dos ensaios de compressão (b) na direção paralela às fibras.



Fonte: Próprio autor (2021)

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) define que as deformações medidas nos corpos de prova para a compressão paralela às fibras sejam realizadas utilizando no mínimo dois relógios comparadores (Figura 10b) com precisão de milésimo de milímetro (0,001 mm),

devidamente posicionados em cantoneiras metálicas fixadas em faces opostas do corpo de prova a uma distância de 100 mm entre linhas de fixação e afastadas das extremidades de 25 mm. Cabe destacar que as deformações foram medidas com precisão mínima de 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , e o carregamento foi aplicado a uma taxa de 10 MPa/min de modo monotônico.

### 3.3 DUREZA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

Esse ensaio objetiva determinar a dureza da madeira para um lote considerado homogêneo. A norma brasileira estabelece como critério para se determinar o grau de dureza de uma determinada espécie o método proposto por Janka, que define convencionalmente a dureza ( $f_h$ ) como a força máxima ( $F_{\text{máx}}$ ) de compressão que atua em uma face do corpo de prova quando ocorre a penetração total de uma semiesfera de área diametral ( $A_{\text{seção diametral}}$ ) de 1,0  $\text{cm}^2$ . A dureza Janka é medida na direção paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras.

A forma prismática do corpo de prova tem seção transversal medindo 5x5cm e comprimento paralelo de 15 cm, elaborados com precisão dimensional de 0,1 mm. Na Figura 11 são ilustrados os ensaios para a determinação da dureza nas direções paralela e perpendicular às fibras das madeiras.

**Figura 11** - Ensaios de dureza Janka nas direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor (2021)

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o uso do software Minitab® versão 18. Inicialmente foi utilizado o teste de correlação ( $r$ ) de Pearson entre as variáveis ( $\rho_{ap}$ ,  $f_{c0}$ ,  $E_{c0}$ ,  $f_{h0}$  e  $f_{h90}$ ), de maneira a verificar o nível de correlação e o tipo (ascendente ou descendente).

A análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizada como forma de investigar a significância das correlações testadas. Pela formulação da ANOVA, P-valor (probabilidade  $P$ ) inferior ao nível de significância implica em correlação significativa, e em correlação não significativa em caso contrário ( $P\text{-valor} \geq 0,05$ ). No caso de correlações significativas, isso indica tendência de comportamento linear entre as variáveis confrontadas.

Modelo de regressão polinomial linear (Equação 7) assim como o quadrático (Equação 8) e o cúbico (Equação 9), visando os melhores ajustes, foram utilizados na estimativa da  $f_{c0}$ , do  $E_{c0}$  e das  $f_{h0}$  e  $f_{h90}$  em função da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ). Tais modelos também foram utilizados para estimar a  $f_{c0}$  e o  $E_{c0}$  ora em função da  $f_{h0}$ , ora em função  $f_{h90}$ .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \varepsilon \quad (7)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot X^2 + \varepsilon \quad (8)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot X^2 + \beta_3 \cdot X^3 + \varepsilon \quad (9)$$

Das Equações de 7 a 9,  $\beta_i$  consistem nos parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados,  $Y$  é a propriedade estimada,  $X$  é a variável considerada independente e  $\varepsilon$  é o erro aleatório, cabendo destacar que a precisão dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ).

A ANOVA, também ao nível de 5% de significância, foi considerada na análise dos modelos de regressão das Equações de 7 a 9, possibilitando identificar os modelos e os termos considerados significativos ou não. O uso de tal abordagem, que combinada com o os coeficientes de determinação ajustados, possibilita identificar as equações de melhor ajuste. Pela formulação da ANOVA, P-valor inferior ao nível de significância implica que os coeficientes ou o modelo são considerados significativos, e não significativos em caso contrário. O teste de normalidade de Anderson-Darling também será utilizado para verificar a normalidade na distribuição dos resíduos dos modelos de regressão. Da formulação do teste, p-valor maior ou igual ao nível de 5% de significância implica que a distribuição é normal, o que valida o modelo da ANOVA.

Na busca por equações de maior precisão, modelos de regressão múltipla linear (Equação 10) e quadrático (Equação 11) foram utilizados combinando-se ora a densidade aparente e a dureza na direção paralela e ora a densidade aparente e a dureza na direção

perpendicular às fibras na estimativa dos valores de resistência e de rigidez à compressão na direção paralela às fibras.

$$Z = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot Y + \varepsilon \quad (10)$$

$$Z = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot Y + \beta_3 \cdot X^2 + \beta_4 \cdot Y^2 + \beta_5 \cdot X \cdot Y + \varepsilon \quad (11)$$

Das Equações 10 e 11, avaliadas também pela ANOVA dos modelos de regressão e nas mesmas condições descritas anteriormente para os modelos de uma variável livre, Z denota a variável dependente, Y e X são as variáveis independentes,  $\beta_i$  são os parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados e  $\varepsilon$  é o erro aleatório. A precisão dos modelos de regressão múltipla é comparada com a precisão dos modelos ordinários, possibilitando identificar a existência de melhorias quando se estima determinada propriedade com duas ao invés de uma variável.

O erro relativo (Er) cometido nas aproximações foi calculado com o uso da Equação 12, em que  $VAL_{exp}$  consiste no valor de certa propriedade determinada experimentalmente e  $VAL_{est}$  no valor estimado pelos modelos de regressão.

$$Er(\%) = 100 \cdot \frac{|VAL_{exp} - VAL_{est}|}{VAL_{exp}} \quad (12)$$

Por fim, os modelos foram gerados com base nos valores médios das propriedades e não nos valores amostrais, o que reduz a variabilidade de resultados de uma certa propriedade obtidos da mesma espécie, assim como feito no trabalho de Lahr *et al.* (2020). Dessa forma, os modelos de regressão a uma variável livre foram ajustados a um conjunto de 15 pares ordenados, em razão de serem consideradas 15 espécies de madeira ao todo.

## 4. Resultados e Discussão

Nas Tabela 44 a Tabela 48 (espécies agrupadas em classes de resistência) são apresentadas as sínteses dos resultados das propriedades avaliadas, cabendo destacar que CV consiste no coeficiente de variação e IC no intervalo de confiança da média ao nível de 95% de confiabilidade.

**Tabela 44** - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C20 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).

<b>Esp.</b>	<b>Estat.</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h90}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>
Caixeta	Média	0,33	38,37	8270	49,94	27,78	27,63
	CV (%)	2,67	6,69	26,78	14,04	15,19	
	IC (95%)	(0,33; 0,35)	(36,73; 40,00)	(6863; 9677)	(45,48; 54,39)	(25,10; 30,47)	
Cajueiro	Média	0,54	39,71	11278	50,50	28,00	28,77
	CV (%)	5,88	10,69	20,86	10,76	12,09	
	IC (95%)	(0,51; 0,55)	(37,01; 42,40)	(9783; 12773)	(47,05; 53,95)	(25,85; 30,15)	
Cedro doce	Média	0,50	31,48	8354	48,51	32,17	23,11
	CV (%)	5,34	17,88	14,09	16,78	25,01	
	IC (95%)	(0,48; 0,52)	(27,90; 35,05)	(7606; 9102)	(37,48; 59,54)	(27,06; 37,29)	

**Tabela 45** - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C30 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).

<b>Esp.</b>	<b>Estat.</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h90}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>
Embireira	Média	0,51	38,50	11536	48,42	27,08	31,57
	CV (%)	2,45	7,55	13,16	8,60	10,50	
	IC (95%)	(0,49; 0,51)	(36,65; 40,35)	(10571; 12500)	(45,77; 51,06)	(25,28; 28,89)	
Castanheira	Média	0,72	48,17	13639	67,33	52,01	35,22
	CV (%)	9,43	13,89	19,96	18,73	14,57	
	IC (95%)	(0,67; 0,76)	(43,92; 52,42)	(11909; 15369)	(59,32; 75,34)	(47,19; 56,82)	
Cambará	Média	0,59	45,53	11919	48,21	34,40	33,72
	CV (%)	9,88	11,27	27,56	14,11	9,84	
	IC (95%)	(0,55; 0,63)	(42,27; 48,79)	(9832; 14007)	(43,89; 52,53)	(32,25; 36,55)	

**Tabela 46** - Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C40 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).

<b>Esp.</b>	<b>Estat.</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h90}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>
Canela parda	Média	0,71	53,34	13334	77,07	46,89	42,25
	CV (%)	4,18	15,10	20,52	13,68	8,74	
	IC (95%)	(0,68; 0,72)	(48,22; 58,46)	(11595; 15072)	(70,37; 83,76)	(44,29; 49,50)	
Cafearana	Média	0,66	57,58	14089	80,46	47,59	44,33
	CV (%)	8,38	21,06	26,06	20,62	26,45	
	IC (95%)	(0,63; 0,70)	(49,88; 65,29)	(11757; 16422)	(66,85; 94,07)	(39,59; 55,59)	
Rabo de arraia	Média	0,73	56,81	13402	85,69	51,85	42,76
	CV (%)	6,41	19,92	15,55	10,63	8,09	
	IC (95%)	(0,69; 0,75)	(49,62; 64,00)	(12078; 14726)	(79,90; 91,48)	(49,19; 54,51)	

**Tabela 47** – Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C50 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).

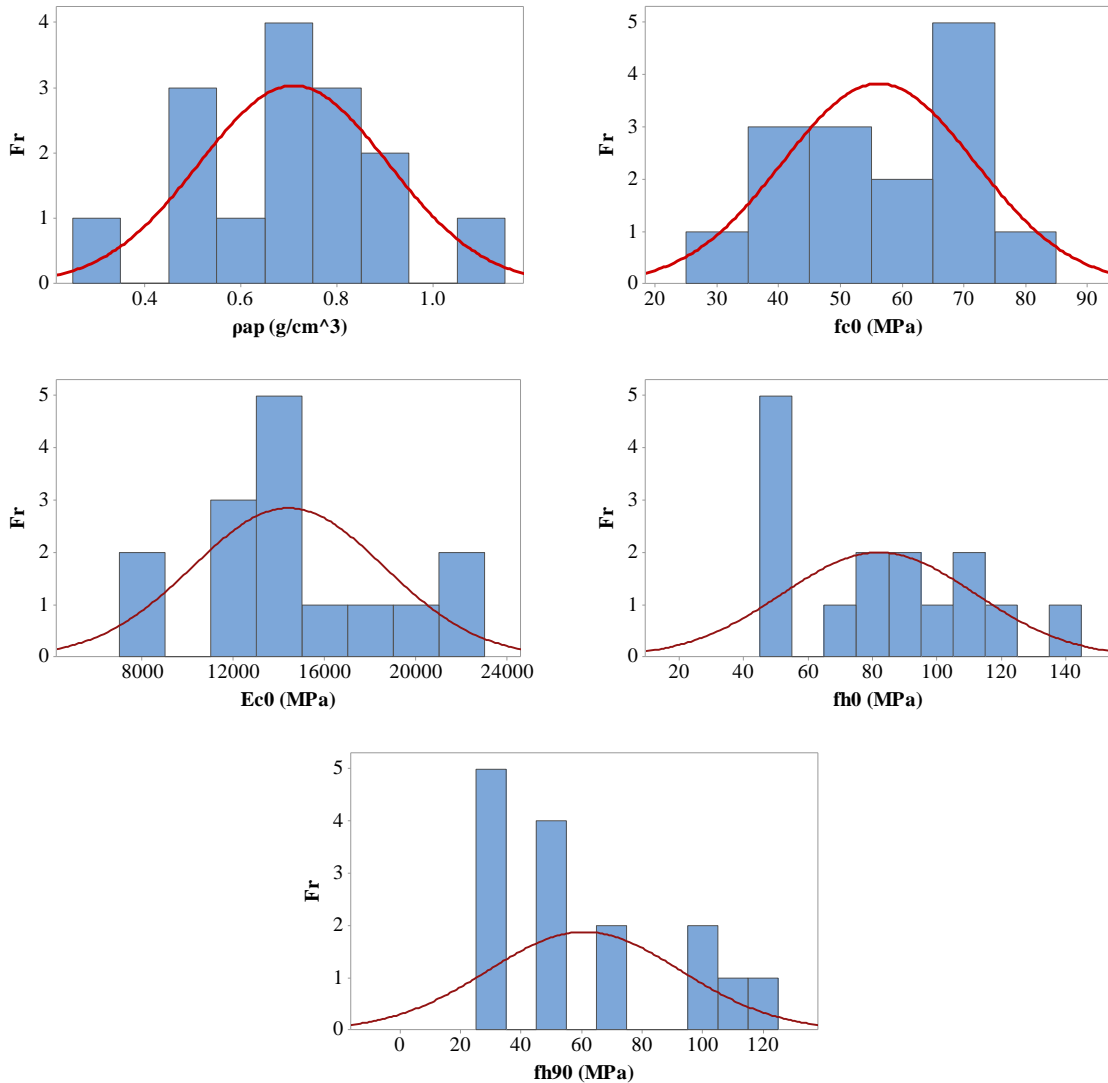
<b>Esp.</b>	<b>Estat.</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h90}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>
Angelim pedra	Média	0,77	66,62	14363	99,98	66,32	51,64
	CV (%)	8,05	18,24	15,31	11,08	11,94	
	IC (95%)	(0,73; 0,81)	(58,90; 74,34)	(12966; 15761)	(92,94; 107,02)	(61,29; 71,35)	
Garapa	Média	0,92	74,03	17716	112,43	97,95	54,78
	CV (%)	5,93	11,45	14,73	9,46	14,50	
	IC (95%)	(0,88; 0,96)	(68,64; 79,41)	(16057; 19374)	(105,67; 119,18)	(88,92; 106,98)	
Guaiçara	Média	1,09	71,41	15302	119,30	111,25	52,69
	CV (%)	2,43	12,46	15,88	5,83	8,27	
	IC (95%)	(1,06; 1,10)	(65,76; 77,06)	(13758; 16845)	(114,88; 123,72)	(105,40; 117,10)	

**Tabela 48** – Resultados das propriedades das espécies enquadradas na classe de resistência C60 conforme a Tabela 1 da ABNT NBR 7190 (1997).

<b>Esp.</b>	<b>Estat.</b>	<b><math>\rho_{ap}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h0}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{h90}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>
Garrote	Média	0,80	69,58	19293	106,67	103,75	61,59
	CV (%)	3,04	8,50	7,23	8,03	6,72	
	IC (95%)	(0,78; 0,81)	(65,82; 73,34)	(18407; 20180)	(101,23; 112,11)	(99,32; 108,18)	
Quina rosa	Média	0,84	69,17	22483	94,08	71,42	63,13
	CV (%)	3,07	4,43	12,38	7,03	7,95	
	IC (95%)	(0,82; 0,85)	(67,50; 70,83)	(20715; 24252)	(89,88; 98,28)	(67,81; 75,03)	
Roxinho	Média	0,94	82,83	21080	140,96	115,14	65,60
	CV (%)	3,96	7,31	20,33	5,32	5,56	

IC (95%)	(0,91; 0,96)	(78,99; 86,68)	(18358; 23803)	(136,19; 145,72)	(111,07; 119,21)
----------	-----------------	-------------------	-------------------	---------------------	---------------------

**Figura 12 – Histograma das propriedades avaliadas (Fr – frequência).**



Nas Tabela 44 a Tabela 48, os P-valores [0,069;0,625] do teste de normalidade de Anderson-Darling para todas as propriedades avaliadas foram superiores ao nível de significância (5%), validando assim os resultados dos intervalos de confiança calculados.

Na Tabela 44, as espécies de madeira Caixeta, Cajueiro e Cedro doce foram classificadas na classe de resistência C20 da ABNT NBR 7190 (1997), pois apresentaram valores de resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) iguais a 27,63 MPa (Caixeta), 28,77 MPa (Cajueiro) e 23,11 MPa (Cedro doce).

O lote de madeira Caixeta estudado neste trabalho, apresentou valores médios (Tabela 44) de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,33$  g/cm<sup>3</sup>) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 38,37$  MPa) próximos ao informado pelo IPT (2021) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,44$  g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0} =$



33 MPa). Entretanto, essa diferença de valores ocorreu, pois o IPT empregou a ABNT NBR 6230 (1940) que utilizava corpos de provas prismáticos de 2x2x3 cm para realizar os ensaios físicos e mecânicos da madeira. No entanto, esta norma (ABNT NBR 6230, 1940) foi cancelada e substituída pela ABNT NBR 7190 (1997), utilizada neste trabalho. Devido a isso, os valores obtidos pelo IPT (2021) serão próximos aos obtidos nesta pesquisa e nos trabalhos citados.

Cassiano *et al.* (2013) e Teles (2014) obtiveram valores de densidade aparente da espécie Caixeta semelhantes aos resultados obtidos neste trabalho ( $\rho_{ap,12\%} = 0,34 \text{ g/cm}^3$  e  $\rho_{ap,12\%} = 0,4 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente). O valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela ( $E_{c0}$ ), dureza paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras determinados nesta pesquisa, foram iguais a 8270 MPa, 49,94 MPa e 27,78 MPa, respectivamente, e não possui nenhuma outra pesquisa para realizar a comparação dos resultados. Para a determinação da resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) foi utilizada a Equação 3, que obteve valor igual a 27,63 MPa, sendo categorizada na classe de resistência D20 das dicotiledôneas (folhosas).

Os resultados obtidos da espécie Cajueiro (Tabela 44) para densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,54 \text{ g/cm}^3$ ) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 39,71 \text{ MPa}$ ) foram próximos do valor determinado por Duarte *et al.* (2020) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,55 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0} = 42 \text{ MPa}$ ). O IPT (2021) também apresentou valores de  $\rho_{ap}$  e  $f_{c0}$ , entretanto, não será possível fazer a comparação entre os resultados, pois a  $\rho_{ap}$  possui teor de umidade a 15% ( $\rho_{ap,15\%} = 0,52 \text{ g/cm}^3$ ) e a  $f_{c0}$  apresenta teor de umidade acima do Ponto de Saturação das Fibras (PSF) igual a 29,3 MPa. O módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) obtido neste trabalho foi igual a 11278 MPa, e não possui nenhuma outra pesquisa para realizar a comparação dos resultados. O valor médio determinado da dureza perpendicular ( $f_{h90} = 28 \text{ MPa}$ ) às fibras da espécie Cajueiro (Tabela 44) é próximo do valor informado pelo IPT (2021), com a madeira à 12% de umidade ( $f_{h90} = 22,46 \text{ MPa}$ ), entretanto, essa diferença de valores, já explicado anteriormente, é ocasionada pela NBR 6230 (1940) que o IPT utilizou para realizar os ensaios físicos e mecânicos de algumas espécies de madeiras. Duarte *et al.* (2020) apresentaram valores de  $f_{h0}$  (55 MPa) e  $f_{h90}$  (30 MPa) mais próximos dos valores encontrados neste trabalho. O valor da resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) foi igual a 28,77 MPa, classificando o lote de madeira Cajueiro como D20 da classe das dicotiledôneas (folhosas).

A madeira Cedro doce obteve valores médios de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,50 \text{ g/cm}^3$ ) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 31,48 \text{ MPa}$ ) semelhantes aos valores da norma ABNT NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,50 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0} = 31,5 \text{ MPa}$ ) e de Christoforo *et al.* (2020) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,59 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0} = 31,8 \text{ MPa}$ ). Couto *et al.* (2020) também determinaram um valor médio para  $f_{c0}$  (30,8 MPa) próximo do valor obtido neste trabalho. Vale

a pena ressaltar, que não será possível fazer a comparação dos valores de  $\rho_{ap}$  e  $f_{c0}$  fornecidos pelo IPT (2021), pois ambas as propriedades utilizaram a madeira com 15% de umidade ( $\rho_{ap,15\%} = 0,53 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0,15\%} = 39,1 \text{ MPa}$ ). O valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{c0} = 8354 \text{ MPa}$ ) determinado nesta pesquisa, foi próximo ao valor da norma ABNT NBR 7190 (1997) ( $E_{c0} = 8058 \text{ MPa}$ ). A dureza paralela às fibras ( $f_{h0} = 48,51 \text{ MPa}$ ) obtidas neste trabalho foi maior que o apresentado pelo IPT (2021) ( $f_{h0} = 31,38 \text{ MPa}$ ), entretanto, essa diferença pode ter sido ocasionada, devido o IPT (2021) ter utilizado a madeira no estado verde, isto é, o teor de umidade está acima do Ponto de Saturação das Fibras. Já em relação a  $f_{h90}$ , nem a norma ABNT NBR 7190 (1997) e nem o IPT (2021) apresentam respectivos valores para possível comparação com o valor determinado ( $f_{h90} = 32,17 \text{ MPa}$ ). De acordo com a resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) na Tabela 44 (23,11 MPa), pode-se classificar como D20 da classe das dicotiledôneas (folhosas).

Conforme a norma ABNT NBR 7190 (1997), para as resistências a esforços normais, admite-se um coeficiente de variação de 18% e para as resistências a esforços tangenciais um coeficiente de variação de 28%. Portanto, de acordo com a Tabela 44, pode-se observar que as resistências a esforços normais ( $f_{c0}$  e  $f_{h0}$ ) e tangenciais ( $f_{h90}$ ) conseguiram atender ao coeficiente de variação (CV) com o limite estabelecido pela norma (18% e 28%, respectivamente).

Na Tabela 45, as espécies de madeira Embireira, Castanheira e Cambará foram classificadas na classe de resistência C30 da ABNT NBR 7190 (1997), pois apresentaram valores de resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) iguais a 31,57 MPa (Embireira), 35,22 MPa (Castanheira) e 33,72 MPa (Cambará).

Com relação aos resultados obtidos das propriedades da espécie Embireira (Tabela 45), não será possível fazer a comparação desses dados, pois se trata de uma espécie pouco conhecida e não foi encontrado muitos dados na literatura.

A espécie de madeira Castanheira apresentou valor médio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,72 \text{ g/cm}^3$ ) próximo ao valor obtido por Alves *et al.* (2013) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,696 \text{ g/cm}^3$ ). O IPT (2021) também determinou o valor médio da densidade aparente dessa espécie de madeira, mas com o teor de umidade a 15% ( $\rho_{ap,15\%} = 0,75 \text{ g/cm}^3$ ), assim, não será possível fazer a comparação dos resultados. A propriedade mecânica de resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) da Castanheira, Tabela 45, foi igual a 48,17 MPa, e o valor dessa mesma propriedade fornecido pelo IPT (2021), com teor de umidade a 12% ( $f_{c0} = 58,3 \text{ MPa}$ ), foi próximo do resultado encontrado nessa pesquisa, considerando que o IPT utilizou a norma NBR 6230 (1940). O valor médio do  $E_{c0}$  (15441 MPa) determinado por Almeida *et al.* (2020) está próximo do intervalo de confiança (nível de 95% de confiabilidade) do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (11909 MPa; 15369 MPa) obtido neste trabalho.

Os valores da dureza paralela ( $f_{h0} = 67,33$  MPa) e perpendicular ( $f_{h90} = 52,01$  MPa) às fibras apresentados nesta pesquisa, são menores que os valores informados por IPT (2021), com a madeira à 12% de umidade ( $f_{h0} = 80,71$  MPa e  $f_{h90} = 65,41$  MPa), e maiores que os valores determinados por Alves *et al.* (2013) ( $f_{h, longitudinal} = 55$  MPa,  $f_{h, transversal} = 44$  MPa e  $f_{h, radial} = 46$  MPa).

A madeira Cambará (*Erismia uncinatum*) obteve valor médio para a densidade aparente ( $\rho_{ap, 12\%} = 0,59$  g/cm<sup>3</sup>) próximo do valor estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap, 12\%} = 0,544$  g/cm<sup>3</sup>) e por Lahr *et al.* (2015) ( $\rho_{ap, 12\%} = 0,68$  g/cm<sup>3</sup>). O IPT (2021) também determinou essa propriedade da madeira Cambará, mas com teor de umidade a 15% ( $\rho_{ap, 15\%} = 0,59$  g/cm<sup>3</sup>). O valor médio de resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) apresentado pela norma ( $f_{c0} = 37,8$  MPa), por Arruda, Del Menezzi e Andrade (2015) ( $f_{c0} = 44,91$  MPa), pelo Serviço Florestal Brasileiro – SFB (2015) ( $f_{c0} = 49,75$  MPa) e por Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017) ( $f_{c0} = 34$  MPa), foram próximos do valor determinado neste trabalho ( $f_{c0} = 45,53$  MPa). Conforme a Tabela 45, o resultado do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) foi de 11919 MPa, semelhante ao valor determinado por Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017) ( $E_{c0} = 12967$  MPa) e estabelecido pela norma ( $E_{c0} = 9067$  MPa). A dureza paralela ( $f_{h0} = 48,21$  MPa) às fibras (Tabela 45), foram menores que o valor determinado por Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017) ( $f_{h0} = 51$  MPa), e pode-se observar que o valor obtido da dureza perpendicular ( $f_{h90} = 34,4$  MPa) (Tabela 45), foi maior que o valor determinado por Arruda, Del Menezzi e Andrade (2015) ( $f_{h90} = 26,13$  MPa) e menor que o informado pelo SFB (2015) ( $f_{h90} = 38,64$  MPa) e Lahr *et al.* (2016) *apud* Almeida (2017) ( $f_{h90} = 67$  MPa).

Pode-se observar que a espécie Embireira, Castanheira e Cambará (Tabela 45), apresentaram os coeficientes de variação (CV) das propriedades de resistência com solicitações normais ( $f_{c0}$  e  $f_{h0}$ ) dentro do limite estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997) que é 18%, e os CV referentes à propriedade de resistência com solicitação tangencial ( $f_{h90}$ ) também estão dentro do limite de 28%.

Na Tabela 46, as espécies de madeira Canela parda, Cafearana e Rabo de arraia foram classificadas com classe de resistência C40 da ABNT NBR 7190 (1997), pois apresentaram valores de resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) iguais a 42,25 MPa (Canela parda), 44,33 MPa (Cafearana) e 42,76 MPa (Rabo de arraia).

Para a espécie Canela parda (*Ocotea* sp.), encontramos apenas um dado na literatura sobre as propriedades físicas e mecânicas, mas não será possível fazer a comparação dos resultados, pois as informações fornecidas pelo Remade (2021) contém a madeira com teor de umidade a 15% ( $\rho_{ap, 15\%} = 0,59$  g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0, 15\%} = 28,34$  g/cm<sup>3</sup>), e essas mesmas propriedades obtidas neste trabalho (Tabela 46), utilizaram a madeira com teor de umidade a 12% ( $\rho_{ap, 12\%} = 0,71$  g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0, 12\%} = 53,34$  g/cm<sup>3</sup>). Em relação as outras propriedades mecânicas ( $E_{c0}$ ,  $f_{h0}$  e

$f_{h90}$ ), não será possível fazer a comparação e discussão dos resultados, pois não foram encontrados na literatura.

De acordo com o valor médio da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,66 \text{ g/cm}^3$ ) para a espécie de madeira Cafearana (Tabela 46), pode-se afirmar que este resultado está congruente com a norma ABNT NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,677 \text{ g/cm}^3$ ) e também com os seguintes autores que estudaram essa mesma espécie: ITTO (2021) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,88 \text{ g/cm}^3$ ), Christoforo *et al.* (2014) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,67 \text{ g/cm}^3$ ) e Dias *et al.* (2019) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,68 \text{ g/cm}^3$ ). A norma também apresentou valor médio para a resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 59,1 \text{ MPa}$ ) próximo do resultado encontrado nesta pesquisa ( $f_{c0} = 57,58 \text{ MPa}$ ) e no trabalho de ITTO (2021) ( $f_{c0} = 74,4 \text{ MPa}$ ). O valor médio do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras obtido neste trabalho ( $E_{c0} = 14089 \text{ MPa}$ ) foi semelhante ao valor apresentado no Anexo E da norma ABNT NBR 7190 (1997) ( $E_{c0} = 14098 \text{ MPa}$ ). Em relação as propriedades da dureza paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ) às fibras, não será possível fazer a comparação e discussão dos resultados, pois não foram encontrados dados na literatura dessa espécie de madeira.

A madeira Rabo de arraia (*Vochysia sp.*) apresentou valores médios (Tabela 46) de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,73 \text{ g/cm}^3$ ) e resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 56,81 \text{ MPa}$ ) próximos dos valores encontrados por Grobério e Lahr (2002) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,72 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0} = 57,5 \text{ MPa}$ ) e Christoforo *et al.* (2020b) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,72 \text{ g/cm}^3$  e  $f_{c0} = 57,5 \text{ MPa}$ ). Analisando as outras propriedades mecânicas, pode-se observar que os valores de  $E_{c0}$  (13402 MPa),  $f_{h0}$  (85,69 MPa) e  $f_{h90}$  (51,85 MPa) determinados neste trabalho, foram semelhantes aos valores obtidos por Grobério e Lahr (2002), utilizando a mesma espécie de madeira ( $E_{c0} = 13979,8 \text{ MPa}$ ;  $f_{h0} = 85,4 \text{ MPa}$  e  $f_{h90} = 50,8 \text{ MPa}$ ).

Na Tabela 46, pode-se observar que as espécies Canela parda, Cafearana e Rabo de arraia apresentaram coeficientes de variação (CV) das propriedades de resistência com solicitações tangenciais ( $f_{h90}$ ) dentro do limite estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997), que é 28%. Entretanto, apenas a espécie Canela parda apresentou CV das propriedades de resistência com solicitações normais ( $f_{c0}$  e  $f_{h0}$ ) dentro do admitido pela norma (18%). As espécies Cafearana e Rabo de arraia obtiveram um CV para solicitações normais um pouco acima do admitido pela norma.

Na Tabela 47, as espécies de madeira Angelim pedra, Garapa e Guaiçara foram classificadas com classe de resistência C50 da ABNT NBR 7190 (1997), pois apresentaram valores de resistência característica à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,k}$ ) iguais a 51,64 MPa (Angelim pedra), 54,78 MPa (Garapa) e 52,69 MPa (Guaiçara).

A espécie Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) apresentou valores médios (Tabela 47) de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,77 \text{ g/cm}^3$ ) e resistência a compressão paralela às fibras ( $f_{c0} = 66,62 \text{ MPa}$ ) próximos dos valores encontrados por IPT (2021) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,71$

g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0} = 52,3$  MPa) e pela norma NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,694$  g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0} = 59,8$  MPa). Rodrigues, Silveira e Castello (2014) também determinaram o valor de  $f_{c0}$  (51,97 MPa), entretanto, utilizaram a norma do COPANT para realizar os ensaios experimentais, ocasionando em pequenas diferenças de valores. O valor médio do  $E_{c0}$  (14363 MPa) obtido neste trabalho foi próximo do valor apresentado no anexo E da norma NBR 7190 (1997) que é 12912 MPa para a espécie Angelim pedra. Em relação aos valores de  $f_{h0}$  (99,98 MPa) e  $f_{h90}$  (66,32 MPa) encontrados neste estudo, foram maiores que os determinados pelo IPT (2021) ( $f_{h0} = 76,59$  MPa e  $f_{h90} = 57,86$  MPa), entretanto, essa diferença é devida o IPT (2021) ter utilizado a norma NBR 6230 (1940) para realização dos ensaios experimentais.

Conforme os valores do intervalo de confiança da densidade aparente (0,88 g/cm<sup>3</sup> ; 0,96 g/cm<sup>3</sup>) da espécie Garapa (Tabela 47), consegue observar que este resultado está coerente com a NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,892$  g/cm<sup>3</sup>) e também com os seguintes autores que estudaram essa mesma espécie: Alves *et al.* (2013) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,946$  g/cm<sup>3</sup>); Alves, Pizzol e Carrasco (2017) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,946$  g/cm<sup>3</sup>) e Jankowska *et al.* (2015) *apud* Teixeira *et al.* (2019) ( $\rho_{ap,12\%}$  entre 0,82 g/cm<sup>3</sup> e 0,905 g/cm<sup>3</sup>). Os valores de  $f_{c0}$  (78,4 MPa) e  $E_{c0}$  (18359 MPa) apresentados no Anexo E da NBR 7190 (1997) são bem próximos dos resultados encontrados neste estudo ( $f_{c0} = 74,03$  MPa;  $E_{c0} = 17716$  MPa). O IPT (2021) também determinou a  $\rho_{ap}$  e  $f_{c0}$ , entretanto, essas propriedades foram ensaiadas com amostras com o teor de umidade a 15% ( $\rho_{ap,15\%} = 0,83$  g/cm<sup>3</sup> e  $f_{c0,15\%} = 54,3$  MPa). Com relação aos valores da  $f_{h0}$  (112,43 MPa) e  $f_{h90}$  (97,65 MPa) não será possível fazer uma comparação com os resultados obtidos por Jankowska *et al.* (2015) *apud* Teixeira *et al.* (2019), pois eles apresentaram uma média dos valores de  $f_h$  das espécies de madeira Garapa, Cumaru e Tatajuba.

A espécie de madeira Guaiçara obteve valor médio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 1,09$  g/cm<sup>3</sup>) semelhante ao valor encontrado por Grobério e Lahr (2002) ( $\rho_{ap,12\%} = 1,09$  g/cm<sup>3</sup>), Lahr *et al.* (2010) ( $\rho_{ap,12\%} = 1,08$  g/cm<sup>3</sup>) e na norma NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,825$  g/cm<sup>3</sup>). No anexo E da norma NBR 7190 (1997) e no estudo realizado por Grobério e Lahr (2002) e Moreira *et al.* (2017), os valores de  $f_{c0}$  (71,4 MPa; 71,4 MPa e 71 MPa, respectivamente) e  $E_{c0}$  (14624 MPa; 15301,7 MPa e 15301 MPa, respectivamente) determinados foram próximos do resultado encontrado neste estudo ( $f_{c0} = 71,41$  MPa e  $E_{c0} = 15302$  MPa) e estão dentro do intervalo de confiança com nível de 95% de confiabilidade. Em relação as propriedades mecânicas de dureza paralela ( $f_{h0}$ ) e perpendicular ( $f_{h90}$ ), os autores Grobério e Lahr (2002) e Lahr *et al.* (2010) obtiveram valores médios de  $f_{h0}$  (120 MPa e 118 MPa, respectivamente) e  $f_{h90}$  (111,3 MPa e 111 MPa, respectivamente) semelhantes aos valores encontrados neste trabalho ( $f_{h0} = 119,30$  MPa e  $f_{h90} = 111,25$  MPa).

Pode-se observar na Tabela 47, que as espécies de madeira Angelim pedra, Garapa e Guaiçara apresentaram coeficientes de variação (CV) das propriedades de resistência com

solicitações tangenciais e normais, dentro do limite estabelecido pela norma ABNT NBR 7190 (1997), que é 28% e 18%.

As espécies de madeira Garrote, Quina rosa e Roxinho, Tabela 48, foram classificadas com classe de resistência C60 da ABNT NBR 7190 (1997), pois apresentaram valores de  $f_{c0,k}$  iguais a 61,59 MPa, 63,13 MPa e 65,60 MPa, respectivamente.

Conforme o valor médio da densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%} = 0,80 \text{ g/cm}^3$ ) para a espécie de madeira Garrote (Tabela 48), pode-se afirmar que este resultado está congruente com o anexo E da norma NBR 7190 (1997) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,94 \text{ g/cm}^3$ ). Em relação as propriedades mecânicas de  $f_{c0}$  e  $E_{c0}$ , os valores médios obtidos neste trabalho ( $f_{c0} = 69,58 \text{ MPa}$  e  $E_{c0} = 19293 \text{ MPa}$ ) foram próximos das propriedades descritas por Duarte *et al.* (2020) ( $f_{c0} = 85 \text{ MPa}$  e  $E_{c0} = 19761 \text{ MPa}$ ) e NBR 7190 (1997) ( $f_{c0} = 79,5 \text{ MPa}$  e  $E_{c0} = 19583 \text{ MPa}$ ). O IPT (2021) também determinou as propriedades de  $\rho_{ap}$  e  $f_{c0}$ , entretanto, os ensaios foram realizados com amostras que continham teor de umidade a 15%, assim, não será possível fazer a comparação dos resultados. Duarte *et al.* (2020) também determinaram as propriedades de  $f_{h0}$  e  $f_{h90}$  que foram 125 MPa e 92 MPa, respectivamente, e pode-se observar que esses valores foram congruentes com os resultados dessas mesmas propriedades encontradas neste estudo ( $f_{h0} = 106,67 \text{ MPa}$  e  $f_{h90} = 103,75 \text{ MPa}$ ).

As propriedades da espécie de madeira Quina Rosa determinadas neste estudo ( $\rho_{ap,12\%} = 0,84 \text{ g/cm}^3$ ;  $f_{c0} = 69,17 \text{ MPa}$ ;  $E_{c0} = 22483 \text{ MPa}$ ;  $f_{h0} = 94,08 \text{ MPa}$  e  $f_{h90} = 71,42 \text{ MPa}$ ) foram semelhantes com as propriedades determinadas por Lahr *et al.* (2010b) ( $\rho_{ap,12\%} = 0,84 \text{ g/cm}^3$ ;  $f_{c0} = 59 \text{ MPa}$ ;  $E_{c0} = 33089 \text{ MPa}$ ;  $f_{h0} = 94 \text{ MPa}$  e  $f_{h90} = 71 \text{ MPa}$ ).

A espécie de madeira Roxinho obteve valor médio de  $\rho_{ap}$  com teor de umidade a 12% ( $\rho_{ap,12\%} = 0,94 \text{ g/cm}^3$ ) próximo do valor determinado por Alves, Smits e Carrasco (2016), que foi de  $0,93 \text{ g/cm}^3$ . Rodrigues, Silveira e Castello (2014) obtiveram valor de  $f_{c0}$  (92 MPa) semelhante ao resultado encontrado neste trabalho ( $f_{c0} = 82,83 \text{ MPa}$ ). O IPT (2021) determinou as propriedades de  $\rho_{ap}$  e  $f_{c0}$ , mas não será possível fazer a comparação dos resultados, pois as amostras utilizadas nos ensaios experimentais, apresentava teor de umidade a 15%. Em relação as outras propriedades mecânicas ( $E_{c0}$ ,  $f_{h0}$  e  $f_{h90}$ ), não será possível fazer a comparação e discussão dos resultados, pois não foram encontrados na literatura.

Na Tabela 48, as espécies Garrote, Quina Rosa e Roxinho apresentaram coeficiente de variação (CV) das propriedades de resistência com solicitações normais e tangenciais, dentro do limite estabelecido pela ABNT NBR 7190 (1997).

Considerando os resultados das 15 espécies de madeiras utilizadas neste trabalho e distribuídas em 5 classes de resistências, foi feito um histograma (Figura 12) com a função de fazer uma análise geral dos valores médios das propriedades determinadas neste estudo. Pode-se observar na Figura 12, que o eixo das ordenadas (eixo vertical) contém a frequência

daquela propriedade, e o eixo das abscissas (eixo horizontal) corresponde a propriedade analisada.

No gráfico densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) x frequência (Figura 12), os maiores acúmulos, das 15 espécies de madeira consideradas neste estudo, estão na faixa de densidade entre 0,6 e 0,8 g/cm<sup>3</sup>. Apenas duas entre as quinze espécies tiveram densidade aparente inferior a 0,4 g/cm<sup>3</sup> e superior a 1,0 g/cm<sup>3</sup>.

Na relação entre resistência a compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) x frequência (Figura 12), os valores médios de  $f_{c0}$  estão se acumulando entre 50 e 70 MPa. Apenas uma espécie possui  $f_{c0}$  próximo a 30 MPa e uma espécie superior a 80 MPa.

No gráfico módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ) x frequência (Figura 12), pode-se observar que as maiores concentrações estão localizadas entre 12000 MPa e 16000 MPa. Há duas espécies que possuem  $E_{c0}$  próximo de 8000 MPa e duas espécies com  $E_{c0}$  próximo de 22000 MPa.

Quanto ao gráfico dureza Janka paralela às fibras ( $f_{h0}$ ) x frequência (Figura 12), os valores médios com maiores acúmulos estão localizados entre 70 e 100 MPa. Consegue-se observar também, que cinco espécies de madeiras contêm  $f_{h0}$  inferior a 60 MPa e apenas uma espécie possui  $f_{h0}$  superior a 130 MPa.

Na relação entre dureza Janka perpendicular às fibras ( $f_{h90}$ ) x frequência (Figura 12), os maiores acúmulos estão na faixa de 40 e 90 MPa. Há 5 espécies de madeiras que possuem  $f_{h90}$  inferior a 40 MPa e 4 espécies com  $f_{h90}$  superior a 90 MPa.

Na Tabela 49 são apresentados os resultados do teste de correlação de Pearson entre as propriedades avaliadas e também da ANOVA (5% de significância).

**Tabela 49** – Resultados do teste de correlação de Pearson e da ANOVA.

	$\rho_{ap}$	$f_{c0}$	$E_{c0}$	$f_{h0}$	<b>Estat.</b>
$f_{c0}$	0,895				r de Pearson
	0,000				p-valor (ANOVA)
$E_{c0}$	0,781	0,889			r de Pearson
	0,001	0,000			p-valor (ANOVA)
$f_{h0}$	0,899	0,972	0,817		r de Pearson
	0,000	0,000	0,000		p-valor (ANOVA)
$f_{h90}$	0,903	0,925	0,802	0,956	r de Pearson
	0,000	0,000	0,000	0,000	p-valor (ANOVA)

Da Tabela 49, todas as correlações foram consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância), cabendo destacar ainda que ambas foram positivas (aumentos em uma variável implica em aumentos na outra associada) e superiores a 0,70, o que indica ser plausível considerar modelos lineares na estimativa dessas propriedades.

Na Tabela 50 são apresentados os resultados os modelos de regressão considerando-se a densidade aparente como estimadora das demais propriedades. Cabe destacar que os termos considerados significativos pela ANOVA em cada ajuste foram devidamente sublinhados, e os modelos de melhor ajuste por propriedade foram destacados em negrito.

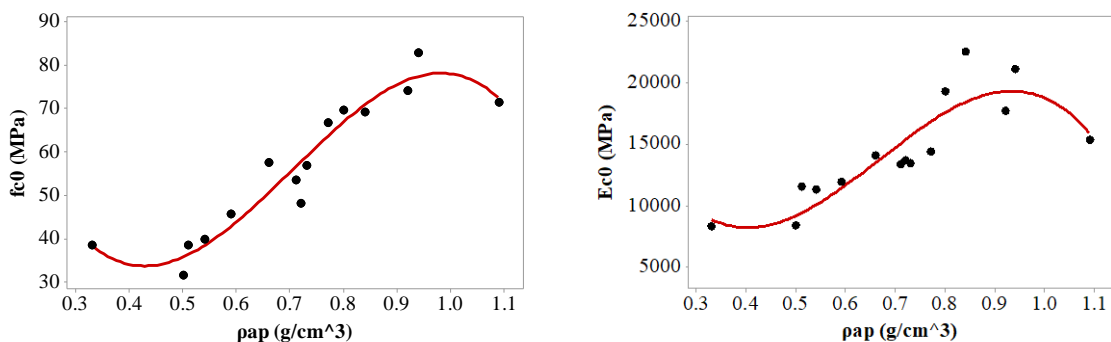
**Tabela 50** – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador.

Modelo	R <sup>2</sup> aj. (%)	P-valor
$f_{c0} = 5,881 + 70,88 \cdot \rho_{ap}$	78,58	0,000
$f_{c0} = 1,62 + 83,81 \cdot \rho_{ap} - 9,09 \cdot \rho_{ap}^2$	76,88	0,000
<b><math>f_{c0} = 154,8 - 660,8 \cdot \rho_{ap} + 1107 \cdot \rho_{ap}^2 - 523,0 \cdot \rho_{ap}^3</math></b>	<b>90,95</b>	0,000
$E_{c0} = 2606 + 16617 \cdot \rho_{ap}$	57,96	0,001
$E_{c0} = -6268 + 43534 \cdot \rho_{ap} - 18942 \cdot \rho_{ap}^2$	59,82	0,002
<b><math>E_{c0} = 36907 - 166363 \cdot \rho_{ap} + 295681 \cdot \rho_{ap}^2 - 147430 \cdot \rho_{ap}^3</math></b>	<b>73,96</b>	0,000
$f_{h0} = -14,91 + 136,5 \cdot \rho_{ap}$	79,44	0,000
$f_{h0} = 5,93 + 73,2 \cdot \rho_{ap} + 44,49 \cdot \rho_{ap}^2$	78,31	0,000
<b><math>f_{h0} = 259,5 - 1159 \cdot \rho_{ap} + 1892 \cdot \rho_{ap}^2 - 865,8 \cdot \rho_{ap}^3</math></b>	<b>88,41</b>	0,000
$f_{h90} = -42,69 + 145,9 \cdot \rho_{ap}$	80,20	0,000
$f_{h90} = 8,61 - 9,7 \cdot \rho_{ap} + 109,5 \cdot \rho_{ap}^2$	81,66	0,000
<b><math>f_{h90} = 217,1 - 1023 \cdot \rho_{ap} + 1628 \cdot \rho_{ap}^2 - 711,8 \cdot \rho_{ap}^3</math></b>	<b>87,19</b>	0,000

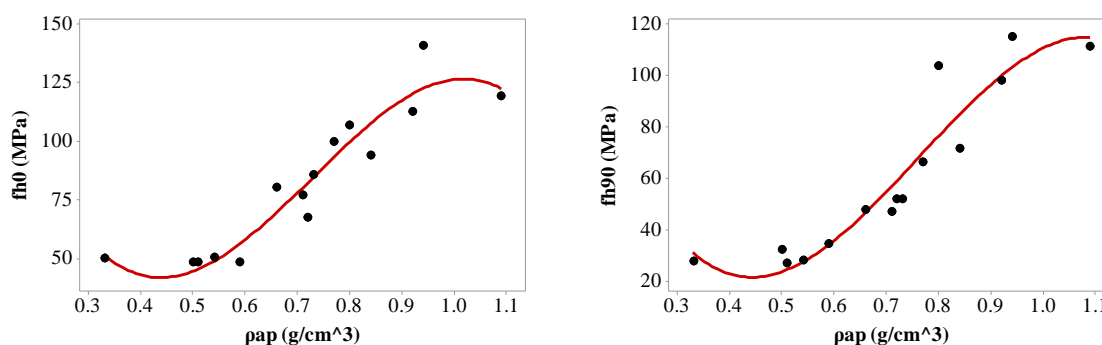
Os resultados do teste de normalidade sobre os resíduos da análise de variância dos modelos de regressão apresentados na Tabela 50 foram superiores ao nível de 5% de significância, o que valida os modelos da ANOVA.

Os modelos lineares foram considerados todos significativos, assim como esperado pelos níveis de correlação obtidos (Tabela 49), em que aumentos na densidade aparente explicam aumentos nas propriedades estimadas. Os modelos quadráticos não foram significativos na estimativa de nenhuma das propriedades (termos quadráticos não significativos, não sublinhados), entretanto, os modelos cúbicos (em negrito) sim, e forneceram os melhores ajustes (R<sup>2</sup> aj entre 72 e 91%), cujos gráficos dos de maior precisão são ilustrados na Figura 13.

**Figura 13** – Gráficos dos melhores ajustes (modelos cúbicos) por propriedade considerando a densidade aparente como estimador.







Da Figura 13, nota-se que os valores da densidade aparente estão compreendidos majoritariamente entre 0,50 e 0,90 g/cm<sup>3</sup>, pois apenas dois valores ficaram fora desse intervalo. Mesmo sendo apenas duas espécies, a ANOVA do modelo de regressão acusou os mesmos como sendo significativos, evidenciando que as propriedades não variem muito para densidade entre 0,35 e 0,50 g/cm<sup>3</sup> e entre 0,905 e 1,10 g/cm<sup>3</sup>, comportamento esse (notado em todas as propriedades estimadas) que pode ser mais bem explicado com a inclusão de maior número de espécies de madeira, devendo ser objetivo de trabalhos futuros.

Na Tabela 51 são apresentados os resultados dos modelos de regressão considerando-se a dureza na direção paralela às fibras como estimador da resistência e da rigidez à compressão na direção paralela, cabendo destacar, assim como feito anteriormente, que os termos considerados significativos pela ANOVA (5% de significância) foram devidamente sublinhados e que os melhores ajustes estão destacados em negrito.

**Tabela 51** – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador.

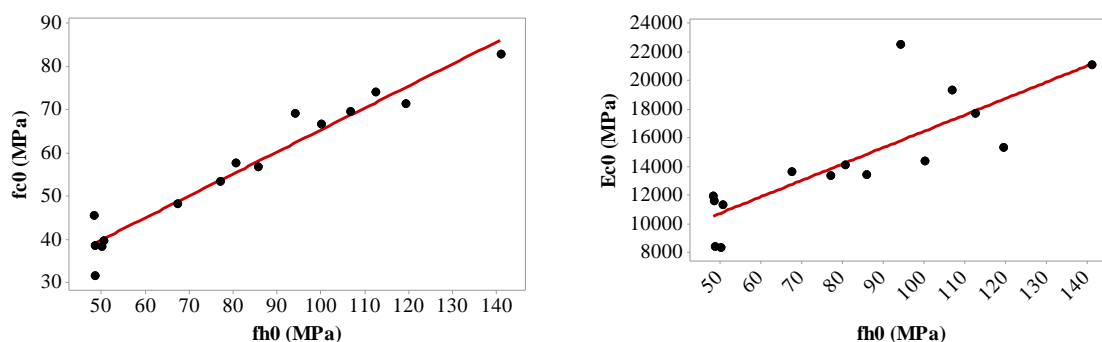
Modelo	R <sup>2</sup> aj. (%)	P-valor
<b><math>f_{c0} = 14,63 + 0,5073 \cdot \underline{f_{h0}}</math></b>	<b>93,98</b>	0,000
$f_{c0} = 2,661 + 0,8175 \cdot \underline{f_{h0}} - 0,001782 \cdot \underline{f_{h0}}^2$	94,51	0,000
$f_{c0} = 13,36 + 0,413 \cdot \underline{f_{h0}} + 0,00289 \cdot \underline{f_{h0}}^2 - 0,000017 \cdot \underline{f_{h0}}^3$	94,07	0,000
<b><math>E_{c0} = 5011 + 114,6 \cdot \underline{f_{h0}}</math></b>	<b>64,15</b>	0,000
$E_{c0} = 1277 + 211,4 \cdot \underline{f_{h0}} - 0,5560 \cdot \underline{f_{h0}}^2$	62,56	0,001
$E_{c0} = -6318 + 498,6 \cdot \underline{f_{h0}} - 3,87 \cdot \underline{f_{h0}}^2 + 0,01193 \cdot \underline{f_{h0}}^3$	59,53	0,004

Os resultados do teste de normalidade sobre os resíduos da análise de variância dos modelos de regressão apresentados na Tabela 51 foram superiores ao nível de 5% de significância, o que valida os modelos da ANOVA.

Com relação a  $f_{c0}$  e ao  $E_{c0}$  estimados pela  $f_{h0}$ , os melhores ajustes (Figura 14) consistiram no linear em ambas as propriedades (modelos polinomiais do 2 e 3 graus foram considerados não significativos pela ANOVA), em que aumentos na  $f_{h0}$  explicam aumentos na  $f_{c0}$  e no  $E_{c0}$ . Pelo excelente nível de precisão (R<sup>2</sup> aj = 93,98%) alcançado com o modelo para a estimativa da  $f_{c0}$ , esse é um indicativo de que a resistência à compressão paralela às fibras

de madeiras folhosas provenientes de florestas nativas possa ser estimada pela dureza na direção paralela. Para confirmar tal tendência de resultados faz-se necessário o desenvolvimento de trabalhos futuros que visem considerar outras espécies, corroborando para modelos que efetivamente possam ser inclusive incorporados em novas versões do documento normativo brasileiro de estruturas de madeira.

**Figura 14** – Gráficos dos melhores ajustes (modelos lineares) por propriedade considerando a dureza paralela às fibras como estimador.



Na Tabela 52 são apresentados os resultados dos modelos de regressão considerando-se a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador da resistência e da rigidez à compressão na direção paralela, e na Figura 15 são ilustrados os modelos de melhor ajuste.

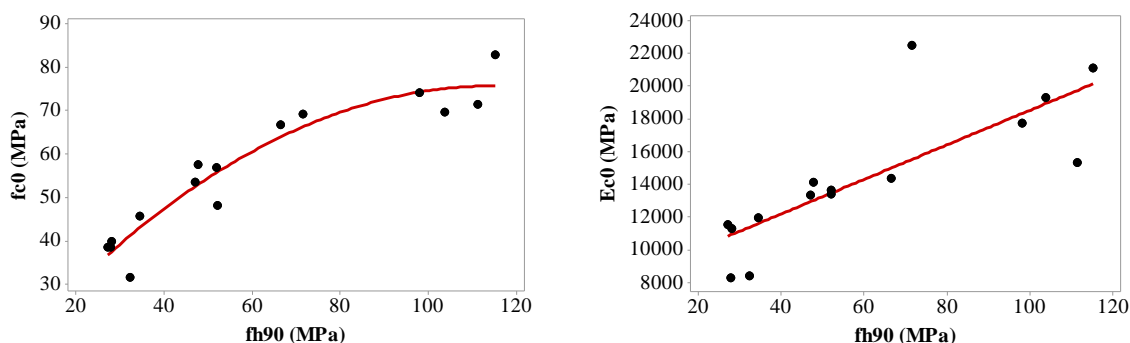
**Tabela 52** – Resultados dos modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador.

Modelo	R <sup>2</sup> aj. (%)	P-valor
$f_{c0} = 28,57 + 0,4538 \cdot f_{h90}$	84,54	0,000
$f_{c0} = 8,918 + 1,165 \cdot f_{h90} - 0,005078 \cdot f_{h90}^2$	<b>89,53</b>	0,000
$f_{c0} = -1,11 + 1,737 \cdot f_{h90} - 0,01460 \cdot f_{h90}^2 + 0,000047 \cdot f_{h90}^3$	88,83	0,000
$E_{c0} = 7966 + 105,7 \cdot f_{h90}$	<b>61,59</b>	0,000
$E_{c0} = 1709 + 332,1 \cdot f_{h90} - 1,617 \cdot f_{h90}^2$	67,20	0,000
$E_{c0} = 5481 + 116,8 \cdot f_{h90} + 1,964 \cdot f_{h90}^2 - 0,01762 \cdot f_{h90}^3$	64,72	0,002

Os resultados do teste de normalidade sobre os resíduos da análise de variância dos modelos de regressão apresentados na Tabela 52 foram superiores ao nível de 5% de significância, o que valida os modelos de ANOVA.

Assim como no caso da estimativa pela  $f_{h0}$ , considerando a  $f_{h90}$  como estimador, foi notada maior precisão na previsão da resistência à compressão na direção paralela às fibras do que no módulo de elasticidade, cabendo notar a interdependência entre essas duas propriedades ( $E_{c0}$ ,  $f_{c0}$ ). Para a  $f_{c0}$ , o melhor ajuste foi o modelo quadrático (considerado significativo pela ANOVA), entretanto, o ajuste linear forneceu R<sup>2</sup> aj próximo ao da equação quadrática, evidenciando que esse também pode ser usado na estimativa da  $f_{c0}$ . Os melhores ajustes são ilustrados na Figura 15.

**Figura 15** – Gráficos dos melhores ajustes por propriedade considerando a dureza perpendicular às fibras como estimador.



Na tentativa de melhorar a precisão dos ajustes obtidos anteriormente, foram considerados modelos de regressão múltipla ora dependentes das  $\rho_{ap}$  e a  $f_{h0}$  e ora do par de variáveis  $\rho_{ap}$  e a  $f_{h90}$ . Os resultados desses modelos são apresentados nas Tabela 53 e Tabela 54.

**Tabela 53** – Resultados dos modelos de regressão múltipla para a estimativa da  $f_{c0}$  e do  $E_{c0}$  em função da  $\rho_{ap}$  e da  $f_{h0}$ .

Modelo	R <sup>2</sup> aj. (%)	P-valor
$f_{c0} = 12,67 + 8,7 \cdot \rho_{ap} + 0,4555 \cdot f_{h0}$	93,75	0,000
$f_{c0} = -11,5 + 9,9 \cdot \rho_{ap} + 1,068 \cdot f_{h0} + 113 \cdot \rho_{ap}^2 + 0,00502 \cdot f_{h0}^2 - 1,99 \cdot \rho_{ap} \cdot f_{h0}$	93,80	0,000
$E_{c0} = 3861 + 5138 \cdot \rho_{ap} + 84,1 \cdot f_{h0}$	62,47	0,001
$E_{c0} = -8424 + 31720 \cdot \rho_{ap} + 172 \cdot f_{h0} + 14404 \cdot \rho_{ap}^2 + 1,99 \cdot f_{h0}^2 - 579 \cdot \rho_{ap} \cdot f_{h0}$	61,26	0,014

**Tabela 54** – Resultados dos modelos de regressão múltipla para a estimativa da  $f_{c0}$  e do  $E_{c0}$  em função da  $\rho_{ap}$  e da  $f_{h90}$ .

Modelo	R <sup>2</sup> aj. (%)	P-valor
$f_{c0} = 19,19 + 25,4 \cdot \rho_{ap} + 0,312 \cdot f_{h90}$	85,46	0,000
$f_{c0} = -1,3 + 60 \cdot \rho_{ap} + 0,824 \cdot f_{h90} - 76 \cdot \rho_{ap}^2 - 0,0067 \cdot f_{h90}^2 + 0,76 \cdot \rho_{ap} \cdot f_{h90}$	86,46	0,000
$E_{c0} = 5565 + 6501 \cdot \rho_{ap} + 69,3 \cdot f_{h90}$	60,39	0,002
$E_{c0} = -4715 + 21816 \cdot \rho_{ap} + 282 \cdot f_{h90} + 2175 \cdot \rho_{ap}^2 + 0,74 \cdot f_{h90}^2 - 374 \cdot \rho_{ap} \cdot f_{h90}$	64,53	0,010

Os resultados do teste de normalidade sobre os resíduos da análise de variância dos modelos de regressão apresentados nas Tabela 53 e Tabela 54 foram superiores ao nível de 5% de significância, o que valida os modelos da ANOVA. Os modelos lineares de regressão múltipla foram os de melhor ajuste (termos quadráticos não considerados significativos pela ANOVA), entretanto, se comparado com os modelos de regressão dependentes de uma única variável ( $\rho_{ap}$  ou  $f_{h0}$  ou  $f_{h90}$ ), nota-se que os R<sup>2</sup> aj. dos modelos de regressão múltipla não foram

significativamente superior, indicando o uso dos modelos ordinários como estimadores das propriedades avaliadas.

Portanto, considerando os melhores ajustes (modelos de regressão dependentes de uma única variável em negrito) por propriedade, foram utilizados esses modelos de regressão em outras espécies de madeiras, a fim de testar a precisão dos mesmos.

A escolha dessas outras espécies de madeira seguiu o seguinte critério: devem possuir a densidade aparente dentro da faixa de densidade aparente utilizada neste trabalho e as espécies têm que ser do grupo das folhosas. Assim, foi feita uma ampla busca na literatura a fim de procurar pesquisas que realizaram a caracterização das espécies de madeira que enquadram dentro desses critérios descritos anteriormente.

Na Tabela 55, encontra-se o nome dos pesquisadores, a espécie de madeira utilizada e as propriedades física e mecânica obtidas experimentalmente. Na Tabela 56 contém os valores estimados das propriedades físico-mecânicas das espécies descritas na Tabela 55, utilizando os modelos de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador (Tabela 50) e o valor do erro cometido na estimativa (equação 12).

**Tabela 55** – Pesquisas que realizaram a caracterização das espécies de madeiras do grupo das folhosas e contém densidade aparente entre 0,3 g/cm<sup>3</sup> e 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

Autores	Espécie	Resultados obtidos experimentalmente				
		$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{h0}$ (MPa)	$f_{h90}$ (MPa)
Christoforo <i>et al.</i> (2013)	Breu vermelho ( <i>Protium</i> sp.)	0,79	89	13142	121	82
Lahr <i>et al.</i> (2016)	Angelim saia ( <i>Vatairea</i> sp.)	0,76	64,2	19748	86,4	60,5
Christoforo <i>et al.</i> (2017b)	Castelo ( <i>Calycophyllum multiflorum</i> )	0,77	55	11188	101	65
Duarte, Lahr e Curvelo (2017)	Cumaru ( <i>Dipteryx odorata</i> )	1,09	93	23002	138	127
Christoforo <i>et al.</i> (2017)	Angico branco ( <i>Anadenanthera colubrina</i> )	0,71	44	14962	70	61
Aquino <i>et al.</i> (2018)	Copaíba ( <i>Copaifera</i> sp.)	0,70	50	12845	79	47
Silva <i>et al.</i> (2018)	Cupiúba ( <i>Goupia glabra</i> Aubl.)	0,84	62,07	15976	99,8	68,7
Morando <i>et al.</i> (2019)	<i>Qualea albiflora</i>	0,85	70,93	19143	111,1	74,2
Aquino <i>et al.</i> (2021)	Goiabão ( <i>Planchonella pachycarpa</i> )	0,93	48,4	18716	109,67	100
Soares <i>et al.</i> (2021)	Mandioqueira ( <i>Ruizterania albiflora</i> )	0,87	71,35	19200	107,87	67,73

**Tabela 56** – Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador e seu respectivo erro de cálculo.

Espécie	Modelo de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador				Erro de cálculo			
	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{h0}$ (MPa)	$f_{h90}$ (MPa)	$f_{c0}$ (%)	$E_{c0}$ (%)	$f_{h0}$ (%)	$f_{h90}$ (%)
Breu vermelho ( <i>Protium</i> sp.)	65,79	17326,0	97,81	74,02	26,08	31,84	19,16	9,73
Angelim saia ( <i>Vatairea</i> sp.)	62,41	16538,23	91,41	67,49	2,79	16,25	5,80	11,55
Castelo ( <i>Calycophyllum multiflorum</i> )	63,59	16810,09	93,57	69,67	15,56	50,25	7,36	7,19
Cumaru ( <i>Dipteryx odorata</i> )	72,45	15943,80	122,84	114,46	22,09	30,69	10,99	9,88
Angico branco ( <i>Anadenanthera colubrina</i> )	56,48	15075,24	80,49	56,68	28,37	0,76	14,98	7,08
Copaíba ( <i>Copaifera</i> sp.)	55,28	14768,10	78,31	54,57	10,56	14,97	0,87	16,11
Cupiúba ( <i>Goupia glabra</i> Aubl.)	70,84	18412,24	107,77	84,61	14,13	15,25	7,99	23,16
<i>Qualea albiflora</i>	71,74	18587,52	109,61	86,65	1,14	2,90	1,34	16,77
Goiabão ( <i>Planchonella pachycarpa</i> )	77,02	19337,55	121,61	101,23	59,14	3,32	10,89	1,23
Mandioqueira ( <i>Ruizterania albiflora</i> )	73,40	18889,04	113,09	90,60	2,87	1,62	4,84	33,77

Na Tabela 57 contém os valores estimados das propriedades físico-mecânicas, espécies descritas na Tabela 55, utilizando os modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador (Tabela 51) e o valor do erro cometido na estimativa.

**Tabela 57** - Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador e seu respectivo erro cometido na estimativa.

Espécie	Modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador		Erro de cálculo	
	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{c0}$ (%)	$E_{c0}$ (%)
Breu vermelho ( <i>Protium</i> sp.)	76,01	18877,6	14,59	43,64
Angelim saia ( <i>Vatairea</i> sp.)	58,46	14912,4	8,94	24,49
Castelo ( <i>Calycophyllum multiflorum</i> )	65,87	16585,6	19,76	48,24
Cumaru ( <i>Dipteryx odorata</i> )	84,64	20825,8	8,99	9,46
Angico branco ( <i>Anadenanthera colubrina</i> )	50,14	13033	13,96	12,89
Copaíba ( <i>Copaifera</i> sp.)	54,71	14064,4	9,41	9,49

Cupiúba ( <i>Goupia glabra</i> Aubl.)	65,26	16448,1	5,14	2,95
<i>Qualea albiflora</i>	70,99	17743,1	0,09	7,31
Goiabão ( <i>Planchonella</i> <i>pachycarpa</i> )	70,27	17579,2	45,18	6,07
Mandioqueira ( <i>Ruizterania albiflora</i> )	69,35	17372,9	2,80	9,52

Na Tabela 58 contém os valores estimados das propriedades físico-mecânicas, espécies descritas na Tabela 55, utilizando os modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador (Tabela 52) e o valor do erro cometido na estimativa.

**Tabela 58** - Resultado do melhor ajuste do modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador e seu respectivo erro cometido na estimativa.

Espécie	Modelo de regressão polinomiais considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador		Erro de cálculo	
	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{c0}$ (%)	$E_{c0}$ (%)
Breu vermelho ( <i>Protium</i> sp.)	70,30	16633,40	21,01	26,57
Angelim saia ( <i>Vatairea</i> sp.)	60,81	14360,85	5,27	27,28
Castelo ( <i>Calycophyllum</i> <i>multiflorum</i> )	63,19	14836,50	14,89	32,61
Cumaru ( <i>Dipteryx</i> <i>odorata</i> )	74,97	21389,90	19,39	7,01
Angico branco ( <i>Anadenanthera</i> <i>colubrina</i> )	61,09	14413,70	38,84	3,66
Copaíba ( <i>Copaifera</i> sp.)	52,46	12933,90	4,91	0,69
Cupiúba ( <i>Goupia glabra</i> Aubl.)	64,99	15227,59	4,70	4,68
<i>Qualea albiflora</i>	67,40	15808,94	4,97	17,42
Goiabão ( <i>Planchonella</i> <i>pachycarpa</i> )	74,64	18536	54,21	0,96
Mandioqueira ( <i>Ruizterania albiflora</i> )	64,53	15125,06	9,56	21,22

Pode-se observar na Tabela 56, Tabela 57 e Tabela 58 que o modelo proposto para estimar as propriedades de outras espécies utilizando a densidade aparente (Tabela 56), a dureza paralela (Tabela 57) e perpendicular (Tabela 58) como estimador, obteve um erro relativo absoluto situado entre 0,09 e 60%. Caso a ABNT 7190 (1997) fosse fundamentada no método das tensões admissíveis, o uso das equações para a estimativa do  $E_{c0}$  e da  $f_{c0}$  em função da  $\rho_{ap}$ , da  $f_{h0}$  e  $f_{h90}$  não deveria ser inferior a 0,5, cabendo destacar ainda que a própria norma não explicita o erro cometido nas estimativas das propriedades das quais expressa

relações, sendo tais incertezas abrangidas na adoção dos coeficientes de ponderação das ações combinadas e também das propriedades de resistência e de rigidez.

## 5. Conclusões

---

Pelos resultados obtidos da presente pesquisa, pode-se concluir que:

- os baixos coeficientes de variação determinados para as propriedades física e mecânicas neste estudo mostram a homogeneidade dos lotes de madeira utilizados;
- a madeira Caixeta ( $\rho_{ap,12} = 0,33 \text{ g/cm}^3$ ) e Guaiçara ( $\rho_{ap,12} = 1,09 \text{ g/cm}^3$ ) apresentaram, respectivamente, a menor e a maior densidade aparente, dentre as espécies estudadas nesta pesquisa;
- a espécie Cedro doce apresentou os menores valores médios das propriedades mecânicas estudadas, e de acordo com a sua resistência característica ( $f_{c0,k} = 23,11 \text{ MPa}$ ) determinada neste estudo, foi possível classificá-la como madeiras D20 das dicotiledôneas.
- a madeira Roxinho obteve os maiores valores médios de resistência dentre as espécies estudadas, e foi classificada como D60 das dicotiledôneas, conforme o valor médio obtido da resistência característica ( $f_{c0,k} = 65,60 \text{ MPa}$ );
- de acordo com o resultado do teste de correlação de Pearson, todas as correlações foram consideradas significativas pela ANOVA (5% de significância), cabendo destacar ainda que ambas foram positivas e superiores a 0,70;
- os modelos de regressão polinomiais considerando a densidade aparente como estimador foram considerados significativos tanto para os modelos lineares (assim como esperado pelos níveis de correlação obtidos no teste de correlação de Pearson), quanto para os cúbicos (forneceram os melhores ajustes –  $R^2$  aj entre 73 e 91%). Os modelos quadráticos não foram significativos pela ANOVA na estimativa de nenhuma propriedade;
- os modelos de regressão polinomiais considerando a dureza na direção paralela às fibras como estimador das propriedades mecânicas de  $f_{c0}$  e  $E_{c0}$ , obteve os melhores ajustes no modelo linear (significativos pela ANOVA), com  $R^2$  aj de 93,98% para  $f_{c0}$  e 64,15% para  $E_{c0}$ . Pelo excelente nível de precisão alcançado com o modelo para a estimativa da  $f_{c0}$ , esse é um indicativo de que a resistência a compressão paralela as fibras de madeiras folhosas provenientes de florestas nativas possam ser estimadas pela dureza na direção paralela às fibras;
- os modelos de regressão polinomiais, significativos pela ANOVA, considerando a dureza na direção perpendicular às fibras como estimador das propriedades mecânica ( $f_{c0}$  e  $E_{c0}$ ), notou-se a maior precisão na previsão da resistência a compressão na

direção paralela às fibras ( $R^2$  aj = 89,53% - modelo quadrático) do que no módulo de elasticidade ( $R^2$  aj = 61,59% - modelo linear).

- em relação aos modelos de regressão múltipla para a estimativa da  $f_{c0}$  e do  $E_{c0}$  ora em função da  $\rho_{ap}$  e da  $f_{h0}$ , ora em função da  $\rho_{ap}$  e da  $f_{h90}$ , os melhores ajustes obtidos foram dos modelos lineares, (termos quadráticos não foram considerados significativos pela ANOVA), entretanto, se comparado com os modelos de regressão dependentes de uma única variável ( $\rho_{ap}$  ou  $f_{h0}$  ou  $f_{h90}$ ), os  $R^2$  aj dos modelos de regressão múltipla não foram significativamente superior, indicando o uso dos modelos de regressão de uma única variável como estimadores das propriedades avaliadas;
- o erro relativo absoluto utilizando os modelos de regressão polinomiais de melhores ajustes e significativos pela ANOVA, para estimar propriedades de outras espécies de madeiras pertencentes ao grupo das folhosas e com densidade aparente entre 0,3 e 1,1 g/cm<sup>3</sup>, situou entre 0,09 e 60%.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se avaliar um maior número de espécies de madeira do grupo das folhosas com densidades entre 0,35 e 0,50 g/cm<sup>3</sup> e entre 0,905 e 1,10 g/cm<sup>3</sup>, corroborando para modelos que efetivamente possam ser incorporados em novas versões do documento normativo brasileiro de estruturas de madeiras.



## Referências bibliográficas

---

- ALMEIDA, T. H. **Estudo da estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ALMEIDA, D. H. **Estimativa de propriedades de resistência e rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. 2017. 100 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- ALMEIDA, J. P. B. **Relações entre propriedades de rigidez de madeiras do grupo das folhosas**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- ALMEIDA, D. H. *et al.* Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 203-207, 2014.
- ALMEIDA, D. H. *et al.* Determinação da rigidez de *Pinus elliotti* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba (SP), v. 44, n. 110, p. 303-309, jun. 2016.
- ALMEIDA, T. H. *et al.* Density as estimator of strength in compression parallel to the grain in wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 67-71, 2016b.
- ALMEIDA, T. H. *et al.* Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 6579-6590, 2017.
- ALMEIDA, J. P. B. *et al.* Analysis of relations between the moduli of elasticity in compression, tension, and static bending of hardwoods. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3278-3288, 2020.
- ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L. Mechanical Properties of Wood estimated by Colorimetric Technique. **LAP LAMBERT Academic Publishing**, 2018.
- ALVES, R. C. *et al.* Application of the nondestructive method of drill resistance for determination of the strength of brazilian tropical woods. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 13, n. 4, p. 69-73, 2013.
- ALVES, R. C.; SMITS, M. A.; CARRASCO, E. V. M. Estimativa da densidade e dureza Janka de madeiras tropicais por meio do método de penetração. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões – Mecânica Experimental**, v. 26, p. 71-77, 2016.
- ALVES, R. C.; PIZZOL, V. T.; CARRASCO, E. V. M. Estimativa do módulo de elasticidade das madeiras tropicais por meio do ultrassom. **II Congresso Latinoamericano de Estruturas de madeira – CLEM + CIMAD**, 2017.
- AQUINO, V. B. M. **Análise das relações entre propriedades físicas e mecânicas em diferentes regiões de extração da madeira de Cambará (*Erisma uncinatum* Warm.)**. 2019. 68 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.
- AQUINO, V. B. M. *et al.* Physical and Mechanical Characterization of *Copaifera* sp. wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 3, p. 55-58, 2018.

AQUINO, V. B. M. *et al.* Physical and mechanical characterization of *Planchonella Pachycarpa* wood species for use in structural purpose. **Wood Research**, v. 66, n. 2, p. 267-276, 2021.

ARBOUL. **Conheça mais sobre as espécies com que trabalhamos** – Quina Rosa. Disponível em: <http://arboul.com.br/loungearboul/>. Acesso em 13 de mar. de 2021.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; ANDRADE, A. Utilization of a thermomechanical process to enhance properties of hardwood used for flooring. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, p. 223-231, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Estudo Setorial 2009 Ano Base 2008**. Disponível em: <https://abimci.com.br/wp-content/uploads/2019/04/estudo-setorial-2009.pdf>. Acesso em 09 de mar. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 107 p., 1997.

BAAR, J.; TIPPNER, J.; RADEMACHER, P. Prediction of mechanical properties – Modulus of rupture and modulus of elasticity – of five tropical species by nondestructive methods. **Maderas. Ciencia y tecnologia**, v. 17, n. 2, p. 239-252, 2015.

BARROS, M. M. Edifícios de madeira no Sul e Sudeste do Brasil: Uma tendência de redução do impacto ambiental. **UNICESUMAR**, 2020.

BC FOCUS. **Global Glued Laminated Timbers and Cross Laminated Timbers Market 2020-2025**. 2020. Disponível em: <https://bcfocus.com/global-glued-laminated-timbers-and-cross-laminated-timbers-market-2020-analysis-types-applications-forecast-and-covid-19-impact-analysis-2025/>. Acesso em 05 de mai. de 2021.

BLAKE, Sasha. **Case study: murray grove**. London: PrefabTimber, 2009. Disponível em: <https://rquerstret.wixsite.com/prefab-timber/murraygrove>. Acesso em 05 de mai. de 2021.

BLOG CIVILIZAÇÃO ENGENHARIA. **Conheça mais sobre a maior estrutura de madeira do Brasil!** Disponível em: <https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2017/10/20/conheca-mais-sobre-a-maior-estrutura-de-madeira-do-brasil/>. Acesso em 09 de mar. de 2021.

BLOG ENGENHEIRO MADEIREIRO. **A madeira laminada colada e suas curvas**. Disponível em: <http://engenheiromadeireiro.blogspot.com/2018/07/a-madeira-laminada-colada-e-suas-curvas.html>. Acesso em 05 de mai. de 2021.

CARDOSO, D. *et al.* Amazon plant diversity revealed by taxonomically verified species list. **Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 144, n. 40, p. 10695-10700, 2017.

CARRILLO, A. *et al.* Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 4, p. 675-679, 2011.

CARVALHO, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Fatigue in wood members for structural purpose. **Saarbrücken-Deutschland/Germany: Lambert Academic Publishing**, v. 1, 61p, 2018.

CASSIANO, C. *et al.* Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 457-468, 2013.

CAVALHEIRO, R. S. *et al.* Density as estimator of shrinkage for some brazilian wood species. **International Journal od Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 107-112, 2016.

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

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Characterization of tropical wood species for use in civil constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 3, n. 3, p. 98-103, 2013.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Estimative of wooden toughness by the apparent density and bending strength. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, n. 2, p. 49-55, 2014.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Shrinkage for some wood species estimated by density. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 23-27, 2016.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrine* wood specie. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 376-384, 2017.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Full characterization of *Calycophyllum multiflorum* wood specie. **Engenharia Agrícola**, v. 37, p. 637-643, 2017b.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Estimation of the characteristic value of wood strength. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 127-132, 2019.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Apparent density as na estimator of wood properties obtained in tests where failure is fragile. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 1, p. 105-112, 2020.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Estimation of wood toughness in brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 232-237, 2020b.

CORDEIRO JÚNIOR, C. R.; SILVA, W. C. R.; SOARES, P. T. M. L. USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Projectus**, v. 2, n. 4, p. 79-93, 2017.

COUTO, N. G. *et al.* Relação entre a resistência ao cisalhamento e a resistência à compressão paralela às fibras de madeiras folhosas. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 319-327, 2020.

CULTURA MIX. **Informações** – Quina Rosa. Disponível em: <https://flores.culturamix.com/informacoes/quina-rosa-arvore>. Acesso em 13 de mar. de 2021.

DIAS, A. **Centre Pompidou Metz** – Arquiteto Shigeru Ban. Blog Estruturas de Madeira. Disponível em: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2012/08/centre-pompidou-metz-arquiteto-shigeru.html>. Acesso em 05 de mai. de 2021.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 2000. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, v. 65, n. 2, p. 102-113, 2004.

DIAS, F. M. *et al.* Influence of the apparent density on the shrinkage of 43 tropical wood species. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 41, p. e30947-e30947, 2019.

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

DUARTE, B. B.; LAHR, F. A. R.; CURVELO, A. A. S. Caracterização física-mecânica e composição química da madeira de Cumaru (*Dipteryx odorata*). **Engenharia Industrial Madeireira** – Tecnologia, Pesquisa e Tendência, p. 100-111, 2017.

DUARTE, B. B. *et al.* Influence of Physical and Chemical Components on the Physical-Mechanical Properties of Tem Brazilian Wood Species. **Materials Research**, v. 23, n. 2, 2020.

FERREIRA, M. D. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim-pedra submetida a tratamento térmico. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 1, p. 3-7, 2019.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of European design principles to cross laminated timber. **Engineering Structures**, v. 171, p. 934-943, 2018.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL (FSC). **FSC: Facts & Figures**. FSC, 2019. Disponível em: <https://fsc.org/en/facts-figures>. Acesso em 08 de mar. de 2021.

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

FREITAS, J. F. *et al.* A preliminar study about the utilization of Cajueiro and Amescla for MDP Panels Production. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 2, p. 21-24, 2017.

GASKO, M.; ROSENBER, G. Correlation between hardness and tensile properties in ultra-high strength phase steels. **Materials Engineering**, v. 18, n. 4, p. 155-159, 2011

GROBÉRIO, M. P. **Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil**. 2000. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

GROBÉRIO, M. P.; LARH, F. A. R. Indicações para o emprego da madeira de espécies tropicais do Brasil. **Revista Madeira: arquitetura e engenharia**, ano 3, n. 8, 2002.

HEIN, P. R. G.; BRANCHERIAU, L. Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of *Eucalyptus* specimens. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 3, p. 333-342, 2018.

HOWARD, J. L.; JONES, K. C. **U.S. Timber Production, Trade, Consumption and Price Statistics, 1965-2013**. Madison, WI: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 91 p. 2016.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Angelim pedra. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/8.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/8.htm). Acesso em 10 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Caixeta. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/43-caixeta.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/43-caixeta.htm). Acesso em 10 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Cajueiro. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/56-giganteum.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/56-giganteum.htm). Acesso em 11 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Cambará. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/9-cambara.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/9-cambara.htm). Acesso em 11 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Castanheira. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/16-castanheira.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/16-castanheira.htm). Acesso em 12 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Cedro doce. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/29-a\\_madeira\\_de\\_cedro\\_apresenta\\_durabilidade\\_moderada\\_ao\\_ataque\\_de\\_organismos\\_xilofagos\\_fungos\\_e\\_inset.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/29-a_madeira_de_cedro_apresenta_durabilidade_moderada_ao_ataque_de_organismos_xilofagos_fungos_e_inset.htm). Acesso em 12 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Garapa. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/35-a\\_madeira\\_de\\_garapa\\_e\\_facil\\_de\\_ser\\_trabalhada\\_desde\\_que\\_se\\_use\\_ferramentas\\_apropriadas\\_devido\\_a\\_pres.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/35-a_madeira_de_garapa_e_facil_de_ser_trabalhada_desde_que_se_use_ferramentas_apropriadas_devido_a_pres.htm). Acesso em 13 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Garrote. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/50-garrote.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/50-garrote.htm). Acesso em 13 de mar. de 2021.

INSTITUTO de PESQUISA TECNOLÓGICAS – IPT. **Informações sobre madeiras** – Roxinho. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/49-roxinho.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/49-roxinho.htm). Acesso em 14 de mar. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA Madeiras Tropicais Brasileiras. **Brasília: IBAMA-LPF**, 1997a. 152p.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION – ITTO. **Pesquisar por espécie de madeira** – Andira (Andira spp). Disponível em: <http://www.tropicaltimber.info/specie/andira-andira-spp/#lower-content>. Acesso em 10 de mar. de 2021.

IULIANELLI, G. C. V.; TAVARES, M. I. B. Propriedades mecânicas de compósitos PVC/Pó de madeira. **10º CBPol**. 2009.

JANKOWSKY, I. P. (COORD.) Madeiras Brasileiras. **Caxias do Sul: Spectrum**, 1990. Vol. 1.172p.

LAHR, F. A. R. *et al.* Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 153-158, 2010.

LAHR, F. A. R. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas de três espécies de madeira provenientes de áreas certificadas da floresta amazônica. **Construindo**, v. 2, n. 2, p. 34-37, 2010b.

LAHR, F. A. R. *et al.* Full characterization of *Vatairea* sp wood specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 92-96, 2016.

LAHR, F. A. R. *et al.* Shear and longitudinal modulus of elasticity in wood: relations based on static bending tests. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 4, p. 433-437, 2017.

LAHR, F. A. R. *et al.* Models to estimate longitudinal compressive strength of brazilian hardwood based on apparent density. **BioResources**, v. 16, n. 1, p. 1373-1381, 2021.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 1ª ed. Nova Odessa: Plantarum, 385 p., 1992.

MAAS, P. J. M.; WESTRA, L. Y. A taxonomic survey of *Guatteria* section *Mecocarpus* including the genera *Guatteriopsis* and *Guatteriella* p.p. (*Annonaceae*). **Blumea-Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants**, v. 56, n. 2, p. 113-145, 2011.

MATOS, G. S.; MOLINA, J. C. Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190:1997 e ISO 13910:2005. **Revista Matéria**, v.21, n. 4, p. 1069-1079, 2016.

MEIRELLES, C. R. M. *et al.* **Evolução das Coberturas em Madeiras no Brasil**. Equador, CLEFA: 2005.

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

MOREIRA, A. P. *et al.* Toughness and impact strength in dynamic bending of wood as a function of the modulus of elasticity and the strength in compression to the grain. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 4, p. 61-67, 2017.

OLIVEIRA, S. M. *et al.* Caracterização anatômica macroscópica de madeiras comercializadas no município de Paragominas-PA. **1º Fórum de Anatomistas de madeiras da Amazônia – FAMAZON**, 2017.

PAVLINA, E. J.; TYNE, C. J. V. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 17, n. 6, p. 888-893, 2008.

REMADE. **Madeiras brasileiras e exóticas – Canela-parda**. Disponível em: <http://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/150/madeiras-brasileiras-e-exoticas/canela-parda>. Acesso em 11 de mar. de 2021.

RIBEIRO, E. S. **Comercialização de madeira serrada de florestas naturais em Mato Grosso: Um diagnóstico do setor de base florestal**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Faculdade de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

RIBEIRO, E. S. *et al.* Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.

RODRIGUES, D. A.; SILVEIRA, A. P.; CASTELLO, P. A. R. Determinação de propriedades físico-mecânicas da madeira de cinco espécies madeireiras da Amazônica Meridional. **Scientific Eletronic Archives**, v. 7, p. 52-58, 2014.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Avaliação de vigas de madeira laminada colada de Cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SILVA, C. E. G. *et al.* Influence of the procurement site on physical and mechanical properties of Cupiúba wood species. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 4118-4131, 2018.

SOARES, L. S. Z. R. et al. Estimativa de propriedades da madeira Mandioqueira pela frequência natural de vibração e pela densidade aparente. **Revista Matéria**, v. 26, n. 3, 2021.

SORIANO, J. et al. Propriedade de dureza da madeira. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, [S. I.], n. 26, 2019.

STANGERLIN, D. M. et al. Dureza Rockwell da madeira de três espécies amazônicas submetidas a ensaios de apodrecimento acelerado. **Ciência Rural**, v. 43, n. 4, p. 623-630, 2013.

STANT. **Ouso da madeira na construção civil: quais são as melhores aplicações?** Disponível em: <https://www.stant.com.br/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-quais-sao-as-melhores-aplicacoes/>. Acesso em 05 de mai. de 2021.

STEEGE, H. et al. The Discovery of the Amazonian tree flora with update checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports**, v. 6, n. 29549, p. 1-15, 2016.

TAQUES, A. C.; ARRUDA, T. P. M. Usinagem da madeira de Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*). **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 14, n. 1, p. 97-103, 2016.

TEIXEIRA, D. E. et al. Resistência à abrasão, dureza Janka e a correlação com outras propriedades em 14 espécies de madeiras tropicais brasileiras com potencial para utilização em pisos de madeira. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 2, p. 135-141, 2019.

TELES, R. F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente**. 2014. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestais) – Departamento de Engenharia Floresta, Universidade de Brasília, Brasília/Distrito Federal, 2014.

WOLENSKI, A. R. V. et al. Estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos. **Revista Matéria**, v. 24, n. 4, 2019.

YOJO, T. et al. Dureza Janka como estimador da densidade aparente e das resistências à flexão de compressão em Eucalipto. **Pesquisa Científica e Inovação Tecnológica das Engenharias**, v. 1, p. 158-166, 2019.

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, ano 3, n. 9, 2002.