

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

**AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES
COLORIMÉTRICAS E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE
MADEIRAS TROPICAIS**

Vinicius Borges de Moura Aquino

São Carlos
2021

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

**AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES
COLORIMÉTRICAS E PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE
MADEIRAS TROPICAIS**

Vinicius Borges de Moura Aquino

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

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: André Luis Christoforo

Coorientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Vinicius Borges de Moura Aquino, realizada em 01/10/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Prof. Dr. Julio Cesar Molina (UNESP)

Profa. Dra. Poliana Dias de Moraes (UFSC)

Prof. Dr. Fabiano Bianchini Batista (UFSJ)

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

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.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido irmão Igor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, ao Messias Meishu-Sama e aos meus antepassados e ancestrais pela permissão de retornar a São Carlos e ter a permissão de poder realizar mais uma etapa do meu desenvolvimento técnico e acadêmico.

Aos meus pais, Blair e Bernardina, e meus irmãos, Iure e Tatiana, pelo carinho e apoio devotados. Profunda gratidão por possibilitarem tornar real mais este sonho.

Ao amigo irmão André Luis Christoforo pela atenção, pelo carinho e pela amizade. Uma pessoa maravilhosa que conheci nesta jornada acadêmica e que tenho profunda gratidão. Sei que és um grande amigo para a vida toda e um grande parceiro nessa longa e tortuosa vida acadêmica.

Ao grande amigo e parceiro Francisco Antonio Rocco Lahr, pelos inestimáveis préstimos envidados para a realização deste trabalho e pelos conhecimentos ministrados do alto de uma experiência única em madeiras e afins.

Aos profissionais e técnicos do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

À Raísse, uma pessoa ímpar que entrou em minha vida e tornou essa caminhada mais jovial e mais alegre, fazendo os dias mais bonitos e as noites mais acalentadoras, sendo minha mulher, minha amiga, companheira nesta linda jornada!

À UNIFESSPA, pelo afastamento a fim de poder continuar a aprimorar e sempre poder contribuir com o desenvolvimento do Sul e Sudeste do Pará.

A todos que, de alguma forma, propiciaram meu aprimoramento espiritual, material e acadêmico.

RESUMO

AQUINO, Vinicius Borges de Moura. **Avaliação da Correlação entre Propriedades Colorimétricas e Propriedades Físico-mecânicas de Madeiras Tropicais** 2021. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

Este trabalho objetivou avaliar o uso de propriedades colorimétricas (L^* , a^* e b^*) do sistema CIELAB e densidade aparente como estimadores de propriedades físicas e mecânicas de dez espécies de madeira tropical utilizando modelos de regressão multivariável quadrático. Os modelos foram avaliados seguindo os preceitos da ANOVA (Análise de Variância), bem como avaliada a normalidade dos dados. Para tanto, foram feitas análises de como as propriedades físicas e mecânicas e os parâmetros colorimétricos estão relacionados. Primeiro, foi feita avaliação da correlação entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas foi utilizado o teste de Pearson. A qualidade no ajuste foi medida por meio do coeficiente de determinação (R^2). Para entendimento de como as propriedades físicas e mecânicas e os parâmetros colorimétricos estão relacionados, foram gerados modelos lineares e quadráticos a uma variável independente (L^* ou a^* ou b^*). Após compreendido como relacionam-se os parâmetros colorimétricos e verificada a independência entre os parâmetros e propriedades, foram gerados modelos lineares e quadráticos a fim de ver se o uso de modelos quadráticos melhora a precisão das estimativas. Após a avaliação dos modelos quadráticos e lineares, procedeu-se a validação dos modelos multivariáveis quadráticos com dados de nove espécies e estimadas as propriedades da décima espécie e comparados com os dados experimentais. Após a validação, foram gerados modelos multivariáveis quadráticos com dados das dez espécies avaliadas e avaliado o erro das estimativas utilizando os modelos obtidos como estimadores de dados na literatura. De forma adicional, foi avaliado o comportamento da densidade aparente e sua relação com as propriedades físicas e mecânicas ao longo de toda a avaliação feita. O resultado da correlação de Pearson mostrou que os parâmetros colorimétricos, bem como a densidade aparente possuem significância na correlação, indicando relação significativa entre os fatores e as propriedades, porém com fraca correlação. Os modelos quadráticos, comparado aos modelos lineares, aumentaram a significância da estimativa, exceto para o parâmetro L^* . Os resultados dos modelos de validação mostraram que f_{c0} , f_{H0} e f_{H90} apresentaram boa qualidade no ajuste ($R^2 > 70\%$) utilizando somente os parâmetros. Adicionando a densidade, E_M também chegou em boa qualidade no ajuste, indicando a possibilidade de seu uso. Para os modelos com dados das 10 espécies, os modelos estimadores das propriedades f_{c0} , f_{H0} e f_{H90} , E_{c0} e E_M atingiram boa qualidade no ajuste utilizando somente os parâmetros colorimétricos, melhorando a precisão com a adição da densidade aparente como variável independente. A comparação com os dados estimados pelos modelos e os valores experimentais mostram que há possibilidade de se estimar propriedades físicas e mecânicas com o uso de parâmetros colorimétricos e densidade aparente.

Palavras-chave: Colorimetria, propriedades físicas e mecânicas, CIELAB, modelos de regressão.

ABSTRACT

AQUINO, Vinicius Borges de Moura. **Correlation Evaluation between Colorimetric Properties and Physico-mechanical Properties of Tropical Wood Species** 2021. 150 f. Thesis (Doctorate on Civil Engineering) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2021.

This work aimed to evaluate the use of colorimetric properties (L^ , a^* and b^*) of the CIELAB system and apparent density as estimators of physical and mechanical properties of ten tropical wood species using quadratic multivariable regression models. The models were evaluated following the ANOVA (Analysis of Variance) precepts, as well as the normality of the data. Therefore, analyzes were made of how physical and mechanical properties and colorimetric parameters are related. First, the correlation between colorimetric parameters and physical and mechanical properties was evaluated using the Pearson test. The goodness of fit was measured using the coefficient of determination (R^2). In order to understand how physical and mechanical properties and colorimetric parameters are related, linear and quadratic models with an independent variable (L^* or a^* or b^*) were generated. After understanding how the colorimetric parameters are related and verifying the independence between parameters and properties, linear and quadratic models were generated in order to see if the use of quadratic models improves the accuracy of the estimates. After the evaluation of the quadratic and linear models, the quadratic multivariable models were validated with data from nine species and the properties of the tenth species were estimated and compared with the experimental data. After validation, quadratic multivariable models were generated with data from the ten species evaluated and the error of the estimates was evaluated using the models obtained as data estimators in the literature. Additionally, the behavior of apparent density and its relationship with physical and mechanical properties was evaluated throughout the entire evaluation. The result of Pearson's correlation showed that the colorimetric parameters, as well as the apparent density have significance in the correlation, indicating a significant relationship between factors and properties, but with a weak correlation. Quadratic models, compared to linear models, increased the significance of the estimate, except for the L^* parameter. The results of the validation models showed that fc_0 , fH_0 and fH_{90} presented good quality in the fit ($R^2 > 70\%$) using only the parameters. Adding density, EM also arrived in good quality in the fit, indicating the possibility of its use. For the models with data from the 10 species, the estimator models of the properties fc_0 , fH_0 and fH_{90} , Ec_0 and EM achieved good quality in the adjustment using only the colorimetric parameters, improving the precision with the addition of the apparent density as an independent variable. The comparison with the data estimated by the models and the experimental values show that it is possible to estimate physical and mechanical properties using colorimetric parameters and apparent density.*

Keywords: Colorimetry, Physical and Mechanical Properties, CIELAB, regression models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Madeira de Cambará Rosa: (a) Tora e (b) casca e (c) corte tangencial.	22
Figura 2.2 - Cedro Amargo: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial	26
Figura 2.3 – Copaíba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.	28
Figura 2.4 – Angelim Araroba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.	29
Figura 2.5 – Cutiúba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.	32
Figura 2.6 – Tachi: corte tangencial	36
Figura 2.7 - Espaço de Cor CIE L*a*b*	36
Figura 3.1 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela.	47
Figura 3.2- Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.	47
Figura 3.3 – Espécime instrumentado com os relógios - Compressão paralela.	47
Figura 3.4 – Espécime instrumentado na prensa - Compressão paralela.	48
Figura 3.5 – Espécime de seção retangular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros) (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.	49
Figura 3.6 – Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.....	49
Figura 3.7 – Espécime instrumentado na máquina para ensaio – Tração Paralela – Vistas (a) frontal e (b) lateral.....	50
Figura 3.8 – Espécime – Tração normal às fibras. Seção lateral e corte (Dimensões em centímetros).....	51
Figura 3.9 - Espécime - Tração Normal - (a) Perspectiva e (b) vista superior.	51
Figura 3.10 - Ensaio - Tração Normal - Espécime (a) antes e (b) depois da ruptura.....	51
Figura 3.11 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras – (a) Detalhamento e (b) Perspectiva (Dimensões em centímetros).....	52
Figura 3.12 - Ensaio – Cisalhamento – Espécime (a) antes e (b) depois.	52
Figura 3.13 - Espécime – Fendilhamento: (a) vista superior e (b) corte (Dimensões em centímetros).....	53
Figura 3.14 – Espécime – Fendilhamento – Vistas (a) superior e (b) perspectiva.	53
Figura 3.15 - Ensaio - Fendilhamento - Espécime antes (a) e depois o ensaio (b).....	54
Figura 3.16 – Espécime – Flexão estática (dimensões em cm).	55
Figura 3.17 - Diagrama força x deslocamento para a determinação do módulo de elasticidade na flexão estática simples.	55
Figura 3.18 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão.	55
Figura 3.19 - Ensaio – Flexão Estática Simples – Espécime instrumentado (a) durante o ensaio e (b) após o ensaio.	56
Figura 3.20 – Espécime – Dureza Janka - (a) Vista Superior e (b) Corte (Dimensões em centímetros).....	57
Figura 3.21 - Esquema do ensaio de dureza Janka (Dimensões em milímetros).	57
Figura 3.22 – Ensaio – Dureza Janka – Direção paralela às fibras – Espécime (a) antes e (b) após o ensaio.....	57
Figura 3.23 – Ensaio – Dureza Janka – Direção normal às fibras – Espécime (a) antes e (b) após o ensaio.....	58
Figura 3.24 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade (dimensões em cm).....	58
Figura 3.25 – Ensaio – Tenacidade – Espécime (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio na máquina.	59
Figura 3.26 – Colorímetro Portátil – (a) Uso com a Impressora e pistola e (b) Uso somente com a pistola.....	60
Figura 3.27- Descrição das leituras preliminares – Espécime para colorimetria (Dimensões em milímetros).	60
Figura 3.28 – Leitura das propriedades colorimétricas das espécies (a) Angelim Ferro e (b) Cambará Rosa.	62
Figura 3.29 – Fluxograma da Metodologia Experimental desta Pesquisa	66

Figura 4.1 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RRT	93
Figura 4.2 – Gráfico de Pareto - Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RRT..	93
Figura 4.3 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RTT.....	94
Figura 4.4 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RTT	94
Figura 4.5 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{c0}	95
Figura 4.6 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{c0}	95
Figura 4.7 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t0}	96
Figura 4.8 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{t0}	96
Figura 4.9 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t90}	97
Figura 4.10 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{t90}	97
Figura 4.11 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{v0}	98
Figura 4.12 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{v0}	98
Figura 4.13 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{s0}	99
Figura 4.14 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{s0}	99
Figura 4.15 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_M	100
Figura 4.16 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_M	100
Figura 4.17 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{H0}	101
Figura 4.18 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{H0}	101
Figura 4.19 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{H90}	102
Figura 4.20 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{H90}	102
Figura 4.21 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – W	103
Figura 4.22 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – W	103
Figura 4.23 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{c0}	104
Figura 4.24 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{c0}	104
Figura 4.25 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{t0}	105
Figura 4.26 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{t0}	105
Figura 4.27 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_M	106
Figura 4.28 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_M	106
Figura A. 1 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Radial Total (RRT)	143
Figura A. 2 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Tangencial Total (RTT)	143
Figura A. 3 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).....	144
Figura A. 4 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}).....	144
Figura A. 5 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração normal às fibras (f_{t90})	145
Figura A. 6 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}).....	145
Figura A. 7 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao fendilhamento (f_{s0})	146
Figura A. 8 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_M)	146
Figura A. 9 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza paralela às fibras (f_{H0}).....	147

Figura A. 10 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza normal às fibras (f_{h90})	147
Figura A. 11 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a tenacidade (W)	148
Figura A. 12 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})	148
Figura A. 13 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0})	149
Figura A. 14 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na flexão estática (E_M)	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação de espécies de madeira usuais para uso na construção civil.....	21
Tabela 2.2 - Valores médios de propriedades da madeira de Cambará Rosa (<i>Erism uncinatum</i> Warm.) U = 12%.....	23
Tabela 2.3 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa U = 12%.....	23
Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr (2004).....	24
Tabela 2.5 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa.....	25
Tabela 2.6 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.....	25
Tabela 2.7 - Valores médios de propriedades da madeira de Cedro Amargo (<i>Cedrela odorata</i> L.) U = 12%.....	26
Tabela 2.8 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedro Amargo U = 12%.....	27
Tabela 2.9 - Valores das propriedades da madeira de Cedro Amargo (<i>Cedrela odorata</i> L.).....	27
Tabela 2.10 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Copaíba U = 12%.....	29
Tabela 2.11 - Valores médios de propriedades da madeira de Angelim-araroba (<i>Vataireopsis araroba</i> Ducke.) U = 12%.....	30
Tabela 2.12 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Araroba U = 12%.....	30
Tabela 2.13 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Catanudo U = 12%.....	31
Tabela 2.14 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cutiúba U = 12%.....	32
Tabela 2.15 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia.....	33
Tabela 2.16 – Resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia U = 12%.....	34
Tabela 2.17 - Valores médios de propriedades da madeira de Angelim Ferro (<i>Hymenolobium spp.</i>) U = 12%.....	35
Tabela 2.18 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Ferro.....	35
Tabela 3.1 - Propriedades físicas, mecânicas e colorimétricas das madeiras tropicais a serem avaliadas.....	44
Tabela 3.2 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 03 – Cambará Rosa.....	61
Tabela 3.3 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 07 – Cambará Rosa.....	61
Tabela 3.4 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 11 – Cambará Rosa.....	61
Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedrinho (<i>Erisma spp.</i>).....	67
Tabela 4.2 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa (<i>Erisma uncinatum</i>).....	68
Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedro Amargo (<i>Cedrela odorata</i>).....	70
Tabela 4.4 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Copaíba (<i>Copaifera spp.</i>).....	71
Tabela 4.5 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Araroba (<i>Vataireopsis araroba</i>).....	72

Tabela 4.6 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Catanudo (<i>Calophyllum spp.</i>).....	73
Tabela 4.7 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cutiúba (<i>Goupia paraensis</i>).	74
Tabela 4.8 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia (<i>Vatairea spp.</i>).....	75
Tabela 4.9 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Ferro (<i>Hymenolobium spp.</i>).....	76
Tabela 4.10 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Tachi (<i>Tachigali sp.</i>).	77
Tabela 4.11 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Radial Total (RRT)	78
Tabela 4.12 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Tangencial Total (RTT)	78
Tabela 4.13 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).....	79
Tabela 4.14 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}).....	79
Tabela 4.15 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração normal às fibras (f_{t90})	80
Tabela 4.16 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})	80
Tabela 4.17 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao fendilhamento (f_{s0})	80
Tabela 4.18 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_M).....	81
Tabela 4.19 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza paralela às fibras (f_{h0})	81
Tabela 4.20 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza normal às fibras (f_{h90}).....	81
Tabela 4.21 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a tenacidade (W).....	82
Tabela 4.22 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})	82
Tabela 4.23 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0})	83
Tabela 4.24 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na flexão estática (E_M).....	83
Tabela 4.25 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico L^*	84
Tabela 4.26 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico a^*	85
Tabela 4.27 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico b^*	86
Tabela 4.28 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para densidade aparente (ρ_{12}).....	87
Tabela 4.29 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico L^*	88
Tabela 4.30 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico a^*	89
Tabela 4.31 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico b^*	90
Tabela 4.32 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para densidade aparente (ρ_{12}).....	91
Tabela 4.33 – Avaliação dos modelos de regressão quadráticos para estimar as propriedades da madeira de Angelim Araroba	107
Tabela 4.34 - ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RRT	110
Tabela 4.35 - ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RRT	110
Tabela 4.36 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RTT	111

Tabela 4.37 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RTT	112
Tabela 4.38 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{c0}	113
Tabela 4.39 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{c0}	113
Tabela 4.40 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{i0}	114
Tabela 4.41 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{i0}	115
Tabela 4.42 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{i90}	116
Tabela 4.43 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{i90}	116
Tabela 4.44 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{v0}	117
Tabela 4.45 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{v0}	118
Tabela 4.46 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{s0}	119
Tabela 4.47 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{s0}	119
Tabela 4.48 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_M	120
Tabela 4.49 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_M	121
Tabela 4.50 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{h0}	122
Tabela 4.51 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{h0}	122
Tabela 4.52 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{h90}	123
Tabela 4.53 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{h90}	124
Tabela 4.54 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – W	125
Tabela 4.55 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – W	125
Tabela 4.56 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{c0}	127
Tabela 4.57 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{c0}	127
Tabela 4.58 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{i0}	128
Tabela 4.59 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{i0}	129
Tabela 4.60 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_M	130
Tabela 4.61 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_M	130
Tabela 4.62 – Propriedades Físicas, Mecânicas e Colorimétricas obtidas por Almeida (2017)	132
Tabela 4.63 – Estimativa dos modelos quadráticos e comparação com dados experimentais de Almeida (2017)	133

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	18
1.2 Justificativa	18
1.3 Descrição dos Capítulos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Uso da Madeira na Construção Civil	20
2.2 Características das Espécies de Madeira Tropical Avaliadas	21
2.2.1 Cedrinho (Erisma spp.)	21
2.2.2 Cambará Rosa (Erisma uncinatum Warm.)	22
2.2.3 Cedro Amargo (Cedrella odorata).....	26
2.2.4 Copaíba (copaifera spp.)	28
2.2.5 Angelim Araroba (Vataireopsis araroba Ducke.).....	29
2.2.6 Catanudo (Calophyllum spp.).....	31
2.2.7 Cutiúba (Goupia paraensis)	31
2.2.8 Angelim Saia (Vatairea spp.)	33
2.2.9 Angelim Ferro (Hymenolobium spp.)	34
2.2.10 Tachi (Tachigali spp.).....	35
2.3 Cor e Sistema CIELAB.....	36
2.4 Uso da Avaliação das Propriedades Colorimétricas em Madeira.....	37
2.5 Estimativa de Propriedades Físicas e Mecânicas com Uso de Colorimetria.....	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 Propriedades Físicas	44
3.1.1 Densidade Aparente	44
3.1.2 Retração da Madeira	45
3.2 Propriedades Mecânicas	46
3.2.1 Compressão Paralela às Fibras.....	46
3.2.2 Tração Paralela às Fibras.....	48
3.2.3 Tração Normal às Fibras	50
3.2.4 Cisalhamento Paralelo às Fibras	52
3.2.5 Fendilhamento Paralelo às Fibras	53
3.2.6 Flexão Estática	54
3.2.7 Dureza Janka.....	56
3.2.8 Tenacidade e Resistência ao Impacto na Flexão	58
3.3 Propriedades Colorimétricas	59
3.4 Análise Estatística	62
3.5 Resumo da Metodologia desta pesquisa.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1 Propriedades Físicas, mecânicas e Colorimétricas.....	67

4.2	Correlação entre Propriedades Físicas, Mecânicas, Parâmetros Colorimétricos e densidade aparente	78
4.3	Modelos de regressão Linear para relacionar Parâmetros Colorimétricos, densidade aparente e propriedades Físicas e mecânicas	83
4.4	Modelos de regressão Quadráticos para relacionar Parâmetros Colorimétricos, densidade aparente e propriedades Físicas e mecânicas	87
4.5	Validação dos modelos de regressão multivariáveis quadrático	92
4.5.1	Retração Radial Total	93
4.5.2	Retração Tangencial Total	94
4.5.3	Resistência à Compressão paralela às Fibras	95
4.5.4	Resistência à Tração Paralela às Fibras	96
4.5.5	Resistência à Tração Normal às Fibras	97
4.5.6	Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras	98
4.5.7	Resistência ao Fendilhamento	99
4.5.8	Resistência convencional no ensaio de flexão estática	100
4.5.9	Dureza Paralela às Fibras	101
4.5.10	Dureza Normal às Fibras	102
4.5.11	Tenacidade	103
4.5.12	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	104
4.5.13	Módulo de elasticidade na Tração paralela às fibras	105
4.5.14	Módulo de elasticidade na Flexão Estática	106
4.5.15	Estimativa das propriedades de Angelim Araroba	107
4.6	Modelos de Regressão multivariáveis para o Total das Espécies	109
4.6.1	Retração Radial Total	109
4.6.2	Retração Tangencial Total	111
4.6.3	Resistência à Compressão paralela às Fibras	112
4.6.4	Resistência à Tração Paralela às Fibras	114
4.6.5	Resistência à Tração Normal às Fibras	115
4.6.6	Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras	117
4.6.7	Resistência ao Fendilhamento	119
4.6.8	Resistência convencional no ensaio de flexão estática	120
4.6.9	Dureza Paralela às Fibras	122
4.6.10	Dureza Normal às Fibras	123
4.6.11	Tenacidade	125
4.6.12	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	126
4.6.13	Módulo de elasticidade na Tração paralela às fibras	128
4.6.14	Módulo de elasticidade na Flexão Estática	129
4.7	Avaliação de Precisão dos modelos quadráticos multivariável	131
5.	CONCLUSÕES	135
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
A.	APÊNDICE	143

1. INTRODUÇÃO

A madeira, um material natural e renovável, tem seu uso muito difundido na indústria, móveis, materiais esportivos e na construção civil. O material possui grande aplicação em estruturas, com propriedades de resistência e rigidez próximas às de outros materiais utilizados na construção civil, como aço e concreto (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003; DIAS; LAHR, 2004; CHRISTOFORO *et al.*, 2019).

A utilização deste material é muito difundida em outros países, como os Estados Unidos da América, que produzem 88 milhões de metros cúbicos de madeira para uso interno em edificações e produção de papel e celulose e têm um consumo *per capita* de produtos engenheirados à base de madeira, como o compensado, OSB e painéis lamelados, variando em torno de 3,8 metros quadrados por ano (HOWARD; JONES, 2016).

Os produtos engenheirados à base de madeira também são utilizados como material de construção a fim de melhorar o conforto térmico e acústico das habitações, com o uso de painéis compensados tendo desempenho superior quanto ao conforto térmico em relação a outros materiais conhecidos para isolamento, como celulose e poliestireno expandido (VALDENEBRO; DIETRICH; INO, 2019).

Também se destaca o uso de madeira como alternativa construtiva com o uso de painéis engenheirados em sistema construtivo industrializado, como o *wood frame*, com construções mais leves, de maior controle tecnológico. O sistema é composto pela estrutura de madeira tratada, sistema de isolamento, membrana hidrofugante, painel OSB, gesso acartonado e acabamento (IBEN, 2021).

A madeira também tem a capacidade de efetuar a fixação de dióxido de carbono. Para a construção de 100 m² de área construída em madeira, utiliza-se uma média de 13 m³ a 24 m³ desse material. E para este volume de madeira, ocorre uma fixação de 30 kg de CO₂ a 55 kg de CO₂ por metro quadrado de área construída com de *Pinus* e *Eucalyptus* (ARAUJO *et al.*, 2020).

O Brasil é o país que dispõe do maior número de espécies de madeira (8715 espécies) no mundo, sendo 4333 delas endêmicas do país (BEECH *et al.*, 2017). O Brasil também possui uma larga cobertura vegetal, ocupando 58% de seu território (493,5 milhões de hectares). Parte dessa cobertura vegetal é composta de madeiras de reflorestamento (7,84

milhões de hectares) como *Pinus* e *Eucalyptus*, mostrando assim a importância do uso de um material tão abundante no país para fins estruturais (CONAB, 2019; IBÁ, 2017).

Por questões relativas ao processo de colonização brasileira, houve predomínio no país por construções em tijolos trazidos pelos portugueses. Em regiões onde houve predomínio de outros povos colonizadores de origem germânica, como a região Sul, observa-se um maior número de construções em madeira em comparação ao restante do país (MEIRELLES *et al.*, 2005).

Considerando o tamanho da reserva florestal do Brasil e a abundância de madeira, o seu uso pode ser uma oportunidade para a construção de residências a fim de reduzir o déficit habitacional estimado de 5,876 milhões de domicílios em 2019 (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2021).

A fim de melhorar a utilização da madeira para fins estruturais e não estruturais na construção civil e na indústria, como mobiliário, instrumentos esportivos e musicais, deve-se conhecer suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas (DIAS; LAHR, 2004; MORANDO *et al.*, 2019). A fim de tornar mais acessível o uso da madeira, sua caracterização pode ser efetuada por uso de métodos não destrutivos, como o uso de técnicas de vibração (longitudinal ou transversal) ou por uso de colorimetria e uso da densidade aparente para estimar suas propriedades físicas e mecânicas (ALMEIDA *et al.*, 2016; KERBER *et al.*, 2016; SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

A Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) prescreve indicações executivas para o uso de madeira para fins estruturais, predições normativas para projeto, critérios de dimensionamento, controle tecnológico, bem como questões relativas à caracterização física e mecânica, por métodos destrutivos da madeira, podendo ser de três tipos: completa; mínima, feita para espécies pouco conhecidas e simplificada, feita para espécies usuais.

A caracterização completa das propriedades da madeira para fins estruturais é feita determinando-se onze propriedades físicas e mecânicas: densidade aparente na umidade padrão (12%) ($\rho_{12\%}$), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e normal às fibras (f_{c90}), resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) e normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e resistência de embutimento paralelo às fibras (f_{e0}), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{co,m}$), módulo de elasticidade na tração paralela às fibras ($E_{to,m}$) e módulo de elasticidade convencional na flexão estática (E_M). Outros ensaios, como dureza paralela às fibras (f_{H0}) e normal às fibras (f_{H90}), resistência ao fendilhamento (f_{s0}) e tenacidade (W) são utilizados. Todos estes ensaios são feitos em equipamentos de alto valor, disponíveis apenas em grandes centros de pesquisas (CHRISTOFORO *et al.*, 2017; LAHR *et al.*, 2017; AQUINO *et al.*, 2018; MORANDO *et al.*,

2019). Assim, ressalta-se a importância do uso de técnicas não destrutivas, em especial a colorimetria.

A partir da caracterização efetuada, a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece que as madeiras devem ser classificadas em classes de resistência, com o objetivo de organizar as madeiras com propriedades similares e orientar o profissional técnico responsável na escolha do material mais adequado à sua necessidade. A norma possui 4 classes de resistência (C20, C30, C40 e C60) para as madeiras folhosas. Esta classificação é feita em função do valor característico obtido na resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$).

A cor, sendo uma propriedade organoléptica, é utilizada para diversos fins em relação à madeira. Pode ser utilizada para classificação da madeira em função de suas fases de crescimento, como cerne e alburno (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003). Também avalia-se em nível comercial que madeiras tropicais ou madeiras tratadas termicamente possuem maior atratividade comercial por terem uma cor mais escura, significando que o material possui maior durabilidade (MÉNDEZ-MEJÍAS; MOYA, 2016; PAES *et al.*, 2016).

A fim de normatizar a avaliação de cor em materiais, tem-se na literatura a norma americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D2244 (ASTM, 2016), denominada *Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates*, a qual é baseada no sistema CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), onde define-se a cor com base em três parâmetros: L* (escala entre as cores branco e preto), medindo luminosidade; a* (escala entre as cores verde e vermelho); b* (escala entre cores amarelo e azul).

Na literatura, verifica-se o uso de colorimetria para avaliação dos efeitos de modificação térmica na madeira, intemperismo natural e artificial, bem como a caracterização colorimétrica de espécies de madeira (KOKUTSE *et al.*, 2006; BARCÍK; GAŠPARÍK; RAZUMOV, 2015; CUI *et al.*, 2015; TORNIAINEN; ELUSTONDO; DAGBRO, 2016; GARAY; INOSTROZA; DUCAUD, 2017; MEINTS *et al.*, 2017; STRAŽE; FAJDIGA; GOSPODARIČ, 2018; MAHDIYANTI; INAGAKI; TSUCHIKAWA, 2019; HADI *et al.*, 2020).

Porém, existem poucos trabalhos na literatura versando sobre o uso dos parâmetros colorimétricos como estimadores das propriedades físicas e mecânicas de madeiras (ALMEIDA, 2017; MARINI *et al.*, 2021).

Para tanto, deve-se observar que para utilizar os parâmetros colorimétricos como estimadores das propriedades físicas e mecânicas é importante que compreenda como os parâmetros colorimétricos se relacionam com tais propriedades. Na literatura, o trabalho de

Almeida (2017) utilizou modelos multivariáveis quadráticos para fazer relacionar os parâmetros colorimétricos e propriedades mecânicas. De forma adicional, houve a adição do fator estimador a densidade aparente no teor de umidade igual a 12% (ρ_{12}). Porém, há limitações no número de espécies avaliadas, bem como no número de propriedades avaliadas, bem como qual é a relação entre as propriedades físicas e mecânicas e os parâmetros colorimétricos. Desta forma, faz-se necessário compreender como os parâmetros colorimétricos relacionam-se com as propriedades físicas e mecânicas a fim de propor modelos estimadores das propriedades físicas e mecânicas com o uso de parâmetros colorimétricos, bem como o uso da densidade aparente, a fim de verificar a influência da densidade aparente juntamente com os parâmetros colorimétricos para geração de tais modelos.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo da presente pesquisa é avaliar a possibilidade de se estimar propriedades físicas e mecânicas em função de fatores colorimétricos do espaço de cor CIELAB (sistema CIE L*a*b*) com o uso de modelos de regressão multivariáveis, utilizando dez espécies de madeira tropical do Brasil, sendo duas espécies por classe de resistência (C20, C30, C40, C50 – atribuído, C60) atribuída em norma Brasileira (ABNT, 1997) e serão caracterizadas quinze propriedades físicas e mecânicas. As espécies analisadas foram: Cedrinho (*Erismia* sp.), Cambará Rosa (*Erismia uncinatum*), Cedro Amargo (*Cedrella odorata*), Copaíba (*Copaifera* sp.); Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*); Catanudo (*Calophyllum* sp.); Cutiúba (*Goupia paraensis*); Angelim Saia (*Vatairea* sp.); Angelim Ferro (*Hymenolobium* sp.); Tachi (*Tachigali* sp.).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os trabalhos apresentados na literatura versando sobre estimativa de propriedades físicas e mecânicas de madeiras em função de fatores colorimétricos são reduzidos. Observando tais trabalhos (ALMEIDA, 2017; MARINI *et al.*, 2021), verificou-se que o primeiro apresenta 5 espécies de madeiras tropicais, uma de cada classe de resistência, porém versa sobre apenas 5 propriedades físicas e mecânicas, não trazendo os dados para todas as propriedades mecânicas preconizadas pela norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) e utilizadas para a caracterização completa de uma espécie de madeira, bem como outras propriedades usuais para comparação e classificação de espécies. O segundo trabalho versa sobre madeira de espécie conífera, avaliando apenas duas propriedades.

Assim, faz-se necessário avaliar de forma ampla e representativa para todas as propriedades mecânicas preconizadas em Norma a possibilidade de se estimar tais propriedades em função de fatores colorimétricos, utilizando duas espécies por classe de resistência.

Também é importante mostrar resultados robustos e inéditos à literatura, a fim de torna-los uma opção viável na caracterização de novas espécies de madeira da vasta flora nacional, desconhecidas para uso estrutural e não estrutural, e tais espécies poderem ser alternativas às atuais espécies comerciais, protegendo-as de extração predatória, bem como do perigo de extinção das usuais.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho desenvolvido está organizado e dividido em seis capítulos.

O capítulo 1 introduz o assunto da presente pesquisa, contextualizando-a, apresenta os objetivos geral e específicos e traz a justificativa para a execução da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são apresentadas pesquisas relacionadas ao uso de madeira na construção civil, as características das espécies de madeiras estudadas neste trabalho, o sistema de cores e o sistema CIELAB de avaliação, os trabalhos da literatura versando sobre o uso de propriedades colorimétricas na avaliação de madeira, bem como o uso de colorimetria para estimar propriedades físicas e mecânicas da madeira.

O capítulo 3 expõe a metodologia utilizada neste trabalho.

O capítulo 4 exhibe os resultados e discussões, com base na literatura científica correlata.

O capítulo 5 evidencia as conclusões sobre este trabalho.

O capítulo 6 mostra as referências bibliográficas utilizadas no corpo do texto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica objetivou apresentar os estudos sobre o uso da madeira na construção civil, o estado da arte para as espécies de madeira a serem analisadas, os usos para o uso de colorimetria para a madeira, bem como mostrar os estudos efetuados utilizando propriedades colorimétricas para estimar propriedades físicas e mecânicas da madeira.

2.1 USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Considerando os diversos usos da madeira na construção civil, bem como a intrínseca variabilidade da madeira, com diferentes propriedades para as diversas espécies de madeira existentes (HOMAN; JORISSEN, 2004; KOKUTSE *et al.*, 2006; FERNANDO; FRANGI; KOBEL, 2016), faz-se necessário classificar os diferentes usos da madeira em três grandes grupos: Construção Civil Pesada, Construção Civil Leve e Assoalhos (NAHUZ *et al.*, 2013).

Dentro da Construção Civil Pesada, esta divide-se em Externa, com uso da madeira para estruturas pesadas, estacas, ripas e vigas; e Interna, com uso para confecção de terças, vigas, colunas, caibros e ripas. Para Construção Civil Leve, tem-se as seguintes divisões: Externa e Uso Temporário, com uso para mourões, andaimes, tábuas, caixilhos, guarnições e formas para concreto e Interna. Esta subdivide-se em Decorativa, utilizada em molduras, rodapés e sarrafos; Estrutural, uso em ripas, caibros e alçapões; Esquadrias, usada em portas, venezianas, batentes e janelas; Utilidade Geral, com uso em tábuas, forros, guarnições, arremates, rodapés e corrimões. Em Assoalhos, seu uso é feito em tacos, parquetes, blocos e estrados (NAHUZ *et al.*, 2013). A

Tabela 2.1 mostra algumas espécies usuais para cada uso, conforme classificação acima.

Tabela 2.1 – Classificação de espécies de madeira usuais para uso na construção civil.

Construção Civil Pesada		
Externa	Angelim-pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>)	
	Jatobá (<i>Hymenaea spp</i>)	
	Garapa (<i>Apuleia leiocarpa</i>)	
Interna	Cedroarana (<i>Cedrelinga cateniformis</i>)	
	Quaruba (<i>Vochysia spp.</i>)	
	Tachi (<i>Tachigali myrmecophilla</i>)	
Construção Civil Leve		
Externa e Uso Temporário	Mandioqueira (<i>Ruizterania albiflora</i>)	
	Tuari (<i>Couratari spp.</i>)	
	Tuari-vermelho (<i>Cariniana micrantha</i>)	
Interna	Decorativa	Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)
		Oiticica-amarela (<i>Clarisia racemosa</i>)
		Pau-roxo (<i>Peltogyne spp.</i>)
	Utilidade geral	Cedroarana (<i>Cedrelinga cateniformis</i>)
		Mandioqueira (<i>Ruizterania albiflora</i>)
		Tuari-vermelho (<i>Cariniana micrantha</i>)
	Esquadrias	Angelim-pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>)
		Curupixá (<i>Micropholis venulosa</i>)
		Muiracatiara (<i>Astronium lecointei</i>)
Assoalhos		
Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)		
Pau-roxo (<i>Peltogyne spp.</i>)		

Tatajuba (*Bagassa guianensis*)

Fonte: Adaptado de Nahuz *et al.* (2013).

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES DE MADEIRA TROPICAL AVALIADAS

2.2.1 CEDRINHO (*ERISMA SPP.*)

A madeira de Cedrinho tem ocorrência na América do Sul tropical, principalmente na região amazônica. Possui cerne marrom avermelhado, com o alburno com cor distinta do cerne. Possui densidade variando entre 0,5 g/cm³ e 0,7 g/cm³, sendo uma espécie alternativa na produção de laminados de madeira e com bom desempenho a organismos xilófagos (RICHTER; DALLWITZ, 2000; REIS *et al.*, 2014).

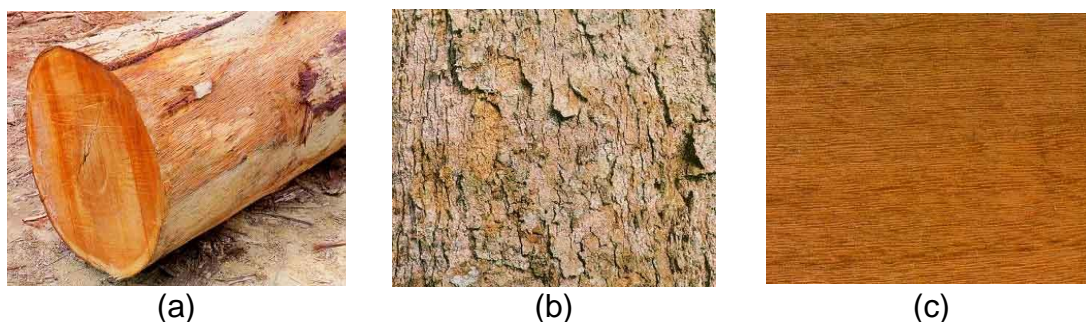
Zangiácomo e Lahr (2002) avaliaram o emprego de Cedrinho (*Erisma spp.*) para confecção de elementos estruturais de madeira lamelada colada. A madeira de Cedrinho apresentou bom desempenho, com boa permeabilidade aos adesivos Cascophen e à base de mamona para as pressões de prensagem 0,8 MPa e 1,2 MPa.

Ziglio *et al.* (2017) avaliou a molhabilidade, polaridade de superfície e perda de massa de *Erisma spp.* após termorreificação feita em três temperaturas (100°C, 140°C, 180°C). Também foi avaliado o impacto da termorreificação com a inoculação do fungo *Picnoporus sanguineus*. A molhabilidade foi reduzida em temperaturas abaixo de 180°C, com baixa polaridade superficial, sem apresentar alterações visuais significativas. A madeira *Erisma spp.* apresentou boa estabilidade mássica e menor molhabilidade, comparada à madeira não modificada termicamente.

2.2.2 CAMBARÁ ROSA (*ERISMA UNCINATUM WARM.*)

O Cambará Rosa (Figura 2.1) é uma árvore com altura variando entre 6 e 20 metros, para fins comerciais: tronco reto, cilíndrico e casca com espessura entre 0,2 cm e 0,5 cm. Possui cerne marrom avermelhado e alburno marrom acinzentado, com anéis de crescimento pouco distintos. Para preservação, possui retenção de preservativos variando entre 308 kg/m³ e 446 kg/m³. Possui serragem fácil, aplainamento fácil e superfície de acabamento lisa. Sua ocorrência predomina na floresta amazônica, nos estados brasileiros do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia (LORENZI, 1998; BRASIL, 2021).

Figura 2.1 - Madeira de Cambará Rosa: (a) Tora e (b) casca e (c) corte tangencial.



Fonte: Brasil (2021).

A madeira de Cambará Rosa pode ser utilizada na Construção Civil em portas, ripas, molduras, guarnições, forros, andaimes, formas para concreto, mobiliário e embalagens (IPT, 2019).

A norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta em seu anexo E valores médios de algumas propriedades usuais da madeira Cambará Rosa: densidade aparente a 12% de umidade (umidade de referência) (ρ_{12}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento (f_v) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), utilizando 11 corpos de prova para cada propriedade. Os respectivos valores são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores médios de propriedades da madeira de Cambará Rosa (*Erismia uncinatum* Warm.) U = 12%.

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

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

Dias e Lahr (2004) caracterizaram a espécie de madeira Cambará Rosa, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.3, com a descrição das propriedades na Tabela 2.4. Os autores classificaram o Cambará Rosa na classe C20 das madeiras folhosas, conforme a Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.3 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)
544	3,6	7,2	38	58	2,6	9,6

f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,4	67	8783	9172	8842	64	39	4,9

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas investigadas por Dias e Lahr (2004).

Propriedades	Simbologia	Unidade
Densidade aparente	ρ_{ap}	kg/m ³
Retratibilidade radial	$\epsilon_{r,2}$	%
Retratibilidade tangencial	$\epsilon_{r,3}$	%
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	MPa
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	MPa
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	MPa
Resistência ao cisalhamento	f_{v0}	MPa
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	MPa
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	MPa
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	MPa
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_M	MPa
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	N
Dureza normal às fibras	f_{H90}	N

Tenacidade	W	N.m
------------	---	-----

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Araújo (2007) caracterizou a madeira de Cambará Rosa (*Erismia uncinatum* Warm.) utilizando as normas de ensaio COPANT, determinando as seguintes propriedades: densidade básica (ρ_{bas}), contração tangencial ($\epsilon_{r,3}$) e radial ($\epsilon_{r,2}$), dureza Janka paralela (f_{H0}) e transversal (f_{H90}) às fibras, resistência e rigidez a esforços mecânicos de compressão (f_{c0} e E_{c90}), flexão estática (f_M e E_{M0}), tração (f_{wt90}), fendilhamento (f_{v0}) e cisalhamento (f_{s0}). Os ensaios foram realizados na umidade padrão de 12%. Os resultados são apresentados na

Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa.

ρ_{bas} (g/cm ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_M (MPa)
0,46	4,3	10,0	49,72	3,0	87,5
f_{v0} (MPa)	f_{s0} (MPa)	E_{c90} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (N)	f_{H90} (N)
3,7	7,8	5,6	10787	5786	3864

Fonte: Araújo (2007).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019) também apresenta valores para as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa (*Erismia uncinatum* Warm.), onde são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará.

Densidade aparente a 15% de umidade	590 kg/m ³
-------------------------------------	-----------------------

Densidade básica (massa seca da amostra / volume saturado)	480 kg/m ³
Retratibilidade radial	3,3%
Retratibilidade tangencial	7,7%
Retratibilidade volumétrica	12,5%
Resistência na flexão estática (madeira verde)	72,50 MPa
Resistência na flexão estática (madeira com 15% de umidade)	80,20 MPa
Módulo de elasticidade na flexão estática (madeira verde)	9365 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira verde)	33,70 MPa
Resistência na compressão paralela às fibras (madeira com 15% de umidade)	42,20 MPa
Módulo de elasticidade na compressão paralela (madeira verde)	12101 MPa
Trabalho absorvido no impacto (madeira com 15% de umidade)	21,50 J
Dureza Janka (madeira verde)	3,84 kN
Resistência à tração normal às fibras (madeira verde)	4,20 MPa
Resistência ao fendilhamento (madeira verde)	0,50 MPa

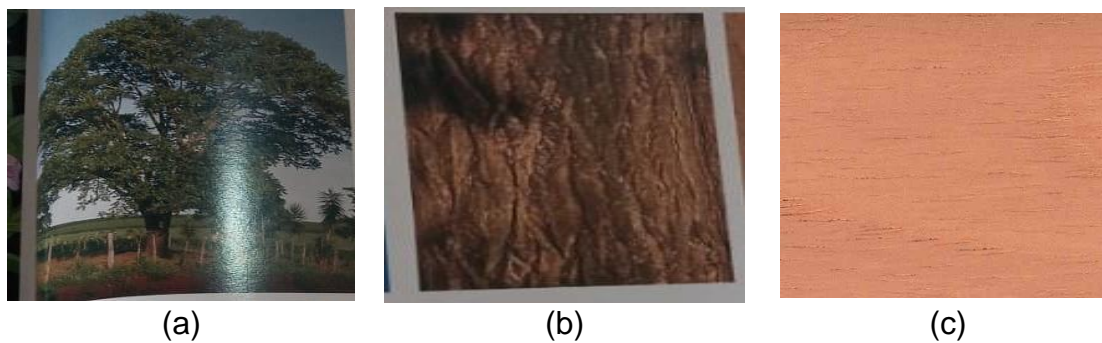
Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2018).

Aquino *et al.* (2021a) avaliaram a madeira de Cambará extraída de três locais distintos no Brasil (Vera – MT, Mucajaí – RR e Região Sul de Rondônia) a fim de ver a influência do local de extração nas propriedades físicas e mecânicas. A madeira de Vera foi classificada na classe C40, a madeira de Mucajaí foi classificada na classe C20 e a madeira oriunda do sul de Rondônia foi classificada na classe C30 conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Os autores verificaram que não houve influência do local de extração para esta espécie.

2.2.3 CEDRO AMARGO (*CEDRELLA ODORATA*)

O Cedro Amargo (Figura 2.2) possui altura entre 25 m e 35 m, com altura comercial de 10 m, diâmetro variando entre 25 cm a 150 cm. Cerne e alburno possuem cores distintas, com o primeiro sendo rosa e o segundo, branco-rosado. Seu tronco é retilíneo, com cheiro agradável e macio quanto ao corte manual. Possui pequena tendência ao encurvamento, rachaduras e encanoamento durante secagem (LORENZI, 1998; BRASIL, 2021).

Figura 2.2 - Cedro Amargo: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial



Fonte: Brasil (2021).

A Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) também apresenta valores para propriedades física e mecânicas para a espécie *Cedrela odorata* L., os quais são densidade aparente na umidade de referência (ρ_{12}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t0}), resistência ao cisalhamento (f_v) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). A Tabela 2.7 apresenta os valores das propriedades.

Tabela 2.7 - Valores médios de propriedades da madeira de Cedro Amargo (*Cedrela odorata* L.) U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
504	39,0	58,1	3,0	6,1	9839

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Dias e Lahr (2004) efetuaram a caracterização da espécie de madeira Cedro Amargo, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na

Tabela 2.8. Os autores classificaram a espécie *Cedrela odorata* na classe C30 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.8 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedro Amargo U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
514	4,0	5,3	38	59	2,8	10,2	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)

0,5	62	9601	10033	9176	53	31	4,1
-----	----	------	-------	------	----	----	-----

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Valverde e Moyá (2014) avaliaram a correlação entre a variação colorimétrica e a qualidade da superfície com a madeira *Cedrela odorata* submetida ao envelhecimento artificial e natural em ambiente tropical com dois revestimentos, sendo verniz e resina poliuretana. Os resultados mostraram variações nos parâmetros colorimétricos da madeira antes da exposição ao intemperismo. Também encontraram que os revestimentos causavam aumento do brilho da cor nas madeiras após o intemperismo.

Jesus, Logsdon, Finger (2015) efetuaram a caracterização mecânica da madeira *Cedrela odorata*, apresentando as propriedades usuais para uso em fins estruturais, determinando a densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{ap}), resistência característica à compressão ($f_{c0,k}$), tração ($f_{t0,k}$) e cisalhamento ($f_{v0,k}$) paralela às fibras, módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras médio ($E_{c0,m}$) e característico ($E_{c0,k}$). A madeira de Cedro Amargo foi classificada na classe C30 das madeiras folhosas. A Tabela 2.9 ilustra os dados obtidos.

Tabela 2.9 - Valores das propriedades da madeira de Cedro Amargo (*Cedrela odorata* L.).

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{t0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	$E_{c0,k}$ (MPa)
501	30,5	44,6	6,2	10261	8841

Fonte: Jesus, Logsdon, Finger (2015).

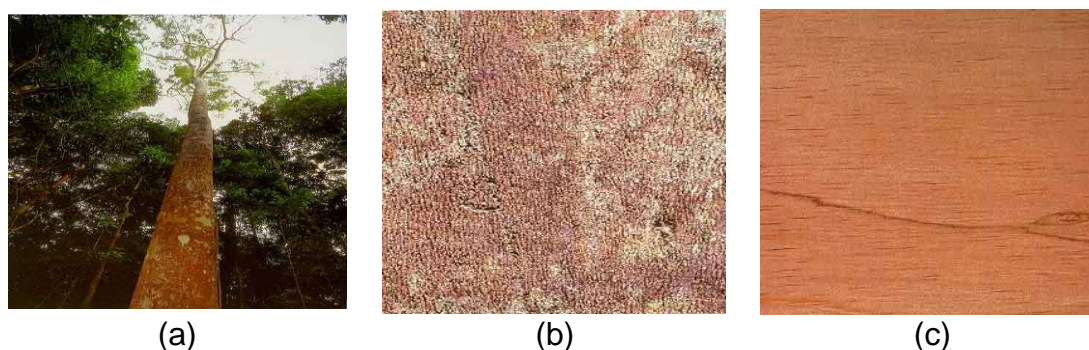
Fernandes *et al.* (2018) efetuaram a análise física e anatômica da madeira de Cedro amargo com fins para uso na indústria moveleira, determinando o teor de umidade, densidade básica e variação dimensional. O teor de umidade encontrado para o lote foi de 15,98%. A densidade básica foi de 0,41 g/cm³. Os valores para contração tangencial, radial, longitudinal e volumétrica foram de 9,05%, 7,37%, 0,22% e 15,94%, respectivamente, com coeficientes de variação (CV) entre 3,13% e 18,72%. Os valores de inchamento tangencial, radial, longitudinal e volumétrico foram 9,96%, 7,96%, 0,22% e 18,97%, respectivamente, com coeficientes de variação entre 3,44% e 18,75%. Os autores encontraram fatores de anisotropia de contração e inchamento de 1,23 e 1,26, respectivamente, com coeficientes de variação abaixo de 9%, sendo essa madeira classificada como excelente para confecção de móveis, barcos, aparelhos musicais e aparelhos esportivos.

2.2.4 COPAÍBA (*COPAIFERA SPP.*)

A madeira de Copaíba (*Copaifera spp.*) (Figura 2.3), com ocorrência nos biomas Mata Atlântica e Amazônia no Brasil, presente também na América Central, Bolívia, Colômbia, Guiana Francesa, Paraguai, Peru e Venezuela, possui cerne e alborno pouco distintos a indistintos, com cor cinza-rosado e textura média. Possui brilho moderado, cheiro agradável após o corte e moderadamente dura quando cortada manualmente (IPT, 2019; BRASIL, 2021;).

Pinheiro e Lahr (2001) avaliaram a influência da preservação com o uso de preservativo CCA nas propriedades de resistência e rigidez da madeira de Copaíba. A resistência característica à compressão paralela às fibras sem preservativo CCA ($f_{c0,k,p}$) foi de 73,6 MPa e a resistência característica à compressão paralela às fibras com preservativo CCA ($f_{c0,k,CCA}$) de 79,0 MPa. Vale ressaltar que os teores de umidade para cada amostra foram 12,5% e 7,4%, respectivamente. Corrigindo os valores de resistência para o teor de umidade padrão (12%), não se encontrou efeito significativo do preservativo CCA na resistência à compressão paralela às fibras característica de Copaíba.

Figura 2.3 – Copaíba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.



Fonte: Brasil (2021).

Dias e Lahr (2004) determinaram as propriedades físicas e mecânicas da espécie de madeira Copaíba, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.10. Os autores classificaram a espécie *Copaifera spp.* na classe C40 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.10 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Copaíba U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)
695	3,5	7,0	50	71	3,3	14,6

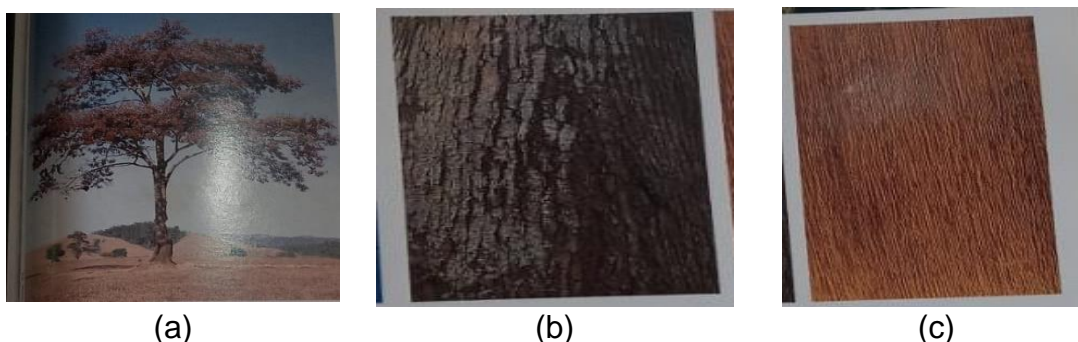
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,6	87	14012	14627	13572	86	51	6,4

Fonte: Dias e Lahr (2004).

2.2.5 ANGELIM ARAROA (*VATAIREOPSIS ARAROA DUCKE.*)

O Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba* Ducke) (Figura 2.4) tem altura entre 20 e 35 m, com tronco ereto e cilíndrico, com diâmetro entre 60 e 90 cm. Tem ocorrência no Sul da Bahia, Espírito Santo, Norte do Rio de Janeiro, vale do rio Doce em Minas Gerais e na mata Atlântica. É madeira moderadamente pesada (0,68 g/cm³), dura, com alta resistência ao apodrecimento e ataque de cupins (LORENZI, 1998).

Figura 2.4 – Angelim Araroba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.



Fonte: Lorenzi (1998).

A Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) divulga valores para propriedades físicas e mecânicas para a espécie *Vataireopsis araroba* Ducke., as quais são: densidade aparente na umidade de referência (ρ_{12}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento (f_v) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). A Tabela 2.11 apresenta os valores das propriedades.

Tabela 2.11 - Valores médios de propriedades da madeira de Angelim-araroba (*Vataireopsis araroba* Ducke.) U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
688	50,5	69,2	3,1	7,1	12876

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Dias e Lahr (2004) realizaram a caracterização da espécie de madeira Angelim Araroba, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.12. Os autores classificaram

a espécie *Vataireopsis araroba* Ducke. na classe C40 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Branco *et al.* (2014) avaliaram a influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas da madeira de Angelim Araroba. Foram avaliados a resistência à compressão (f_{c0}), tração (f_{t0}) e cisalhamento (f_{v0}) paralelas às fibras, a resistência convencional na flexão estática (f_M), os módulos de elasticidade na compressão (E_{c0}), a tração paralela às fibras (E_{t0}) e o módulo de elasticidade convencional na flexão estática (E_M) nos teores de umidade de 12% (umidade padrão) e acima de 30% (ponto de saturação das fibras). Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey mostraram uma diferença significativa nas propriedades na umidade acima de 30% comparadas com os valores obtidos na umidade de 12%, reduzindo em média 16%.

Tabela 2.12 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Araroba U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
674	3,8	6,0	50	70	3,1	12,0	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,4	75	12587	11661	11457	66	42	7,0

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Christoforo *et al.* (2020) avaliaram o uso da densidade aparente a 12% de umidade como estimador de propriedades frágeis da madeira com o uso de modelos de regressão, como a resistência à tração normal às fibras (f_{t90}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e resistência ao fendilhamento (f_{s0}). Os resultados da Análise de Variância dos modelos, bem como o valor do coeficiente de determinação (R^2), mostraram que não foi possível estimar tais propriedades em função da densidade aparente.

2.2.6 CATANUDO (*CALOPHYLLUM* SPP.)

A madeira de Catanudo (*Calophyllum spp.*) tem altura entre 23 e 30 m, com tronco de 40 a 60 cm de diâmetro. Tem ocorrência na região Amazônica Brasileira até o norte do estado brasileiro de Santa Catarina. Possui densidade variando entre 0,6 g/cm³ e 0,8 g/cm³, com fácil trabalhabilidade e durabilidade quando exposta (LORENZI, 1998; RICHTER; DALLWITZ, 2000).

Dias e Lahr (2004) realizaram a caracterização da espécie de madeira de Catanudo, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.13. Os autores classificaram a espécie *Calophyllum spp.* na classe C40 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.13 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Catanudo U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
804	5,4	8,4	51	68	3,6	16,4	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,6	83	13029	15499	14729	85	59	13,1

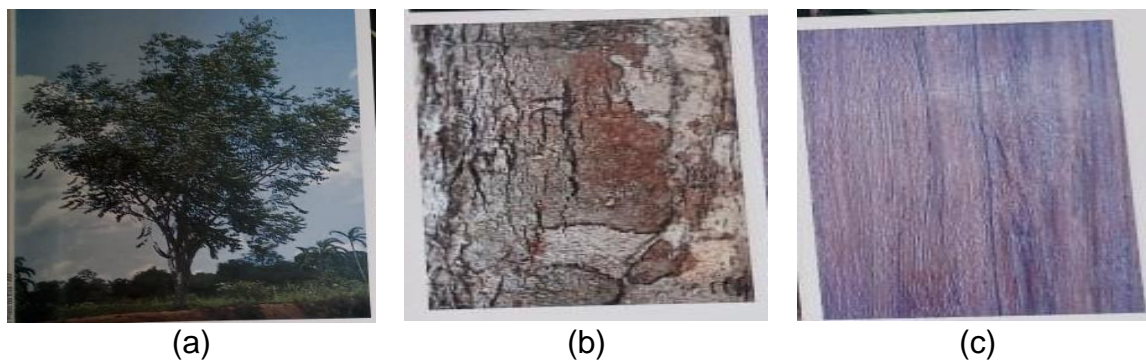
Fonte: Dias e Lahr (2004).

2.2.7 CUTIÚBA (*GOUPIA PARAENSIS*)

A Cutiúba

Figura 2.5) pode atingir entre 10 m a 35 m de altura, tendo tronco ereto e cilíndrico, com 50cm a 80cm de diâmetro. Cerne e albúrnio são pouco distintos, com o cerne tendo cor marrom-avermelhado-claro e o albúrnio, amarelo-avermelhado. Possui cheiro característico desagradável, sendo dura ao corte manual. Tem ocorrência na região Amazônica Brasileira. É uma madeira pesada, com densidade igual a 0,87 g/cm³. (LORENZI, 1998; BRASIL, 2021;).

Figura 2.5 – Cutiúba: (a) Espécime e (b) casca e (c) corte tangencial.



Fonte: Lorenzi (1998).

Dias e Lahr (2004) realizaram a caracterização da espécie de madeira de Cutiúba, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.14. Os autores classificaram a espécie *Goupia paraensis* na classe C40 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.14 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cutiúba U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
1152	4,9	7,8	79	108	3,5	17,9	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,2	127	18238	16569	16984	164	118	16,2

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Lahr *et al.* (2010) avaliaram a influência da densidade na dureza paralela e normal às fibras para espécies tropicais Brasileiras, incluindo a espécie *Goupia paraensis*. Os autores obtiveram valores de 1,17 g/cm³ para a densidade aparente a 12% de umidade, 165 MPa para dureza paralela às fibras e 132 MPa para a dureza normal às fibras, com os coeficientes de variação sendo inferiores a 20%. Os modelos obtidos foram significativos, com coeficiente de determinação R² variando entre 59 e 77%, indicando a possibilidade de seu uso.

Almeida *et al.* (2020) analisaram a relação entre o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}), tração paralela às fibras (E_{t0}) e convencional na flexão estática (E_M) utilizando 30 espécies de madeira tropical Brasileiras, entre elas *Goupia paraensis*. Para a madeira de Cutiúba, obtiveram os seguintes valores: E_{c0} igual a 18317 MPa; E_{t0} igual a 15093 MPa e E_M igual a 16851 MPa, com coeficientes de variação (CV) entre 14 e 19% para os três módulos. Os autores encontraram equivalência entre E_{t0} , E_M e E_{c0} , com base nos dados obtidos pela Análise de Variância (ANOVA).

Wolenski *et al.* (2020) examinaram a estimativa da resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$) em função da resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), utilizando 40 espécies de madeiras tropicais Brasileiras, dentre elas, *Goupia paraensis*, e modelos de regressão. A norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta uma relação ($f_{v0,k} = 0,12 * f_{c0,k}$) e foi avaliado se essa relação ainda era significativa. Foi efetuada a caracterização experimental das 40 espécies para essas duas propriedades, utilizando 12 espécimes para cada propriedade de cada espécie. Para a madeira de *Goupia paraensis*, foram encontrados valores de 55,28 MPa para $f_{c0,k}$ e 12,63 MPa para $f_{v0,k}$. Os

autores encontraram que o modelo geométrico ($f_{v0,k} = 0,76 * (f_{c0,k})^{0,76}$) foi o modelo com melhor ajuste ($R^2 = 52,89\%$).

2.2.8 ANGELIM SAIA (*VATAIREA SPP.*)

O Angelim Saia é considerado uma madeira medianamente pesada, com ocorrência em diversas regiões do Brasil, desde os estados de Tocantins, Goiás e Bahia até o estado de São Paulo. Possui boa trabalhabilidade, com altura comercial em torno de 11 m (LAHR *et al.*, 2016; BRASIL, 2021).

Dias e Lahr (2004) caracterizaram a espécie de madeira de Angelim Saia, avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.15. Os autores classificaram a espécie *Vatairea spp.* na classe C40 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.15 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
764	4,3	8,0	63	101	2,2	14,6	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,9	110	24081	20821	17561	84	62	4,5

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Stolf *et al.* (2014) analisaram a influência do teor de umidade na propriedade de tenacidade da madeira de Angelim Saia (*Vatairea spp.*), para os teores de 0%, 6%, 12%, 20% e 30%, considerando a orientação dos anéis de crescimento em relação à direção da força de impacto. O resultado da análise estatística (ANOVA e teste de Tukey) indicou que a umidade foi significativa para a tenacidade na madeira de Angelim Saia, com aumento significativo da tenacidade com teor de umidade acima de 20%.

Lahr *et al.* (2016) efetuaram a caracterização da espécie *Vatairea spp.* conforme a Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), bem como avaliaram a possibilidade de se estimar as propriedades físicas e mecânicas em função da densidade aparente com o uso de modelos de regressão. Os modelos com melhor ajuste foram o logarítmico e o geométrico, estimando a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), dureza paralela (f_{H0}) e normal (f_{H90}) às fibras, com coeficiente de determinação (R^2) inferior. A Tabela 2.16 apresenta os valores encontrados para as propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 2.16 – Resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	
760	4,2	8,2	64,2	96,0	3,0	15,0	1,8	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	E_{c90} (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,8	113,0	19748	20214	18561	93,6	86,4	60,5	4,3

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

2.2.9 ANGELIM FERRO (*HYMENOLOBIMUM SPP.*)

O Angelim Ferro (*Hymenolobium spp.*) é uma árvore com altura comercial de 13,5 m, tronco retilíneo e diâmetro médio de 56,4 cm. Possui cerne e albarno distintos, com o albarno marrom-pálido e o cerne marrom-avermelhado. É uma madeira de densidade elevada e com boa trabalhabilidade (BRASIL, 2021).

A Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta valores médios para propriedades física e mecânicas para a espécie *Hymenolobium spp.*, os quais são: densidade aparente na umidade de referência (ρ_{12}), resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência à tração na direção paralela às fibras (f_{t0}), resistência à tração normal às fibras (f_{t0}), resistência ao cisalhamento (f_v) e o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). A Tabela 2.17 apresenta os valores das propriedades.

Tabela 2.17 - Valores médios de propriedades da madeira de Angelim Ferro (*Hymenolobium spp.*) U = 12%.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)
1170	79,5	117,8	3,7	11,8	20827

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

Dias e Lahr (2004) caracterizaram a espécie de madeira Angelim Ferro avaliando quinze propriedades físicas e mecânicas, apresentadas na Tabela 2.4. Os valores encontrados pelos autores estão dispostos na Tabela 2.18. Os autores classificaram a espécie *Hymenolobium spp.* na classe C60 das folhosas, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 2.18 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Ferro.

$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m ³)	$\epsilon_{r,2}$ (%)	$\epsilon_{r,3}$ (%)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{v0} (MPa)	
1163	5,0	8,3	82	115	3,5	19,4	
f_{s0} (MPa)	f_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	E_M (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90} (MPa)	W (N.m)
0,8	134	21263	19750	19938	154	136	19,2

Fonte: Dias e Lahr (2004).

Dias *et al.* (2019) analisaram a influência da densidade aparente a 12% de umidade na retratibilidade (radial e tangencial) de 43 espécies de madeira tropical, dentre elas o Angelim Ferro (*Hymenolobium spp.*). Os autores encontraram valores para a densidade ($\rho_{12\%}$) igual a 1,16 g/cm³, retração total radial (TRS) de 5,0% e retração total tangencial (TTS) de 8,3%. Os modelos de regressão apresentados pelos autores não foram significativos, demonstrando assim a não relação entre a densidade aparente e a retratibilidade, considerando o conjunto dos dados das 43 espécies.

2.2.10 TACHI (TACHIGALI SPP.)

A Tachi (*Tachigali spp.*) (

Figura 2.6) tem altura comercial de 11 m, com diâmetro médio de 48 cm, tronco retilíneo, cerne e alburno distintos, com o cerne marrom-amarelado e o alburno, cinza-claro, cheiro imperceptível após o corte e sendo duro ao corte manual (BRASIL, 2021).

Figura 2.6 – Tachi: corte tangencial



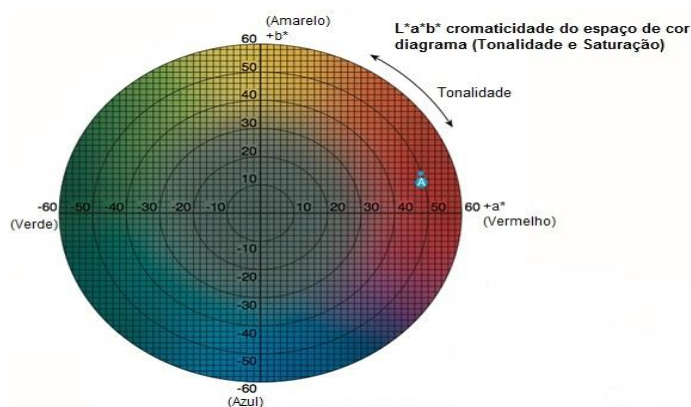
Fonte: Brasil (2021).

2.3 COR E SISTEMA CIELAB

A cor, sendo uma propriedade organoléptica, isto é, uma propriedade percebida pelos sentidos humanos, é considerada uma propriedade subjetiva. Para que possa ser avaliada objetivamente, fez-se necessário o uso de métodos objetivos definidos pela CIE para avaliação das cores nos denominados Espaços de Cor. Os espaços de cor representam a cor com o uso de um parâmetro objetivo, como números. A CIE define três espaços de cor: CIE XYZ, CIE L*C*h e CIE L*a*b*. O espaço de cor tridimensional CIE XYZ não é visto de forma uniforme com os valores trístimulus XYZ, bem como as distâncias percorridas neste espaço de cor não refletem de forma equânime os estímulos de cor. Assim, o espaço de cor CIELAB (CIE L*a*b*) foi introduzido pelo CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), a fim de correlacionar as diferenças de cor de forma numérica, melhorando assim a percepção na diferença de cores (CIE, 2007; KONICA, 2021).

O espaço de cor CIELAB é utilizado por diversos ramos da atividade humana, como indústrias de plásticos, tintas, alimentícias e têxtil, a fim de padronizar suas análises (KONICA, 2021). Os equipamentos de medição de cores, como colorímetros, medem a luz refletida em comprimento de onda e faz a quantificação dos dados no espaço de cor CIE L*a*b* e apresenta tais dados de forma numérica, seguindo o espaço de cor apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Espaço de Cor CIE L*a*b*



Fonte: Adaptado de Konica (2021).

Ordenando as cores, pode-se representá-las em função da tonalidade, luminosidade e saturação, possibilitando assim expressá-las de forma acurada. O espaço de cor CIELAB foi criado considerando que duas cores não podem ser verdes e vermelhas ao mesmo tempo, ou amarelas e azuis ao mesmo tempo. Desta forma, tem-se que o fator L^* representa a luminosidade da cor; a^* , a coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e -a indica verde) e b^* , coordenada amarelo/azul (+b indica amarelo e -b indica azul) (KONICA, 2021).

Para avaliar as diferenças de cor, estas ocorrem pela comparação numérica entre os valores de referência e das amostras. As diferenças absolutas nos fatores CIE L^* , a^* e b^* são avaliadas como o módulo dentre os valores das três coordenadas (L^* , a^* e b^*).

2.4 USO DA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS EM MADEIRA

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos da literatura versando sobre o uso da colorimetria em madeiras, objetivando mostrar quais são os usos da colorimetria e suas possibilidades na avaliação de madeiras *in natura* e termorretrificadas.

Kokutse *et al.* (2006) estudaram a resistência da madeira de teca togolesa (*Tectona grandis* L.f) ao ataque de fungos *Pycnoporus sanguineus*, *Antrodia sp.*, *Gloephyllum trabeum* e *Coriolus versicolor*, bem como avaliaram o uso de colorimetria para determinar a resistência do cerne ao ataque dos fungos citados. As amostras de madeira foram separadas em três classes (cerne interno, intermediário e externo). Para o parâmetro colorimétrico, foi utilizado o sistema CIELAB (CIE $L^*a^*b^*$) e os resultados foram correlacionados à perda de massa da madeira após o ataque fúngico. Os resultados mostraram que os fungos *Antrodia sp.* e *C. versicolor* foram os que causaram maior dano à madeira, com perda de massa acima de 20% e o cerne interno foi o mais resistente ao ataque de fungos. O cerne externo foi o menos resistente. A avaliação colorimétrica mostrou que o cerne é claro próximo ao centro e mais escuro e vermelho em direção ao cerne externo. Os modelos de regressão da variação de claridade (ΔL^*) com a variação de massa foram significativas; ao contrário, os indicadores a^* e b^* não foram significativos, com o uso de colorimetria como estimador de curto prazo para a durabilidade natural da madeira de teca.

Srinivas e Pandey (2012) avaliaram os efeitos da termorretrificação nas espécies *Hevea brasiliensis* e *Grevillea robusta* feita a vácuo nas temperaturas variando entre 210 e 240°C pelo período de 1 a 8 horas, considerando a perda de massa, cor e variação química. Os parâmetros colorimétricos foram avaliados pelo padrão CIELAB. Com o aumento da temperatura de termorretrificação, houve diminuição do parâmetro L^* , indicando aumento do escurecimento da madeira. Para os parâmetros colorimétricos a^* e b^* , também houve diminuição com o aumento da temperatura de tratamento, ocorrendo um leve aumento no início da termorretrificação. A análise química mostrou que houve degradação dos polímeros, responsável pelo escurecimento da madeira. As propriedades mecânicas foram reduzidas com o aumento da temperatura de termorretrificação.

Garcia *et al.* (2014) estudaram a estabilidade colorimétrica da madeira de Teca sob modificação térmica (*Tectona grandis*) exposta a radiação ultravioleta e envelhecimento

acelerado. Os corpos de prova foram separados entre cerne e alburno. As temperaturas de termorreificação foram 180°C e 200°C. A termorreificação iniciou com aquecimento do material da temperatura ambiente a 100°C por duas horas, incremento de temperatura até a temperatura final de modificação (180°C ou 200°C) por 30 minutos, com aquecimento por 2 horas na temperatura final e resfriamento do material até a temperatura ambiente por 1 hora. A coloração das amostras foi aferida a cada 42 horas, com espectrofotômetro portátil, utilizando-se o sistema CIELAB. O total de ciclos de exposição à radiação ultravioleta foi de 168 horas a 340nm. Os corpos de prova de alburno não modificado termicamente sofreram grande mudança de cor após o envelhecimento artificial, ao contrário dos espécimes de cerne não termorreificado. Para os espécimes de alburno termorreificado, houve maior estabilidade colorimétrica após o envelhecimento artificial, com destaque para a temperatura de 180°C.

Cui *et al.* (2015) analisaram as propriedades colorimétricas de 9 tipos de clones de *Paulownia* com cinco anos de idade utilizando o sistema CIELAB (L^* a^* b^*), comparando a diferença de cor entre eles, a fim de verificar o melhor valor comercial para os clones. Estes foram cultivados na província Hubei, na China. Os clones 204, 605, 702 e 603, que apresentaram coloração mais escura, foram os que apresentaram propriedades colorimétricas superiores dentro do estudo.

Kerber *et al.* (2016) estudaram a cor e rugosidade superficial das madeiras *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr., *Erismia uncinatum* Warm. e *Parkia pendula* Benth. ex Walp. sob intemperismo natural por 240 dias. A caracterização colorimétrica foi feita usando o sistema CIELAB por meio de um colorímetro, determinando L^* , a^* , b^* e ΔE . As madeiras submetidas ao intemperismo natural apresentaram coloração acinzentada, com redução dos parâmetros L^* , a^* e b^* . A espécie *Parkia pendula* Benth. ex Walp. apresentou maior variação de cor do que as outras duas espécies de madeira.

Lazarotto *et al.* (2016) avaliaram o efeito da modificação térmica nas madeiras *Eucalyptus tereticornis* e *Corymbia citriodora* submetida ao ataque de fungos da podridão mole (*Trametes versicolor* e *Ganoderma applanatum*) nos parâmetros colorimétricos dessas madeiras. A modificação térmica foi feita em 4 tratamentos: testemunha; autoclave a 120°C a 147 kPa por uma hora; estufa laboratorial a 180°C por 4 horas e térmico combinado, com autoclave a 120°C a 147 kPa por uma hora; e estufa laboratorial a 180°C por 4 horas. O apodrecimento acelerado ocorreu durante 16 semanas. Os parâmetros colorimétricos foram avaliados após a modificação térmica e ataque fúngico. Os maiores efeitos nos parâmetros colorimétricos ocorreram devido à modificação térmica e pouca variação por conta do ataque de fungos. Todos os parâmetros foram alterados, claridade (L^*), matriz vermelho (a^*) e amarelo (b^*), com redução significativa da claridade (L^*), tornando as madeiras mais escuras e mais atrativas comercialmente.

Meints *et al.* (2017) caracterizaram 24 espécies de madeira europeias, sendo folhosas e coníferas, espectrofotometricamente, com o uso do sistema CIELAB de cor, aferindo L^* , a^* e b^* . Foi analisada a reação à umidade das 24 espécies e como esta altera a cor das madeiras. As mais escuras são mais suscetíveis ao efeito de intensificação de cor sob umidade, ficando ainda mais escuras. Os autores também realizaram um modelo a fim de descrever a aparência da cor da madeira, em função do comprimento de onda refletido da luz visível, da sua rugosidade superficial, da sua estrutura interna e de propriedades refrativas da interação das substâncias que compõem a madeira. O efeito de intensificação da cor após a madeira ser molhada pode ser descrito e explanado por meio da mudança estrutural na parte superficial que afeta a cor para o observador.

Sikora *et al.* (2018) analisaram o impacto da termorreificação na cor e propriedades químicas das madeiras de *Picea abies* e *Quercus robur* sob as temperaturas 160°C, 170°C, 180°C e 210°C pelo processo *Thermowood*. As propriedades colorimétricas foram avaliadas pelo sistema CIELAB. De forma geral, houve diminuição do parâmetro L^* para as amostras de ambas as espécies com o aumento da temperatura de termorreificação. Para o parâmetro a^* , a espécie *Picea abies* apresentou aumento constante com o aumento da temperatura até 180°C e redução em 210°C. Para a espécie *Quercus robur*, ocorreu de forma semelhante, porém com uma intensidade menor. Para o parâmetro b^* , ambas as espécies apresentaram valores próximos antes da termorreificação e após o tratamento mostraram comportamentos distintos, com a espécie *Picea abies* reduzindo a cor amarelada de forma contínua com o aumento da temperatura e a espécie *Quercus robur* tornando-se mais amarelada para as temperaturas 160°C a 180°C e reduzindo para a temperatura 210°C. Para a parte química, houve aumento dos teores de celulose, lignina, e extrativos e redução de hemicelulose.

Li *et al.* (2019) avaliaram a descoloração da madeira de teca (*Tectona grandis*) sob irradiação artificial de luz simulando a luz solar com o uso de lâmpada xênon por 80 horas. A temperatura na câmara de ensaio foi de 50°C \pm 2°C. A avaliação das propriedades colorimétricas foi feita utilizando o sistema CIELAB com a aferição feita por meio de um colorímetro. As avaliações dos parâmetros L^* , a^* e b^* foram feitas a cada 10 horas de exposição da madeira à iluminação artificial. Os resultados mostraram que a madeira escureceu nas primeiras 20 horas de exposição e depois ficou mais clara. Considerando os três parâmetros (L^* , a^* e b^*), a madeira ficou com mais clara até as 40h de exposição e, após esse tempo, a variação colorimétrica estabilizou.

Hadi *et al.* (2020) avaliaram o mudança de cor e resistência ao ataque de térmitas subterrâneos da madeiras *Acacia mangium* e *Falcataria moluccana* submetidas à fumaça da pirólise da madeira *Syzygium polyanthum* por uma, duas e três semanas. A mudança de cor foi analisada pelo sistema CIELAB (L^* , a^* e b^*). As térmitas utilizadas foram *Coptotermes*

curvignathus Holmgren). Os resultados mostraram que o processo de defumação foi significativo na coloração da madeira em comparação com a madeira não defumada, com colorações mais escuras com maiores períodos de defumação, com reduções na claridade da madeira (ΔL^*). O processo de defumação foi eficaz a fim de aumentar a resistência da madeira às térmitas.

Almeida *et al.* (2021) avaliaram a variação colorimétrica com o sistema CIELAB de madeiras de coníferas e folhosas sob intemperismo artificial e natural. Os resultados mostraram que a ação dos raios UV foi diferente para cada intemperismo. Os valores de L^* , a^* e b^* diminuíram, chegando a zero no caso de intemperismo artificial para a^* e b^* , mostrando que ocorre um escurecimento da madeira por efeito dos raios UV.

Herrera-Builes *et al.* (2021) analisaram o efeito de termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e colorimétricas (CIELAB) da madeira *Pinus oocarpa* cultivada na Colômbia. Foram utilizadas duas temperaturas de 170°C e 190°C por 2,5 horas em vapor saturado. Os resultados mostraram uma redução de 2,4% a 3,3% na massa. As propriedades colorimétricas mostraram uma redução do parâmetro L^* de 10% a 22%. Para as propriedades a^* e b^* houve aumento variando de 11% a 26%, levando a madeira termorretificada a uma coloração avermelhada e amarelada em comparação à madeira não tratada. As propriedades mecânicas (MOE e MOR) aumentaram com a termorretificação, com aumento de 46% para a temperatura de 170°C e 22% para a temperatura de 190°C considerando MOR em comparação à madeira não tratada. Para o MOE, o aumento foi de 4% para a temperatura de 170°C e uma redução de 10% para a temperatura de 190°C. Os pesquisadores chegaram à conclusão que a melhor temperatura de termorretificação da madeira de *Pinus oocarpa* é de 170°C, trazendo melhor estabilidade dimensional, propriedades de resistência e rigidez superiores e madeira mais escura, com melhor apelo comercial.

Observando as pesquisas apresentadas, pode-se observar a diversidade do uso da colorimetria para avaliação de madeiras termorretificadas e correlacionando a cor com resistência ao ataque de organismos xilófagos, efeito do intemperismo, estabilidade após intemperismo, bem como avaliar qual melhor clone com maior atratividade comercial.

2.5 ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS COM USO DE COLORIMETRIA

Na literatura existem apenas dois trabalhos versando sobre o uso de colorimetria a fim de estimar propriedades de resistência e rigidez em função dos fatores L^* , a^* e b^* , padrão CIELAB (ALMEIDA, 2017; MARINI *et al.*, 2021).

Observando tais trabalhos, apenas o trabalho de Almeida (2017) apresenta o uso de propriedades colorimétricas como estimadores das propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais.

Almeida (2017) avaliou o uso de colorimetria para estimar quatro propriedades de resistência e rigidez: resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), dureza normal às fibras (f_{H90}), módulo de ruptura (f_M) e módulo de elasticidade na flexão estática (E_M) e a densidade aparente a 12% de umidade ($\rho_{ap,12\%}$), utilizando cinco espécies de madeira tropical Caixeta (*Simarouba amara* Aubl.), Cajueiro (*Anacardium giganteum* W. Hancock), Cambará (*Erismia uncinatum* Warm), Tatajuba (*Bagassa guianenses* Aubl.) e Roxinho (*Peltogyne* sp.) com o uso de modelos de regressão multivariável quadrático completo, a fim de se contabilizar o efeito de cada variável e a interação entre elas, com as variáveis sendo L^* , a^* e b^* . Em alguns modelos foi adicionado como variável independente a densidade aparente ($\rho_{12\%}$) a fim de levar em conta a variabilidade desta propriedade. A caracterização das propriedades mecânicas seguiu o disposto na norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Para avaliação das propriedades colorimétricas, foi utilizado o colorímetro Konica Minolta® CR-400 seguindo o preconizado na norma Americana D2244 (ASTM, 2016). O autor encontrou modelos significativos para estimar propriedades, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 70%, indicando a boa qualidade no ajuste do modelo e a possibilidade de seu uso. Considerando os resultados do conjunto de espécies com a densidade aparente, os modelos estimando as propriedades mecânicas, estes tiveram alta qualidade de ajuste, com R^2 acima de 87%, indicando a possibilidade de seu uso considerando os limites inferior e superior dos modelos, sendo os valores L^* , a^* , b^* e $\rho_{12\%}$.

Marini *et al.* (2021) avaliaram a possibilidade de estimar a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) da madeira de *Pinus spp.* em função de fatores colorimétricos (CIE $L^*a^*b^*$) e do número de anéis de crescimento (Nle) utilizando modelos de regressão. Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras foram feitos seguindo o disposto na norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Para avaliação das propriedades colorimétricas, foi utilizado o colorímetro Konica Minolta® CR-400 seguindo o preconizado na norma Americana D2244 (ASTM, 2016). Os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) mostraram que para E_{c0} e f_{c0} os parâmetros colorimétricos foram significativos, porém com baixa qualidade no ajuste, com coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 70%, mostrando não haver correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), o que indica não possibilidade de seu uso para estimar as propriedades mecânicas avaliadas de *Pinus spp.* Para os parâmetros colorimétricos e o número de anéis de crescimento, os resultados apresentados foram próximos ao encontrado

na literatura, com coeficiente de variação entre 3,42% e 10,50% para L^* , a^* e b^* e de 35,25% para N_{le} , o que mostra a influência de fatores edafoclimáticos no crescimento dos lenhos. Para E_{c0} , o valor médio obtido foi de 13476 MPa, com CV igual a 17,72%, resultado próximo ao disposto em literatura. Já para f_{c0} , o valor médio foi de 33,25 MPa, com CV de 19,25%, com os valores próximos ao obtidos por outros autores.

Observando tais trabalhos, apenas o trabalho de Almeida (2017) apresenta o uso de propriedades colorimétricas como estimadores das propriedades mecânicas de madeiras tropicais. Tal estudo apresenta limitações quanto ao número de espécies, número de propriedades avaliadas, bem como falta compreensão como as propriedades mecânicas e os parâmetros colorimétricos estão relacionados. Compreendendo-se como os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas estão relacionadas, pode-se gerar modelos com maior precisão e melhor ajuste.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia para estimar as propriedades físicas e mecânicas das madeiras tropicais em função dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* , efetuando a determinação experimental das propriedades físicas, mecânicas e colorimétricas, bem como determinar os modelos de regressão que estimarão aquelas propriedades em função da colorimetria. Foram realizadas 2160 determinações experimentais, considerando todas as propriedades avaliadas nas dez espécies de madeira analisadas.

Segundo informações provenientes da fornecedora de madeiras, as peças de madeira foram extraídas, desdobradas em caibros, vigas e terças em serraria próxima ao local de extração e foram transportadas por caminhão até o pátio do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP). No LaMEM, as peças de madeira foram armazenadas conforme o preconizado na norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), com teor de umidade próximo à umidade de equilíbrio ($12\% \pm 1\%$) e foi feita a extração e ensaio das amostras no próprio local.

Conforme descrito pelo fornecedor das madeiras, os espécimes possuem certificação FSC® de origem, sendo elas extraídas de forma legal.

As propriedades físicas e mecânicas foram determinadas seguindo o Anexo B da norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) - "Determinação de Propriedades das Madeiras para Projetos de Estruturas", e o número de amostras (NA) por propriedade de cada espécie avaliada são mostrados na Tabela 3.1.

Os valores característicos das propriedades de resistência (Equação 3.1) foram determinados conforme disposto na norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

$$f_{wk} = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{(n/2)-1}}{(n/2)-1} - f_{n/2} \right) \cdot 1,10 \quad (3.1)$$

Conforme a Equação 3.1, os resultados experimentais da resistência à solicitação específica (f) foram colocados em ordem crescente ($f_1 \leq f_2 \leq f_3 \dots \leq f_n$), desprezando o maior valor caso o número de corpos de provas fosse ímpar e o valor característico não pode ser inferior a 70% do valor médio da resistência, inferior ao menor valor amostral, bem como o valor médio. Vale ressaltar que a classificação das madeiras é feita com o valor característico

da resistência à compressão paralela às fibras, com esta classificação da madeira nas respectivas classes de resistência dos grupos das folhosas.

Com o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, as madeiras foram classificadas nas classes de resistência seguindo a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) em C20, C30, C40, C50 – adotado e C60.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas, mecânicas e colorimétricas das madeiras tropicais a serem avaliadas.

Propriedades	Sigla	NA
Densidade aparente	ρ_{12}	12
Retração radial total	$\epsilon_{r,2}$	12
Retração tangencial total	$\epsilon_{r,3}$	12
Resistência à compressão paralela às fibras	f_{c0}	12
Resistência à tração paralela às fibras	f_{t0}	12
Resistência à tração normal às fibras	f_{t90}	12
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	f_{v0}	12
Resistência ao fendilhamento	f_{s0}	12
Resistência convencional no ensaio de flexão estática	f_M	12
Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras	E_{c0}	12
Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras	E_{t0}	12
Módulo de elasticidade na flexão estática	E_M	12
Dureza paralela às fibras	f_{H0}	12
Dureza normal às fibras	f_{H90}	12
Tenacidade	W	12
Parâmetro colorimétrico de luminosidade	L*	12
Parâmetro colorimétrico coordenada vermelho/verde	a*	12
Parâmetro colorimétrico coordenada amarelo/azul	b*	12

NA: Número de Amostras

Fonte: Autoria Própria (2021).

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

São apresentadas a forma de obtenção das propriedades físicas nas madeiras nesta pesquisa.

3.1.1 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente da madeira ($\rho_{ap,12\%}$) é a massa específica convencional, obtida a partir da razão entre a massa ($m_{12\%}$) e o volume ($v_{12\%}$) dos corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, sendo expresso na Equação 3.2.

$$\rho_{ap,12\%} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (3.2)$$

Os espécimes para determinação da densidade aparentem possuem dimensões 20x30x50 mm, com a direção preponderante ao longo das fibras e a seção transversal deve abranger pelo menos cinco anéis de crescimento. Para sua estimativa foram utilizados um paquímetro digital e balança eletrônica. O paquímetro digital possui precisão de 0,01 mm e a balança digital possui sensibilidade de 0,001 gramas.

3.1.2 RETRAÇÃO DA MADEIRA

A estabilidade dimensional da madeira foi avaliada por meio das propriedades de retração e inchamento nas direções preferenciais 1, 2 e 3 de um lote de madeira considerado homogêneo obtidas em 12 amostras. Conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), a propriedade de retração (ε) é avaliada nas direções (n) - longitudinal (1), radial (2) e tangencial (3) - e também avaliado o coeficiente de retração volumétrica (ΔV), expressos nas Equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\varepsilon_{r,n} = \left(\frac{L_{n,sat} - L_{n,seca}}{L_{n,seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.3)$$

$$\Delta V = \left(\frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \right) \cdot 100 \quad (3.4)$$

Da Equação 3.3 infere-se que:

- r: propriedade de retração;
- n: direção de referência considerada – 1 (longitudinal), 2 (radial) ou 3 (tangencial);
- L: dimensão da amostra na direção axial (paralela às fibras).

Da Equação 3.4 tem-se que:

- V_{sat} : $L_{1,sat} \cdot L_{2,sat} \cdot L_{3,sat}$ é o volume da amostra saturada;
- V_{seca} : $L_{1,seca} \cdot L_{2,seca} \cdot L_{3,seca}$ é o volume da amostra seca;
- L: a dimensão representativa dos três lados do corpo de prova.

Segundo a norma NBR 7190 (ABNT, 1997), o espécime possuía umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF). Caso esteja menor, deve-se reumidificar o corpo de

prova. Para o estudo do inchamento, o corpo de prova estava seco, geralmente utilizando o mesmo tipo de amostra usado no estudo de retratibilidade.

3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

3.2.1 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

O ensaio de compressão teve por finalidade determinar a resistência e rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo de 12 m³.

A resistência à compressão (f_{c0}) foi definida pela razão entre a máxima força de compressão aplicada a um corpo de prova por sua Área de seção transversal, com dimensões 50 x 50 mm, conforme mostrado na Equação 3.5.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (3.5)$$

O módulo de elasticidade submetido à compressão paralela às fibras (E_{c0}) foi determinado por meio do trecho linear do diagrama tensão x deformação (

Figura 3.1), expresso na Equação 3.6, onde os quantis $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{50\%}$, $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ representam os valores de tensão e deformação respectivamente a 10% e 50% da resistência f_{c0} obtidas no terceiro ciclo de carregamento, nos pontos 71 e 85 do diagrama de carregamento (Figura 3.2).

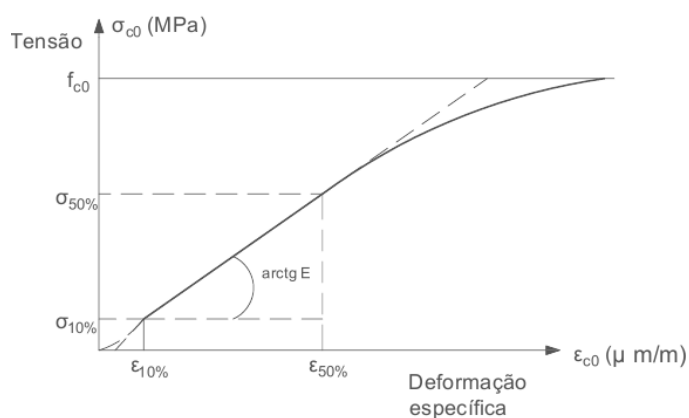
$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (3.6)$$

O corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras foi prismático com seção transversal quadrada de 50 mm e comprimento igual a 150 mm na direção das fibras.

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) indica que as deformações medidas nos espécimes durante a compressão paralela às fibras sejam aferidas por meio de relógios comparadores, com precisão de 0,001 mm, fixados por meio de duas cantoneiras metálicas pregadas no

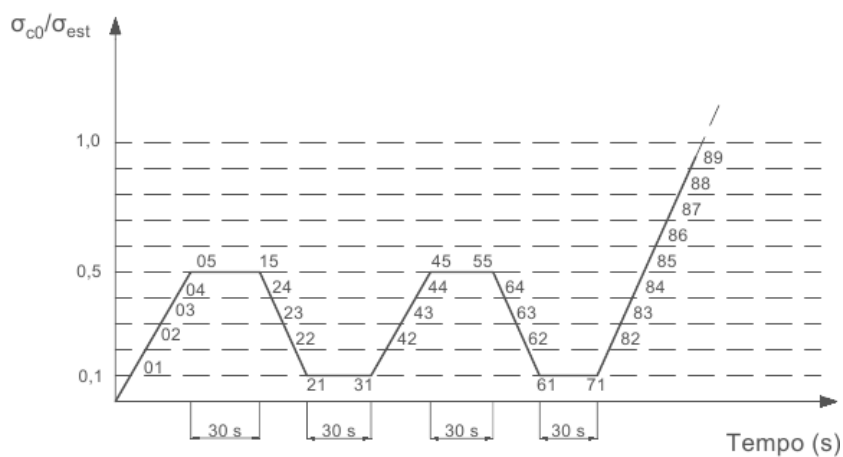
corpo de prova, com distância nominal igual a 100 mm entre as linhas de pregação, afastadas 25 mm das extremidades do corpo de prova (Figura 3.3).

Figura 3.1 - Diagrama tensão x deformação na compressão paralela.



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Figura 3.2- Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez da madeira à compressão.



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Figura 3.3 – Espécime instrumentado com os relógios - Compressão paralela.



Fonte: Autoria Própria (2020)

As medições das deformações específicas foram feitas com extensômetros com exatidão mínima de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ e taxa de carregamento igual a 10 MPa/min, de forma monotônica e crescente.

O afastamento de 25 mm das bordas do corpo de prova é justificado devido ao esmagamento da madeira nas bordas não interfira na aferição das deformações.

Considerando que a madeira é um material ortotrópico e heterogêneo e que cada espécime pode exibir um comportamento distinto, levando a deformações variadas (ICIMOTO *et al.*, 2015), a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) permite fixar os relógios comparadores em no mínimo duas faces do corpo de prova e atribuir a deformação característica a média das deformações registradas em cada relógio comparador.

Figura 3.4 – Espécime instrumentado na prensa - Compressão paralela.



Fonte: Autoria Própria (2020)

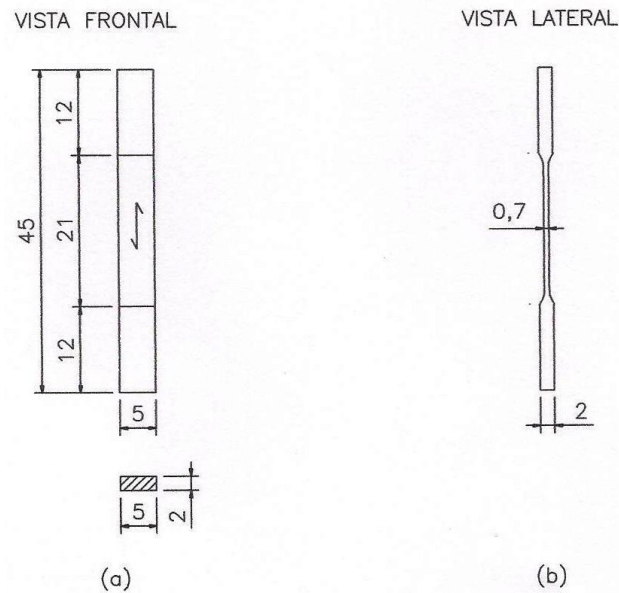
3.2.2 **TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS**

O ensaio de tração paralela às fibras teve por fim apontar as propriedades de resistência e rigidez de um lote considerado homogêneo. A Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) define que a resistência é a razão entre a máxima força aplicada ao corpo de prova pela área da seção transversal (Equação 3.7). O corpo de prova pode ser de seção retangular (

Figura 3.5), sendo o que foi adotado nesta pesquisa.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} \quad (3.7)$$

Figura 3.5 – Espécime de seção retangular para ensaios de tração paralela às fibras (Dimensões em centímetros) (a) Vista Frontal e (b) Vista Lateral.

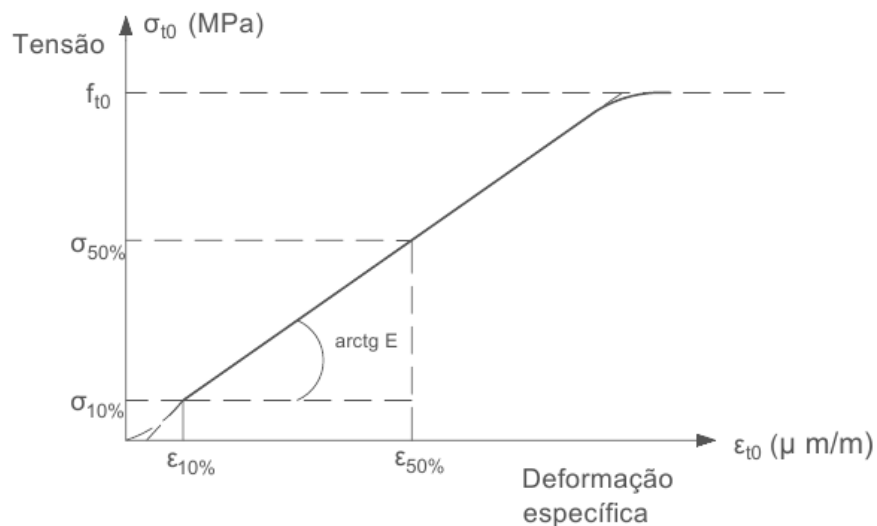


Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

A rigidez foi determinada pelo módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (Equação 3.8), considerando a inclinação da reta secante à curva tensão x deformação considerando as tensões 10% ($\sigma_{10\%}$) e 50% ($\sigma_{50\%}$) e deformações a 10% ($\varepsilon_{10\%}$) e 50% ($\varepsilon_{50\%}$) da resistência à tração paralela, conforme mostrado na Figura 3.6.

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.8)$$

Figura 3.6 – Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Neste trabalho, as propriedades de resistência e rigidez na tração paralela às fibras utilizaram os corpos de prova com seção retangular, conforme a

Figura 3.5.

As deformações no corpo de prova foram medidas no lado de maior dimensão (5 cm) com o uso de extensômetros com exatidão de 50 µm/m e o carregamento foi aplicado de forma crescente e monotônico a uma taxa de 10 MPa/min (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Espécime instrumentado na máquina para ensaio – Tração Paralela – Vistas (a) frontal e (b) lateral.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

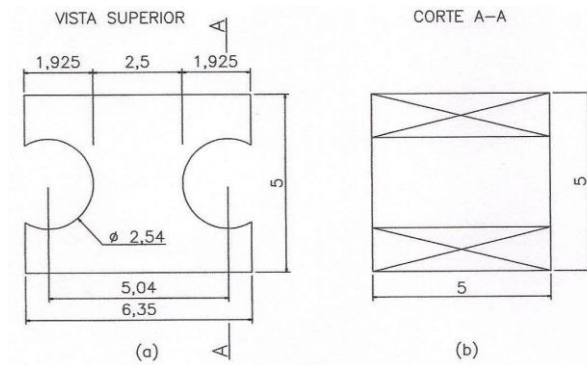
3.2.3 TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Esta determinação experimental teve por função estimar a resistência à tração normal das fibras da madeira. A norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) preconiza que esta propriedade é dada pela razão entre a força máxima de tração (F_{t90}) aplicada ao corpo de prova e a área da seção transversal do corpo de prova ($A_{t90} \approx 25\text{mm} \times 50\text{mm}$) na qual deve atuar a força de tração normal, conforme expresso na Equação 3.9. O corpo de prova é descrito na Figura 3.8.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,máx}}{A_{t90}} \quad (3.9)$$

A norma Brasileira proíbe o uso desta propriedade mecânica no dimensionamento de estruturas, sendo utilizado apenas para fins comparativos. O corpo de prova foi confeccionado com precisão de 0,1 mm e o carregamento no ensaio foi monotônico crescente, aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 3.8 – Espécime – Tração normal às fibras. Seção lateral e corte (Dimensões em centímetros).



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Figura 3.9 - Espécime - Tração Normal - (a) Perspectiva e (b) vista superior.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 3.10 - Ensaio - Tração Normal - Espécime (a) antes e (b) depois da ruptura.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

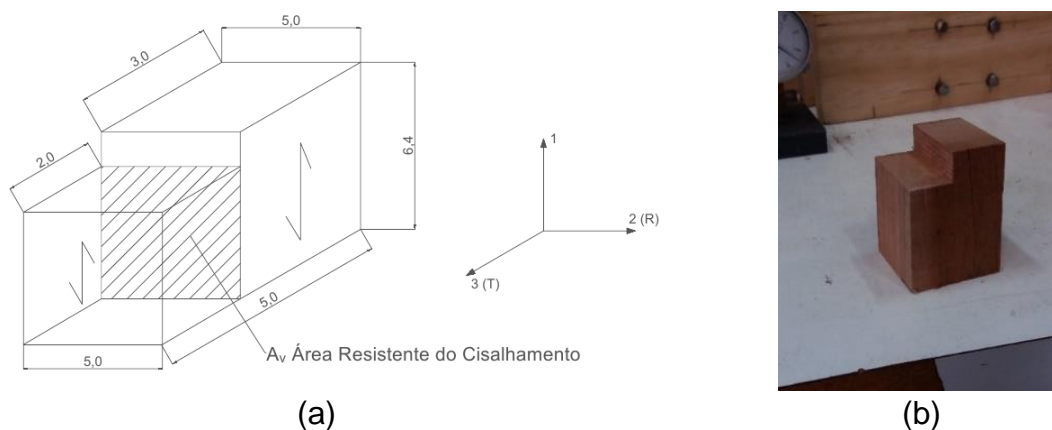
3.2.4 CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

Este ensaio teve por objetivo determinar a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de um lote considerado homogêneo, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). A resistência ao cisalhamento paralela às fibras (f_{v0}) é dada pela razão entre a força máxima de cisalhamento ($F_{v0,max}$) pela área de cisalhamento (A_{v0}), conforme mostrado na Equação 3.12.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (3.10)$$

O espécime padrão é mostrado na Figura 3.11, com as dimensões em centímetros. Deve possuir precisão dimensional de 0,1 mm e o carregamento deve ser monotônico crescente de 2,5 MPa/min.

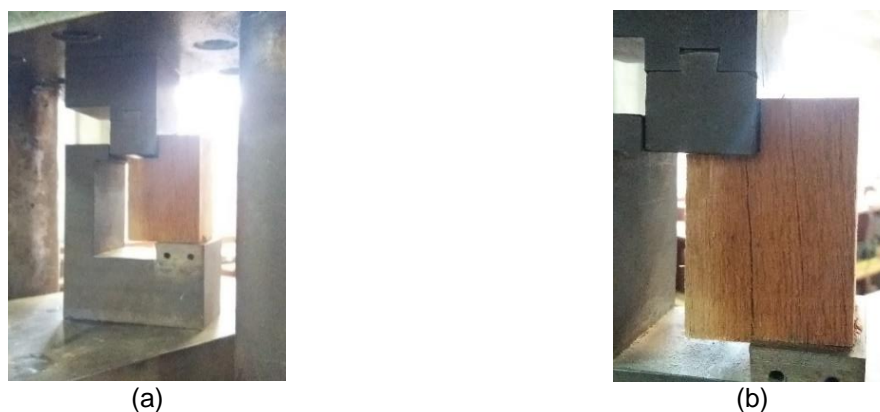
Figura 3.11 - Corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras – (a) Detalhamento e (b) Perspectiva (Dimensões em centímetros).



Fonte: (a) Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997) e (b) Autoria Própria (2020).

A Figura 3.12 mostra o espécime na máquina antes e depois do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

Figura 3.12 - Ensaio – Cisalhamento – Espécime (a) antes e (b) depois.



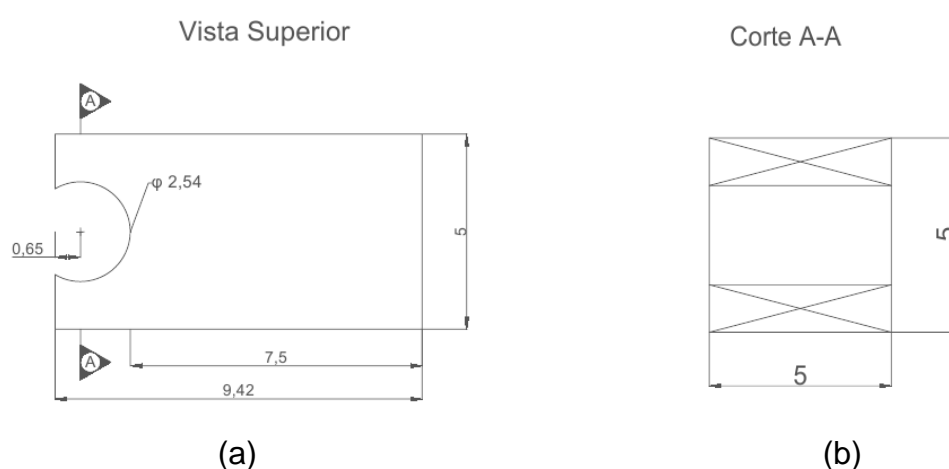
Fonte: Autoria Própria (2020)

3.2.5 FENDILHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

Este ensaio objetivou a determinação da resistência ao fendilhamento paralelo às fibras em um lote de madeira de 12 m³ considerado homogêneo.

A resistência ao fendilhamento (f_{s0}) é definida pela razão entre a força máxima aplicada ($F_{s0,max}$) pela área da seção útil ($A_{s0} \approx 75\text{mm} \times 50\text{mm}$) do corpo de prova (Figura 3.13) e precisão dimensional de 0,1 mm e carregamento monotônico crescente aplicado a uma taxa de 2,5 MPa/min.

Figura 3.13 - Espécime – Fendilhamento: (a) vista superior e (b) corte (Dimensões em centímetros).



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

A Figura 3.14 ilustra o corpo de prova de madeira de Cambará para o ensaio de fendilhamento paralelo às fibras.

Figura 3.14 – Espécime – Fendilhamento – Vistas (a) superior e (b) perspectiva.



(a)

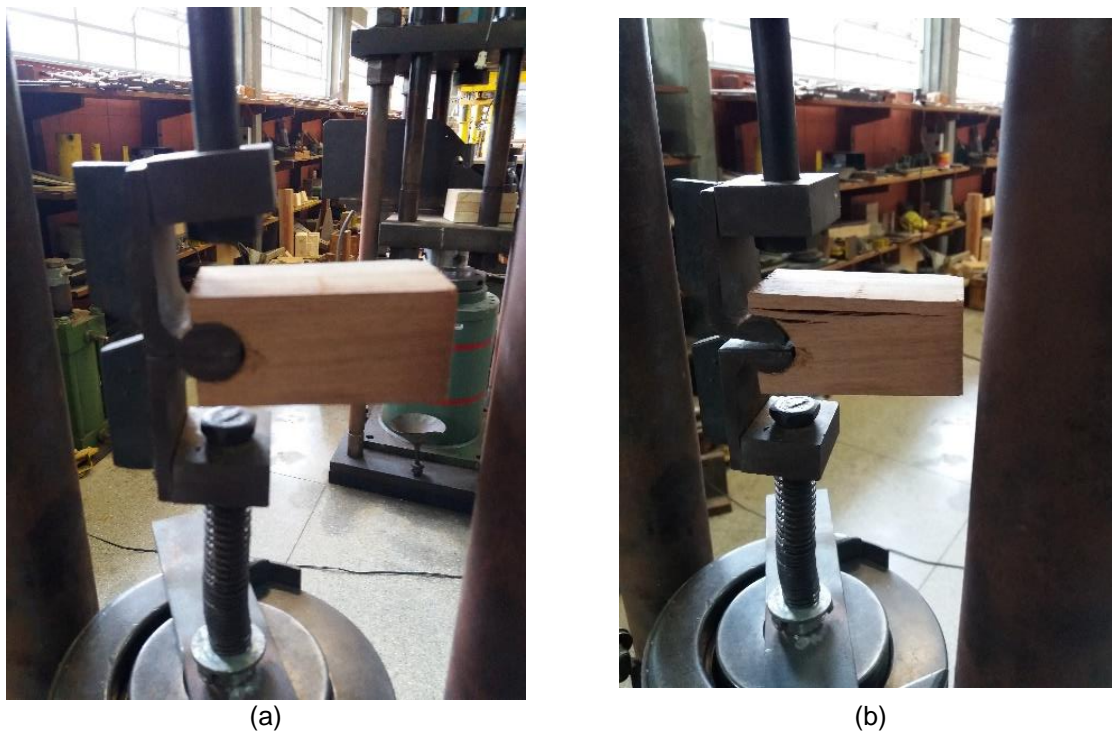


(b)

Fonte: Autoria Própria (2019)

A norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) trata a resistência ao fendilhamento como um valor convencional, sendo utilizado apenas para estudo comparativo entre espécies de madeira. A Figura 3.15 ilustra o comportamento do espécime antes e depois do ensaio de fendilhamento.

Figura 3.15 - Ensaio - Fendilhamento - Espécime antes (a) e depois o ensaio (b).



Fonte: Aatoria Própria (2020)

3.2.6 FLEXÃO ESTÁTICA

A determinação experimental de flexão estática visa obter os valores convencionais para a resistência à flexão (f_M), sendo igual a máxima tensão atuante em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, considerando o material elástico, conforme expresso na Equação 3.11. O valor de M_{max} é o valor do momento fletor máximo e W_e corresponde ao módulo de resistência elástico na flexão, igual a $W_e = b.h/6$, com b e h as medidas de base e altura da seção transversal, respectivamente.

$$f_M = \frac{M_{Max}}{W_e} \quad (3.11)$$

O ensaio de flexão estática simples em três pontos é definido pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) como a aplicação de carregamento no ponto médio do corpo de prova por meio de um cutelo. O corpo de prova foi vinculado a dois apoios articulados com vão livre igual a $21h$, com h sendo a altura da seção transversal. O corpo de prova seguiu as dimensões preconizadas na Figura 3.16.

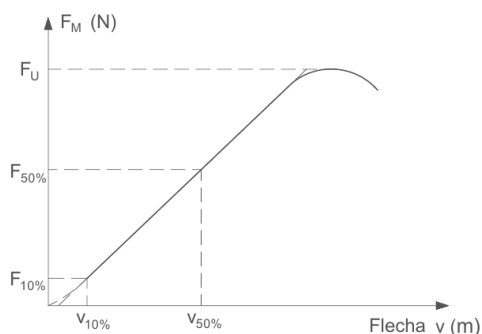
Figura 3.16 – Espécime – Flexão estática (dimensões em cm).



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Para determinação do valor da rigidez na flexão estática, calculou-se o módulo de elasticidade (E_M) na flexão simples em função da inclinação da reta secante à curva força x deslocamento considerando as forças a 10% ($F_{10\%}$) e 50% ($F_{50\%}$) e dos deslocamentos a 10% ($v_{10\%}$) e 50% ($v_{50\%}$) da força última estimada (F_U) (Equação 3.12). Para determinar a força máxima (F_U), rompeu-se um espécime gêmeo das amostras.

Figura 3.17 - Diagrama força x deslocamento para a determinação do módulo de elasticidade na flexão estática simples.

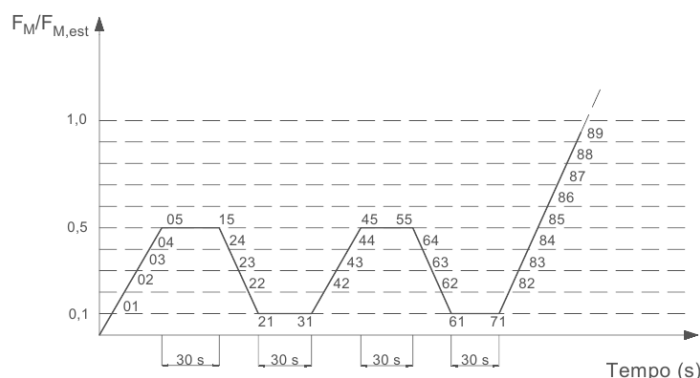


Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3.12)$$

O cálculo do módulo de elasticidade na flexão simples (E_M) foi avaliado no terceiro ciclo de carga, nos pontos 71 e 85, conforme a Figura 3.18. A carga estimada ($F_{M,est}$) mostrada na Figura 3.18 é igual àquela definida pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) como que produz a ruptura no corpo de prova gêmeo (F_U).

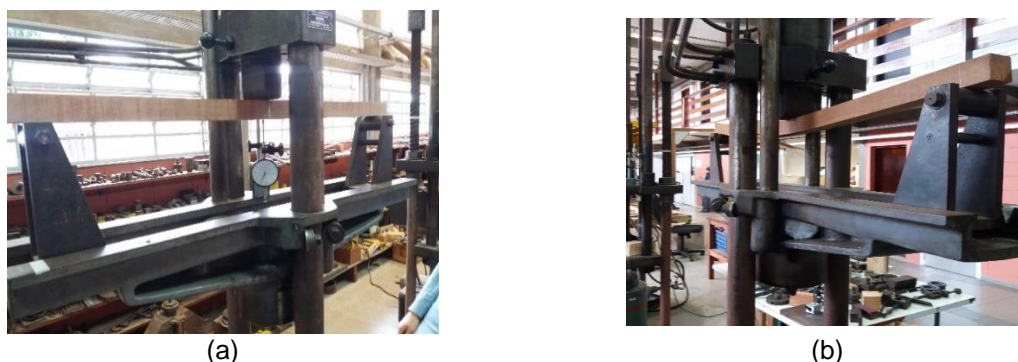
Figura 3.18 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão.



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

Os deslocamentos transversais no meio do vão foram aferidos em cada ponto do diagrama de carregamento (Figura 3.18) por intermédio de transdutores de deslocamentos com exatidão de 0,01 mm. Neste caso, procedeu-se a aferição de deslocamentos até 70% da carga estimada, os instrumentos foram retirados e procedeu-se o carregamento até a ruptura do corpo de prova. A Figura 3.19 mostra o espécime durante o ensaio de flexão estática e o espécime rompido.

Figura 3.19 - Ensaio – Flexão Estática Simples – Espécime instrumentado (a) durante o ensaio e (b) após o ensaio.



Fonte: Autoria Própria (2020)

3.2.7 DUREZA JANKA

O ensaio objetivou determinar a dureza da madeira para um lote de madeira considerado homogêneo pelo método de Janka. A norma Brasileira prescreve os requisitos para determinar a dureza de uma determinada espécie, definindo convencionalmente a dureza (f_H) como a tensão atuante em uma das faces do corpo de prova que produz a penetração de uma semi-esfera de aço com área diametral de 1 cm² (Equação 3.13).

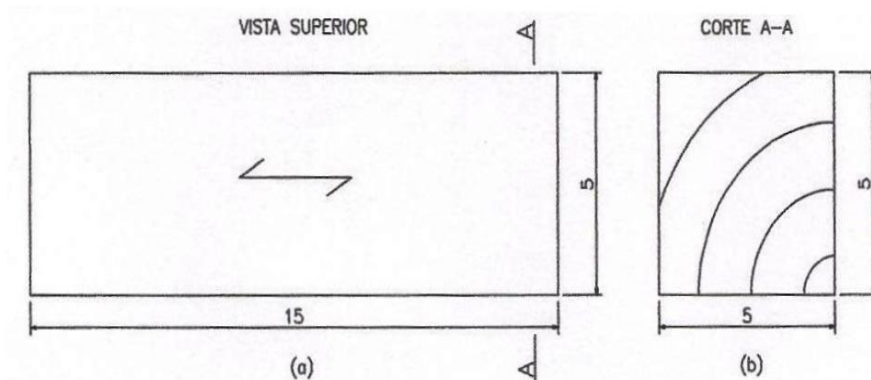
$$f_H = \frac{F_{\max}}{A_{\text{seção transversal}}} \quad (3.13)$$

A dureza Janka foi medida na direção paralela (f_{H0}) e perpendicular (f_{H90}) às fibras. O corpo de prova para ensaio da dureza é prismático, com seção transversal quadrada de lado 5 cm e comprimento paralelo às fibras de 15 cm, com precisão dimensional de 0,1 mm (

Figura 3.20).

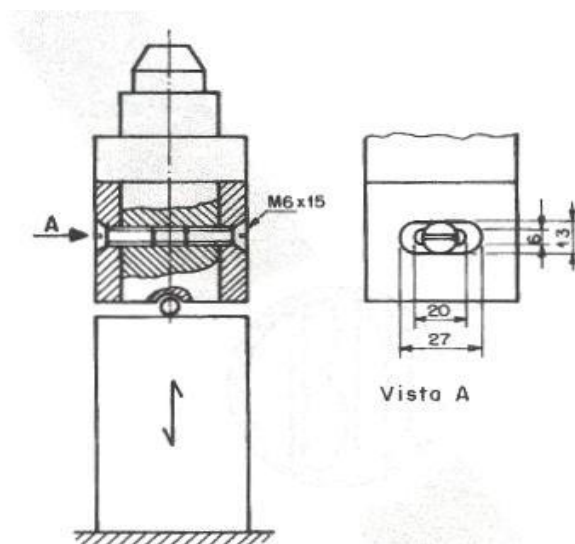
O esquema do dispositivo utilizado para determinação do grau de dureza Janka proposto pela norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) é disposto na Figura 3.21. A Figura 3.22 e Figura 3.23 mostram o ensaio de dureza Janka nas direções paralela e normal às fibras da madeira de Cambará.

Figura 3.20 – Espécime – Dureza Janka - (a) Vista Superior e (b) Corte (Dimensões em centímetros).



Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 3.21 - Esquema do ensaio de dureza Janka (Dimensões em milímetros).



Fonte: Adaptado da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 3.22 – Ensaio – Dureza Janka – Direção paralela às fibras – Espécime (a) antes e (b) após o ensaio.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 3.23 – Ensaio – Dureza Janka – Direção normal às fibras – Espécime (a) antes e (b) após o ensaio.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

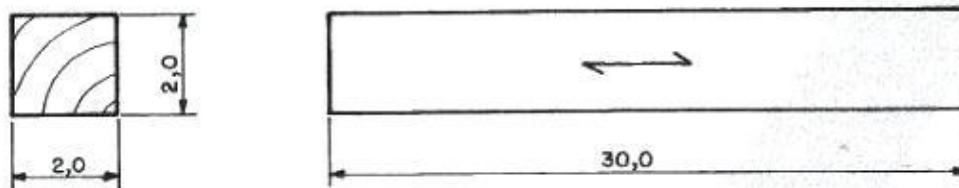
3.2.8 TENACIDADE E RESISTÊNCIA AO IMPACTO NA FLEXÃO

Esta determinação experimental teve por objetivo estimar a tenacidade (W) da madeira, que é a energia necessária para fraturar corpo de prova padrão (Figura 3.24). A tenacidade (W) é calculada pela Equação 3.14.

$$W = m \cdot g \cdot (L - L') \quad (3.14)$$

Da Equação 3.14, tem-se que m é a massa do pêndulo, g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), L é o comprimento do braço do pêndulo Charpy, que é a elevação máxima para aferição da energia potencial gravitacional, e L' é a altura final que o pêndulo atinge posteriormente ao impacto com o corpo de prova.

Figura 3.24 - Corpo de prova para o ensaio de tenacidade (dimensões em cm).



Fonte: Modificado de NBR 7190 (ABNT,1997).

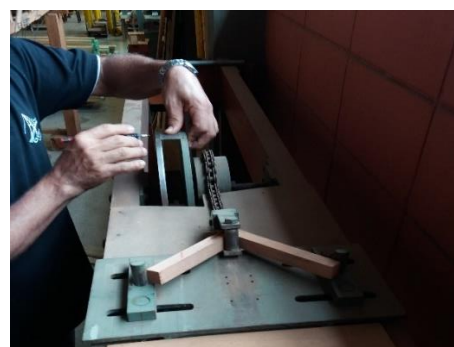
Conhecendo o valor da tenacidade, pode-se calcular a resistência ao impacto na flexão (f_{bw}), expresso na Equação 3.15, com b e h sendo as medidas da seção transversal (2 cm x 2 cm) do corpo de prova utilizado. O conhecimento da resistência ao impacto na flexão da madeira é extremamente relevante no dimensionamento de estruturas de madeira submetidas às ações dinâmicas.

$$f_{bw} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad (3.15)$$

Figura 3.25 – Ensaio – Tenacidade – Espécime (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio na máquina.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.3 PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS

Para avaliação dos parâmetros colorimétricos nas madeiras tropicais, foi utilizado um colorímetro CR-400 da marca Konica Minolta®, conforme mostrado na Figura 3.26. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

O colorímetro pode ser utilizado de duas formas: a pistola acoplada à impressora portátil, onde foram mostrados dos dados para os parâmetros L^* , a^* e b^* (Figura 3.26a), bem como a variação dos parâmetros e a variação de cor, conforme mostrado na Equação 2.1; e somente com a pistola, onde o visor após a medição mostra os mesmos dados (Figura 3.26b).

Conforme o fabricante, não há restrições de horário e luminosidade para avaliação das propriedades colorimétricas desde que toda a circunferência da pistola esteja cerrada com a superfície a ser avaliada.

Para calibrar o equipamento, o fabricante disponibiliza uma placa com papel branco e o valor para os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* que o equipamento deve atingir. Liga-se o equipamento na alavanca *Power*, apoia-se a pistola na superfície a ser avaliada, cerrando toda a circunferência de leitura e aperta-se o gatilho para o disparo de três feixes de luz. Logo após, o equipamento retorna os parâmetros colorimétricos da superfície lida.

A norma Americana D2244 (ASTM, 2016) preconiza que a leitura dos parâmetros colorimétricos não demanda confecção de espécime específico. Porém, a fim de facilitar a medição das propriedades colorimétricas, foram confeccionados 12 corpos de prova prismáticos com dimensões 50 mm x 120 mm x 10 mm para a leitura dos fatores colorimétricos (L^* , a^* , b^*) de cada espécie. Os espécimes foram extraídos durante a confecção dos corpos de prova para determinação das propriedades físicas e mecânicas.

Figura 3.26 – Colorímetro Portátil – (a) Uso com a Impressora e pistola e (b) Uso somente com a pistola.

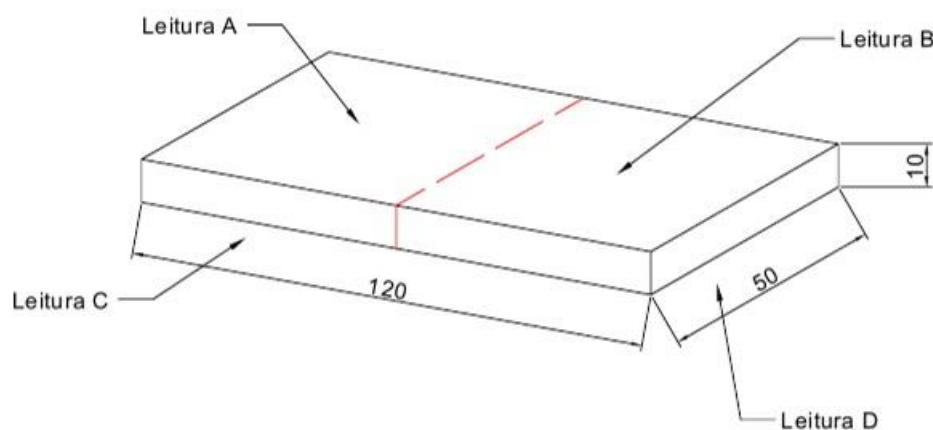


Fonte: Autoria Própria (2021).

Para determinar o número de leituras por espécime, procedeu-se um estudo preliminar para averiguar o comportamento das propriedades colorimétricas dentro do espécime. Para tanto, avaliou-se três espécimes de cada espécie de madeira a fim de se verificar como a cor se comportava ao longo do corpo de prova. Serão apresentadas as medições feitas para a espécie Cambará Rosa para os parâmetros colorimétricos e o respectivo coeficiente de variação (CV) dos valores lidos.

Foram efetuadas quatro leituras por espécime, duas em cada face. Isso se deve ao tamanho da circunferência da pistola do colorímetro, a qual possibilita apenas duas leituras por face, conforme descrito na Figura 3.27.

Figura 3.27- Descrição das leituras preliminares – Espécime para colorimetria (Dimensões em milímetros).



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 3.2 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 03 – Cambará Rosa

Leitura	L*	a*	b*
A	66,72	16,98	31,97
B	66,37	16,47	32,21
C	65,98	16,93	31,59
D	66,71	16,72	31,83
CV (%)	1%	1%	1%

Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 3.3 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 07 – Cambará Rosa

Leitura	L*	a*	b*
A	63,05	17,58	29,31
B	63,29	17,71	29,18
C	63,57	17,35	29,64
D	63,19	17,27	29,43
CV (%)	0%	1%	1%

Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 3.4 – Medições das propriedades colorimétricas do espécime CR 11 – Cambará Rosa

Leitura	L*	a*	b*
A	60,15	17,64	28,36
B	60,03	17,75	28,41
C	59,98	17,43	28,1
D	60,12	17,56	28,66
CV (%)	0%	1%	1%

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os valores dos coeficientes de variação, os valores dentro não variam dentro do próprio espécime, com o máximo 1%. Considerando essa baixa variação colorimétrica ao longo do espécime, pode-se considerar as propriedades colorimétricas uniformes por todo o corpo de prova. Este comportamento repetiu-se por todos os corpos de prova de todas as espécies.

Para correlacionar as propriedades físicas e mecânicas com as propriedades colorimétricas, deve-se ter o mesmo número de amostras para todas as propriedades. Como pode-se considerar as propriedades colorimétricas uniformes em cada corpo de prova, foi sacada uma leitura por espécime, feita de forma randômica no espécime, conforme mostrado na Figura 3.26.

Figura 3.28 – Leitura das propriedades colorimétricas das espécies (a) Angelim Ferro e (b) Cambará Rosa.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2021).

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para estimativa das propriedades físicas e mecânicas, foi seguida a análise feita por Almeida (2017), com o uso de modelos multivariáveis quadráticos utilizando os parâmetros colorimétricos e densidade aparente, de forma adicional.

Considerando o conjunto de todas as espécies de madeira, o teste de correção de Pearson foi inicialmente utilizado para avaliar a relação de linearidade entre cada uma das variáveis independentes (L^* ; a^* ; b^* ; ρ_{12}) e as demais propriedades (variáveis dependentes) investigadas na presente pesquisa. Cabe destacar que o coeficiente r de Pearson é um número real que varia no intervalo $[-1; 1]$. Quanto mais próximo dos valores extremos desse intervalo for o valor do r , maior ou mais forte é a correlação entre as variáveis confrontadas, que pode apresentar tendência de relação linear crescente, para o caso do coeficiente r ser positivo, e decrescente em caso contrário.

Adicionalmente, a análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância, foi utilizada para avaliar a significância do coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis confrontadas. Pela formulação do teste, p -valor maior ou igual ao nível de significância implica que a correlação não é significativa, e significativa em caso contrário (p -valor $< 0,05$). Tal abordagem foi considerada, pois possibilita compreender a efetiva influência de cada uma das variáveis com as demais.

Tal análise é feita a fim de verificar se há independência entre os parâmetros colorimétricos, a densidade aparente e as propriedades físicas e mecânicas.

Na sequência, modelos de regressão lineares e quadráticos (Equação 3.16 e 3.17) a uma variável livre foram utilizados com o propósito de avaliar a precisão dos mesmos, cabendo ressaltar que a precisão desses foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2).

$$Y = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot X + \varepsilon \quad (3.16)$$

$$Y = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot X + \alpha_3 \cdot X^2 + \varepsilon \quad (3.17)$$

Da Equação 3.16 e 3.17, α_i são os coeficientes obtidos pelo método dos mínimos quadrados, X é a variável independente (L^* ou a^* ou b^* ou ρ_{12}), Y é a variável dependente (demais propriedades avaliadas) e ε é o erro aleatório, cabendo destacar que o significado dessas variáveis se estende às Equações 3.18 e 3.19.

Entendidos os efeitos isolados de cada variável independente nas demais propriedades, modelos quadráticos de regressão múltipla foram gerados com o propósito de

melhorar a precisão das estimativas. *A priori*, apenas os parâmetros colorimétricos (L^* ; a^* ; b^*) foram considerados na estimativa das propriedades, de maneira a verificar se a combinação desses parâmetros colorimétricos resulta em modelos (Equação 3.18) mais precisos (se comparados com os modelos ordinários: L^* ou a^* ou b^*) na estimativa das demais propriedades. Na sequência, com a expectativa da obtenção de modelos de precisão superior (Equação 3.19), a densidade aparente será considerada em conjunto com as demais variáveis colorimétricas.

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot L^* + \alpha_2 \cdot a^* + \alpha_3 \cdot b^* + \alpha_4 \cdot L^* \cdot a^* + \alpha_5 \cdot L^* \cdot b^* + \alpha_6 \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_7 \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_8 \cdot L^{*2} + \alpha_9 \cdot a^{*2} + \alpha_{10} \cdot b^{*2} + \varepsilon \quad (3.18)$$

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot L^* + \alpha_2 \cdot a^* + \alpha_3 \cdot b^* + \alpha_4 \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_5 \cdot L^* \cdot a^* + \alpha_6 \cdot L^* \cdot b^* + \alpha_7 \cdot L^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_8 \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_9 \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{10} \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{11} \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* + \alpha_{12} \cdot L^* \cdot a^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{13} \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{14} \cdot L^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{15} \cdot L^* \cdot a^* \cdot b^* \cdot \rho_{ap,12\%} + \alpha_{16} \cdot L^{*2} + \alpha_{17} \cdot a^{*2} + \alpha_{18} \cdot b^{*2} + \alpha_{19} \cdot \rho_{ap,12\%}^2 + \varepsilon \quad (3.19)$$

O teste de normalidade de Anderson-Darling, também ao nível 5% de significância, foi utilizado para avaliar a normalidade dos resíduos da ANOVA dos modelos de regressão (ordinários e múltiplos). Pela formulação do teste, p-valor maior ou igual ao nível de significância implica assumir que a distribuição dos resíduos é normal, o que valida os resultados da ANOVA. Cabe destacar que os modelos de regressão assim como a ANOVA dos modelos de regressão ordinários e de múltiplas variáveis foram gerados e avaliados com o auxílio do software Minitab® (MINITAB, 2010).

A ANOVA dos modelos de regressão possibilita identificar se o modelo e os termos do modelo são ou não considerados significativos, além de apresentar a ordem de significância dos termos, permitindo identificar qual termo do modelo mais influencia na propriedade. De forma sintetizada, os resultados da ANOVA do modelo de regressão podem ser expressos pelo gráfico de Pareto.

Pela falta de pesquisas e, conseqüentemente, de resultados disponíveis na literatura à cerca da combinação de parâmetros colorimétricos e da densidade aparente como estimadores de propriedades de resistência e de rigidez da madeira, os modelos de regressão múltipla (Equações 3.17 e 3.18) serão gerados inicialmente considerando 9 entre as 10 espécies de madeira avaliadas. Obtidos os modelos, esses serão utilizados na estimativa das propriedades da espécie Angelim Araroba, escolhido de forma randômica dentre as dez

espécies. Depois de testada a precisão dos modelos considerando nove espécies, novos modelos (Equações 3.18 e 3.19) considerando as dez espécies foram gerados.

Para os modelos gerados com base nos resultados amostrais das propriedades físicas e mecânicas das dez espécies de madeira, apenas os resultados obtidos da pesquisa de Almeida (2017) serão utilizados na verificação da precisão dos modelos obtidos da presente pesquisa, pois esse autor foi o único que considerou a combinação dos parâmetros colorimétricos e a densidade aparente como estimador, via modelos de regressão múltipla, de propriedades físicas e mecânicas da madeira, entretanto, cabendo destacar que na pesquisa de Almeida (2017) foram avaliadas apenas 4 propriedades e com a consideração de 5 espécies de madeira.

Nos modelos gerados com base nas propriedades amostrais de todas as espécies, se forem considerados nulos os parâmetros colorimétricos, as equações quadráticas resultam ser dependentes apenas da densidade aparente. Por serem vários os trabalhos disponíveis na literatura relacionados com a caracterização de espécies de madeira folhosas e também provenientes de florestas nativas, tais modelos (considerando nulos os valores dos parâmetros colorimétricos) serão utilizados na estimativa das propriedades divulgadas nos trabalhos correlatos, o que também permitirá avaliar a precisão das equações obtidas.

A Equação 3.20 será utilizada para avaliar o erro (Er) de cada modelo na estimativa das propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira elencadas pela revisão da literatura, em que Y_{real} e Y_{est} consistem nos valores real e estimado, respectivamente.

$$Er(\%) = 100 \cdot \frac{\|Y_{real} - Y_{est}\|}{Y_{real}} \quad (3.20)$$

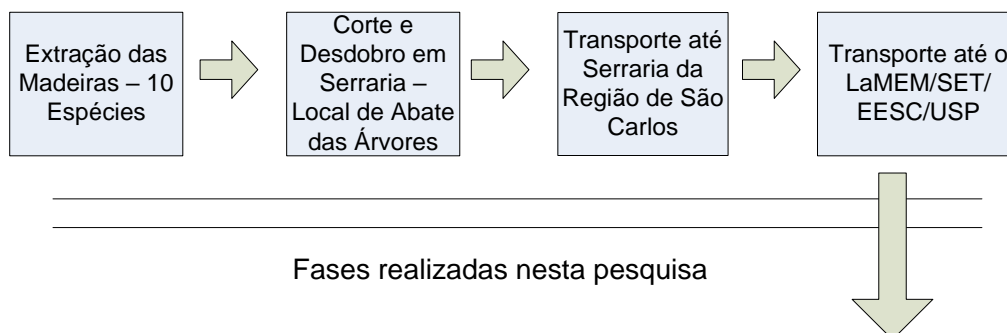
Por fim, cabe ressaltar que os modelos de regressão podem ser aplicados na estimativa das propriedades de resistência e de rigidez de outras espécies folhosas apenas no caso dos valores da densidade aparente e dos parâmetros colorimétricos de tal espécie pertencerem aos intervalos de variação dessas variáveis obtidos para as espécies de madeira consideradas na geração dos modelos.

3.5 RESUMO DA METODOLOGIA DESTA PESQUISA

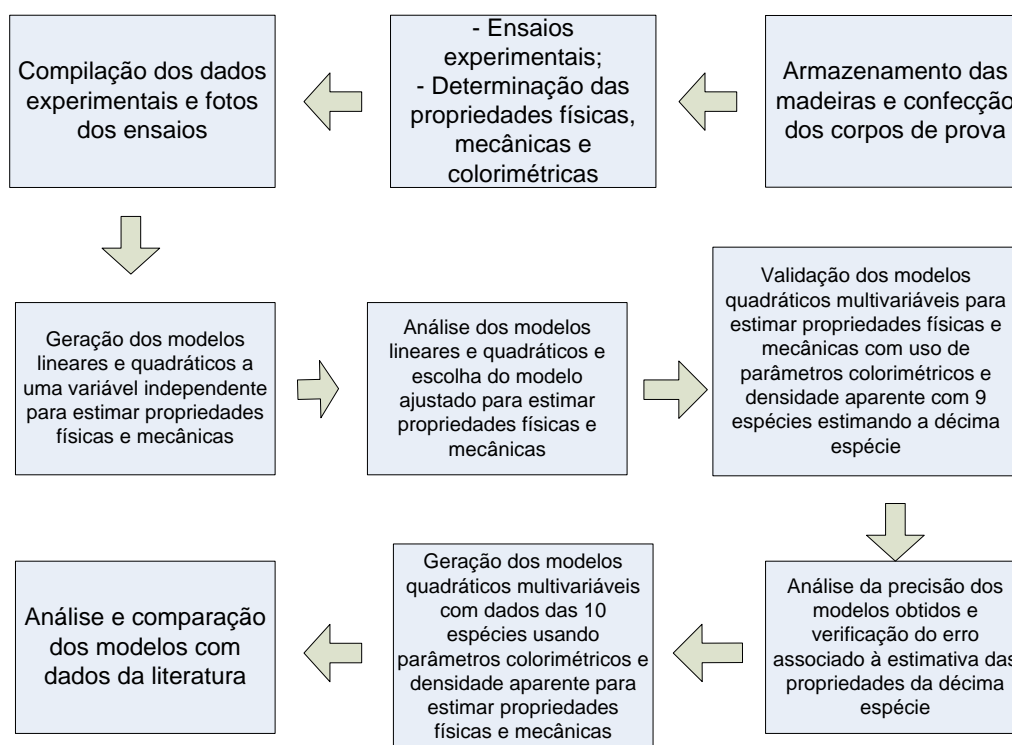
A Figura 3.29 mostra um fluxograma a fim de resumir o processo experimental desta pesquisa.

Figura 3.29 – Fluxograma da Metodologia Experimental desta Pesquisa

Fases anteriores às realizadas nesta pesquisa



Fases realizadas nesta pesquisa



Fonte: Autoria Própria (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E COLORIMÉTRICAS

Os resultados dispostos nas Tabelas 4.1 a 4.10 mostram os valores médios (\bar{x}), coeficientes de variação (Cv), valores máximos (Max) e mínimos (Min), o intervalo de confiança da média (IC - 95% de confiabilidade) das propriedades físicas, mecânicas e colorimétricas, bem como os valores característicos (f_{wk}) das propriedades avaliadas.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedrinho (*Erisma spp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,59	4,00	0,56	0,69	0,59; 0,65	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	5,77	11,00	4,81	6,87	5,31; 6,23	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	10,68	11,00	8,73	12,64	10,04; 11,31	---
f_{c0} (MPa)	32	14,00	28	37	28,82; 35,18	29,64
f_{t0} (MPa)	47	28,00	35	58	40,01; 53,99	38,17
f_{t90} (MPa)	5,00	12,00	4,40	6,00	4,61; 5,38	4,53
f_{v0} (MPa)	15	15,00	12	17	14,04; 15,95	13,98
f_{s0} (MPa)	0,70	14,00	0,50	0,90	0,64; 0,76	0,61
f_M (MPa)	60	18,00	46	72	54,92; 65,08	48,79
f_{H0} (MPa)	49	11,00	45	57	46,46; 51,54	45,94
f_{H90} (MPa)	64	10,00	58	70	60,19; 67,81	59,17
W (N·m)	32,10	16,00	25,30	39,80	28,86; 35,34	---
E_{c0} (MPa)	13081	16,00	9913	15874	11683; 14479	---
E_{t0} (MPa)	12847	14,00	10984	15347	11779; 13914	---
E_M (MPa)	11873	5,00	10591	12949	11371; 12374	---
L*	64,51	6,00	58,48	72,34	61,86; 67,15	---
a*	15,42	15,00	11,16	17,87	13,99; 16,84	---
b*	30,21	5,00	28,27	33,52	29,18; 31,23	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

Conforme o valor obtido para a resistência característica à compressão paralela às fibras, a madeira de Cedrinho é classificada na classe C20 das madeiras folhosas segundo a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Zangiácomo e Lahr (2002) encontraram valor de densidade aparente para *Erismia spp.* de 0,62 g/cm³, próximo ao encontrado neste trabalho.

Observando os valores dos coeficientes de variação (CV), a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece que a prescrição normativa a fim de considerar a caracterização adequada, isto é, a significância estatística dos resultados é garantida sem análises posteriores, é de 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais. Para a madeira *Erismia spp.*, todas as propriedades mecânicas respeitaram a prescrição normativa.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cambará Rosa (*Erismia uncinatum*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,51	8,00	0,45	0,62	0,48; 0,54	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,54	25,00	2,47	5,08	2,99; 4,09	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	6,93	13,00	6,24	8,13	6,39; 7,47	---
f_{c0} (MPa)	35	18,00	26	47	31,82; 38,18	27,94
f_{t0} (MPa)	54	18,00	42	61	49,55; 58,45	47,68
f_{t90} (MPa)	2,30	27,00	1,70	3,50	1,91; 2,68	1,90
f_{v0} (MPa)	12	18,00	9	14	10,36; 11,63	10,64
f_{s0} (MPa)	0,31	30,00	0,30	0,50	0,25; 0,37	0,38
f_M (MPa)	68	18,00	55	84	62,28; 73,72	59,07
f_{H0} (MPa)	85	8,00	75	93	79,91; 90,08	83,58
f_{H90} (MPa)	50	12,00	46	63	45,55; 54,45	48,33
W (N·m)	5,00	36,00	2,40	7,70	3,98; 6,02	---
E_{c0} (MPa)	8537	27,00	6981	11573	7140; 9933	---
E_{t0} (MPa)	9371	18,00	8583	10738	8417; 10324	---
E_M (MPa)	8976	19,00	7683	10817	7959; 9993	---
L*	62,83	1,00	61,89	64,91	62,28; 63,38	---
a*	12,82	3,00	12,29	13,51	12,60; 13,04	---
b*	25,45	2,00	24,42	26,49	25,04; 25,85	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

Segundo o valor encontrado na Tabela 4.2, a madeira de Cambará Rosa foi classificada na classe C20 das folhosas, conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

Avaliando os trabalhos na literatura versando sobre *Erismia uncinatum* Warm. (ABNT, 1997; LORENZI, 1998; DIAS; LAHR, 2004; ARAÚJO, 2007; IPT, 2019; BRASIL, 2021), as propriedades físicas e mecânicas foram semelhantes, também classificando-a na classe C20 das folhosas (ABNT, 1997).

Observando os valores dos coeficientes de variação (CV), as propriedades f_{s0} e E_{c0} ultrapassaram os limites normativos de 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais.

Kerber *et al.* (2016) efetuaram a caracterização colorimétrica do Cambará Rosa, obtendo os seguintes resultados: L^* de 54,26, a^* de 13,82 e b^* de 22,33, com coeficientes de variação entre 0,79% e 1,97%.

Almeida (2017) obteve os seguintes valores para os parâmetros colorimétricos do Cambará Rosa: L^* igual a 63,04, a^* igual a 7,89 e b^* igual a 14,70. Os valores do coeficiente de variação ficaram entre 4,62% e 22,44%.

Almeida *et al.* (2021) encontraram valores de L^* , a^* e b^* para *Erismia uncinatum* igual a 64,14, 7,71 e 15,14, respectivamente. Os valores dos coeficientes de variação ficaram entre 5,72% e 33,05%.

Vale ressaltar que o parâmetro L^* encontrado nesta pesquisa foi próximo ao encontrado na literatura (ALMEIDA, 2017; ALMEIDA *et al.*, 2021) e os parâmetros a^* e b^* foram superiores, indicando que madeira tem uma coloração mais vermelha e amarela que os demais trabalhos.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cedro Amargo (*Cedrela odorata*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,50	5,00	0,44	0,57	0,37; 0,63	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,97	10,00	3,62	5,13	3,80; 4,13	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	5,32	7,00	4,77	6,37	5,15; 5,48	---
f_{c0} (MPa)	39	13,00	31,00	48,00	36,86; 41,13	31,72
f_{t0} (MPa)	60	23,00	37,00	88,00	54,01; 66,00	45,50
f_{t90} (MPa)	3,0	20,00	1,30	4,00	2,74; 3,26	2,33
f_{v0} (MPa)	10	15,00	7,00	14,00	9,14; 10,85	9,11
f_{s0} (MPa)	0,6	18,00	0,40	0,80	0,56; 0,64	0,48
f_M (MPa)	67	20,00	43,00	93,00	61,44; 72,56	50,50
f_{H0} (MPa)	54	20,00	33,00	79,00	49,29; 58,71	45,1
f_{H90} (MPa)	33	35,00	21,00	74,00	27,86; 38,13	26,28
W (N·m)	4,3	46,00	1,70	9,80	3,44; 5,15	---
E_{c0} (MPa)	9725	11,00	7394	11515	9265; 10184	---
E_{t0} (MPa)	10371	12,00	7386	12200	9821; 10920	---
E_M (MPa)	9625	20,00	8317	12431	9171; 10078	---
L*	59,39	5,00	55,87	63,32	57,60; 61,18	---
a*	15,27	5,00	14,34	16,19	14,79; 15,74	---
b*	27,04	1,00	26,72	27,29	26,91; 27,16	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

A madeira de Cedro Amargo (*Cedrela odorata*) foi classificada na classe C30 das madeiras folhosas conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) considerando o valor obtido nesta pesquisa (Tabela 4.3) para a resistência característica à compressão paralela às fibras.

Observando os resultados dispostos na literatura para as propriedades físicas e mecânicas de Cedro Amargo (ABNT, 1997; LORENZI, 1998; DIAS; LAHR, 2004; JESUS; LOGSDON; FINGER, 2015), os resultados obtidos foram próximos aos obtidos neste trabalho, classificando a madeira *Cedrela odorata* na classe C30 das dicotiledôneas (ABNT, 1997).

Considerando os valores dos coeficientes de variação (CV), as propriedades f_{t0} , f_M e E_M ultrapassaram as prescrições normativas de 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

Valverde e Moya (2014) encontraram valores de L^* , a^* e b^* para a madeira *in natura* de *Cedrela odorata* igual a 61,8, 11,8 e 31,0, respectivamente. Na presente pesquisa, o parâmetro L^* foi próximo ao encontrado pelos autores. Destaca-se que a madeira desta pesquisa é ligeiramente mais vermelha e menos amarela que a estudada pelos autores.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Copaíba (*Copaifera spp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,67	5,00	0,63	0,75	0,65; 0,69	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,44	25,00	2,38	4,61	2,87; 4,01	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	6,82	17,00	5,43	8,27	6,12; 7,52	---
f_{c0} (MPa)	46	10,00	35	53	43,46; 48,54	38,13
f_{t0} (MPa)	67	21,00	56	91	58,74; 75,25	59,14
f_{t90} (MPa)	2,90	29,00	1,60	4,60	2,33; 3,47	1,76
f_{v0} (MPa)	13	17,00	8	17	11,28; 14,71	9,73
f_{s0} (MPa)	0,50	19,00	0,30	0,90	0,44; 0,56	0,37
f_M (MPa)	77	17,00	64	100	69,37; 84,62	69,15
f_{H0} (MPa)	76	9,00	69	88	70,91; 81,08	74,86
f_{H90} (MPa)	44	9,00	39	50	42,09; 45,91	41,74
W (N·m)	5,10	37,00	3,70	6,10	3,96; 6,24	---
E_{c0} (MPa)	13128	18,00	9710	15873	11730; 14526	---
E_{t0} (MPa)	13108	10,00	10273	14386	12155; 14061	---
E_M (MPa)	11934	9,00	9873	13584	11108; 12760	---
L^*	61,54	11,00	50,21	72,61	57,16; 65,92	---
a^*	11,28	20,00	7,76	15,07	9,86; 12,69	---
b^*	22,10	13,00	20,04	26,19	20,30; 23,89	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

A madeira de Copaíba (*Copaifera spp.*) foi classificada na classe C30 das dicotiledôneas segundo a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) com base no valor da resistência característica à compressão paralela às fibras, disposto na Tabela 4.4. O valor

obtido nesta pesquisa é menor do que o obtido por Pinheiro e Lahr (2001), onde obtiveram valor característico de resistência a compressão paralela às fibras de 73,6 MPa. Dias e Lahr (2004) encontraram resultados próximos aos encontrados nesta pesquisa, porém classificou a Copaíba na classe C40 das folhosas ($f_{c0,k} = 44,1$ MPa).

Considerando os valores dos coeficientes de variação, as propriedades f_{t0} e f_{t90} tiveram valores acima da prescrição normativa da NBR 7190 (ABNT, 1997) para esforços normais (18%) e esforços tangenciais (28%).

Tabela 4.5 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,68	9,00	0,57	0,81	0,64; 0,72	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,99	26,00	3,03	6,66	3,33; 4,64	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	6,13	20,00	4,88	9,16	5,33; 6,92	---
f_{c0} (MPa)	50	10,00	40	58	46,87; 53,13	44,00
f_{t0} (MPa)	69	27,00	43	108	56,93; 81,07	42,61
f_{t90} (MPa)	3,20	31,00	1,70	5,40	2,56; 3,83	1,72
f_{v0} (MPa)	11	17,00	7	17	9,57; 12,42	7,88
f_{s0} (MPa)	0,60	22,00	0,40	0,80	0,54; 0,66	0,35
f_M (MPa)	80	16,00	57	99	71,74; 88,26	68,22
f_{H0} (MPa)	61	32,00	43	110	48,92; 73,07	49,61
f_{H90} (MPa)	40	24,00	27	59	33,64; 46,35	28,40
W (N·m)	7,60	20,00	5,10	10,00	6,65; 8,55	---
E_{c0} (MPa)	12525	17,00	9850	18308	11151; 13899	---
E_{t0} (MPa)	11885	13,00	9383	14736	10432; 13337	---
E_M (MPa)	11943	19,00	8126	16983	10490; 13395	---
L*	44,37	2,00	42,97	45,32	43,69; 45,04	---
a*	14,64	6,00	13,79	15,74	14,04; 15,23	---
b*	21,99	8,00	20,25	23,93	21,93; 24,20	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

A madeira de Angelim Araroba foi classificada como C40 pela norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) segundo o valor $f_{c0,k}$ igual a 44 MPa (Tabela 4.5). Dias e Lahr (2004) e Christoforo *et al.* (2020) também encontraram valores próximos, 45,3 MPa e 42,9 MPa,

respectivamente. De forma geral, os dados na literatura sobre a madeira de Angelim Araroba (ABNT, 1997; DIAS; LAHR, 2004; BRANCO *et al.*, 2014; CHRISTOFORO *et al.*, 2020) são próximos ao encontrados na presente pesquisa.

Levando em conta os valores dos coeficientes de variação, as propriedades f_{t0} , f_{t90} , f_{s0} e E_M ultrapassaram as prescrições normativas da NBR 7190 (ABNT, 1997) para esforços normais (18%) e esforços tangenciais (28%).

Tabela 4.6 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Catanudo (*Calophyllum spp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,78	4,00	0,76	0,85	0,75; 0,80	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	5,37	11,00	4,15	5,89	4,96; 5,78	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	8,12	10,00	7,15	9,43	7,58; 8,66	---
f_{c0} (MPa)	49	6,00	44	53	47,09; 50,91	46,17
f_{t0} (MPa)	69	27,00	53	88	58,20; 79,80	63,48
f_{t90} (MPa)	3,70	28,00	2,40	5,20	3,06; 4,33	0,81
f_{v0} (MPa)	17	18,00	13	21	15,09; 18,91	15,19
f_{s0} (MPa)	0,50	29,00	0,40	0,90	0,44; 0,56	0,22
f_M (MPa)	86	18,00	65	97	77,11; 94,89	81,02
f_{H0} (MPa)	87	8,00	69	101	80,64; 93,35	78,37
f_{H90} (MPa)	61	10,00	51	68	58,46; 63,54	56,42
W (N·m)	12,80	29,00	8,70	18,90	10,89; 14,71	---
E_{c0} (MPa)	12937	16,00	9104	15375	11539; 14334	---
E_{t0} (MPa)	14751	10,00	11083	15838	13798; 15704	---
E_M (MPa)	14507	11,00	12319	15684	13553; 15460	---
L*	62,54	2,00	60,73	66,33	61,56; 63,51	---
a*	16,49	5,00	14,35	17,12	16,00; 16,97	---
b*	28,71	3,00	27,30	30,51	28,08; 29,33	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

Os resultados obtidos na presente pesquisa foram próximos aos determinados por Dias e Lahr (2004), considerando a madeira de Catanudo na classe C40 das dicotiledôneas, bem como encontrado na presente pesquisa, com diferenças nas propriedades pouco significativas. Este estudo também utilizou a unidade padrão de 12%.

Considerando os valores do coeficiente de variação (CV), as propriedades f_{t0} e f_{s0} tiveram valores acima do prescrito em norma Brasileira, sendo 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais.

Tabela 4.7 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Cutiúba (*Goupia paraensis*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	1,15	6,00	1,02	1,24	1,10; 1,19	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	4,89	18,00	2,66	6,15	4,34; 5,43	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	7,76	12,00	5,93	9,21	7,14; 8,37	---
f_{c0} (MPa)	69	18,00	51	99	62,64; 75,35	54,87
f_{t0} (MPa)	107	33,00	66	166	84,76; 129,24	68,68
f_{t90} (MPa)	3,50	25,00	2,00	5,30	2,93; 4,07	2,29
f_{v0} (MPa)	18	24,00	12	24	15,46; 20,54	12,63
f_{s0} (MPa)	0,90	18,00	0,60	1,20	0,77; 1,02	0,76
f_M (MPa)	127	27,00	82	184	104,76; 149,24	71,68
f_{H0} (MPa)	164	11,00	136	200	152,56; 175,44	149,31
f_{H90} (MPa)	118	31,00	71	198	94,49; 141,51	65,87
W (N·m)	16,20	48,00	4,10	29,20	11,30; 21,09	---
E_{c0} (MPa)	18238	21,00	12184	24534	15835; 20640	---
E_{t0} (MPa)	16802	19,00	12629	22970	14771; 18832	---
E_M (MPa)	17151	23,00	12636	25004	14590; 19711	---
L*	48,80	6,00	45,11	53,76	46,96; 50,64	---
a*	15,39	9,00	13,26	17,88	14,54; 16,23	---
b*	16,22	14,00	13,19	20,35	14,75; 17,69	---

Fonte: Autoria Própria (2020).

Observando o valor da resistência característica à compressão paralela às fibras, tem-se a madeira de Cutiúba pode ser classificada como C50 (atribuída) da norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Levando em conta as propriedades físicas e mecânicas obtidas nesta pesquisa e o disposto na literatura (DIAS; LAHR, 2004; LAHR *et al.*, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2020; WOLENSKI *et al.*, 2020), os valores são próximos, com diferenças pouco significativas que podem ser explicadas pela variabilidade natural do material.

Os valores dos coeficientes de variação das propriedades f_{t0} , f_{v0} , E_{c0} , E_{t0} e E_M obtidos para a madeira *Goupia paraensis* ficaram acima da prescrição normativa da NBR 7190 (ABNT, 1997), com 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais.

De forma geral, uma possível explicação para que algumas propriedades das espécies tenham valores de CV superiores à prescrição normativa seja o modo de falha da respectiva propriedade. Algumas das propriedades avaliadas nesta pesquisa possuem ruptura frágil, elevando assim a variabilidade natural da madeira, um material ortotrópico (MORANDO *et al.*, 2019; CHRISTOFORO *et al.*, 2020).

Tabela 4.8 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Saia (*Vatairea spp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	0,74	7,00	0,69	0,81	0,71; 0,77	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	4,18	17,00	3,15	4,84	3,74; 4,62	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	7,88	10,00	6,31	8,53	7,32; 8,43	---
f_{c0} (MPa)	65	13,00	50	74	59,92; 70,08	54,37
f_{t0} (MPa)	93	25,00	58	129	75,20; 110,79	81,71
f_{t90} (MPa)	2,80	19,00	2,10	3,80	2,54; 3,05	2,69
f_{v0} (MPa)	14	10,00	11	18	13,04; 14,95	12,53
f_{s0} (MPa)	0,70	13,00	0,50	0,90	0,63; 0,76	0,67
f_M (MPa)	108	18,00	83	129	96,56; 119,44	94,37
f_{H0} (MPa)	85	10,00	70	98	79,91; 90,08	77,51
f_{H90} (MPa)	59	12,00	52	67	53,91; 64,08	55,73
W (N·m)	41	11,00	3,70	5,00	3,78; 4,42	---
E_{c0} (MPa)	19562	14,00	15173	23814	17592; 21531	---
E_{t0} (MPa)	19749	15,00	15493	25107	17969; 21528	---
E_M (MPa)	18062	10,00	14587	21967	16854; 19269	---
L*	60,01	3,00	57,51	62,25	58,93; 61,08	---
a*	17,06	6,00	15,58	19,34	16,43; 17,68	---
b*	27,95	4,00	26,18	29,47	27,28; 28,62	---

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados apresentados na Tabela 4.8, a madeira de Angelim Saia pode ser classificada como C50 (atribuída) da norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) e apenas a resistência à tração paralela às fibras superou a prescrição normativa de 18% para o coeficiente de variação em esforços normais.

Observando os valores encontrados por Dias e Lahr (2004), Stolf *et al.* (2014) e Lahr *et al.* (2016) e comparando com os valores apresentados na Tabela 4.8, observa-se que os valores obtidos nesta pesquisa estão próximos aos apresentados na literatura, com Dias e Lahr (2004) e Lahr *et al.* (2016) também classificando o Angelim-saia como uma espécie da classe C40, com os valores para $f_{c0,k}$ sendo superiores a 50 MPa (51 MPa).

Tabela 4.9 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Ferro (*Hymenolobium spp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	1,14	3,00	1,05	1,21	1,11; 1,17	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	5,13	9,00	4,01	5,89	4,86; 5,40	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	8,34	9,00	7,32	9,53	7,97; 8,71	---
f_{c0} (MPa)	80	10,00	69	99	75,20; 84,79	74,36
f_{t0} (MPa)	108	26,00	81	154	92,55; 123,45	56,66
f_{t90} (MPa)	3,60	34,00	1,00	5,90	3,07; 4,13	1,87
f_{v0} (MPa)	18	14,00	15	24	16,93; 19,06	16,69
f_{s0} (MPa)	0,70	23,00	0,40	1,10	0,65; 0,75	0,50
f_M (MPa)	124	17,00	92	148	114,41; 133,59	94,03
f_{H0} (MPa)	138	21,00	105	168	122,01; 153,98	109,37
f_{H90} (MPa)	113	25,00	67	155	97,02; 128,98	75,11
W (N·m)	17,20	32,00	9,60	28,70	14,00; 20,40	---
E_{c0} (MPa)	19341	17,00	13684	23489	17529; 21152	---
E_{t0} (MPa)	19245	15,00	13207	23094	17593; 20896	---
E_M (MPa)	18764	14,00	15820	21943	17485; 20042	---
L*	52,75	5,00	48,51	56,24	50,95; 54,54	---
a*	14,47	7,00	13,15	15,88	13,81; 15,12	---
b*	18,24	9,00	14,93	20,41	17,23; 19,24	---

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados apresentados na Tabela 4.9, a madeira de Angelim Ferro pode ser classificada na classe C60 das dicotiledôneas segundo a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), próximo ao obtido por Dias e Lahr (2004). As propriedades físicas obtidas nesta pesquisa foram próximas às obtidas por Dias e Lahr (2004) e ao apresentado na Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), com exceção do valor de E_{c0} , que foi 9% menor que o obtido por Dias e Lahr (2004).

Observando os valores dos coeficientes de variação, verifica-se que as propriedades de resistência à tração (f_{t0} e f_{t90}) superaram a prescrição normativa de 18% e 28%, respectivamente. Isso pode ser explicado devido pelo modo de falha que ocorre no teste em tela, predominante frágil (CHRISTOFORO *et al.*, 2020).

Tabela 4.10 - Resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Tachi (*Tachigali sp.*).

PROPRIEDADE	\bar{x}	Cv (%)	Mín	Máx	IC 95%	f_{wk} (MPa)
$\rho_{ap,12\%}$ (g/cm ³)	1,05	7,00	0,87	1,15	1,00; 1,09	---
$\epsilon_{r,2}$ (%)	4,25	23,00	2,14	6,16	3,54; 4,95	---
$\epsilon_{r,3}$ (%)	9,39	15,00	7,31	11,55	8,51; 10,26	---
f_{c0} (MPa)	87	11,00	73	100	81,65; 94,35	75,46
f_{t0} (MPa)	108	26,00	62	148	89,84; 124,15	65,01
f_{t90} (MPa)	5,36	37,00	3,70	10,50	4,02; 6,57	4,05
f_{v0} (MPa)	23	23,00	13	30	17,82; 24,18	14,76
f_{s0} (MPa)	1,35	25,00	1,00	1,80	1,11; 1,49	1,10
f_M (MPa)	138	23,00	94	207	119,66; 160,33	98,49
f_{H0} (MPa)	114	12,00	89	135	107,11; 124,89	102,56
f_{H90} (MPa)	127	14,00	106	161	117,56; 140,44	111,36
W (N·m)	15,80	28,00	9,20	21,70	13,07; 18,53	---
E_{c0} (MPa)	19956	15,00	14754	25239	17962; 21839	---
E_{t0} (MPa)	19427	24,00	11302	27315	16567; 22384	---
E_M (MPa)	20883	14,00	14759	24832	18949; 22674	---
L*	65,88	11,00	58,43	73,70	61,22; 70,53	---
a*	8,07	10,00	6,67	9,07	7,53; 8,60	---
b*	29,38	10,00	25,57	33,00	27,42; 31,33	---

Fonte: Autoria Própria (2021).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.10, podemos classificar a madeira de Tachi na classe C60 das madeiras folhosas conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997). Os valores apresentados são próximos aos obtidos por Dias e Lahr (2004).

As propriedades f_{10} , f_{190} , f_{v0} e f_M superaram as prescrições normativas para o coeficiente de variação, sendo 18% para esforços normais e 28% para esforços tangenciais, a fim de considerar a caracterização adequada, isto é, a significância estatística dos resultados é garantida sem análises posteriores.

4.2 CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS, PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS E DENSIDADE APARENTE

A seguir são mostrados os valores para a correlação r de Pearson (r) e o p -valor para a correlação efetuada, avaliando as propriedades físicas e mecânicas com os parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Conforme a literatura (DANCEY; REIDY, 2006), considera-se uma correlação fraca valores inferiores a 0,3, para correlação moderada, valores entre 0,4 e 0,6, e para correlação forte, valores acima de 0,7. As imagens relativas à correlação de Pearson das propriedades físicas e mecânicas estão dispostas no Apêndice A.

Tabela 4.11 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Radial Total (RRT)

Propriedade Correlacionada	Valor r	p -valor
L*	0,079	0,390
a*	0,214	0,019
b*	0,051	0,578
ρ_{12}	0,262	0,004

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

A Tabela 4.11 mostra que o parâmetro colorimétrico a^* e a densidade aparente apresentaram relação significativa, mostrando que há relação entre RRT, a^* e ρ_{12} , porém os valores de r foram abaixo de 0,3, indicando uma fraca correlação entre os parâmetros (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.12 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Tangencial Total (RTT)

Propriedade Correlacionada	Valor r	p -valor
L*	0,349	0,000
a*	-0,114	0,217
b*	0,266	0,003
ρ_{12}	0,287	0,002

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados da Tabela 4.12, apenas o parâmetro colorimétrico a^* não possui correlação significativa com a propriedade RTT. As correlações significantes das propriedades apresentaram valor próximo a zero, indicando baixa precisão, com correlação fraca (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.13 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L^*	-0,230	0,012
a^*	-0,230	0,011
b^*	-0,394	0,000
ρ_{12}	0,895	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.13, todas as propriedades foram significativas na relação com a f_{c0} , com o p-valor inferior ao valor de significância. As correlações dos parâmetros L^* , a^* e b^* ficaram com valores próximo ao valor nulo, indicando baixa precisão, com correlações fracas (DANCEY; REIDY, 2006). A maior precisão apresentada foi a densidade aparente, com r próximo ao valor unitário, indicando correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.14 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L^*	-0,194	0,033
a^*	-0,101	0,274
b^*	-0,319	0,000
ρ_{12}	0,655	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.14, apenas o parâmetro a^* não possui correlação significativa. Os demais fatores possuem correlação significativa com a resistência à tração paralela às fibras. Para os parâmetros colorimétricos, os valores R estão próximos ao valor nulo da unidade, indicando baixa precisão, com correlações fracas (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor r está acima do valor intermediário, indicando média precisão, com correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.15 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração normal às fibras (f_{t90})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	0,161	0,078
a*	-0,209	0,022
b*	0,183	0,046
ρ_{12}	0,225	0,013

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os resultados apresentados na

Tabela 4.15 mostram que apenas os parâmetros a* e b* e a densidade aparente foram significativos para o teste de Pearson, com baixa precisão, indicando fraca correlação (DANCEY; REIDY, 2006), com os valores próximos ao valor nulo.

Tabela 4.16 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	-0,596	0,000
a*	0,041	0,658
b*	-0,213	0,020
ρ_{12}	-0,029	0,755

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

O resultado apresentado na Tabela 4.16 apresenta correlação significativa para os parâmetros colorimétricos L* e b*, com o valor r para o parâmetro L* indicando correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006), ao contrário do que ocorreu para o parâmetro b*, que apresentou correlação fraca (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.17 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao fendilhamento (f_{s0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	0,107	0,246
a*	-0,295	0,001
b*	0,035	0,701
ρ_{12}	0,570	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.17, apenas a* e ρ_{12} tiveram p-valor inferior ao valor de significância. A correlação dos parâmetro a* ficou com valor próximo ao valor nulo, indicando fraca correlação (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente,

o valor r foi próximo ao valor intermediário, indicando média precisão, com correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.18 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_M)

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	-0,201	0,028
a*	-0,153	0,095
b*	-0,318	0,000
ρ_{12}	0,776	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados apresentados na

Tabela 4.18, apenas o parâmetro a^* não possui correlação significativa. Os demais fatores possuem correlação significativa com a resistência convencional no ensaio de flexão estática. Os valores de r para as propriedades colorimétricas apresentaram-se próximo ao valor nulo, indicando baixa precisão, com correlações fracas (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor r está próximo ao valor unitário, indicando elevada precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.19 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza paralela às fibras (f_{H0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	-0,248	0,006
a*	-0,127	0,168
b*	-0,557	0,000
ρ_{12}	0,838	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.19, todas as propriedades foram significativas na relação com a f_{H0} , exceto o parâmetro a^* , com o p-valor inferior ao valor de significância. A correlação do parâmetros L* apresentou valor próximo ao valor nulo, com correlação fraca (DANCEY; REIDY, 2006). Já para o parâmetro b^* a correlação apresentou valor próximo ao valor intermediário, com correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor r ficou com valor próximo ao valor unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.20 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza normal às fibras (f_{H90})

Propriedade Correlacionada	Valor R	p-valor
L*	-0,108	0,238
a*	-0,210	0,021
b*	-0,347	0,000
ρ_{12}	0,841	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.20, todas as propriedades foram significativas na relação com a f_{H90} , exceto o parâmetro L^* , com o p-valor inferior ao valor de significância. As correlações dos parâmetros a^* e b^* ficaram com valores próximo ao valor nulo, indicando baixa precisão, com correlações fracas (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor de r foi próximo ao unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.21 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a tenacidade (W)

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L^*	-0,242	0,008
a^*	-0,153	0,096
b^*	-0,407	0,000
ρ_{12}	0,794	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.21, todas as propriedades foram significativas na relação com a W , exceto o parâmetro a^* , com o p-valor inferior ao valor de significância. As correlações dos parâmetros L^* e b^* ficaram com valores próximo ao valor médio, indicando razoável precisão, com correlações moderadas (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor de r foi próximo ao unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.22 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L^*	-0,111	0,226
a^*	-0,044	0,634
b^*	-0,185	0,043
ρ_{12}	0,725	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.22, todas as propriedades foram significativas na relação com a E_{c0} , exceto o parâmetro L^* e a^* , com o p-valor inferior ao valor de significância. A correlação do parâmetro b^* ficou com valor próximo ao valor nulo, indicando baixa precisão, com correlação fraca (DANCEY; REIDY, 2006). Para a densidade aparente, o valor de r foi próximo ao unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.23 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{10})

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	-0,080	0,383
a*	-0,028	0,757
b*	-0,172	0,061
ρ_{12}	0,724	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados apresentados na

Tabela 4.23, apenas a densidade aparente foi significativa na relação com o E_{10} . A correlação para a densidade aparente foi próxima ao unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

Tabela 4.24 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na flexão estática (E_M)

Propriedade Correlacionada	Valor r	p-valor
L*	-0,075	0,417
a*	-0,108	0,242
b*	-0,174	0,058
ρ_{12}	0,801	0,000

P-valor inferior ao nível de significância implica em relação significativa entre o parâmetro colorimétrico ou densidade aparente e a propriedade avaliada.

Fonte: Autoria Própria (2021).

De forma análoga ao E_{10} , apenas a densidade aparente foi significativa na relação com o E_M . A correlação para a densidade aparente foi próxima ao unitário, indicando boa precisão, com correlação forte (DANCEY; REIDY, 2006).

De forma geral, os parâmetros colorimétricos e a densidade aparente apresentaram, com algumas exceções, correlação significativa com as propriedades físicas e mecânicas apresentadas, isto é, houve efetiva influência e relação entre os parâmetros colorimétricos, densidade aparente e as propriedades físicas e mecânicas avaliadas. Desta forma, sabendo que há efetiva relação entre os parâmetros colorimétricos, densidade aparente e as propriedades físicas e mecânicas, serão gerados modelos de regressão lineares a fim de

avaliar a precisão das relações entre as propriedades físicas e mecânicas e os parâmetros colorimétricos. De forma adicional, também será avaliada a densidade aparente como estimador.

4.3 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR PARA RELACIONAR PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS, DENSIDADE APARENTE E PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

São apresentados nas Tabelas 4.25 a 4.28 os modelos lineares considerando como variáveis independentes os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* e a densidade aparente e para variáveis dependentes, as propriedades físicas e mecânicas, levando em conta o conjunto de resultados para as dez espécies de madeira estudadas nesta pesquisa.

Observando os dados na Tabela 4.25, parte dos modelos foi significativa, destacados com os p-valores sublinhados. Isso corrobora os dados apresentados na correlação de Pearson para as propriedades físicas e mecânicas. Também ilustra a possibilidade de se estimar tais propriedades em função do parâmetro L^* . Mesmo que os modelos significativos não tenham boa qualidade no ajuste, o que deve ser enaltecido é a significância dos modelos dispostos.

Tabela 4.25 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico L^* .

Prop.	P-valor	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	0,390	$\varepsilon_{r,2} = 3,838 + 0,0111 \cdot L^*$	0,63
$\varepsilon_{r,3}$	<u>0,000</u>	$\varepsilon_{r,3} = 3,27 + 0,0776 \cdot L^*$	12,20
f_{c0}	<u>0,012</u>	$f_{c0} = 93,4 - 0,609 \cdot L^*$	5,28
f_{t0}	<u>0,033</u>	$f_{t0} = 126,6 - 0,806 \cdot L^*$	3,78
f_{t90}	0,078	$f_{t90} = 2,067 + 0,0274 \cdot L^*$	2,60
f_{v0}	<u>0,000</u>	$f_{v0} = 158,6 - 2,295 \cdot L^*$	35,52
f_{s0}	0,246	$f_{s0} = 0,503 + 0,0042 \cdot L^*$	1,14
f_M	<u>0,028</u>	$f_M = 147,3 - 0,891 \cdot L^*$	4,03
f_{H0}	<u>0,006</u>	$f_{H0} = 161,4 - 1,193 \cdot L^*$	6,15
f_{H90}	0,238	$f_{H90} = 109,1 - 0,575 \cdot L^*$	1,18
W	<u>0,008</u>	$W = 2,176 - 0,02087 \cdot L^*$	5,86
E_{c0}	0,226	$E_{c0} = 18908 - 69,1 \cdot L^*$	1,24
E_{t0}	0,383	$E_{t0} = 17779 - 47,7 \cdot L^*$	0,65
E_M	0,417	$E_M = 17294 - 44,2 \cdot L^*$	0,56

P-valor inferior ao nível de significância implica que modelo significativo.
 Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados na Tabela 4.26, apenas cinco propriedades ($\varepsilon_{r,2}$, f_{c0} , f_{t90} , f_{s0} e f_{H90}) apresentaram modelos significativos, destacados com os p-valores sublinhados. Isso corrobora os dados apresentados na correlação de Pearson para as propriedades físicas e mecânicas. Também ilustra a baixa aderência entre as propriedades avaliadas e o parâmetro a^* , indicando a impossibilidade de se estimar tais propriedades em função apenas do parâmetro a^* .

Com base nos dados na Tabela 4.27, a maioria dos modelos apresentaram valores significativos, destacados com os p-valores sublinhados, corroborando os dados apresentados na correlação de Pearson para as propriedades físicas e mecânicas. Também ilustra a possibilidade de se estimar tais propriedades em função do parâmetro b^* . Mesmo que os modelos significativos não tenham boa qualidade no ajuste, o que deve ser observado é a significância dos modelos dispostos.

Tabela 4.26 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico a^* .

Prop.	P-valor	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	<u>0,019</u>	$\varepsilon_{r,2} = 3,342 + 0,081 \cdot a^*$	4,59
$\varepsilon_{r,3}$	0,217	$\varepsilon_{r,3} = 8,751 - 0,0682 \cdot a^*$	1,29
f_{c0}	<u>0,011</u>	$f_{c0} = 81,17 - 1,65 \cdot a^*$	5,31
f_{t0}	0,274	$f_{t0} = 95,5 - 1,13 \cdot a^*$	1,01
f_{t90}	<u>0,022</u>	$f_{t90} = 5,014 - 0,0958 \cdot a^*$	4,35
f_{v0}	0,658	$f_{v0} = 18,9 + 0,424 \cdot a^*$	0,17
f_{s0}	<u>0,001</u>	$f_{s0} = 1,189 - 0,03133 \cdot a^*$	8,70
f_M	0,095	$f_M = 121,3 - 1,83 \cdot a^*$	2,34
f_{H0}	0,168	$f_{H0} = 115 - 1,64 \cdot a^*$	1,60
f_{H90}	<u>0,021</u>	$f_{H90} = 117,9 - 3,00 \cdot a^*$	4,41
W	0,096	$W = 1,462 - 0,0356 \cdot a^*$	2,34
E_{c0}	0,634	$E_{c0} = 15919 - 73 \cdot a^*$	0,19
E_{t0}	0,757	$E_{t0} = 15643 - 46 \cdot a^*$	0,08
E_M	0,242	$E_M = 17138 - 172 \cdot a^*$	1,16

P-valor inferior ao nível de significância implica que o modelo significativo.
 Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados na Tabela 4.28, a maioria dos modelos apresentaram valores significativos, com exceção da f_{v0} , destacados com os p-valores sublinhados, corroborando

os dados apresentados na correlação de Pearson para as propriedades físicas e mecânicas. Também ilustra a possibilidade de se estimar tais propriedades em função da densidade aparente.

Os modelos significativos tiveram boa qualidade no ajuste, com algumas exceções, o que mostra uma boa aderência das propriedades com as propriedades estimadas. Na literatura, observa-se tal comportamento (ALMEIDA *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2020), o que esta pesquisa confirma com os dados ilustrados.

De forma geral, observa-se que a maioria dos modelos para as propriedades físicas e mecânica foram significativos considerando os parâmetros colorimétricos, levando ao um melhor entendimento do comportamento de forma isolada dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente com tais propriedades.

Desta forma, a fim de verificar se há elevação na precisão do modelo, bem como avaliar se o termo quadrático é mais significativo na estimativa das propriedades utilizando os parâmetros colorimétricos e a densidade aparente, ou seja, se é possível verificar se grau do termo no modelo é significativo ou não, foram gerados modelos quadráticos utilizando de forma isolada os parâmetros colorimétricos como estimadores das propriedades físicas e mecânicas. De forma adicional, também foi avaliada a densidade aparente como estimador.

Tabela 4.27 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para o parâmetro colorimétrico b^* .

Prop.	P-valor	Expressão	R ² (%)
$\epsilon_{r,2}$	0,578	$\epsilon_{r,2} = 4,201 + 0,0114 \cdot b^*$	0,26
$\epsilon_{r,3}$	<u>0,003</u>	$\epsilon_{r,3} = 5,471 + 0,0938 \cdot b^*$	7,09
f_{c0}	<u>0,000</u>	$f_{c0} = 98,84 - 1,655 \cdot b^*$	15,50
f_{t0}	<u>0,000</u>	$f_{t0} = 131,5 - 2,097 \cdot b^*$	10,16
f_{t90}	<u>0,046</u>	$f_{t90} = 2,448 + 0,0492 \cdot b^*$	3,33
f_{v0}	<u>0,020</u>	$f_{v0} = 57 - 1,298 \cdot b^*$	4,52
f_{s0}	0,701	$f_{s0} = 0,692 + 0,00221 \cdot b^*$	0,13
f_M	<u>0,000</u>	$f_M = 150,8 - 2,238 \cdot b^*$	10,12
f_{H0}	<u>0,000</u>	$f_{H0} = 196,9 - 4,248 \cdot b^*$	31,04
f_{H90}	<u>0,000</u>	$f_{H90} = 147,6 - 2,914 \cdot b^*$	12,02
W	<u>0,000</u>	$W = 2,335 - 0,0556 \cdot b^*$	16,55
E_{c0}	<u>0,043</u>	$E_{c0} = 19385 - 182 \cdot b^*$	3,43
E_{t0}	0,061	$E_{t0} = 18991 - 161,4 \cdot b^*$	2,95

E_M	0,058	$E_M = 18742 - 162,7 \cdot b^*$	3,02
-------	-------	---------------------------------	------

P-valor inferior ao nível de significância implica que o modelo significativo.
 Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 4.28 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão lineares para densidade aparente (ρ_{12}).

Prop.	P-valor	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	<u>0,004</u>	$\varepsilon_{r,2} = 3,558 + 1,162 \cdot \rho_{12}$	6,85
$\varepsilon_{r,3}$	<u>0,002</u>	$\varepsilon_{r,3} = 6,184 + 2,018 \cdot \rho_{12}$	8,21
f_{c0}	<u>0,000</u>	$f_{c0} = -2,00 + 75,23 \cdot \rho_{12}$	80,13
f_{t0}	<u>0,000</u>	$f_{t0} = 10,99 + 86,18 \cdot \rho_{12}$	42,95
f_{t90}	<u>0,013</u>	$f_{t90} = 2,697 + 1,215 \cdot \rho_{12}$	5,08
f_{v0}	0,755	$f_{v0} = 27,65 - 3,5 \cdot \rho_{12}$	0,08
f_{s0}	<u>0,000</u>	$f_{s0} = 0,1813 + 0,7104 \cdot \rho_{12}$	32,45
f_M	<u>0,000</u>	$f_M = 8,55 + 109,13 \cdot \rho_{12}$	60,22
f_{H0}	<u>0,000</u>	$f_{H0} = -9,85 + 127,75 \cdot \rho_{12}$	70,25
f_{H90}	<u>0,000</u>	$f_{H90} = -36,97 + 141,32 \cdot \rho_{12}$	70,77
W	<u>0,000</u>	$W = -0,768 + 2,17 \cdot \rho_{12}$	63,10
E_{c0}	<u>0,000</u>	$E_{c0} = 3542 + 14243 \cdot \rho_{12}$	52,60
E_{t0}	<u>0,000</u>	$E_{t0} = 4158 + 13614 \cdot \rho_{12}$	52,48
E_M	<u>0,000</u>	$E_M = 2776 + 14998 \cdot \rho_{12}$	64,19

P-valor inferior ao nível de significância implica que o modelo significativo.
 Fonte: Autoria Própria (2021).

4.4 MODELOS DE REGRESSÃO QUADRÁTICOS PARA RELACIONAR PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS, DENSIDADE APARENTE E PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

São apresentados nas Tabelas 4.29 a 4.31 os modelos quadráticos considerando como variáveis independentes os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* e a densidade

aparente e como variáveis dependentes, as propriedades físicas e mecânicas, considerando o conjunto de resultados para as dez espécies consideradas, o p-valor para o modelo, para o termo linear e para o termo quadrático.

Tabela 4.29 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico L^* .

Prop.	P-valor Modelo	P-valor Linear	P-valor Quadrático	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	0,663	0,365	0,766	$\varepsilon_{r,2} = 5,28 - 0,04 \cdot L^* + 0,00045 \cdot (L^*)^2$	0,70
$\varepsilon_{r,3}$	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,632	$\varepsilon_{r,3} = 6,72 - 0,046 \cdot L^* + 0,00109 \cdot (L^*)^2$	12,37
f_{c0}	<u>0,030</u>	0,032	0,414	$f_{c0} = 166,4 - 3,22 \cdot L^* + 0,023 \cdot (L^*)^2$	5,82
f_{t0}	0,105	<u>0,044</u>	0,987	$f_{t0} = 124 - 0,72 \cdot L^* - 0,0007 \cdot (L^*)^2$	3,78
f_{t90}	0,098	<u>0,039</u>	0,213	$f_{t90} = 9,28 - 0,231 \cdot L^* + 0,00227 \cdot (L^*)^2$	3,89
f_{v0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{v0} = 842,9 - 26,81 \cdot L^* + 0,2153 \cdot (L^*)^2$	58,06
f_{s0}	<u>0,036</u>	0,065	<u>0,021</u>	$f_{s0} = 3,59 - 0,1064 \cdot L^* + 0,000971 \cdot (L^*)^2$	5,55
f_M	0,084	<u>0,028</u>	0,699	$f_M = 89 + 1,19 \cdot L^* - 0,0183 \cdot (L^*)^2$	4,15
f_{H0}	<u>0,018</u>	<u>0,005</u>	0,440	$f_{H0} = 37 + 3,27 \cdot L^* - 0,0392 \cdot (L^*)^2$	6,63
f_{H90}	0,496	0,283	0,896	$f_{H90} = 133 - 1,43 \cdot L^* + 0,0075 \cdot (L^*)^2$	1,19
W	<u>0,026</u>	<u>0,018</u>	0,626	$W = 3,59 - 0,071 \cdot L^* + 0,000444 \cdot (L^*)^2$	6,06
E_{c0}	0,480	0,261	0,949	$E_{c0} = 20283 - 118 \cdot L^* + 0,43 \cdot (L^*)^2$	1,21
E_{t0}	0,345	0,231	0,243	$E_{t0} = -6064 + 806 \cdot L^* - 7,5 \cdot (L^*)^2$	1,80
E_M	0,619	0,552	0,583	$E_M = 28491 - 445 \cdot L^* + 3,52 \cdot (L^*)^2$	0,82

P-valor inferior ao nível de significância implica que o modelo ou o termo é significativo.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados na Tabela 4.29, a maioria dos modelos não apresentou valores significativos. Isso mostra que a adição do termo independente ao quadrado não elevou a significância dos modelos quando comparado aos modelos lineares para o parâmetro colorimétrico L^* , ilustrado na Tabela 4.25.

Tabela 4.30 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico a^* .

Prop.	P-valor Modelo	P-valor Linear	P-valor Quadrático	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	<u>0,028</u>	<u>0,012</u>	0,202	$\varepsilon_{r,2} = 5,45 - 0,271 \cdot a^* + 0,0138 \cdot (a^*)^2$	5,91
$\varepsilon_{r,3}$	0,001	0,466	<u>0,001</u>	$\varepsilon_{r,3} = 17,68 - 1,56 \cdot a^* + 0,0585 \cdot (a^*)^2$	10,78
f_{c0}	<u>0,000</u>	<u>0,034</u>	<u>0,003</u>	$f_{c0} = 173,4 - 17,06 \cdot a^* + 0,604 \cdot (a^*)^2$	12,42
f_{t0}	0,131	0,411	0,090	$f_{t0} = 179,5 - 15,16 \cdot a^* + 0,55 \cdot (a^*)^2$	3,42
f_{t90}	<u>0,008</u>	0,050	<u>0,033</u>	$f_{t90} = 9,26 - 0,805 \cdot a^* + 0,0278 \cdot (a^*)^2$	8,01
f_{v0}	0,153	0,886	0,060	$f_{v0} = -68,1 + 14,95 \cdot a^* - 0,569 \cdot (a^*)^2$	3,16
f_{s0}	<u>0,000</u>	0,006	0,000	$f_{s0} = 3,762 - 0,4613 \cdot a^* + 0,01686 \cdot (a^*)^2$	33,82
f_M	<u>0,005</u>	0,209	0,005	$f_M = 266,7 - 26,13 \cdot a^* + 0,952 \cdot (a^*)^2$	8,65
f_{H0}	0,337	0,203	0,593	$f_{H0} = 145,8 - 6,79 \cdot a^* + 0,202 \cdot (a^*)^2$	1,84
f_{H90}	<u>0,006</u>	<u>0,049</u>	<u>0,025</u>	$f_{H90} = 257 - 26,2 \cdot a^* + 0,911 \cdot (a^*)^2$	8,45
W	0,168	0,132	0,374	$W = 2,38 - 0,188 \cdot a^* + 0,00599 \cdot (a^*)^2$	3,00
E_{c0}	<u>0,000</u>	0,835	<u>0,000</u>	$E_{c0} = 47393 - 5331 \cdot a^* + 206,1 \cdot (a^*)^2$	15,34
E_{t0}	<u>0,000</u>	0,735	<u>0,000</u>	$E_{t0} = 43879 - 4762 \cdot a^* + 184,9 \cdot (a^*)^2$	13,39
E_M	<u>0,000</u>	0,634	<u>0,000</u>	$E_M = 49785 - 5625 \cdot a^* + 213,8 \cdot (a^*)^2$	19,10

P-valor inferior ao nível de significância implica que o modelo ou o termo é significativo.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados da Tabela 4.30, houve aumento do número de modelos estmadores de propriedades significativos quando comparados com modelos lineares dispostos na Tabela 4.26, com destaque para as propriedades de rigidez, sendo a maioria apresentando valores significativos, destacados com os p-valores sublinhados. Isso

demonstra que a adição do termo independente a^* elevado ao quadrado trouxe mais significância às relações.

Tabela 4.31 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para o parâmetro colorimétrico b^* .

Prop.	P-valor Modelo	P-valor Linear	P-valor Quadrado	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	<u>0,000</u>	0,646	<u>0,000</u>	$\varepsilon_{r,2} = 14,05 - 0,87 \cdot b^* + 0,01881 \cdot (b^*)^2$	18,15
$\varepsilon_{r,3}$	<u>0,000</u>	<u>0,002</u>	<u>0,000</u>	$\varepsilon_{r,3} = 21,29 - 1,322 \cdot b^* + 0,03022 \cdot (b^*)^2$	25,43
f_{c0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{c0} = 257,3 - 15,83 \cdot b^* + 0,3026 \cdot (b^*)^2$	28,41
f_{t0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,006</u>	$f_{t0} = 295,8 - 16,81 \cdot b^* + 0,314 \cdot (b^*)^2$	15,83
f_{t90}	<u>0,001</u>	<u>0,048</u>	<u>0,002</u>	$f_{t90} = 10,12 - 0,638 \cdot b^* + 0,01465 \cdot (b^*)^2$	10,70
f_{v0}	<u>0,001</u>	<u>0,021</u>	<u>0,005</u>	$f_{v0} = -102,8 + 13 \cdot b^* - 0,305 \cdot (b^*)^2$	10,74
f_{s0}	<u>0,000</u>	0,793	<u>0,000</u>	$f_{s0} = 3,658 - 0,2632 \cdot b^* + 0,00566 \cdot (b^*)^2$	20,67
f_M	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_M = 354,7 - 20,49 \cdot b^* + 0,389 \cdot (b^*)^2$	17,76
f_{H0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{H0} = 455,3 - 27,37 \cdot b^* + 0,493 \cdot (b^*)^2$	41,48
f_{H90}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{H90} = 560,3 - 39,85 \cdot b^* + 0,788 \cdot (b^*)^2$	33,94
W	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$W = 7,07 - 0,48 \cdot b^* + 0,00905 \cdot (b^*)^2$	27,48
E_{c0}	<u>0,000</u>	<u>0,022</u>	<u>0,000</u>	$E_{c0} = 56479 - 3502 \cdot b^* + 70,8 \cdot (b^*)^2$	16,39
E_{t0}	<u>0,001</u>	<u>0,041</u>	<u>0,002</u>	$E_{t0} = 46746 - 2645 \cdot b^* + 53 \cdot (b^*)^2$	10,87
E_M	<u>0,000</u>	<u>0,025</u>	<u>0,000</u>	$E_M = 60197 - 3873 \cdot b^* + 79,2 \cdot (b^*)^2$	20,83

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados na Tabela 4.31, todos os modelos foram significativos, destacados com os p-valores sublinhados, mostrando que a adição do termo b^* elevado ao

quadrado no modelo trouxe maior significância em comparação ao modelo linear apresentado na Tabela 4.27, contendo somente b^* como variável independente.

Tabela 4.32 - Resultados dos p-valores da ANOVA dos modelos de regressão quadráticos para densidade aparente (ρ_{12}).

Prop.	P-valor Modelo	P-valor Linear	P-valor Quadrado	Expressão	R ² (%)
$\varepsilon_{r,2}$	<u>0,014</u>	<u>0,004</u>	0,664	$\varepsilon_{r,2} = 2,95 + 2,72 \cdot \rho_{12} - 0,91 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	7,00
$\varepsilon_{r,3}$	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,029</u>	$\varepsilon_{r,3} = 1,41 + 14,20 \cdot \rho_{12} - 7,12 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	11,87
f_{c0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,653	$f_{c0} = -7,5 + 89,3 \cdot \rho_{12} - 8,2 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	80,17
f_{t0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,603	$f_{t0} = -6 + 129,5 \cdot \rho_{12} - 25,3 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	43,09
f_{t90}	<u>0,034</u>	<u>0,012</u>	0,415	$f_{t90} = 1,3 + 4,79 \cdot \rho_{12} - 2,79 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	5,62
f_{v0}	<u>0,037</u>	0,878	<u>0,011</u>	$f_{v0} = -72,7 + 252,8 \cdot \rho_{12} - 149,7 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	5,47
f_{s0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,072	$f_{s0} = 0,419 + 2,214 \cdot \rho_{12} - 0,896 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	34,29
f_M	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,931	$f_M = 6 + 115,5 \cdot \rho_{12} - 3,7 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	60,23
f_{H0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{H0} = 99,3 - 151,1 \cdot \rho_{12} + 162,8 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	74,34
f_{H90}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$f_{H90} = 100,4 - 209,6 \cdot \rho_{12} + 205 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	76,10
W	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,137	$W = 0,038 + 0,11 \cdot \rho_{12} + 1,202 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	63,10
E_{c0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	$E_{c0} = -10674 + 50571 \cdot \rho_{12} - 21218 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	57,30
E_{t0}	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$E_{t0} = -10458 + 50963 \cdot \rho_{12} - 21814 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	52,48
E_M	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	$E_M = -9798 + 47127 \cdot \rho_{12} - 18766 \cdot (\rho_{12}^*)^2$	67,79

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados na Tabela 4.32, todos os modelos apresentaram valores significativos, destacados com os p-valores sublinhado, corroborando os dados apresentados

na correlação de Pearson para as propriedades físicas e mecânicas. Também ilustra a possibilidade de se estimar tais propriedades em função da densidade aparente.

Os modelos significativos tiveram boa qualidade no ajuste, com algumas exceções, o que mostra uma boa aderência das propriedades com as propriedades estimadas. Na literatura, observa-se tal comportamento (ALMEIDA *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017; CHRISTOFORO *et al.*, 2020), o que esta pesquisa confirma com os dados ilustrados.

Com exceção do parâmetro L^* , o uso de modelos quadráticos elevou a significância das estimativas, bem como ampliou sua qualidade de ajuste, tornando assim as correlações expressas pelos modelos mais forte do que o uso de modelo linear. Assim, justifica-se o uso de modelos quadráticos a fim de se poder estimar propriedades físicas e mecânicas em função dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente.

Desta forma, compreendido os efeitos isolados dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) e da densidade aparente como variáveis independentes usadas como estimadores das propriedades físicas e mecânicas, foi efetuado o processo de validação do modelo de regressão quadrático multivariável considerando os parâmetros colorimétricos e posteriormente, adicionando a densidade aparente às variáveis independentes.

4.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE REGRESSÃO MULTIVARIÁVEIS QUADRÁTICO

A seguir são apresentados os modelos quadráticos considerando nove espécies (Cedrinho, Cambará Rosa, Cedro Amargo, Copaíba, Catanudo, Cutiúba, Angelim Saia, Angelim Ferro e Tachi) a fim de estimar as propriedades físicas e mecânicas da espécie Angelim Araroba. Tais modelos foram gerados levando em conta os três parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*) em princípio, e também adicionando a densidade aparente como variável independente.

Estes modelos possuem como intervalo de variação para L^* de 42,97 a 73,70, para a^* de 6,67 a 19,34, b^* de 13,19 a 33,52 e densidade aparente (ρ_{12}) tendo como intervalo de 0,46 g/cm³ a 1,24 g/cm³.

Todos os modelos foram considerados significativos, apresentando p-valor igual a 0,000. Para avaliação dos resultados da ANOVA dos modelos de validação será apresentado o gráfico de Pareto para cada modelo gerado, ilustrando a significância de cada termo no modelo. No gráfico é mostrado o valor mínimo do efeito padronizado. Fatores com efeito padronizado acima do valor mínimo são considerados significativos no modelo. Para todos os

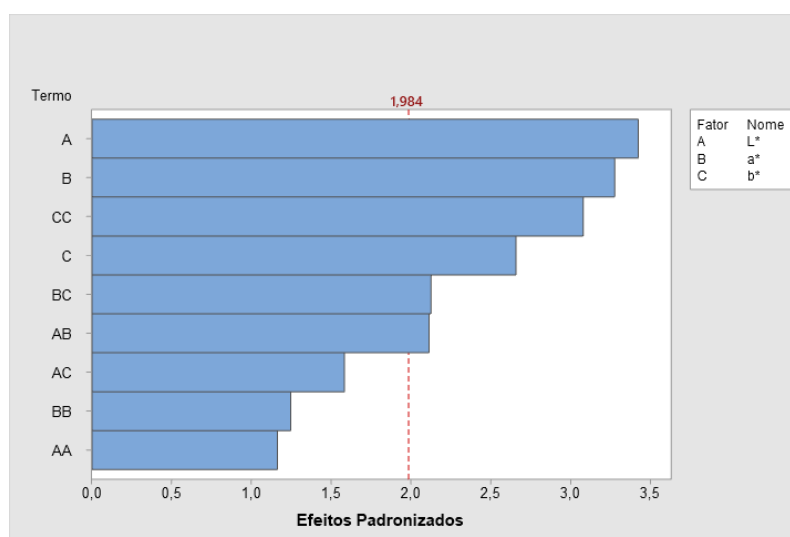
modelos apresentados nas Equações 4.1 a 4.28, os dados do teste de Normalidade de Anderson-Darling mostraram p-valores acima do nível de significância de 5%, o que indica a normalidade dos dados dispostos.

4.5.1 RETRAÇÃO RADIAL TOTAL

$$\begin{aligned}
 RRT = & 31,6 - 0,933 \cdot L^* - 1,43 \cdot a^* + 0,381 \cdot b^* + 0,00949 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,0198 \cdot (a^*)^2 + 0,0392 \cdot (b^*)^2 + 0,0439 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0265 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0595 \cdot a^* \cdot b^*
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

[R² = 32,52%]

Figura 4.1 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RRT

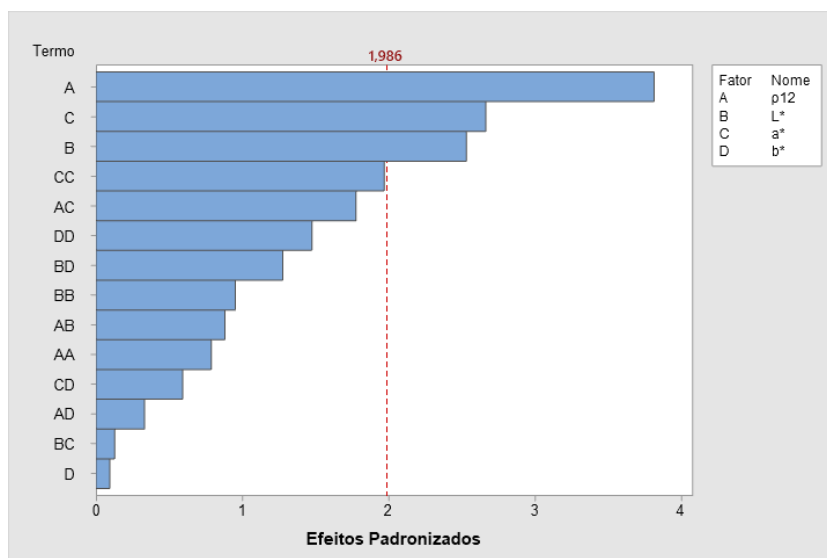


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 RRT = & -33,4 - 0,26 \cdot L^* + 2,45 \cdot a^* + 0,79 \cdot b^* + 29,9 \cdot \rho_{12} + 0,00884 \cdot (L^*)^2 + \\
 & - 0,0512 \cdot (a^*)^2 + 0,0204 \cdot (b^*)^2 - 2,89 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0035 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0232 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & - 0,188 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,0212 \cdot a^* \cdot b^* - 0,625 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,097 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

[R² = 42,85%]

Figura 4.2 – Gráfico de Pareto - Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RRT

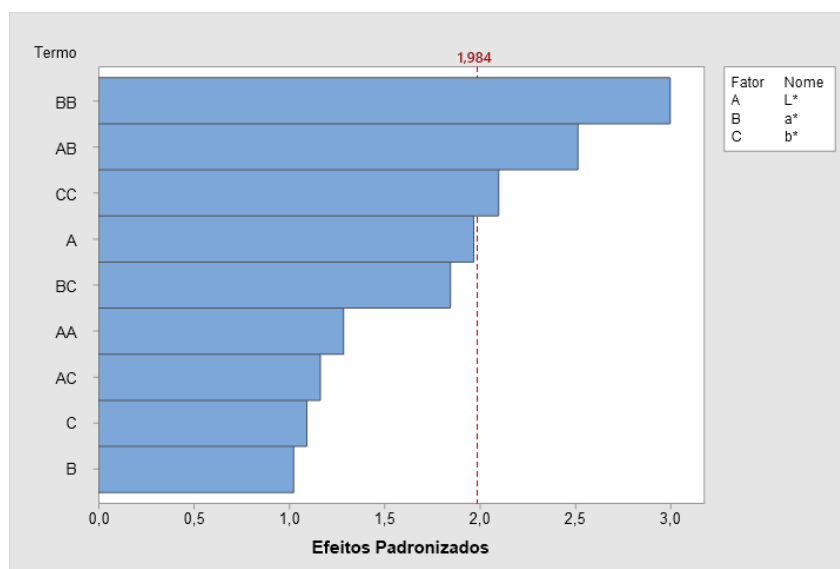


Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.2 RETRAÇÃO TANGENCIAL TOTAL

$$\begin{aligned}
 RTT = & 89,5 - 2,19 \cdot L^* - 4,80 \cdot a^* + 0,83 \cdot b^* + 0,0166 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,0753 \cdot (a^*)^2 + 0,0422 \cdot (b^*)^2 + 0,0824 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0308 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0817 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.3) \\
 & [R^2 = 29,40\%]
 \end{aligned}$$

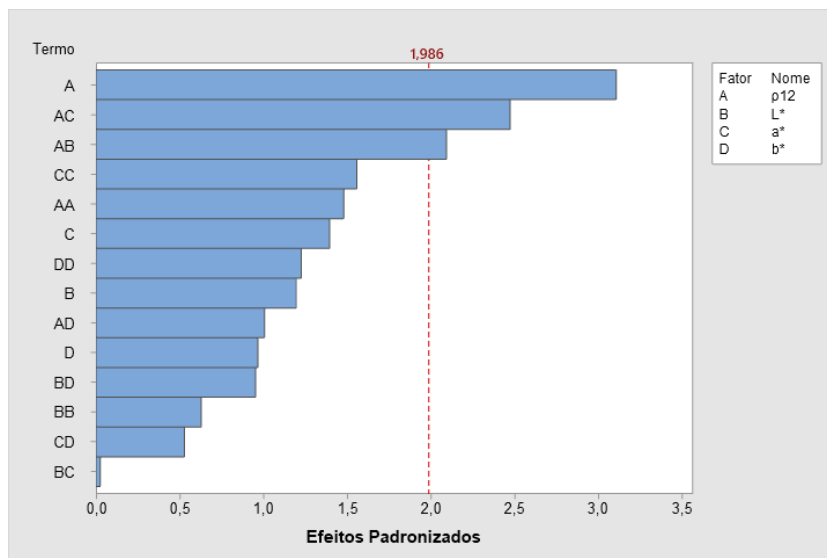
Figura 4.3 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RTT



Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 RRT = & -64,5 + 0,23 \cdot L^* + 3,67 \cdot a^* + 0,47 \cdot b^* + 67,2 \cdot \rho_{12} + 0,0091 \cdot (L^*)^2 + \\
 & - 0,0633 \cdot (a^*)^2 + 0,0265 \cdot (b^*)^2 - 8,49 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0011 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0270 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & - 0,698 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,0295 \cdot a^* \cdot b^* - 1,361 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,460 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.4) \\
 & [R^2 = 41,55\%]
 \end{aligned}$$

Figura 4.4 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RTT



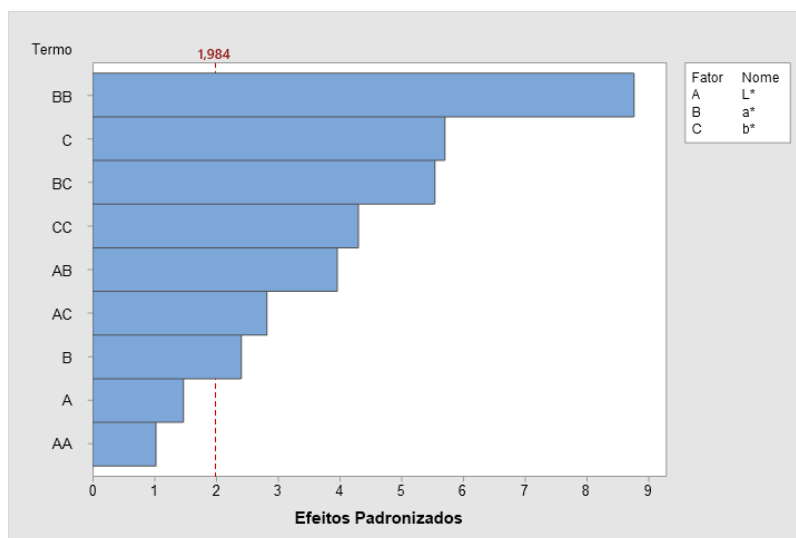
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{c0} = 440 - 10,4 \cdot L^* - 53,8 \cdot a^* + 22,8 \cdot b^* + 0,0968 \cdot (L^*)^2 + 1,609 \cdot (a^*)^2 + 0,633 \cdot (b^*)^2 + 0,949 \cdot L^* \cdot a^* - 0,545 \cdot L^* \cdot b^* - 1,793 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.5)$$

[R² = 77,06%]

Figura 4.5 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{c0}

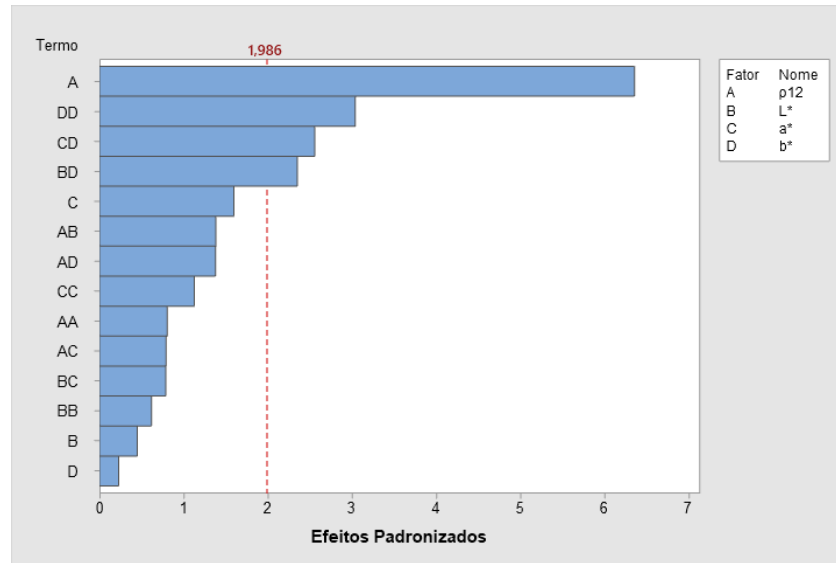


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{c0} = -318 + 2,5 \cdot L^* + 5,0 \cdot a^* + 13,2 \cdot b^* + 213 \cdot \rho_{12} + 0,0542 \cdot (L^*)^2 + 0,278 \cdot (a^*)^2 + 0,398 \cdot (b^*)^2 - 28,1 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,201 \cdot L^* \cdot a^* - 0,404 \cdot L^* \cdot b^* - 2,79 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,865 \cdot a^* \cdot b^* - 2,64 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 3,82 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.6)$$

[R² = 86,95%]

Figura 4.6 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{c0}



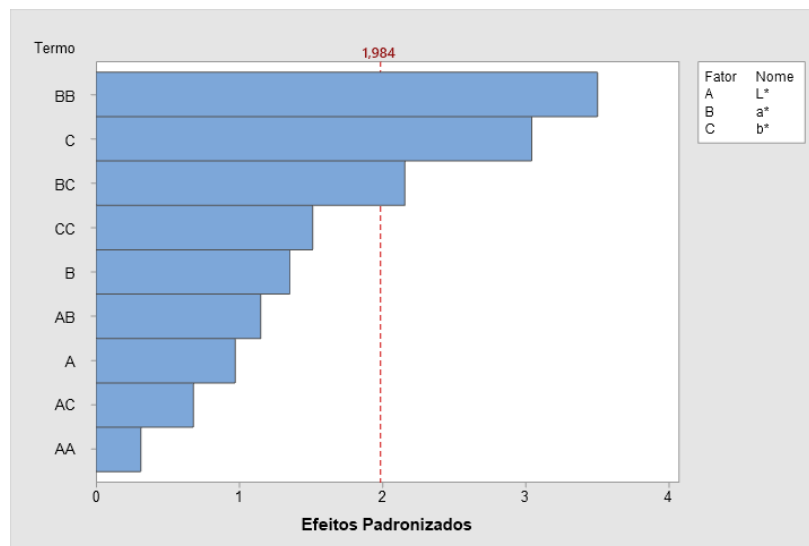
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{t0} = -82 + 8,7 \cdot L^* - 38,4 \cdot a^* + 11,7 \cdot b^* - 0,074 \cdot (L^*)^2 + 1,607 \cdot (a^*)^2 + 0,577 \cdot (b^*)^2 + 0,689 \cdot L^* \cdot a^* - 0,328 \cdot L^* \cdot b^* - 1,743 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.7)$$

$$[R^2 = 40,20\%]$$

Figura 4.7 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t0}

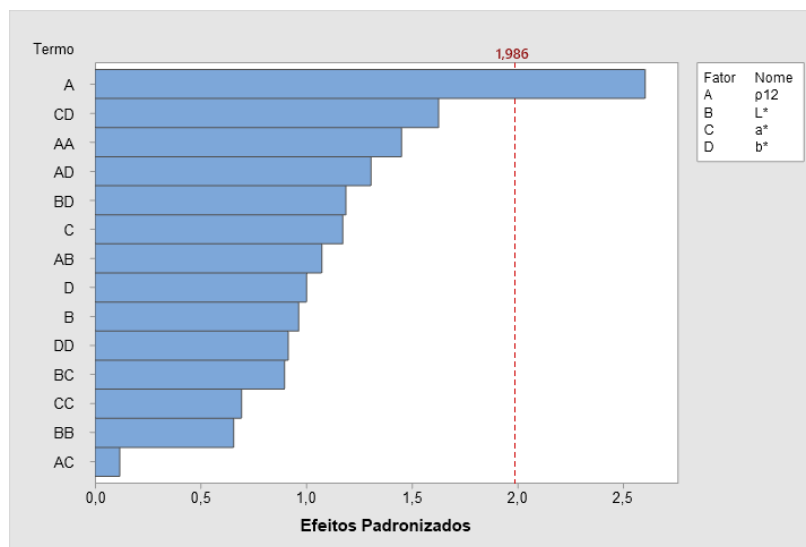


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{t0} = 37 - 19,7 \cdot L^* - 13,2 \cdot a^* + 49,3 \cdot b^* + 179 \cdot \rho_{12} + 0,178 \cdot (L^*)^2 + 0,526 \cdot (a^*)^2 + 0,369 \cdot (b^*)^2 - 155 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,704 \cdot L^* \cdot a^* - 0,629 \cdot L^* \cdot b^* + 6,69 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 1,69 \cdot a^* \cdot b^* + 1,2 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 11,14 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.8)$$

$$[R^2 = 46,96\%]$$

**Figura 4.8 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – f_{t0}**



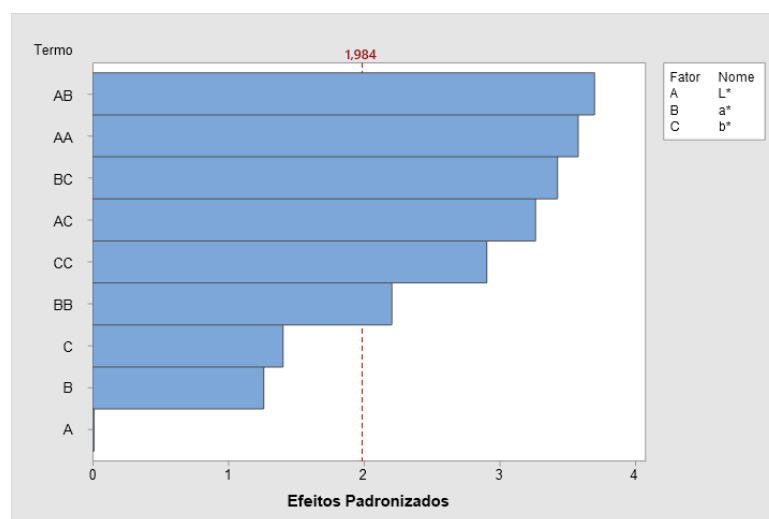
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

$$f_{t90} = 105,5 - 4,08 \cdot L^* - 3,98 \cdot a^* + 3,62 \cdot b^* + 0,0373 \cdot (L^*)^2 + 0,0448 \cdot (a^*)^2 + 0,0472 \cdot (b^*)^2 + 0,098 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0698 \cdot L^* \cdot b^* - 0,1225 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.9)$$

$$[R^2 = 28,61\%]$$

Figura 4.9 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t90}

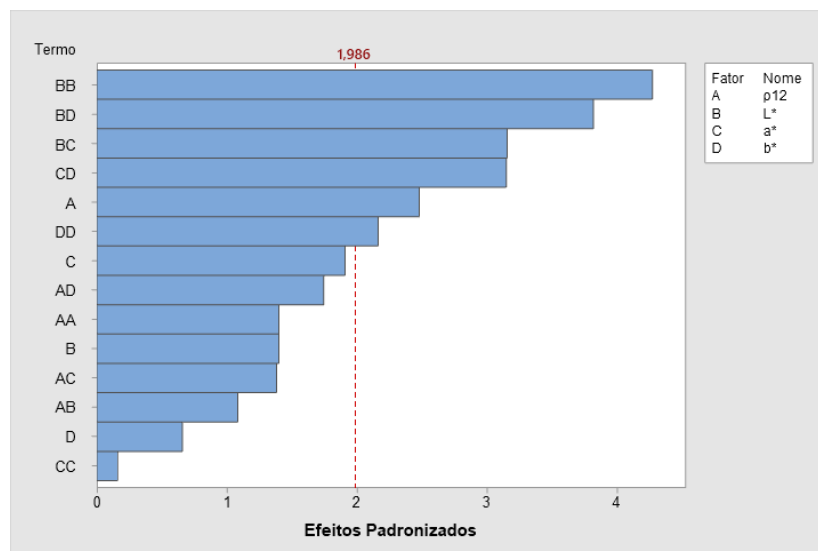


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{t90} = 100,8 - 5,64 \cdot L^* - 2,49 \cdot a^* + 6,10 \cdot b^* + 20,2 \cdot \rho_{12} + 0,0518 \cdot (L^*)^2 + 0,0055 \cdot (a^*)^2 + 0,0392 \cdot (b^*)^2 - 6,72 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,111 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0906 \cdot L^* \cdot b^* + 0,302 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,147 \cdot a^* \cdot b^* - 0,637 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,666 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.10)$$

$$[R^2 = 36,60\%]$$

**Figura 4.10 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – f_{t90}**



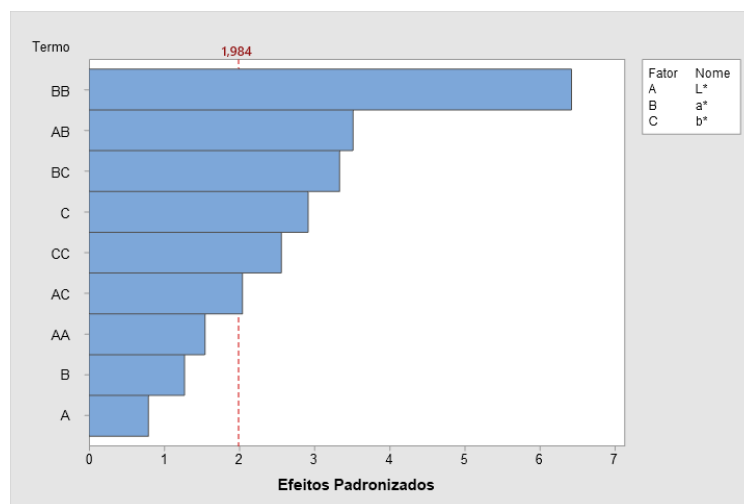
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

$$f_{v0} = 241,4 - 6,15 \cdot L^* - 17,87 \cdot a^* + 5,99 \cdot b^* + 0,0481 \cdot (L^*)^2 + 0,3889 \cdot (a^*)^2 + 0,1244 \cdot (b^*)^2 + 0,278 \cdot L^* \cdot a^* - 0,1302 \cdot L^* \cdot b^* - 0,356 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.11)$$

[$R^2 = 48,35\%$]

Figura 4.11 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{v0}

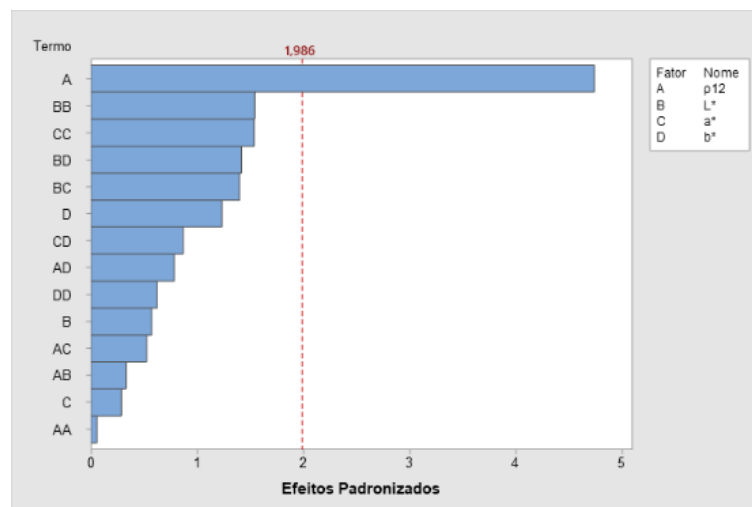


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{v0} = 171 - 6,05 \cdot L^* - 9,87 \cdot a^* + 6,53 \cdot b^* + 12 \cdot \rho_{12} + 0,0515 \cdot (L^*)^2 + 0,1439 \cdot (a^*)^2 + 0,0311 \cdot (b^*)^2 - 0,8 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,1356 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0925 \cdot L^* \cdot b^* + 0,255 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,112 \cdot a^* \cdot b^* + 0,66 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,82 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.12)$$

[$R^2 = 61,11\%$]

**Figura 4.12 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – f_{v0}**



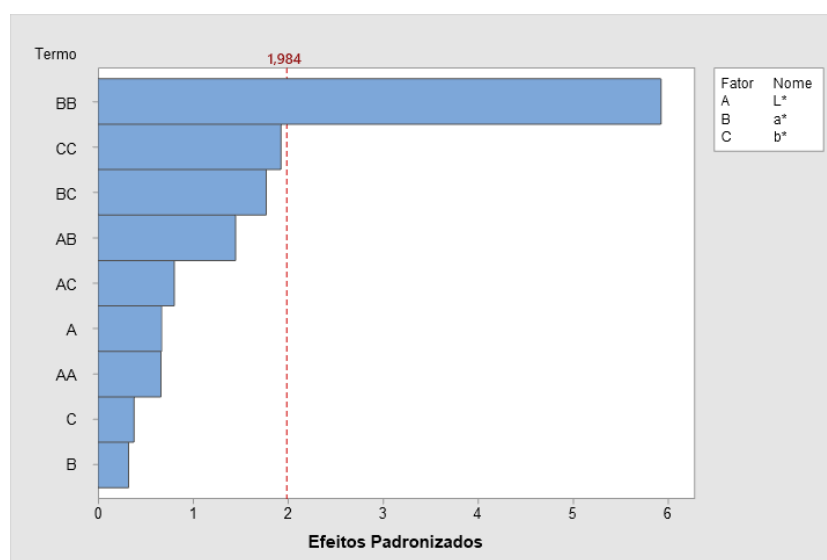
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.7 RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO

$$f_{s0} = 9,85 - 0,173 \cdot L^* - 0,717 \cdot a^* + 0,064 \cdot b^* + 0,00125 \cdot (L^*)^2 + 0,02174 \cdot (a^*)^2 + 0,00566 \cdot (b^*)^2 + 0,00694 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0031 \cdot L^* \cdot b^* - 0,01146 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.13)$$

$$[R^2 = 57,25\%]$$

Figura 4.13 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{s0}

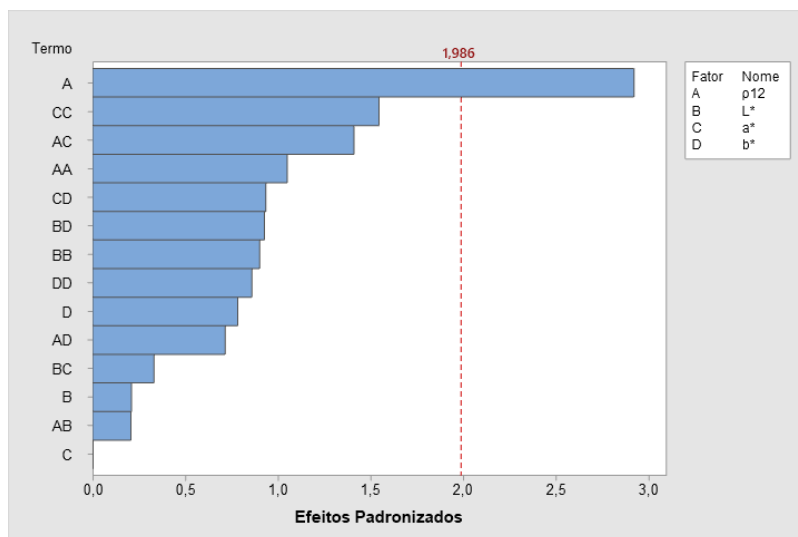


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{s0} = 0,31 - 0,164 \cdot L^* - 0,089 \cdot a^* + 0,265 \cdot b^* + 5,51 \cdot \rho_{12} + 0,00199 \cdot (L^*)^2 + 0,00955 \cdot (a^*)^2 + 0,00283 \cdot (b^*)^2 - 0,918 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,00212 \cdot L^* \cdot a^* - 0,004 \cdot L^* \cdot b^* + -0,0105 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + 0,00793 \cdot a^* \cdot b^* - 0,1182 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,0498 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.14)$$

[R² = 61,57%]

**Figura 4.14 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – f_{s0}**



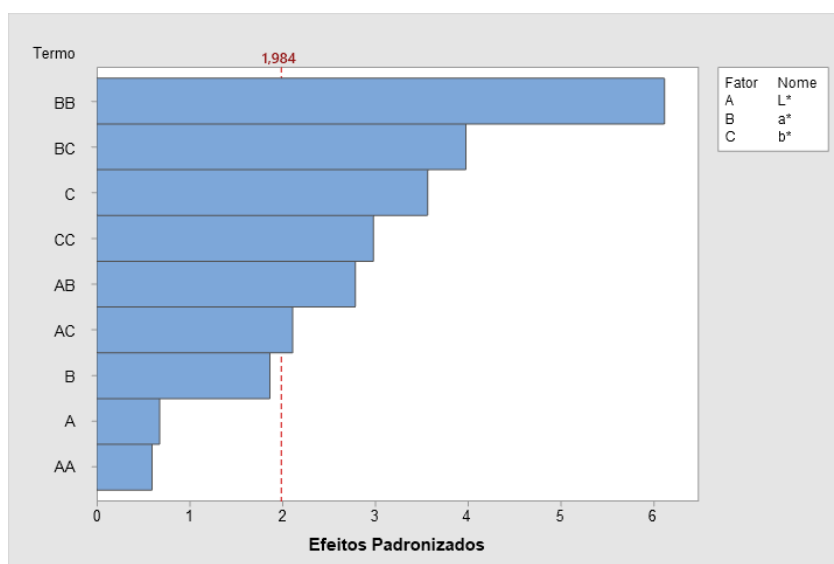
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.8 RESISTÊNCIA CONVENCIONAL NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

$$f_M = 499 - 12,1 \cdot L^* - 81,0 \cdot a^* + 40,4 \cdot b^* + 0,124 \cdot (L^*)^2 + 2,467 \cdot (a^*)^2 + 0,964 \cdot (b^*)^2 + 1,467 \cdot L^* \cdot a^* - 0,896 \cdot L^* \cdot b^* - 2,826 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.15)$$

[R² = 59,91%]

Figura 4.15 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_M

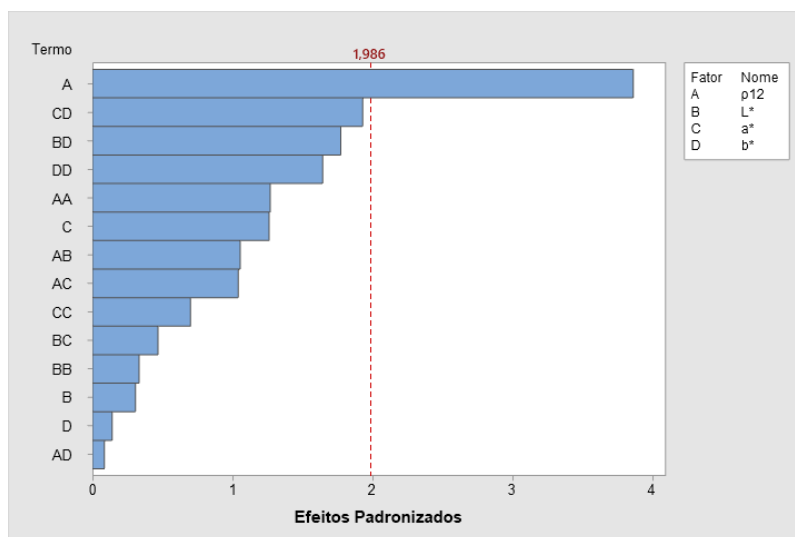


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_M = -1175 + 9,7 \cdot L^* + 20,7 \cdot a^* + 42,7 \cdot b^* + 713 \cdot \rho_{12} + 0,076 \cdot (L^*)^2 + 0,449 \cdot (a^*)^2 + 0,561 \cdot (b^*)^2 - 114,8 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,31 \cdot L^* \cdot a^* - 0,793 \cdot L^* \cdot b^* - 5,55 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 1,697 \cdot a^* \cdot b^* - 9,04 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,61 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.16)$$

[R² = 68,02%]

Figura 4.16 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_M



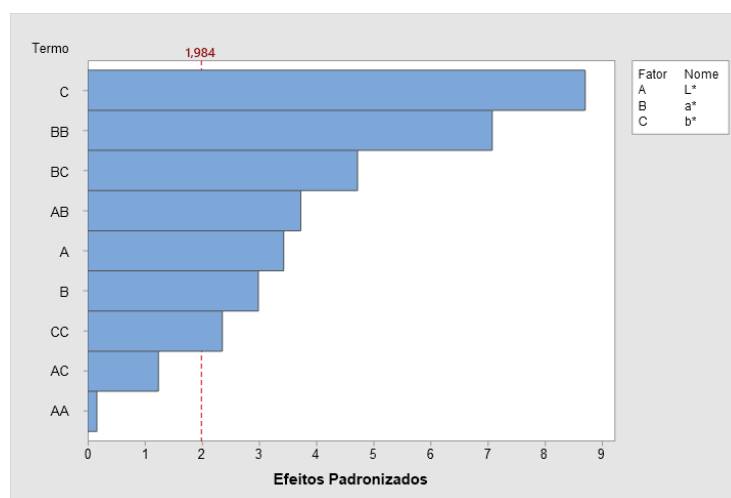
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.9 DUREZA PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{H0} = 665 - 10,6 \cdot L^* - 83,2 \cdot a^* + 22,2 \cdot b^* + 0,026 \cdot (L^*)^2 + 2,251 \cdot (a^*)^2 + 0,601 \cdot (b^*)^2 + 1,548 \cdot L^* \cdot a^* - 0,415 \cdot L^* \cdot b^* - 2,645 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.17)$$

[R² = 77,22%]

Figura 4.17 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{H0}

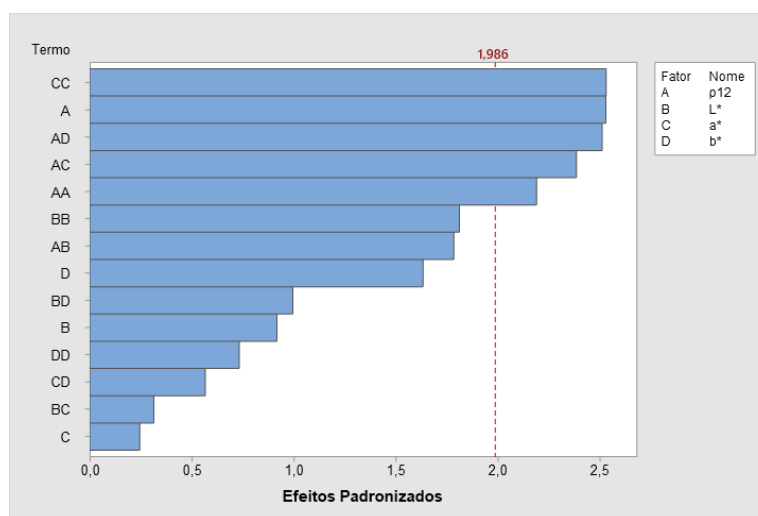


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 f_{h0} = & 44 + 31,4 \cdot L^* - 44,8 \cdot a^* - 36,7 \cdot b^* - 304 \cdot \rho_{12} - 0,303 \cdot (L^*)^2 + 1,188 \cdot (a^*)^2 + \\
 & + 0,183 \cdot (b^*)^2 + 145,2 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,153 \cdot L^* \cdot a^* + 0,326 \cdot L^* \cdot b^* - 6,88 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + \\
 & - 0,365 \cdot a^* \cdot b^* + 15,16 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 13,25 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

[R² = 84,32%]

**Figura 4.18 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – f_{H0}**



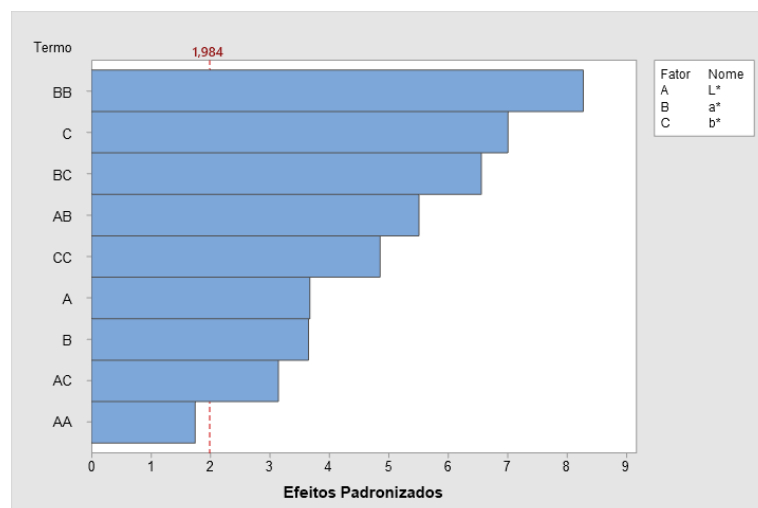
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.10 DUREZA NORMAL ÀS FIBRAS

$$\begin{aligned}
 f_{h90} = & 1442 - 41,2 \cdot L^* - 128,3 \cdot a^* + 52,2 \cdot b^* + 0,327 \cdot (L^*)^2 + 3,02 \cdot (a^*)^2 + \\
 & + 1,421 \cdot (b^*)^2 + 2,627 \cdot L^* \cdot a^* - 1,209 \cdot L^* \cdot b^* - 4,22 \cdot a^* \cdot b^*
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

[R² = 75,60%]

Figura 4.19 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{H90}

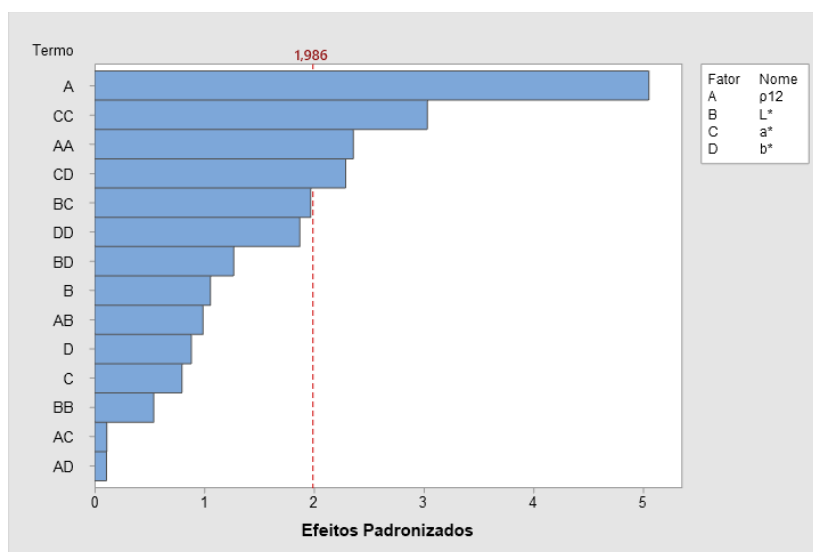


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{h90} = 456 - 10,6 \cdot L^* - 67,7 \cdot a^* + 23,5 \cdot b^* + 22 \cdot \rho_{12} + 0,104 \cdot (L^*)^2 + 1,648 \cdot (a^*)^2 + 0,542 \cdot (b^*)^2 + 181,1 \cdot (\rho_{12})^2 + 1,109 \cdot L^* \cdot a^* - 0,482 \cdot L^* \cdot b^* - 4,41 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 1,707 \cdot a^* \cdot b^* + 0,83 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,67 \cdot b^* \cdot \rho_{12}$$

$$[R^2 = 82,90\%]$$

Figura 4.20 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – f_{H90}



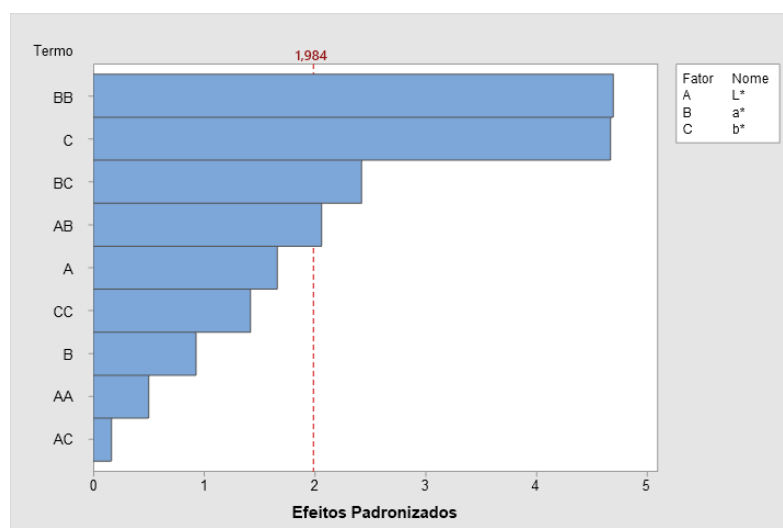
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.11 TENACIDADE

$$W = 9,8 + 0,035 \cdot L^* - 1,5 \cdot a^* - 0,018 \cdot b^* - 0,00218 \cdot (L^*)^2 + 0,03975 \cdot (a^*)^2 + 0,00964 \cdot (b^*)^2 + 0,0228 \cdot L^* \cdot a^* - 0,00148 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0361 \cdot a^* \cdot b^*$$

$$[R^2 = 54,12\%]$$

Figura 4.21 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – W

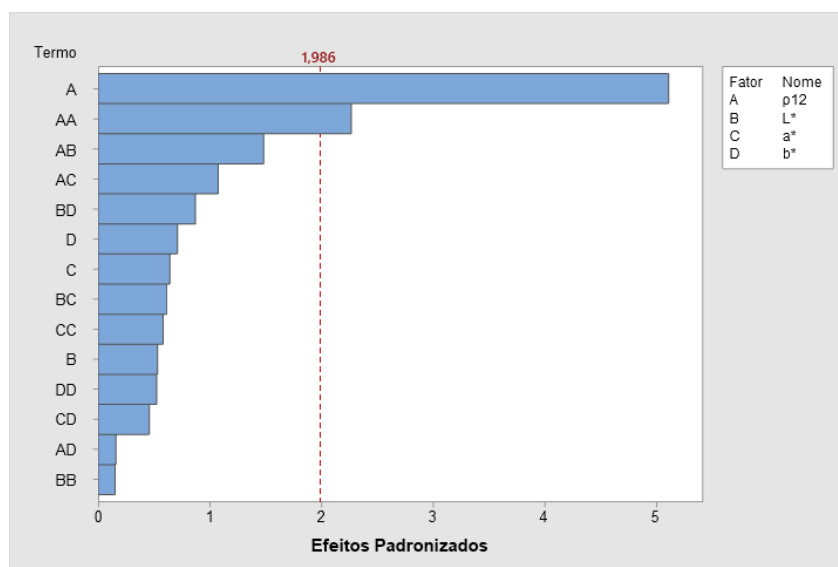


Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 W = & 29 - 0,322 \cdot L^* - 1,059 \cdot a^* - 0,446 \cdot b^* - 16,90 \cdot \rho_{12} - 0,0007 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,0074 \cdot (a^*)^2 - 0,00357 \cdot (b^*)^2 + 4,09 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0081 \cdot L^* \cdot a^* + 0,00776 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & + 0,155 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + 0,0081 \cdot a^* \cdot b^* + 0,186 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,023 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

[R² = 67,03%]

**Figura 4.22 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – W**



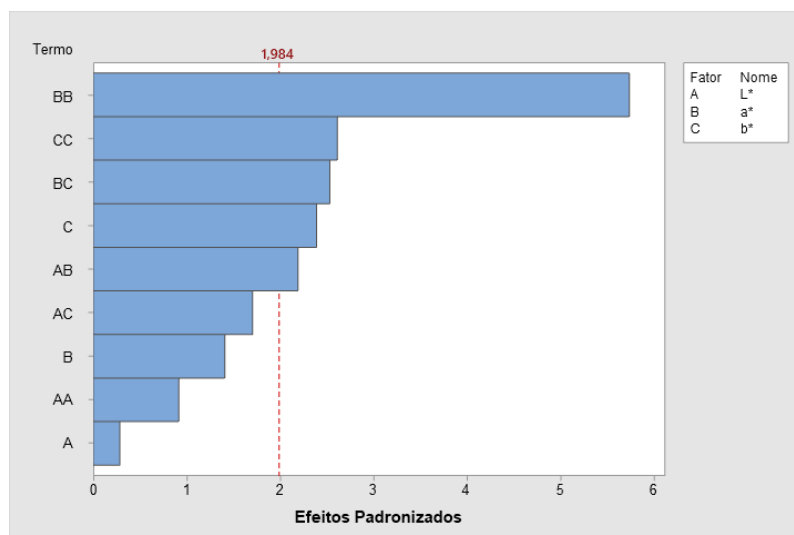
Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.12 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$\begin{aligned}
 E_{c0} = & 150777 - 3250 \cdot L^* - 13301 \cdot a^* + 3812 \cdot b^* + 30,3 \cdot (L^*)^2 + 369 \cdot (a^*)^2 + \\
 & + 134,7 \cdot (b^*)^2 + 184,1 \cdot L^* \cdot a^* - 115,5 \cdot L^* \cdot b^* - 287 \cdot a^* \cdot b^*
 \end{aligned} \quad (4.23)$$

[R² = 47,09%]

Figura 4.23 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{c0}



Fonte: Autoria Própria (2021).

$$E_{c0} = -340707 + 5774 \cdot L^* + 13133 \cdot a^* + 906 \cdot b^* + 194738 \cdot \rho_{12} - 5,7 \cdot (L^*)^2 +$$

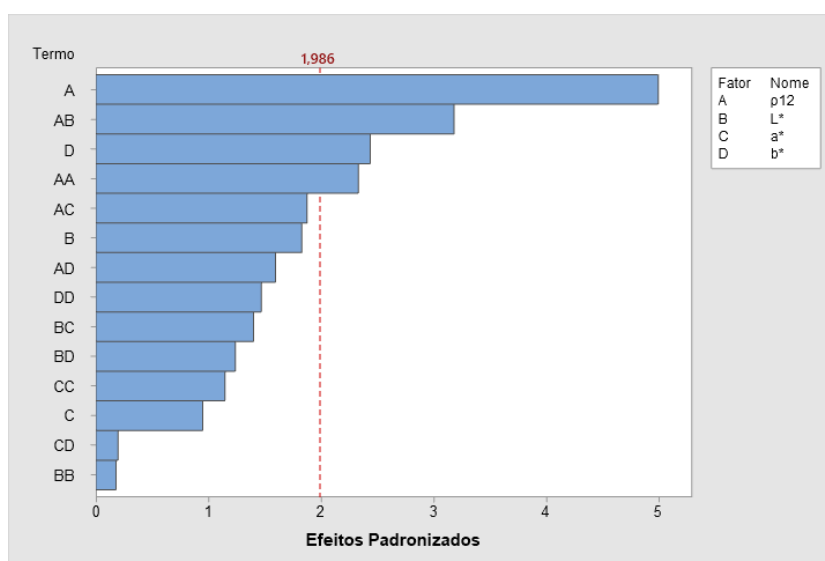
$$-101,7 \cdot (a^*)^2 + 69,5 \cdot (b^*)^2 - 29225 \cdot (\rho_{12})^2 - 128,7 \cdot L^* \cdot a^* - 76,7 \cdot L^* \cdot b^* +$$

$$-2317 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 24 \cdot a^* \cdot b^* - 2253 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 1590 \cdot b^* \cdot \rho_{12}$$

(4.24)

[R² = 68,18%]

**Figura 4.24 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade
Aparente – E_{c0}**



Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.13 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

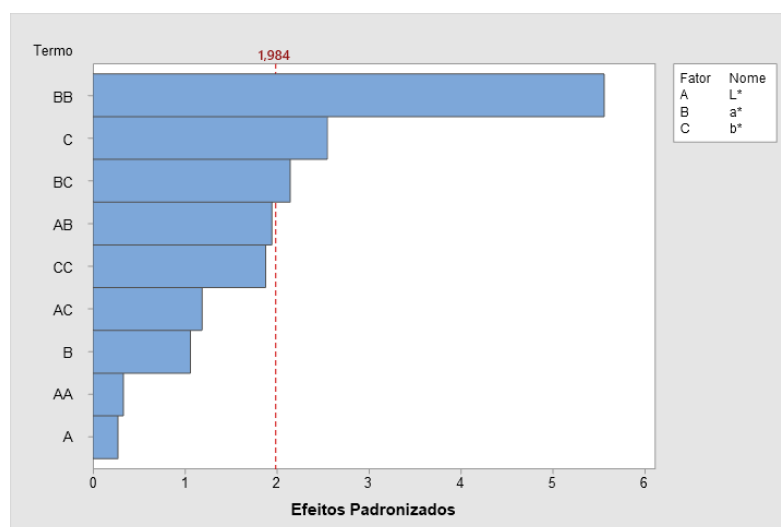
$$E_{t0} = 109626 - 1500 \cdot L^* - 12904 \cdot a^* + 2882 \cdot b^* + 10,9 \cdot (L^*)^2 + 356,7 \cdot (a^*)^2 +$$

$$+ 96,7 \cdot (b^*)^2 + 163,1 \cdot L^* \cdot a^* - 80,2 \cdot L^* \cdot b^* - 242 \cdot a^* \cdot b^*$$

(4.25)

[R² = 41,58%]

Figura 4.25 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{t0}



Fonte: Autoria Própria (2021).

$$E_{t_0} = -322356 + 2887 \cdot L^* + 111109 \cdot a^* + 6691 \cdot b^* + 217283 \cdot \rho_{12} + 9,8 \cdot (L^*)^2 +$$

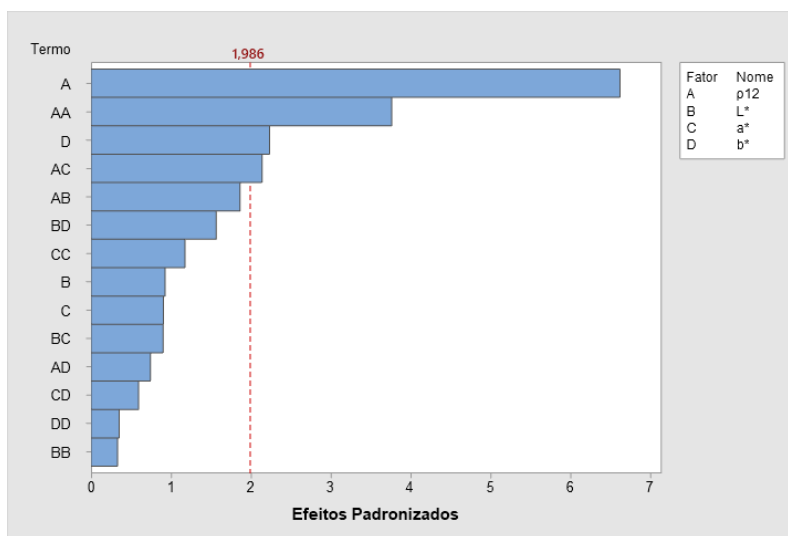
$$-97,9 \cdot (a^*)^2 + 15,6 \cdot (b^*)^2 - 44220 \cdot (\rho_{12})^2 - 77,6 \cdot L^* \cdot a^* - 90,9 \cdot L^* \cdot b^* - 1273 \cdot L^* \cdot \rho_{12} +$$

$$-68 \cdot a^* \cdot b^* - 2411 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 696 \cdot b^* \cdot \rho_{12}$$

(4.26)

[R² = 68,97%]

Figura 4.26 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{t0}



Fonte: Autoria Própria (2021).

4.5.14 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO ESTÁTICA

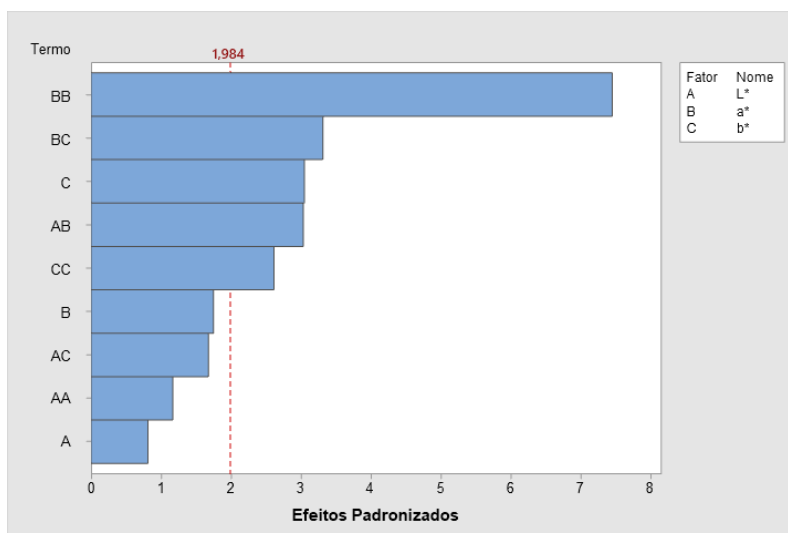
$$E_M = 190182 - 4276 \cdot L^* - 15203 \cdot a^* + 3940 \cdot b^* + 32,3 \cdot (L^*)^2 + 400,9 \cdot (a^*)^2 +$$

$$+ 112,7 \cdot (b^*)^2 + 213,1 \cdot L^* \cdot a^* - 95 \cdot L^* \cdot b^* - 314 \cdot a^* \cdot b^*$$

(4.27)

[R² = 58,50%]

Figura 4.27 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_M



Fonte: Autoria Própria (2021).

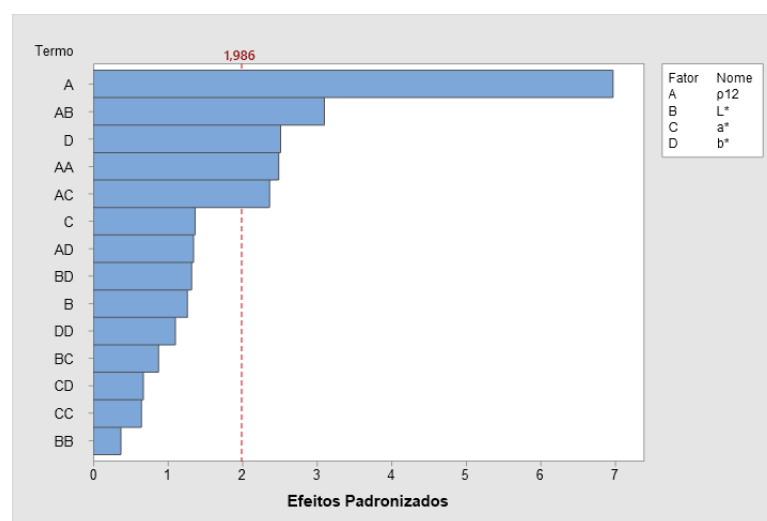
$$E_M = -220435 + 2480 \cdot L^* + 8526 \cdot a^* + 2304 \cdot b^* + 163964 \cdot \rho_{12} + 9,1 \cdot (L^*)^2 +$$

$$-44,1 \cdot (a^*)^2 + 39,9 \cdot (b^*)^2 - 23897 \cdot (\rho_{12})^2 - 61,7 \cdot L^* \cdot a^* - 62,7 \cdot L^* \cdot b^* - 1730 \cdot L^* \cdot \rho_{12} +$$

$$-62,7 \cdot a^* \cdot b^* - 2178 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 1029 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.28)$$

[R² = 79,04%]

Figura 4.28 – Gráfico de Pareto - Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_M



Fonte: Autoria Própria (2021).

De forma geral, observa-se nas Figuras 4.1 a 4.28 que os parâmetros colorimétricos e suas interações foram significativas nos modelos destinados à validação. Também se verifica que a adição da densidade aparente eleva a qualidade de ajuste, aprimorando assim a precisão do modelo.

Observando os modelos apresentados, destaca-se as propriedades f_{c0} , f_{H0} , e f_{H90} , que os modelos utilizando somente os parâmetros colorimétricos atingiram coeficiente de determinação R^2 acima de 70%, com boa qualidade no ajuste (MONTGOMERY, 2012), indicando assim a possibilidade de uso como estimador de tais propriedades. Para estes modelos, quando adicionado a densidade aparente, o R^2 eleva-se para valores acima de 80%, indicando boa precisão na estimativa.

Já para a propriedade E_M , o modelo utilizando apenas os parâmetros colorimétricos apresentou coeficiente R^2 igual a 58,50%, indicando média qualidade no ajuste (MONTGOMERY, 2012). Adicionando a densidade aparente, o R^2 subiu para 79,04%, apresentando boa qualidade no ajuste (MONTGOMERY, 2012), indicando possibilidade de uso como estimador desta propriedade.

Para as demais propriedades, os modelos utilizando apenas os parâmetros colorimétricos, os coeficientes R^2 variaram entre 28% e 62% considerando os modelos utilizando apenas os parâmetros colorimétricos e adicionando a densidade aparente, indicando baixa a média qualidade no ajuste (MONTGOMERY, 2012), impossibilitando seu uso como estimadores.

4.5.15 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE ANGELIM ARAROBA

São apresentados os resultados obtidos pela estimação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba* Ducke.) com o uso das Equações 4.1 a 4.28 utilizando os valores médios mostrados na Tabela 4.5 dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Também são reapresentados os valores médios obtidos experimentalmente nesta pesquisa para espécie Angelim Araroba e o cálculo do erro entre o valor estimado pelos modelos de regressão quadráticos e o valor experimental.

Tabela 4.33 – Avaliação dos modelos de regressão quadráticos para estimar as propriedades da madeira de Angelim Araroba

Prop.	Exp.	L*a*b* (Er - %)	L*a*b* + ρ_{12} (Er - %)
$\epsilon_{r,2}$ (%)	3,99	3,03 (23,97%)	3,06 (23,27%)
$\epsilon_{r,3}$ (%)	6,13	5,84 (9,41%)	5,84 (4,65%)
f_{c0} (MPa)	50,00	41,27 (17,44%)	51,55 (3,11%)
f_{t0} (MPa)	69,00	43,28 (37,27%)	92,15 (33,56%)
f_{t90} (MPa)	3,20	7,78 (143,23%)	10,17 (217,89%)
f_{v0} (MPa)	11,00	15,76 (43,35%)	20,49 (86,32%)
f_{s0} (MPa)	0,60	0,73 (22,64%)	0,89 (49,38%)
f_M (MPa)	16,00	72,62 (12,61%)	79,29 (0,88%)
f_{H0} (MPa)	61,00	38,18 (37,40%)	22,76 (62,69%)
f_{H90} (MPa)	40,00	29,96 (25,10%)	15,84 (60,39%)
W (N·m)	7,60	-0,37 (148,55%)	-26,96 (3646%)
E_{c0} (MPa)	12525	14047 (12,16%)	12448 (0,61%)
E_{t0} (MPa)	11885	11989 (0,88%)	14862 (25,05%)
E_M (MPa)	11943	13181 (10,37%)	13358 (11,85%)

Fonte: Autoria Própria (2021).

Onde: Exp. – Valores médios obtidos experimentalmente nesta pesquisa (Tabela 4.5);

L*a*b* - Resultado da Estimativa dos modelos de regressão quadrático apenas com parâmetros colorimétricos;

$L \cdot a \cdot b^* + p_{12}$ - Resultado da Estimativa dos modelos de regressão quadrático com parâmetros colorimétricos e densidade aparente;
 E_r – Erro associado à estimativa.

Observando os valores de erro associado às estimativas de propriedades mostradas na Tabela 4.33, observa-se que o modelo quadrático com os parâmetros colorimétricos e densidade aparente apresentou melhor precisão quando comparadas às respectivas estimativas utilizando somente os parâmetros colorimétricos.

O erro para as propriedades pode ser justificado devido ao tipo de ruptura nas quais algumas propriedades estão submetidas, cuja ruptura é frágil (CHRISTOFORO *et al.*, 2020). Também deve-se levar em conta a qualidade do ajuste das demais propriedades, que apresentaram baixa qualidade no ajuste considerando o R^2 , o que indica uma correlação de fraca a mediana, diminuindo assim a precisão dos dados estimados.

Para a tenacidade, os modelos apresentados não são representativos fisicamente, pois o valor foi negativo. Christoforo *et al.* (2014) obteve modelos com média correlação no ajuste, com R^2 em torno de 50%, indicando correlação média (DANCEY; REIDY, 2006). Já Almeida *et al.* (2014) encontrou modelos com alta qualidade no ajuste, com R^2 acima de 79%, indicando correlação forte.

As propriedades nas quais os modelos de validação, com destaque para os modelos com parâmetros colorimétricos e densidade aparente, foram significativos são propriedades com comportamento elastoplástico e importantes para o dimensionamento estrutural e mercado moveleiro, como f_{c0} , f_M , f_{H0} , f_{H90} , E_{c0} e E_M , com a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) classificando as madeiras em classes de resistência pela resistência à compressão paralela às fibras e a propriedade de rigidez é utilizada no dimensionamento de pontes, silos e peças estruturais de madeira (CALIL JUNIOR; CHRISTOFORO, 2015; FRANKE; FRANKE; HARTE, 2015; GEBHARDT; KALISKE, 2015).

Deve-se dar destaque ao fato de que os modelos com colorimetria e densidade apresentaram correlação forte, com R^2 acima de 70% para as propriedades como f_{c0} , f_M , f_{H0} , f_{H90} , E_{c0} e E_M . Desta forma, os modelos apresentados estão validados e apresentam boa precisão em algumas propriedades.

4.6 MODELOS DE REGRESSÃO MULTIVARIÁVEIS PARA O TOTAL DAS ESPÉCIES

A seguir são mostrados os valores para o modelo multivariável com os parâmetros colorimétricos, o modelo contendo a densidade aparente, bem como a ANOVA de cada modelo considerando cada propriedade física e mecânica analisada.

Para todos os modelos apresentados nas Equações 4.29 a 4.56, os dados do teste de Normalidade de Anderson-Darling mostraram p-valores acima do nível de significância de 5%, o que indica a normalidade dos dados dispostos.

Estes modelos possuem como intervalo de variação para L^* de 42,97 a 73,70, para a^* de 6,67 a 19,34, b^* de 13,19 a 33,52 e densidade aparente (ρ_{12}) tendo como intervalo de 0,46 g/cm³ a 1,24 g/cm³, onde tais modelos são válidos.

Os termos apresentados na análise de variância (ANOVA) representam: GL – grau de liberdade; SQ (Aj.) – soma de quadrados ajustada; QM (Aj.) – quadrados médios ajustado; Valor F - estatística de teste usado para determinar se algum termo no modelo está associado com a resposta; P-valor - probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

4.6.1 RETRAÇÃO RADIAL TOTAL

$$RRT = 38,3 - 1,353 \cdot L^* - 1,423 \cdot a^* + 0,858 \cdot b^* + 0,01401 \cdot (L^*)^2 + 0,0173 \cdot (a^*)^2 + 0,0426 \cdot (b^*)^2 + 0,0489 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0347 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0686 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.29)$$

[R² = 30,78%]

Tabela 4.34 - ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RRT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	43,081	4,7868	5,43	0,000
L^*	1	9,363	9,3633	10,63	0,001
a^*	1	10,361	10,3607	11,76	0,001
b^*	1	3,744	3,7439	4,25	0,042
L^*L^*	1	7,600	7,5997	8,63	0,004
a^*a^*	1	1,070	1,0702	1,21	0,273
b^*b^*	1	10,279	10,2790	11,67	0,001
L^*a^*	1	6,387	6,3870	7,25	0,008
L^*b^*	1	5,428	5,4277	6,16	0,015
a^*b^*	1	6,119	6,1195	6,95	0,010
Erro	110	96,901	0,8809		
Falta de ajuste	94	79,774	0,8487	0,79	0,761
Erro puro	16	17,127	1,0704	*	*
Total	119	139,982			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 RRT = & -15,8 - 0,856 \cdot L^* + 1,87 \cdot a^* + 1,235 \cdot b^* + 26,5 \cdot \rho_{12} + 0,01325 \cdot (L^*)^2 + \\
 & -0,0468 \cdot (a^*)^2 + 0,0213 \cdot (b^*)^2 - 3,07 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0140 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0284 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & -0,112 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,03 \cdot a^* \cdot b^* - 0,557 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,170 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

[R² = 41,24%]

Tabela 4.35 - ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RRT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	57,726	4,1233	5,26	0,000
ρ ₁₂	1	12,599	12,5992	16,08	0,000
L*	1	4,601	4,6006	5,87	0,017
a*	1	6,810	6,8097	8,69	0,004
b*	1	0,270	0,2697	0,34	0,559
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	0,600	0,6002	0,77	0,383
L*L*	1	5,411	5,4107	6,91	0,010
a*a*	1	3,030	3,0302	3,87	0,052
b*b*	1	1,880	1,8797	2,40	0,124
ρ ₁₂ *L*	1	0,380	0,3804	0,49	0,487
ρ ₁₂ *a*	1	2,444	2,4444	3,12	0,080
ρ ₁₂ *b*	1	0,310	0,3103	0,40	0,530
L*a*	1	0,341	0,3413	0,44	0,511
L*b*	1	2,786	2,7858	3,56	0,062
a*b*	1	0,636	0,6355	0,81	0,370
Erro	105	82,255	0,7834		
Falta de ajuste	104	82,251	0,7909	195,28	0,057
Erro puro	1	0,004	0,0041	*	*
Total	119	139,982			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando a

Tabela 4.34 e Tabela 4.35, verifica-se que os fatores colorimétricos foram significativos para estimar a propriedade RRT. A fim de considerar uma propriedade comum e correlacionada às classes de resistência conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), a adição da densidade aparente como variável independente se mostrou significante e elevou a qualidade do ajuste do modelo mostrado na Equação 4.30, em comparação ao modelo apresentado na Equação 4.29, mostrando assim a possibilidade de estimar a RRT em função dos parâmetros colorimétricos. Porém ambos os modelos mostram que a qualidade do ajuste ficou abaixo de 70%, indicando que há baixa qualidade nesta estimativa. Embora haja baixa qualidade, isto reforça que é possível estimar RRT em função de parâmetros colorimétricos. Outros estudos na literatura mostram que não é possível estimar a RRT em função da densidade (CAVALHEIRO *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2016).

4.6.2 RETRAÇÃO TANGENCIAL TOTAL

$$\begin{aligned}
 RTT = & 71,2 - 1,635 \cdot L^* - 4,12 \cdot a^* + 0,60 \cdot b^* + 0,01290 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,0693 \cdot (a^*)^2 + 0,0457 \cdot (b^*)^2 + 0,0729 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0303 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0792 \cdot a^* \cdot b^* \\
 & [R^2 = 34,60\%]
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

Tabela 4.36 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos - RTT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	121,980	13,5533	6,47	0,000
L*	1	10,327	10,3268	4,93	0,028
a*	1	0,907	0,9074	0,43	0,512
b*	1	2,727	2,7267	1,30	0,257
L*L*	1	6,437	6,4370	3,07	0,082
a*a*	1	17,108	17,1083	8,16	0,005
b*b*	1	11,838	11,8378	5,65	0,019
L*a*	1	14,208	14,2084	6,78	0,010
L*b*	1	4,119	4,1187	1,96	0,164
a*b*	1	8,136	8,1360	3,88	0,051
Erro	110	230,569	2,0961		
Falta de ajuste	94	214,850	2,2856	2,33	0,029
Erro puro	16	15,719	0,9824	*	*
Total	119	352,548			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 RRT = & -41,9 - 0,197 \cdot L^* + 2,65 \cdot a^* + 0,55 \cdot b^* + 55,4 \rho_{12} + 0,01062 \cdot (L^*)^2 + \\
 & - 0,0508 \cdot (a^*)^2 + 0,0276 \cdot (b^*)^2 - 7,21 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0117 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0274 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & - 0,541 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,0338 \cdot a^* \cdot b^* - 1,18 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,363 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \\
 & [R^2 = 45,39\%]
 \end{aligned}
 \tag{4.32}$$

Tabela 4.37 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente - RTT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	160,027	11,4305	6,23	0,000
ρ_{12}	1	22,640	22,6395	12,35	0,001
L*	1	3,264	3,2643	1,78	0,185
a*	1	3,997	3,9972	2,18	0,143
b*	1	2,358	2,3577	1,29	0,259
$\rho_{12} \cdot \rho_{12}$	1	3,308	3,3076	1,80	0,182
L*L*	1	3,475	3,4753	1,90	0,172
a*a*	1	3,566	3,5656	1,94	0,166
b*b*	1	3,151	3,1513	1,72	0,193
$\rho_{12} \cdot L^*$	1	8,833	8,8328	4,82	0,030
$\rho_{12} \cdot a^*$	1	10,946	10,9463	5,97	0,016

$\rho_{12}^{*b^*}$	1	1,420	1,4195	0,77	0,381
L^*a^*	1	0,240	0,2398	0,13	0,718
L^*b^*	1	2,588	2,5881	1,41	0,237
a^*b^*	1	0,803	0,8026	0,44	0,510
Erro	105	192,522	1,8335		
Falta de ajuste	104	192,453	1,8505	27,03	0,152
Erro puro	1	0,068	0,0685	*	*
Total	119	352,548			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos dados mostrados na Tabela 4.36 e

Tabela 4.37, os parâmetros colorimétricos não foram significativos para estimar a RTT, apenas a densidade aparente foi significativa. Mesmo no modelo apresentado na Equação 4.32 a qualidade do seu ajuste foi baixa, mostrando assim a impossibilidade de se estimar a RTT em função da densidade aparente e parâmetros colorimétricos. Esta impossibilidade já foi relatada em outros estudos na literatura (CAVALHEIRO *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2016).

4.6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{c0} = 439 - 12,79 \cdot L^* - 50,7 \cdot a^* + 27,17 \cdot b^* + 0,1332 \cdot (L^*)^2 + 1,555 \cdot (a^*)^2 + 0,688 \cdot (b^*)^2 + 0,961 \cdot L^* \cdot a^* - 0,639 \cdot L^* \cdot b^* - 1,88 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.33)$$

[R² = 76,70%]

Tabela 4.38 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{c0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	38519,7	4279,97	40,24	0,000
L^*	1	88,1	88,06	0,83	0,365
a^*	1	465,7	465,69	4,38	0,039
b^*	1	4010,4	4010,45	37,71	0,000
L^*L^*	1	686,5	686,48	6,45	0,012

a*a*	1	8608,4	8608,35	80,94	0,000
b*b*	1	2687,3	2687,29	25,27	0,000
L*a*	1	2470,0	2470,04	23,23	0,000
L*b*	1	1835,0	1834,95	17,25	0,000
a*b*	1	4589,5	4589,53	43,15	0,000
Erro	110	11698,6	106,35		
Falta de ajuste	94	11165,9	118,79	3,57	0,003
Erro puro	16	532,6	33,29	*	*
Total	119	50218,3			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 f_{c0} = & -236 + 2,33 \cdot L^* + 0,9 \cdot a^* + 11,95 \cdot b^* + 128 \cdot \rho_{12} + 0,0448 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,342 \cdot (a^*)^2 + 0,411 \cdot (b^*)^2 - 15,2 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,22 \cdot L^* \cdot a^* - 0,391 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & - 1,78 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,854 \cdot a^* \cdot b^* - 1,52 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 3,24 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

[R² = 86,40%]

Tabela 4.39 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f _{c0}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	43388,1	3099,15	47,64	0,000
ρ ₁₂	1	3021,5	3021,50	46,45	0,000
L*	1	16,7	16,73	0,26	0,613
a*	1	151,9	151,92	2,34	0,129
b*	1	0,1	0,07	0,00	0,974
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	14,7	14,69	0,23	0,636
L*L*	1	62,0	61,97	0,95	0,331
a*a*	1	161,3	161,35	2,48	0,118
b*b*	1	698,7	698,67	10,74	0,001
ρ ₁₂ *L*	1	95,5	95,50	1,47	0,228
ρ ₁₂ *a*	1	18,3	18,26	0,28	0,597
ρ ₁₂ *b*	1	113,3	113,30	1,74	0,190
L*a*	1	84,9	84,92	1,31	0,256
L*b*	1	526,4	526,37	8,09	0,005
a*b*	1	513,6	513,61	7,90	0,006
Erro	105	6830,2	65,05		
Falta de ajuste	104	6828,6	65,66	40,53	0,125
Erro puro	1	1,6	1,62	*	*
Total	119	50218,3			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os modelos apresentados na Equação 4.33 e 4.34 apresentaram boa qualidade no ajuste (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), superior ao nível de 70%, com correlação forte, indicando que é possível estimar a resistência à compressão paralela às fibras por meio de parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Isso reforça a possibilidade de uso dos parâmetros colorimétricos na estimativa de propriedades. Outras pesquisas na literatura mostraram modelos significativos com boa qualidade no ajuste utilizando apenas a densidade aparente (ALMEIDA *et al.*, 2016; LAHR *et al.*, 2021), reforçando os dados obtidos nesta pesquisa, mostrando que os parâmetros colorimétricos são viáveis na estimativa de propriedade f_{c0}.

Almeida (2017) obteve modelo quadrático para f_{c0} com qualidade de ajuste superior ao obtido nesta pesquisa (91,14%), porém com número menor de espécies (5 espécies), utilizando como variáveis independentes os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* e b^*) e a densidade aparente a 12%.

4.6.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{t0} = 410 - 11,6 \cdot L^* - 50,3 \cdot a^* + 27,8 \cdot b^* + 0,104 \cdot (L^*)^2 + 1,649 \cdot (a^*)^2 + 0,58 \cdot (b^*)^2 + 0,982 \cdot L^* \cdot a^* - 0,545 \cdot L^* \cdot b^* - 2,009 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.35)$$

[$R^2 = 39,20\%$]

Tabela 4.40 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	48196	5355,1	7,88	0,000
L^*	1	279	279,1	0,41	0,523
a^*	1	1182	1182,3	1,74	0,190
b^*	1	6777	6777,2	9,97	0,002
L^*L^*	1	417	417,3	0,61	0,435
a^*a^*	1	9689	9689,0	14,26	0,000
b^*b^*	1	1906	1905,7	2,80	0,097
L^*a^*	1	2580	2580,3	3,80	0,054
L^*b^*	1	1336	1336,2	1,97	0,164
a^*b^*	1	5243	5243,3	7,72	0,006
Erro	110	74746	679,5		
Falta de ajuste	94	70452	749,5	2,79	0,012
Erro puro	16	4294	268,4	*	*
Total	119	122942			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{t0} = 51 - 10,1 \cdot L^* - 20,9 \cdot a^* + 33,2 \cdot b^* + 59 \cdot \rho_{12} + 0,062 \cdot (L^*)^2 + 0,695 \cdot (a^*)^2 + 0,311 \cdot (b^*)^2 - 125,1 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,617 \cdot L^* \cdot a^* - 0,401 \cdot L^* \cdot b^* + 6,72 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 1,43 \cdot a^* \cdot b^* + 3,05 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 9,58 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.36)$$

[$R^2 = 47,12\%$]

Tabela 4.41 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f_{t0}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	57929	4137,75	6,68	0,000
ρ_{12}	1	3013	3013,06	4,87	0,030
L^*	1	791	791,44	1,28	0,261
a^*	1	441	440,97	0,71	0,401
b^*	1	1041	1041,35	1,68	0,198

$\rho_{12}^* \rho_{12}$	1	995	994,78	1,61	0,208
$L^* L^*$	1	117	116,59	0,19	0,665
$a^* a^*$	1	668	668,30	1,08	0,301
$b^* b^*$	1	399	398,84	0,64	0,424
$\rho_{12}^* L^*$	1	1365	1364,88	2,20	0,141
$\rho_{12}^* a^*$	1	73	73,22	0,12	0,732
$\rho_{12}^* b^*$	1	988	987,97	1,60	0,209
$L^* a^*$	1	668	667,83	1,08	0,301
$L^* b^*$	1	555	555,13	0,90	0,346
$a^* b^*$	1	1441	1440,81	2,33	0,130
Erro	105	65014	619,18		
Falta de ajuste	104	64996	624,96	34,72	0,134
Erro puro	1	18	18,00	*	*
Total	119	122942			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.40 e

Tabela 4.41, os modelos apresentados pela Equação 4.35 e 4.36 mostram que os parâmetros colorimétricos como significativos para estimar a f_{t0} . Embora haja correlação significativa, alguns parâmetros possuem p-valor acima do nível de significância. Além disso, os modelos apresentam baixa qualidade no ajuste, inferior a 50%, indicando correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006), o que impossibilita seu uso para estimar a f_{t0} com tais modelos. Não existe na literatura estudos correlatos versando sobre uso de modelos de regressão para estimar a f_{t0} em função da densidade aparente e parâmetros colorimétricos.

4.6.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

$$\begin{aligned}
 f_{t90} = & 32,8 - 1,152 \cdot L^* - 2,13 \cdot a^* + 1,393 \cdot b^* + 0,0121 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,055 \cdot (a^*)^2 + 0,0454 \cdot (b^*)^2 + 0,055 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0407 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0852 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.37) \\
 & [R^2 = 22,04\%]
 \end{aligned}$$

Tabela 4.42 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{t90}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	45,512	5,0569	3,46	0,001
L^*	1	0,538	0,5383	0,37	0,545
a^*	1	0,214	0,2140	0,15	0,703
b^*	1	0,784	0,7838	0,54	0,466
$L^* L^*$	1	5,665	5,6650	3,87	0,052
$a^* a^*$	1	4,765	4,7646	3,26	0,074

b*b*	1	11,691	11,6905	7,99	0,006
L*a*	1	8,103	8,1033	5,54	0,020
L*b*	1	7,440	7,4397	5,08	0,026
a*b*	1	9,427	9,4275	6,44	0,013
Erro	110	160,952	1,4632		
Falta de ajuste	94	147,641	1,5706	1,89	0,075
Erro puro	16	13,311	0,8319	*	*
Total	119	206,464			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 f_{t90} = & -33,5 - 0,942 \cdot L^* + 1,55 \cdot a^* + 2,62 \cdot b^* + 43,6 \cdot \rho_{12} + 0,01586 \cdot (L^*)^2 + \\
 & -0,0191 \cdot (a^*)^2 + 0,0332 \cdot (b^*)^2 - 5,98 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,0363 \cdot L^* \cdot a^* - 0,0483 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & -0,205 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,0876 \cdot a^* \cdot b^* - 1,112 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,185 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.38}$$

[R² = 28,90%]

Tabela 4.43 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f _{t90}						
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor	
Modelo	14	59,671	4,26220	3,05	0,001	
ρ ₁₂	1	7,442	7,44195	5,32	0,023	
L*	1	2,264	2,26399	1,62	0,206	
a*	1	2,637	2,63731	1,89	0,173	
b*	1	0,547	0,54667	0,39	0,533	
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	2,272	2,27180	1,63	0,205	
L*L*	1	7,754	7,75395	5,55	0,020	
a*a*	1	0,506	0,50600	0,36	0,549	
b*b*	1	4,546	4,54581	3,25	0,074	
ρ ₁₂ *L*	1	1,273	1,27289	0,91	0,342	
ρ ₁₂ *a*	1	9,724	9,72409	6,96	0,010	
ρ ₁₂ *b*	1	0,368	0,36759	0,26	0,609	
L*a*	1	2,315	2,31499	1,66	0,201	
L*b*	1	8,053	8,05292	5,76	0,018	
a*b*	1	5,412	5,41175	3,87	0,052	
Erro	105	146,793	1,39803			
Falta de ajuste	104	146,773	1,41128	70,56	0,095	
Erro puro	1	0,020	0,02000	*	*	
Total	119	206,464				

Fonte: Autoria Própria (2021).

A baixa qualidade no ajuste dos modelos apresentados na

Tabela 4.42 e

Tabela 4.43, inferior a 50%, faz com que não seja possível utilizá-los para estimar a f_{i90} em função dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Uma possibilidade para tal má qualidade no ajuste seja o modo de falha desta propriedade (MORANDO *et al.*, 2019; CHRISTOFORO *et al.*, 2020). Christoforo *et al.* (2020) encontrou modelo significativo estimando f_{i90} e densidade aparente utilizando cinco espécies de madeira, com duas sendo o Cambará Rosa e Copaíba, porém com baixa qualidade no ajuste, o que impossibilita seu uso como estimador. Outros estudos na literatura mostram também a impossibilidade de se estimar propriedades como modo frágil de ruptura (f_{s0} e f_{i90}) em função da densidade aparente (LAHR *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; CHRISTOFORO *et al.*, 2019; AQUINO *et al.*, 2021a, 2021b).

4.6.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS

$$f_{v0} = 1355 - 57,04 \cdot L^* - 39 \cdot a^* + 51,12 \cdot b^* + 0,5233 \cdot (L^*)^2 + 0,382 \cdot (a^*)^2 + 0,282 \cdot (b^*)^2 + 0,976 \cdot L^* \cdot a^* - 0,803 \cdot L^* \cdot b^* - 1,154 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.39)$$

[R² = 85,60%]

Tabela 4.44 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{v0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	90689	10076,6	72,64	0,000
L*	1	3525	3524,6	25,41	0,000
a*	1	118	117,6	0,85	0,359
b*	1	4294	4294,0	30,96	0,000
L*L*	1	10598	10597,8	76,40	0,000
a*a*	1	519	519,3	3,74	0,056
b*b*	1	452	451,6	3,26	0,074
L*a*	1	2548	2547,6	18,37	0,000
L*b*	1	2898	2898,1	20,89	0,000
a*b*	1	1731	1730,7	12,48	0,001
Erro	110	15258	138,7		
Falta de ajuste	94	7693	81,8	0,17	1,000
Erro puro	16	7565	472,8	*	*
Total	119	105948			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{v0} = 970 - 54,52 \cdot L^* - 18,2 \cdot a^* + 57,8 \cdot b^* + 190 \cdot \rho_{12} + 0,5108 \cdot (L^*)^2 - 0,107 \cdot (a^*)^2 + 0,124 \cdot (b^*)^2 - 72,8 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,748 \cdot L^* \cdot a^* - 0,763 \cdot L^* \cdot b^* + 1,4 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,911 \cdot a^* \cdot b^* - 0,74 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 4,72 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.40)$$

[R² = 87,37%]

Tabela 4.45 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f_{v0}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	92568	6612,00	51,89	0,000
ρ_{12}	1	815	814,63	6,39	0,013
L*	1	1224	1223,83	9,60	0,002
a*	1	41	41,16	0,32	0,571
b*	1	1944	1943,58	15,25	0,000
$\rho_{12}^* \rho_{12}$	1	337	336,54	2,64	0,107
L*L*	1	8039	8038,81	63,09	0,000
a*a*	1	16	15,87	0,12	0,725
b*b*	1	64	63,85	0,50	0,481
$\rho_{12}^* L^*$	1	59	58,83	0,46	0,498
$\rho_{12}^* a^*$	1	4	4,25	0,03	0,855
$\rho_{12}^* b^*$	1	240	239,59	1,88	0,173
L*a*	1	980	980,04	7,69	0,007
L*b*	1	2007	2006,59	15,75	0,000
a*b*	1	585	584,82	4,59	0,034
Erro	105	13380	127,42		
Falta de ajuste	104	13377	128,62	48,63	0,114
Erro puro	1	3	2,65	*	*
Total	119	105948			

Fonte: Autoria Própria (2021).

O resultado apresentado na Tabela 4.16 apresenta correlação significativa para os parâmetros colorimétricos e a densidade aparente, com elevado valor para o R para o último. Isso pode explicar o motivo que o modelo apresentado na Equação 4.39 apresentar os parâmetros colorimétricos e suas interações como significativos, conforme os dados apresentados na

Tabela 4.44. Isso mostra que há possibilidade de se estimar resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com uso de parâmetros colorimétricos, com o modelo apresentando boa qualidade no ajuste, acima de 70% (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012).

Considerando o modelo apresentado na Equação 4.40 e os dados apresentados na Tabela 4.45, observa-se que os parâmetros colorimétricos e suas interações mantêm significância, com os parâmetros L* e b* e a densidade aparente sendo significativa no modelo. O modelo apresenta boa qualidade no ajuste, o que indica a possibilidade de seu uso para estimar f_{v0} usando parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Outro estudo na literatura mostra a possibilidade de se estimar a f_{v0} em função apenas da densidade aparente, com valor de R² inferior ao obtido nesta pesquisa (51,27%) (CHRISTOFORO *et al.*, 2020). Vale ressaltar que a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é uma importante propriedade no cálculo estrutural (JOHNS; LACROIX, 2000; METELLI; GIURIANI; MARCHINA, 2013; CHANG, 2015), sendo utilizada no dimensionamento de vigas, colunas e outros elementos estruturais.

4.6.7 RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO

$$f_{s0} = 6,56 - 0,059 \cdot L^* - 0,612 \cdot a^* - 0,003 \cdot b^* + 0,00038 \cdot (L^*)^2 + 0,02097 \cdot (a^*)^2 + 0,00597 \cdot (b^*)^2 + 0,00512 \cdot L^* \cdot a^* - 0,00247 \cdot L^* \cdot b^* - 0,001047 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.41)$$

[R² = 57,37%]

Tabela 4.46 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{s0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	6,3440	0,70489	16,45	0,000
L*	1	0,0288	0,02877	0,67	0,414
a*	1	0,0209	0,02092	0,49	0,486
b*	1	0,0144	0,01442	0,34	0,563
L*L*	1	0,0056	0,00564	0,13	0,717
a*a*	1	1,5659	1,56593	36,54	0,000
b*b*	1	0,2020	0,20196	4,71	0,032
L*a*	1	0,0701	0,07011	1,64	0,204
L*b*	1	0,0275	0,02749	0,64	0,425
a*b*	1	0,1424	0,14241	3,32	0,071
Erro	110	4,7141	0,04286		
Falta de ajuste	94	3,9995	0,04255	0,95	0,586
Erro puro	16	0,7146	0,04466	*	*
Total	119	11,0581			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{s0} = -3,51 + 0,011 \cdot L^* - 0,008 \cdot a^* + 0,109 \cdot b^* + 5,41 \cdot \rho_{12} + 0,00046 \cdot (L^*)^2 + 0,00974 \cdot (a^*)^2 + 0,00261 \cdot (b^*)^2 - 0,758 \cdot (\rho_{12})^2 - 0,00025 \cdot L^* \cdot a^* - 0,00201 \cdot L^* \cdot b^* + -0,0185 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 0,00557 \cdot a^* \cdot b^* - 0,1221 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,0366 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.42)$$

[R² = 61,48%]

Tabela 4.47 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f_{s0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	6,7986	0,485612	11,97	0,000
ρ ₁₂	1	0,3651	0,365064	9,00	0,003
L*	1	0,0008	0,000822	0,02	0,887
a*	1	0,0009	0,000853	0,02	0,885
b*	1	0,0185	0,018538	0,46	0,501
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	0,0365	0,036495	0,90	0,345
L*L*	1	0,0065	0,006473	0,16	0,690
a*a*	1	0,1312	0,131205	3,23	0,075
b*b*	1	0,0282	0,028229	0,70	0,406
ρ ₁₂ *L*	1	0,0104	0,010354	0,26	0,614
ρ ₁₂ *a*	1	0,1172	0,117223	2,89	0,092
ρ ₁₂ *b*	1	0,0144	0,014432	0,36	0,552
L*a*	1	0,0001	0,000108	0,00	0,959
L*b*	1	0,0139	0,013894	0,34	0,560
a*b*	1	0,0219	0,021896	0,54	0,464
Erro	105	4,2595	0,040567		
Falta de ajuste	104	4,2395	0,040765	2,04	0,515
Erro puro	1	0,0200	0,020000	*	*
Total	119	11,0581			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os resultados apresentados na Tabela 4.17 mostram que apenas o parâmetro a^* e densidade aparente foram significativos para o teste de Pearson, com baixa correlação. Isso pode explicar a não significância dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente dos modelos apresentados nas Equações 4.41 e 4.42, com base nos dados da Tabela 4.46 e Tabela 4.47, com nenhum parâmetro sendo significativo.

A média qualidade no ajuste dos modelos faz com que não seja possível utilizá-los para estimar a f_{s0} em função dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente. Uma possibilidade para tal má qualidade no ajuste seja o modo de falha desta propriedade (MORANDO *et al.*, 2019; CHRISTOFORO *et al.*, 2020;). Christoforo *et al.* (2020) encontrou modelo significativo estimando f_{s0} e densidade aparente utilizando cinco espécies de madeira, com duas sendo o Cambará Rosa e Copaíba, porém com baixa qualidade no ajuste, o que impossibilita seu uso como estimador. Outros estudos na literatura mostram também a impossibilidade de se estimar propriedades como modo frágil de ruptura (f_{s0} e f_{i90}) em função da densidade aparente (LAHR *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; CHRISTOFORO *et al.*, 2019; AQUINO *et al.*, 2021a, 2021b).

4.6.8 RESISTÊNCIA CONVENCIONAL NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

$$f_M = 665 - 17,8 \cdot L^* - 86,4 \cdot a^* + 43,7 \cdot b^* + 0,166 \cdot (L^*)^2 + 2,509 \cdot (a^*)^2 + 0,944 \cdot (b^*)^2 + 1,561 \cdot L^* \cdot a^* - 0,923 \cdot L^* \cdot b^* - 2,878 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.43)$$

[R² = 60,11%]

Tabela 4.48 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_M

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	84517	9390,8	18,42	0,000
L*	1	92	92,5	0,18	0,671
a*	1	1046	1045,5	2,05	0,155
b*	1	8538	8538,4	16,74	0,000
L*L*	1	1072	1072,4	2,10	0,150
a*a*	1	22430	22430,0	43,99	0,000
b*b*	1	5053	5053,2	9,91	0,002
L*a*	1	6521	6520,5	12,79	0,001
L*b*	1	3834	3833,8	7,52	0,007
a*b*	1	10758	10758,4	21,10	0,000
Erro	110	56093	509,9		
Falta de ajuste	94	52090	554,1	2,21	0,037
Erro puro	16	4003	250,2	*	*
Total	119	140610			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 f_M = & -308 - 0,9 \cdot L^* - 20,3 \cdot a^* + 34,6 \cdot b^* + 289 \cdot \rho_{12} + 0,072 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,976 \cdot (a^*)^2 + 0,513 \cdot (b^*)^2 - 56,4 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,634 \cdot L^* \cdot a^* - 0,635 \cdot L^* \cdot b^* + \\
 & - 1,21 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 1,631 \cdot a^* \cdot b^* - 2,44 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 0,59 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.44}$$

[R² = 66,53%]

Tabela 4.49 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f_M					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	93549	6682,08	14,91	0,000
ρ_{12}	1	5966	5965,95	13,31	0,000
L^*	1	10	9,92	0,02	0,882
a^*	1	296	296,18	0,66	0,418
b^*	1	12	11,65	0,03	0,872
$\rho_{12} \cdot \rho_{12}$	1	202	202,21	0,45	0,503
$L^* \cdot L^*$	1	158	158,40	0,35	0,553
$a^* \cdot a^*$	1	1317	1316,73	2,94	0,089
$b^* \cdot b^*$	1	1085	1085,09	2,42	0,123
$\rho_{12} \cdot L^*$	1	44	44,49	0,10	0,753
$\rho_{12} \cdot a^*$	1	47	46,68	0,10	0,748
$\rho_{12} \cdot b^*$	1	4	3,78	0,01	0,927
$L^* \cdot a^*$	1	704	704,18	1,57	0,213
$L^* \cdot b^*$	1	1389	1389,28	3,10	0,081
$a^* \cdot b^*$	1	1875	1874,64	4,18	0,043
Erro	105	47061	448,20		
Falta de ajuste	104	47022	452,14	11,68	0,230
Erro puro	1	39	38,72	*	*
Total	119	140610			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados apresentados na

Tabela 4.18, as propriedades colorimétricas e a densidade aparente foram significantes na correlação com a f_M , com destaque para a elevada correlação entre densidade aparente e f_M . Isso pode explicar a significância dos parâmetros colorimétricos e suas interações no modelo apresentado na Equação 4.43. Ressalta-se que o modelo apresentou qualidade de ajuste acima de 50% (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), mostrando média correlação entre os fatores.

A adição da densidade aparente no modelo apresentado na Equação 4.44 elevou a qualidade do ajuste no modelo, indicando assim seu uso para estimar f_M em função dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente, embora os parâmetros colorimétricos e suas interações não sejam significantes, conforme dados da Tabela 4.49.

Na literatura, observa-se modelo quadrático com os parâmetros colorimétricos e densidade aparente com maior qualidade de ajuste (R² = 87,62%) (ALMEIDA, 2017) superior ao obtido na presente pesquisa, porém utiliza-se cinco espécies de madeira, uma para cada

classe de resistência (C20, C30, C40, C50 – atribuído, C60) da norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.6.9 DUREZA PARALELA ÀS FIBRAS

$$f_{ho} = 779 - 20 \cdot L^* - 80,3 \cdot a^* + 34,3 \cdot b^* + 0,1369 \cdot (L^*)^2 + 2,159 \cdot (a^*)^2 + 0,71 \cdot (b^*)^2 + 1,644 \cdot L^* \cdot a^* - 0,642 \cdot L^* \cdot b^* - 2,882 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.45)$$

$$[R^2 = 76,42\%]$$

Tabela 4.50 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{ho}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	126227	14025,2	39,61	0,000
L*	1	4650	4649,5	13,13	0,000
a*	1	2722	2722,3	7,69	0,007
b*	1	39366	39365,7	111,17	0,000
L*L*	1	725	724,9	2,05	0,155
a*a*	1	16599	16599,4	46,88	0,000
b*b*	1	2854	2853,8	8,06	0,005
L*a*	1	7232	7232,2	20,42	0,000
L*b*	1	1854	1854,0	5,24	0,024
a*b*	1	10786	10785,7	30,46	0,000
Erro	110	38952	354,1		
Falta de ajuste	94	32380	344,5	0,84	0,711
Erro puro	16	6572	410,7	*	*
Total	119	165179			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$f_{ho} = 325 + 10 \cdot L^* - 45 \cdot a^* - 10,2 \cdot b^* - 234 \cdot \rho_{12} - 0,0916 \cdot (L^*)^2 + 1,050 \cdot (a^*)^2 + 0,275 \cdot (b^*)^2 + 109,5 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,418 \cdot L^* \cdot a^* - 0,037 \cdot L^* \cdot b^* - 5,52 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + -0,808 \cdot a^* \cdot b^* + 14,41 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 10,14 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.46)$$

$$[R^2 = 83,03\%]$$

Tabela 4.51 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f_{ho}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	137142	9795,88	36,69	0,000
ρ_{12}	1	2970	2970,39	11,12	0,001
L*	1	239	239,50	0,90	0,346
a*	1	1	0,93	0,00	0,953
b*	1	367	366,95	1,37	0,244
$\rho_{12} \cdot \rho_{12}$	1	762	762,46	2,86	0,094
L*L*	1	259	258,68	0,97	0,327
a*a*	1	1523	1522,78	5,70	0,019
b*b*	1	313	313,02	1,17	0,281
$\rho_{12} \cdot L^*$	1	921	920,92	3,45	0,066
$\rho_{12} \cdot a^*$	1	1633	1633,14	6,12	0,015
$\rho_{12} \cdot b^*$	1	1107	1107,24	4,15	0,044
L*a*	1	306	306,08	1,15	0,287
L*b*	1	5	4,82	0,02	0,893
a*b*	1	460	459,68	1,72	0,192
Erro	105	28036	267,01		

Falta de ajuste	104	28031	269,53	52,64	0,109
Erro puro	1	5	5,12	*	*
Total	119	165179			

Fonte: Autoria Própria (2021).

O modelo apresentado na Equação 4.45 possui boa qualidade de ajuste, com coeficiente de determinação acima de 70%, indicando forte correlação entre os termos (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012). Além disso, os parâmetros colorimétricos e suas interações são significativos, conforme os dados da Tabela 4.50, indicando a possibilidade de uso como estimador da f_{h0} em função dos parâmetros colorimétricos.

A adição da densidade aparente no modelo apresentado na Equação 4.46 elevou a qualidade do ajuste no modelo, indicando forte correlação (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), para acima de 70% o R^2 , mostrando a possibilidade de estimar f_{h0} em função dos parâmetros colorimétricos e da densidade aparente, com a densidade aparente e parâmetros colorimétricos e suas interações. Vale ressaltar que a propriedade de dureza Janka, normal e paralela às fibras, é importante para indústria moveleira, a fim considerar questões relativas de penetração de pinos e desempenho ao longo da vida útil do equipamento (GONÇALEZ *et al.*, 2006; ALMEIDA, 2017).

4.6.10 DUREZA NORMAL ÀS FIBRAS

$$f_{h90} = 1324 - 41,3 \cdot L^* - 119,4 \cdot a^* + 57,3 \cdot b^* + 0,359 \cdot (L^*)^2 + 2,9 \cdot (a^*)^2 + 1,527 \cdot (b^*)^2 + 2,584 \cdot L^* \cdot a^* - 1,347 \cdot L^* \cdot b^* - 4,335 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.47)$$

[$R^2 = 76,71\%$]

Tabela 4.52 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – f_{h90}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	153912	17101,3	40,25	0,000
L*	1	6127	6127,0	14,42	0,000
a*	1	4165	4165,2	9,80	0,002
b*	1	28419	28419,0	66,89	0,000
L*L*	1	4976	4975,7	11,71	0,001
a*a*	1	29955	29954,9	70,51	0,000
b*b*	1	13220	13219,9	31,12	0,000
L*a*	1	17865	17865,4	42,05	0,000
L*b*	1	8162	8161,5	19,21	0,000
a*b*	1	24408	24407,5	57,45	0,000
Erro	110	46734	424,9		
Falta de ajuste	94	42324	450,3	1,63	0,133
Erro puro	16	4411	275,7	*	*
Total	119	200646			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 f_{h90} = & 709 - 24 \cdot L^* - 72 \cdot a^* + 38,5 \cdot b^* - 8 \cdot \rho_{12} + 0,225 \cdot (L^*)^2 + 1,628 \cdot (a^*)^2 + \\
 & + 0,607 \cdot (b^*)^2 + 169,7 \cdot (\rho_{12})^2 + 1,294 \cdot L^* \cdot a^* - 0,69 \cdot L^* \cdot b^* - 2,7 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + \\
 & - 1,968 \cdot a^* \cdot b^* + 1,41 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 1,73 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.48}$$

[R² = 83,68%]

Tabela 4.53 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

f _{h90}						
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor	
Modelo	14	167896	11992,6	38,45	0,000	
ρ ₁₂	1	10231	10230,5	32,80	0,000	
L*	1	208	208,0	0,67	0,416	
a*	1	83	83,5	0,27	0,606	
b*	1	29	28,9	0,09	0,761	
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	1829	1829,1	5,86	0,017	
L*L*	1	1565	1565,4	5,02	0,027	
a*a*	1	3665	3665,1	11,75	0,001	
b*b*	1	1524	1523,6	4,88	0,029	
ρ ₁₂ *L*	1	220	220,3	0,71	0,403	
ρ ₁₂ *a*	1	16	15,6	0,05	0,823	
ρ ₁₂ *b*	1	32	32,2	0,10	0,749	
L*a*	1	2933	2932,7	9,40	0,003	
L*b*	1	1640	1639,8	5,26	0,024	
a*b*	1	2729	2729,0	8,75	0,004	
Erro	105	32750	311,9			
Falta de ajuste	104	32741	314,8	34,05	0,136	
Erro puro	1	9	9,2	*	*	
Total	119	200646				

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os valores de correlação de Pearson apresentados na Tabela 4.20, tais valores são significativos, com exceção do parâmetro colorimétrico L*. Tal significância pode explicar a boa qualidade no ajuste do modelo apresentado na Equação 4.47, com R² acima de 70%, indicando boa qualidade no ajuste e forte correlação (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012) e com os parâmetros colorimétricos sendo significativos, conforme dados apresentados na Tabela 4.52. Isso mostra que há a possibilidade de se estimar a dureza normal às fibras em função dos parâmetros colorimétricos e suas interações, com boa qualidade no ajuste.

Adicionando a densidade aparente no modelo apresentado na Equação 4.48 trouxe melhora na qualidade de ajuste, elevando o R² para 83,68%, com os parâmetros colorimétrico, suas interações e a densidade aparente sendo significativos, o que mostra a possibilidade de uso de tais fatores, como a densidade aparente e parâmetros colorimétricos para estimar a dureza normal às fibras. O valor na qualidade do ajuste do modelo obtido nesta pesquisa na Equação 4.48 é inferior ao obtido por Almeida (2017), onde obteve-se coeficiente de determinação (R²) igual a 96,08%

4.6.11 TENACIDADE

$$W = 28,46 - 0,524 \cdot L^* - 1,613 \cdot a^* + 0,542 \cdot b^* + 0,00346 \cdot (L^*)^2 + 0,03806 \cdot (a^*)^2 + 0,01287 \cdot (b^*)^2 + 0,02983 \cdot L^* \cdot a^* - 0,01075 \cdot L^* \cdot b^* - 0,0463 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.49)$$

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

Tabela 4.54 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – W

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	27,8599	3,09554	13,52	0,000
L*	1	0,2209	0,22093	0,96	0,328
a*	1	0,1792	0,17919	0,78	0,378
b*	1	5,1290	5,12896	22,40	0,000
L*L*	1	0,4627	0,46265	2,02	0,158
a*a*	1	5,1585	5,15849	22,53	0,000
b*b*	1	0,9396	0,93956	4,10	0,045
L*a*	1	2,3792	2,37918	10,39	0,002
L*b*	1	0,5199	0,51987	2,27	0,135
a*b*	1	2,7779	2,77795	12,13	0,001
Erro	110	25,1879	0,22898		
Falta de ajuste	94	24,1784	0,25722	4,08	0,001
Erro puro	16	1,0095	0,06309	*	*
Total	119	53,0477			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$W = 19 - 0,25 \cdot L^* - 0,559 \cdot a^* - 0,26 \cdot b^* - 11,67 \cdot \rho_{12} - 0,00006 \cdot (L^*)^2 + 0,0008 \cdot (a^*)^2 - 0,00247 \cdot (b^*)^2 + 3,25 \cdot (\rho_{12})^2 + 0,00494 \cdot L^* \cdot a^* + 0,00459 \cdot L^* \cdot b^* + 0,1119 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + 0,0057 \cdot a^* \cdot b^* + 0,106 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 0,021 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.50)$$

$$[R^2 = 66,35\%]$$

Tabela 4.55 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – W

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	35,1979	2,51414	14,79	0,000
ρ_{12}	1	5,1236	5,12364	30,14	0,000
L*	1	0,0357	0,03567	0,21	0,648
a*	1	0,0565	0,05645	0,33	0,566
b*	1	0,0454	0,04539	0,27	0,606
$\rho_{12} \cdot \rho_{12}$	1	0,6727	0,67270	3,96	0,049
L*L*	1	0,0001	0,00011	0,00	0,980
a*a*	1	0,0008	0,00082	0,00	0,945
b*b*	1	0,0252	0,02523	0,15	0,701
$\rho_{12} \cdot L^*$	1	0,3782	0,37816	2,22	0,139
$\rho_{12} \cdot a^*$	1	0,0888	0,08877	0,52	0,472
$\rho_{12} \cdot b^*$	1	0,0047	0,00468	0,03	0,869
L*a*	1	0,0427	0,04273	0,25	0,617
L*b*	1	0,0726	0,07259	0,43	0,515

a*b*	1	0,0230	0,02304	0,14	0,714
Erro	105	17,8498	0,17000		
Falta de ajuste	104	17,8474	0,17161	72,09	0,094
Erro puro	1	0,0024	0,00238	*	*
Total	119	53,0477			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os valores apresentados na Tabela 4.21 mostram que as correlações entre os parâmetros colorimétricos, exceto a^* , e densidade aparente são significativos, apresentando valores robustos para tais correlações (R).

O modelo apresentado pela Equação 4.49 possui boa qualidade no ajuste, com coeficiente de determinação acima de 50% (MONTGOMERY, 2012) e com parâmetro colorimétrico (b^*) e a interação entre o parâmetro a^* sendo significativa.

Considerando os dados apresentados na Tabela 4.55, o modelo apresentado na Equação 4.50 possui boa qualidade de ajuste, com coeficiente de determinação acima de 50% (MONTGOMERY, 2012), porém apenas a densidade aparente é fator significativo no modelo, o que indica a impossibilidade de uso de parâmetros colorimétricos para estimar a tenacidade (W). É importante ressaltar que a tenacidade avalia a resistência ao impacto e a madeira possui tenacidade superior ao concreto e aço, o que faz que se utilize madeira em pontes, dormentes de ferrovias, mourões de currais (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2014).

Almeida *et al.* (2014) avaliaram a possibilidade de se estimar a tenacidade em função da densidade aparente utilizando modelos linear, quadrático e cúbico, utilizando espécies coníferas (1) e folhosas (5), sendo duas da classe C20, uma da classe C40 e uma da classe C60 das folhosas e uma da classe C20 da coníferas. O modelo que apresentou melhor qualidade no ajuste foi o modelo cúbico, com R^2 igual a 84,70%. O modelo quadrático apresentou R^2 igual a 80,60%. Ambos os modelos foram significativos, com p-valor igual a 0,000.

Christoforo *et al.* (2014) analisaram a possibilidade de se estimar a tenacidade em função da densidade aparente utilizando modelos linear, quadrático e cúbico, utilizando espécies tropicais, sendo três espécies por classe de resistência (C20, C30, C40, C50 - atribuído e C60). Neste caso, o modelo quadrático foi que apresentou melhor ajuste, com R^2 igual a 67,80%, com o modelo sendo significativo.

4.6.12 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$E_{c0} = 112897 - 2004 \cdot L^* - 12006 \cdot a^* + 3153 \cdot b^* + 21,3 \cdot (L^*)^2 + 358,7 \cdot (a^*)^2 + 139,7 \cdot (b^*)^2 + 163,5 \cdot L^* \cdot a^* - 110,6 \cdot L^* \cdot b^* - 278 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.51)$$

[R² = 47,49%]

Tabela 4.56 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{c0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	1302355635	144706182	11,06	0,000
L*	1	306465	306465	0,02	0,879
a*	1	17973503	17973503	1,37	0,244
b*	1	110110298	110110298	8,41	0,005
L*L*	1	17505414	17505414	1,34	0,250
a*a*	1	458294807	458294807	35,01	0,000
b*b*	1	110583286	110583286	8,45	0,004
L*a*	1	71462313	71462313	5,46	0,021
L*b*	1	55040833	55040833	4,21	0,043
a*b*	1	100470327	100470327	7,68	0,007
Erro	110	1439785090	13088955		
Falta de ajuste	94	1336607451	14219228	2,21	0,038
Erro puro	16	103177639	6448602	*	*
Total	119	2742140724			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$E_{c0} = -212702 + 4024 \cdot L^* + 7320 \cdot a^* + 148 \cdot b^* + 127405 \cdot \rho_{12} - 4 \cdot (L^*)^2 - 28,5 \cdot (a^*)^2 + 67,7 \cdot (b^*)^2 - 20085 \cdot (\rho_{12})^2 - 80,4 \cdot L^* \cdot a^* - 61,7 \cdot L^* \cdot b^* - 1574 \cdot L^* \cdot \rho_{12} - 21 \cdot a^* \cdot b^* + 1227 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 1294 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.52)$$

[R² = 66,10%]

Tabela 4.57 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente – E_{c0}

E _{c0}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	1812621844	129472989	14,63	0,000
ρ ₁₂	1	249784626	249784626	28,22	0,000
L*	1	26240830	26240830	2,96	0,088
a*	1	9301956	9301956	1,05	0,308
b*	1	51816555	51816555	5,85	0,017
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	25638198	25638198	2,90	0,092
L*L*	1	494527	494527	0,06	0,814
a*a*	1	1124377	1124377	0,13	0,722
b*b*	1	18908836	18908836	2,14	0,147
ρ ₁₂ *L*	1	74800650	74800650	8,45	0,004
ρ ₁₂ *a*	1	11832817	11832817	1,34	0,250
ρ ₁₂ *b*	1	18043052	18043052	2,04	0,156
L*a*	1	11339817	11339817	1,28	0,260

L*b*	1	13109008	13109008	1,48	0,226
a*b*	1	324727	324727	0,04	0,848
Erro	105	929518880	8852561		
Falta de ajuste	104	929504532	8937544	622,90	0,032
Erro puro	1	14348	14348	*	*
Total	119	2742140724			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.22, apenas as propriedades b* e densidade aparente foram significativas na relação com a E_{c0}, com o p-valor inferior ao valor de significância. Isso pode explicar os resultados para a significância dos parâmetros colorimétricos na

Tabela 4.56 e

Tabela 4.57.

Os modelos apresentados na Equação 4.23 e 4.24 apresentaram boa qualidade no ajuste (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), superior ao nível de 50%, mostrando correlação moderada para forte entre os fatores, indicando que é possível estimar a módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras por meio de parâmetros colorimétricos e densidade aparente, reforçando a possibilidade de uso dos parâmetros colorimétricos na estimativa de propriedades. A adição da densidade aparente melhorou a qualidade de ajuste do modelo e os parâmetros colorimétricos e suas interações continuam significativas.

4.6.13 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

$$E_{t0} = 110920 - 1501 \cdot L^* - 13000 \cdot a^* + 2832 \cdot b^* + 10,6 \cdot (L^*)^2 + 357,9 \cdot (a^*)^2 + 95,3 \cdot (b^*)^2 + 163,6 \cdot L^* \cdot a^* - 78,6 \cdot L^* \cdot b^* - 241,2 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.53)$$

$$[R^2 = 44,20\%]$$

Tabela 4.58 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_{t0}

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	1110052805	123339201	9,68	0,000
L*	1	557805	557805	0,04	0,835
a*	1	6422700	6422700	0,50	0,479
b*	1	136368361	136368361	10,70	0,001
L*L*	1	4338231	4338231	0,34	0,561
a*a*	1	456191857	456191857	35,81	0,000
b*b*	1	51498099	51498099	4,04	0,047
L*a*	1	71562712	71562712	5,62	0,020
L*b*	1	27786635	27786635	2,18	0,143
a*b*	1	75559125	75559125	5,93	0,016
Erro	110	1401316560	12739241		
Falta de ajuste	94	1322403062	14068118	2,85	0,010

Erro puro	16	78913498	4932094	*	*
Total	119	2511369365			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$\begin{aligned}
 E_{t0} = & -193561 + 2548 \cdot L^* + 4156 \cdot a^* + 3540 \cdot b^* + 136646 \cdot \rho_{12} - 5,5 \cdot (L^*)^2 + \\
 & + 0,9 \cdot (a^*)^2 + 3,1 \cdot (b^*)^2 - 31340 \cdot (\rho_{12})^2 - 41,1 \cdot L^* \cdot a^* - 40,9 \cdot L^* \cdot b^* - 576 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + \\
 & - 27 \cdot a^* \cdot b^* - 1178 \cdot a^* \cdot \rho_{12} - 728 \cdot b^* \cdot \rho_{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.54}$$

[R² = 66,21%]

Tabela 4.59 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –

E_{t0}					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	1662868837	118776345	14,70	0,000
ρ_{12}	1	306602751	306602751	37,94	0,000
L^*	1	2001018	2001018	0,25	0,620
a^*	1	1719878	1719878	0,21	0,646
b^*	1	20133894	20133894	2,49	0,117
$\rho_{12}^* \rho_{12}$	1	62418083	62418083	7,72	0,006
$L^* L^*$	1	935174	935174	0,12	0,734
$a^* a^*$	1	1027	1027	0,00	0,991
$b^* b^*$	1	40596	40596	0,01	0,944
$\rho_{12}^* L^*$	1	10024469	10024469	1,24	0,268
$\rho_{12}^* a^*$	1	10916535	10916535	1,35	0,248
$\rho_{12}^* b^*$	1	5714161	5714161	0,71	0,402
$L^* a^*$	1	2962235	2962235	0,37	0,546
$L^* b^*$	1	5760685	5760685	0,71	0,400
$a^* b^*$	1	514842	514842	0,06	0,801
Erro	105	848500528	8080957		
Falta de ajuste	104	845441675	8129247	2,66	0,459
Erro puro	1	3058854	3058854	*	*
Total	119	2511369365			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Observando os dados apresentados na

Tabela 4.23, apenas a densidade aparente foi significativa na relação com a E_{t0} , com o p-valor inferior ao valor de significância. Isso pode explicar os resultados para a significância dos parâmetros colorimétricos e suas interações na Tabela 4.58, representado no modelo

apresentado na Equação 4.53, que apresenta qualidade no ajuste (R^2) inferior a 50%, mostrando uma correlação moderada entre os fatores.

Considerando a adição da densidade aparente no modelo apresentado na Equação 4.54, os p-valores apresentados na

Tabela 4.59 mostram que os parâmetros colorimétricos e suas interações deixam de ser significativos, mostrando assim a impossibilidade do uso dos parâmetros colorimétricos para estimar o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras. Embora o coeficiente de determinação esteja acima de 50%, apenas a densidade aparente é significativa na Equação 4.54.

4.6.14 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO ESTÁTICA

$$E_M = 165449 - 3381 \cdot L^* - 14438 \cdot a^* + 3345 \cdot b^* + 25,2 \cdot (L^*)^2 + 396,2 \cdot (a^*)^2 + 114 \cdot (b^*)^2 + 198,6 \cdot L^* \cdot a^* - 88,4 \cdot L^* \cdot b^* - 304,7 \cdot a^* \cdot b^* \quad (4.55)$$

$[R^2 = 58,74\%]$

Tabela 4.60 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos – E_M

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	9	1463624627	162624959	17,40	0,000
L*	1	5328512	5328512	0,57	0,452
a*	1	15497075	15497075	1,66	0,201
b*	1	144584646	144584646	15,47	0,000
L*L*	1	24617311	24617311	2,63	0,107
a*a*	1	559014767	559014767	59,82	0,000
b*b*	1	73711515	73711515	7,89	0,006
L*a*	1	105541429	105541429	11,29	0,001
L*b*	1	35175437	35175437	3,76	0,055
a*b*	1	120584126	120584126	12,90	0,000
Erro	110	1028020605	9345642		
Falta de ajuste	94	945376420	10057196	1,95	0,066
Erro puro	16	82644186	5165262	*	*
Total	119	2491645232			

Fonte: Autoria Própria (2021).

$$E_M = -124095 + 1740 \cdot L^* + 3675 \cdot a^* + 755 \cdot b^* + 108357 \cdot \rho_{12} + 3,2 \cdot (L^*)^2 + 23 \cdot (a^*)^2 + 33,9 \cdot (b^*)^2 - 15623 \cdot (\rho_{12})^2 - 29,6 \cdot L^* \cdot a^* - 36,6 \cdot L^* \cdot b^* - 1181 \cdot L^* \cdot \rho_{12} + 46,4 \cdot a^* \cdot b^* - 1350 \cdot a^* \cdot \rho_{12} + 896 \cdot b^* \cdot \rho_{12} \quad (4.56)$$

[R² = 76,49%]**Tabela 4.61 – ANOVA Modelo com Parâmetros Colorimétricos e Densidade Aparente –**

E_M					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P-valor
Modelo	14	1905917748	136136982	24,40	0,000
ρ ₁₂	1	266862309	266862309	47,84	0,000
L*	1	5643556	5643556	1,01	0,317
a*	1	7860295	7860295	1,41	0,238
b*	1	24263259	24263259	4,35	0,039
ρ ₁₂ *ρ ₁₂	1	15512087	15512087	2,78	0,098
L*L*	1	324657	324657	0,06	0,810
a*a*	1	734054	734054	0,13	0,718
b*b*	1	4753243	4753243	0,85	0,358
ρ ₁₂ *L*	1	42138417	42138417	7,55	0,007
ρ ₁₂ *a*	1	14340441	14340441	2,57	0,112
ρ ₁₂ *b*	1	8650131	8650131	1,55	0,216
L*a*	1	1531429	1531429	0,27	0,601
L*b*	1	4610485	4610485	0,83	0,365
a*b*	1	1516825	1516825	0,27	0,603
Erro	105	585727484	5578357		
Falta de ajuste	104	585147735	5626421	9,70	0,251
Erro puro	1	579749	579749	*	*
Total	119	2491645232			

Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando os dados apresentados na Tabela 4.24, apenas a densidade aparente foi significativa na correlação com a E_M, com o p-valor inferior ao valor de significância. Isso pode explicar os resultados dos parâmetros colorimétricos e suas interações na

Tabela 4.60, representado no modelo apresentado na Equação 4.55, que apresenta qualidade no ajuste (R²) superior a 50%.

Efetuada a adição da densidade aparente no modelo apresentado na Equação 4.56, os p-valores apresentados na Tabela 4.61 ilustram que nem todos os parâmetros colorimétricos e suas interações são significativos, havendo uma predominância da densidade aparente nos fatores significantes. Desta forma e considerando o valor do coeficiente de determinação (R²), é possível utilizar o modelo apresentado na Equação 4.56 para estimar E_M em função dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente com boa precisão.

Almeida (2017) obteve modelo quadrático estimando E_M em função dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente utilizando 5 espécies de madeira tropical, sendo uma de cada classe de resistência conforme a norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997), com modelo tendo boa qualidade no ajuste, com R² igual a 94,63%, superior ao obtido nesta pesquisa.

4.7 AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DOS MODELOS QUADRÁTICOS MULTIVARIÁVEL

A fim de avaliar a precisão dos modelos apresentados nas Equações 4.29 a 4.36, tais modelos foram comparados com dados da literatura. Considerando que existem dois trabalhos na literatura versando sobre estimação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras e apenas um sobre madeiras folhosas, objeto de estudo desta pesquisa, os modelos obtidos nesta pesquisa foram utilizados para estimar as propriedades das espécies de madeira estudadas por Almeida (2017), utilizando os valores médios dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente e comparando com os dados experimentais para as propriedades estudadas por este autor.

Vale lembrar que os modelos apresentados nas Equações 4.29 a 4.56 possuem como intervalo de variação para L^* de 42,97 a 73,70, para a^* de 6,67 a 19,34, b^* de 13,19 a 33,52 e densidade aparente (ρ_{12}) tendo como intervalo de 0,46 g/cm³ a 1,24 g/cm³. Estes intervalos são onde os modelos são válidos.

A Tabela 4.62 ilustra os valores médios para as propriedades estudadas (f_{c0} , f_M , f_{H90} e E_M), densidade aparente e parâmetros colorimétricos obtidos por Almeida (2017).

Observando os dados apresentados na Tabela 4.62, verifica-se que as propriedades das espécies Caixeta e Cajueiro não podem ser estimadas pelas Equações 4.33, 4.34, 4.43, 4.44, 4.47, 4.48, 4.55 e 4.56 pois o parâmetro colorimétrico a^* para a Caixeta e Cajueiro estão abaixo do limite definido pelos quadráticos multivariáveis (a^* de 6,67 a 19,34) e a densidade da Caixeta também está abaixo da densidade mínima dos modelos.

Desta forma, são apresentadas as estimativas feitas pelos modelos dados pelas Equações 4.33, 4.34, 4.43, 4.44, 4.47, 4.48, 4.55 e 4.56 para as propriedades f_{c0} , f_M , f_{H90} e E_M das espécies Cambará, Tatajuba e Roxinho, bem como os dados experimentais obtidos por Almeida (2017).

Tabela 4.62 – Propriedades Físicas, Mecânicas e Colorimétricas obtidas por Almeida (2017)

Espécie	Propriedade	Valor médio	CV (%)	Min	Max
Caixeta (<i>Simarouba amara</i>)	f_{c0} (MPa)	32	4,26	30	35
	f_M (MPa)	63	7,98	45	68
	f_{H90} (MPa)	21,88	7,42	19,12	24,03
	E_M (MPa)	7114	7,13	6392	8614
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,41	2,44	0,39	0,43
	L^*	78,89	1,06	77,03	80,72
	a^*	1,45	20,23	1,08	2,03
	b^*	18,66	3,68	17,42	19,91
Cajueiro	f_{c0} (MPa)	48	5,60	43	54
	f_M (MPa)	84	6,45	73	95

<i>Anacardium giganteum</i>	f_{H90} (MPa)	28,42	8,21	25	35
	E_M (MPa)	12056	6,20	10269	13374
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,60	5,35	0,55	0,66
	L^*	63,52	3,19	59,97	68,20
	a^*	5,28	13,91	4,19	6,37
	b^*	12,48	20,39	9,34	18,68
Cambará (<i>Erisma uncinatum</i>)	f_{c0} (MPa)	59	18,11	37	71
	f_M (MPa)	120	21,88	77	189
	f_{H90} (MPa)	46	14,02	36	57
	E_M (MPa)	13767	16,50	9378	16997
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,74	4,99	0,68	0,78
	L^*	63,04	4,62	58,66	69,49
	a^*	7,89	22,44	3,28	9,44
b^*	14,70	8,71	12,19	16,65	
Tatajuba (<i>Bagassa guianensis</i>)	f_{c0} (MPa)	73	10,72	34	97
	f_M (MPa)	104	21,99	58	136
	f_{H90} (MPa)	57	38,07	33	107
	E_M (MPa)	12299	8,70	97	140
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,74	11,59	0,56	0,92
	L^*	68,17	6,32	60,83	73,44
	a^*	5,39	30,61	3,16	9,48
b^*	23,85	15,20	18,75	29,23	
Roxinho (<i>Peltogyne spp.</i>)	f_{c0} (MPa)	86	10,78	62	96
	f_M (MPa)	144	11,76	109	174
	f_{H90} (MPa)	92	8,44	80	107
	E_M (MPa)	17156	7,80	14457	19207
	ρ_{12} (g/cm ³)	0,97	2,46	0,94	1,02
	L^*	55,32	2,16	52,82	58,09
	a^*	12,98	6,99	11,63	14,85
b^*	5,72	10,93	4,29	6,83	

Fonte: Almeida (2017).

Tabela 4.63 – Estimativa dos modelos quadráticos e comparação com dados experimentais de Almeida (2017)

Espécie	Propriedade	Exp.	$L^*a^*b^*$ (Er - %)	$L^*a^*b^* + \rho_{12}$ (Er - %)
Cambará	f_{c0} (MPa)	59	74,69 (26,60%)	59,56 (0,95%)
	f_M (MPa)	120	110,74 (7,72%)	85,05 (29,12%)
	f_{H90} (MPa)	46	92,08 (17,44%)	47,00 (2,17%)
	E_M (MPa)	13767	18532 (34,61%)	11452 (16,16%)
Tatajuba	f_{c0} (MPa)	73	69,87 (4,29%)	47,67 (34,69%)
	f_M (MPa)	104	112,34 (8,02%)	93,85 (9,75%)

Roxinho	f_{H90} (MPa)	57	54,94 (3,60%)	67,77 (18,90%)
	E_M (MPa)	12299	20465 (66,40%)	13292 (8,08%)
	f_{c0} (MPa)	86	269,18 (213,00%)	165,12 (92,01%)
	f_M (MPa)	144	385,54 (167,74%)	239,75 (66,49%)
	f_{H90} (MPa)	92	561,79 (510,65%)	229,58 (149,55%)
	E_M (MPa)	17156	49752 (190,00%)	17686 (3,09%)

Fonte: Autoria Própria (2021).

Onde: Exp. – Valores médios obtidos por Almeida (2017) (Tabela 4.62);

$L^*a^*b^*$ - Resultado da Estimativa dos modelos de regressão quadrático apenas com parâmetros colorimétricos;

$L^*a^*b^* + \rho_{12}$ - Resultado da Estimativa dos modelos de regressão quadrático com parâmetros colorimétricos e densidade aparente;

Er – Erro associado à estimativa.

Com base nos dados mostrados na Tabela 4.63, observa-se que a adição da densidade aparente trouxe às estimativas uma maior precisão, com redução no valor do erro entre o valor médio experimental e o valor estimado. Vale lembrar que o coeficiente R^2 apresenta a qualidade de ajuste do modelo, ou seja, ilustra o quanto o modelo explica as variações na propriedade analisada decorrente dos fatores de entrada, que no caso são os parâmetros colorimétricos e a densidade aparente.

Conforme dados mostrados na validação dos modelos quadráticos multivariáveis, bem como na estimativa de propriedades com dados da literatura, deve-se dar destaque aos modelos para estimar a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}), resistência convencional na flexão estática (f_M), dureza paralela às fibras (f_{H0}), módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) e módulo de elasticidade na flexão estática (E_M), propriedades com comportamento elastoplástico e importantes para o dimensionamento estrutural, como vigas, caibros, terças, pilares, bem como relevantes para a confecção de móveis.

A obtenção de modelos mais precisos, que tenham um menor erro, deve levar em conta um maior número de espécies, a fim de que os diferentes matizes das madeiras estejam contemplados pelo modelo, considerando a luminosidade, os tons de verde, vermelho, azul e amarelo. Isso trará modelos mais significativos, com melhor qualidade de ajuste, bem como modelos mais representativos, com maior abrangência às diferentes espécies de madeira existentes.

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados da presente pesquisa, pode-se concluir:

- Os resultados da caracterização física e mecânica das madeiras mostrou que os lotes são homogêneos, com os valores do coeficiente de variação estando, em sua maioria, dentro do limite normativo. Também é ilustrado que tais resultados são próximos ao encontrado por outros autores.
- Para as propriedades colorimétricas, observou-se que apenas duas espécies tropicais tem informações na literatura sobre suas características colorimétricas, tornando assim mais proeminente a importância do presente trabalho para o estudo de madeiras com técnicas não destrutivas;
- Com base no teste de Pearson, foi possível avaliar a correlação significativa entre as propriedades físicas e mecânicas e os parâmetros colorimétricos. Na maioria das propriedades, a correlação foi mediana a fraca, indicando que, de forma isolada, cada parâmetro colorimétrico não explica a estimativa das propriedades físicas e mecânicas, porém há relação significativa entre os parâmetros e propriedades, mostrando relação de independência entre os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas, indicando que há a possibilidade de se relacionar, por meio de modelos de regressão multivariáveis os parâmetros colorimétricos e as propriedades físicas e mecânicas. De forma adicional, foi avaliada tal comportamento para a densidade aparente;
- Para melhor entendimento de como as propriedades físicas e mecânicas estão correlacionadas, foram gerados modelos lineares e quadráticos a uma variável independente (L^* ou a^* ou b^* ou ρ_{12}). Para os modelos lineares, verificou-se a mesma significância observada no teste de Pearson e eles apresentaram baixa qualidade no ajuste. Já para os modelos quadráticos a uma variável independente, houve aumento na significância do modelo e dos termos, bem como uma melhor qualidade no ajuste, com aumento do R^2 . Isso mostra o motivo pelo qual os modelos quadráticos multivariáveis para estimar as propriedades físicas e mecânicas foram utilizados.
- Para validação dos modelos quadráticos multivariáveis, foram gerados os modelos com os dados experimentais de nove espécies e estimadas as propriedades da décima espécie. Os modelos para validação foram significativos; para alguns os parâmetros colorimétricos foram significativos e a densidade aparente foi significativa em todos. Os modelos gerados para as propriedades com comportamento elastoplástico, como f_{c0} , f_{H0}

e f_{H90} apresentaram boa qualidade no ajuste, indicando precisão do modelo. Para E_M , a adição da densidade aparente elevou a precisão do modelo para o R^2 acima de 70%, indicando a possibilidade de uso. Para as demais propriedades, os modelos apresentaram baixa a média qualidade no ajuste, impossibilitando seu uso como estimadores. Feita a estimativa das propriedades da décima espécie com uso dos parâmetros colorimétricos e densidade aparente e comparadas com os valores experimentais, observou-se um baixo valor de erro para algumas propriedades, mostrando a viabilidade do uso de parâmetros colorimétricos para estimativa de propriedades físicas e mecânicas.

- Os modelos quadráticos multivariáveis foram gerados e houve a manutenção da elevada precisão, com os parâmetros colorimétricos apenas, e densidade aparente adicionada. Para as propriedades como resistência à compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento, resistência convencional na flexão estática, dureza, módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade na flexão estática, o uso dos parâmetros colorimétricos apresentou boa qualidade no ajuste, indicando a possibilidade de seu uso como estimadores destas propriedades com uso dos parâmetros colorimétricos. Estas propriedades são utilizadas no dimensionamento de peças estruturais, bem como na indústria moveleira. Adicionando a densidade aparente a tais modelos, eleva-se a precisão dos modelos, indicando que o uso combinado da densidade aparente e parâmetros colorimétricos pode ser um bom balizador na escolha de espécies de madeira em locais com indisponibilidade imediata de caracterização de madeira de forma destrutiva.
- A estimativa das propriedades físicas e mecânicas de espécies da literatura com uso das propriedades colorimétricas e densidade aparente apresentou resultados próximos ao encontrado experimentalmente. Isso demonstra a viabilidade dos modelos quadráticos multivariáveis utilizando os parâmetros colorimétricos e densidade aparente para estimar propriedades físicas e mecânicas.
- Para uma melhor precisão dos modelos a fim de reduzir o erro associado à estimativa, faz-se necessária a confecção de modelos com maior número de espécies, bem como uma maior diversidade de matizes das árvores analisadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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 elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 303–309, 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, 2016.

ALMEIDA, D. H. **Estimativa de propriedades de resistência e de rigidez de madeiras tropicais brasileiras pela técnica de colorimetria**. 100 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

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, T. H. *et al.* Color variations in CIELAB coordinates for softwoods and hardwoods under the influence of artificial and natural weathering. **Journal of Building Engineering**, v. 35, n. October 2020, p. 101965, 2021.

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.* Influence of harvest region on properties of Cambará wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 23, n. 23, p. 1–12, 2021a.

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, 2021b.

ARAÚJO, H. J. B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 399–416, 2007.

ARAÚJO, V. *et al.* Wood consumption and fixations of carbon dioxide and carbon from timber housing techniques: A Brazilian panorama. **Energy and Buildings**, v. 216, p. 109960, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D2244-16**: Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates. West Conshohocken, USA, 2016.

BARČÍK, Š.; GAŠPARÍK, M.; RAZUMOV, E. Y. Effect of thermal modification on the colour changes of oak wood. **Wood Research**, v. 60, n. 3, p. 385–396, 2015.

BEECH, E. *et al.* GlobalTreeSearch: The first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 36, n. 5, p. 454–489, 2017.

BRANCO, L. A. M. N. *et al.* Influence of moisture content in some mechanical properties of two brazilian tropical wood species. **Advanced Materials Research**, v. 1025–1026, p. 42–45, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro. **Banco de dados de Madeiras Brasileiras**. 2021. Disponível em: https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=98. Acesso em: 18 mar. 2021.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. 1. ed. Barueri, São Paulo: Manole, 2003.

CALIL JUNIOR, C.; CHRISTOFORO, A. L. **Manual of design and construction of timber bridges**. 1 ed. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing, 2015.

CAVALHEIRO, R. S. *et al.* Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 107–112, 2016.

CHANG, W. Repair and reinforcement of timber columns and shear walls – A review. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 14–24, 2015.

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**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 23–27, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.01>

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Physico-mechanical characterization of the anadenanthera colubrina wood specie. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 376–384, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p376-384/2017>

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Evaluation of the Peltophorum vogelianum Benth. Wood Species for Structural Use. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 763–768, 2019.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* APPARENT DENSITY AS AN ESTIMATOR OF WOOD PROPERTIES OBTAINED IN TESTS WHERE FAILURE IS FRAGILE. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 1, p. 105–112, 2020.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE). **Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space** | CIE. 2007. Disponível em: <http://cie.co.at/publications/colorimetry-part-4-cie-1976-lab-colour-space-0>. Acesso em: 24 mar. 2021.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 5, n. 4, p. 1–113, 2019.

CUI, L. *et al.* Wood color analysis and integrated selection of Paulownia clones grown in Hubei Province, China. **Forestry Studies**, v. 62, p. 48–57, 2015.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 7 ed. Porto Alegre, Brasil: Artmed, 2006.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n. 65, 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, n. 1, 2019.

FERNANDES, N. C. L.; VALLE, M. L. A.; CALDERON, C. M. A. Características físicas e anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2018.

FERNANDO, D.; FRANGI, A.; KOBEL, P. Behaviour of basalt fibre reinforced polymer strengthened timber laminates under tensile loading. **Engineering Structures**, v. 117, p. 437–456, 2016.

FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams-State of the art. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 2–13, 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Deficit Habitacional No Brasil - 2016-2019**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.mg.gov.br/consulta/consultaDetalheDocumento.php?iCodDocumento=47625>.

GARAY, R.; INOSTROZA, M.; DUCAUD, A. Color and gloss evaluation in decorative stain applied to cases of *Pinus radiata* wood treated with copper azole micronized type C. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 21–38, 2017.

GARCIA, R. A. *et al.* Color stability of weathered heat-treated teak wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 16, n. 4, p. 453–462, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000037>

GEBHARDT, C.; KALISKE, M. Reliable simulation of timber structures by combined load and displacement control. **Engineering Computations (Swansea, Wales)**, v. 32, n. 3, p. 766–778, 2015.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciencia Florestal**, v. 16, p. 329–341, 2006.

HADI, Y. S. *et al.* Color change and resistance to subterranean termite attack of mangium (*Acacia mangium*) and sengon (*Falcataria moluccana*) smoked wood. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 1–11, 2020.

HERRERA-BUILES, J. F. *et al.* Effect of thermal modification treatment on some physical and mechanical properties of *pinus oocarpa* wood. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 1–9, 2021.

HOMAN, W. J.; JORISSEN, A. J. M. Wood Modification developments. **Heron**, v. 49, n. 4, p. 361–386, 2004.

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.

IBAN. Iban Engenharia. **O Que é Wood Frame?** 2021. Disponível em:

<http://www.ibenengenharia.com.br/blog/o-que-e-wood-frame/>. Acesso em: 23 jun 2021.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório 2017**. 2017, 80 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ICIMOTO, F. H. *et al.* Influence of specimen orientation on determination of elasticity in static bending. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 2, p. 229–238, 2015.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Informações sobre Madeiras**. 2019. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/8.htm.

JESUS, J. M. H.; LOGSDON, N. B.; FINGER, Z. Classes de Resistência de Algumas Madeiras de Mato Grosso Strength classes of resistance of some timbers from Mato Grosso. **Engineering and Science**, v. 1, n. 2011, p. 35–42, 2015.

JOHNS, K. C.; LACROIX, S. Composite reinforcement of timber in bending. **Canadian journal of civil engineering**, v. 27 (5), p. 899–906, 2000.

KERBER, P.R. *et al.* Colorimetry and Surface Roughness of Three Amazon Woods Submitted to Natural Weathering. **Nativa**, v. 4, n. 5, p. 303–307, 2016.

KOKUTSE, A. D. *et al.* Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f) heartwood and relationship with colour. **Trees - Structure and Function**, v. 20, n. 2, p. 219–223, 2006.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>

KONICA. **Entendendo o Espaço de Cor L*a*b***. 2021. Disponível em: <https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/entendendo-o-espaco-de-cor-lab/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

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**, n. 86, p. 153–158, 2010.

LAHR, F. A. R. *et al.* Full Characterization of *Erismia uncinatum* Warm Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 147–150, 2016.

LAHR, F. A. R. *et al.* Full Characterization of *Vatairea* sp Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 92–96, 2016.

LAHR, F.A.R. *et al.* PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF *Eucalyptus urophylla* WOOD. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 900–906, 2017.

LAHR, F. A. R. *et al.* Models to estimate longitudinal compressive strength of Brazilian hardwood based on apparent density. **BioResources**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 1373–1381, 2021.

LAZAROTTO, M. *et al.* Biological resistance and colorimetry of heat treated wood of two eucalyptus species. **Revista Arvore**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 135–145, 2016.

LI, H. *et al.* Study of the discoloration behaviour of teak wood (*Tectona grandis* Linn. Fil.) caused by simulated sunlight. **Wood Research**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 625–636, 2019.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. 2 eded. Nova Odessa - SP: Plantarum, 1998.

MAHDIYANTI, S. H.; INAGAKI, T.; TSUCHIKAWA, S. Analysis of wood thermal degradation using 2D correlation of near infrared and visible-light spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 354–369, 2019.

MARINI, L. J. *et al.* Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de Pinus sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 149–160, 2021.

MEINTS, T. *et al.* Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 4, p. 499–509, 2017.

MEIRELLES, C. R. M. Evolução das Coberturas em Madeira no Brasil. *In:* , 2005. **CLEFA**. [S. l.: s. n.], 2005.

MÉNDEZ-MEJÍAS, L. D.; MOYA, R. Effects on density, shrinking, color changing and chemical surface analysis through FTIR of Tectona grandis thermo-treated: Density, shrinking, color changing and chemical analysis by FTIR of the thermally-treated teak wood. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, p. 811–820, 2016.

METELLI, G. M.; GIURIANI, E.; MARCHINA, E. The repair of timber beams with controlled-debonding steel plates. **Advanced Materials Research**. 2013. p. 588–595.

MINITAB. **Minitab 18**. State College, PA, USA: 2010.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. New York: John Wiley and Sons, 2012. 730 p.

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.

NAHUZ, M. A. R. *et al.* **Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil** IPT. São Paulo, Brasil: IPT, 2013.

PAES, J. B. *et al.* BIOLOGICAL RESISTANCE OF THERMALLY TREATED Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson E Pinus taeda L. WOODS AGAINST XYLOPHAGOUS TERMITES. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 535–541, 2016.

PINHEIRO, R. V.; LAHR, F. A. R. INFLUÊNCIA DA PRESERVAÇÃO, CONTRA A DEMANDA BIOLÓGICA, NAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE ELASTICIDADE DA MADEIRA. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 2, n. 6, 2001.

REIS, A. R. S. *et al.* CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA DA MADEIRA DE SETE ESPÉCIES DO GÊNERO Erisma RUDGE, CONHECIDAS COMO QUARUBARANA, COMERCIALIZADAS NO MERCADO MADEIREIRO DO ESTADO DO PARÁ. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 804–821, 2014.

RICHTER, H. G.; DALLWITZ, M. J. **Madeiras comerciais**. 2000. Disponível em: <https://www.delta-intkey.com/wood/pt/www/vocer-ca.htm>. Acesso em: 17 mar. 2021.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de Pinus sp. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 319–329, 2017.

SIKORA, A. *et al.* Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. **Journal of Wood Science**, v. 64, n. 4, p. 406–416, 2018.

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.

SRINIVAS, K.; PANDEY, K. K. Effect of heat treatment on color changes, dimensional stability, and mechanical properties of wood. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 32, n. 4, p. 304–316, 2012.

STOLF, D. O. *et al.* Influência do teor de umidade na propriedade de tenacidade de espécies florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 501–508, 2014.

STRAŽE, A.; FAJDIGA, G.; GOSPODARIČ, B. Nondestructive characterization of dry heat-treated fir (*Abies Alba Mill.*) timber in view of possible structural use. **Forests**, v. 9, n. 12, 2018.

TORNIAINEN, P.; ELUSTONDO, D.; DAGBRO, O. Industrial validation of the relationship between color parameters in thermally modified spruce and pine. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 1369–1381, 2016.

VALDENE BRO, E.; DIETRICH, U.; INO, A. Thermal comfort analysis of a representative multi-story social housing unit with wood as an alternative construction material in Brazil. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 297, n. 1, p. 012019, 2019.

VALVERDE, J. C.; MOYA, R. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. **Color Research and Application**, v. 39, n. 5, p. 519–529, 2014.

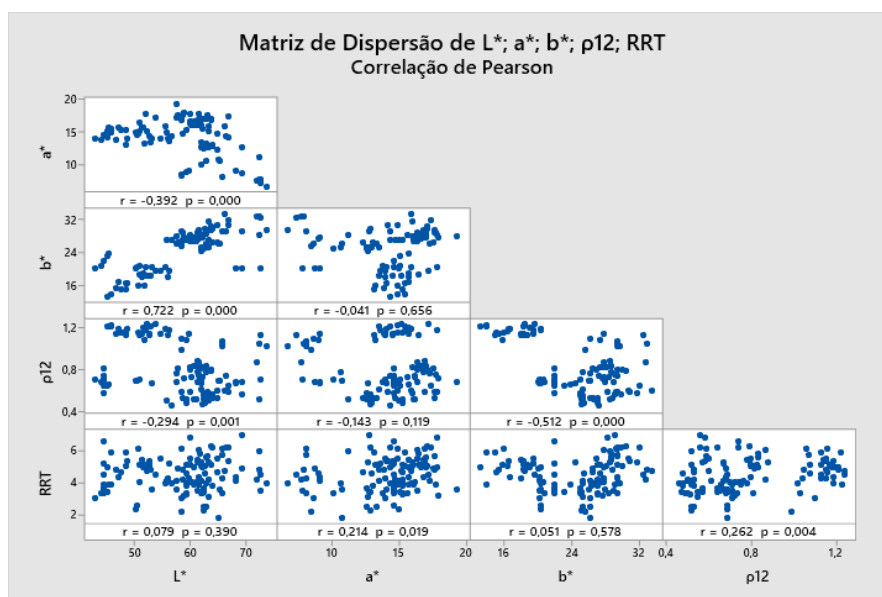
WOLENSKI, A. R. V. *et al.* Shear Strength Estimation Model for Tropical Wood Species. **Wood Research**, v. 65, n. 1, p. 175–182, 2020.

ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R.. Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 3, n. 9, 2002.

ZIGLIO, A. C. *et al.* Wettability and surface free energy on heat-treated *Pinus sp.* and *Erisma sp.* woods. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 161–167, 2017.

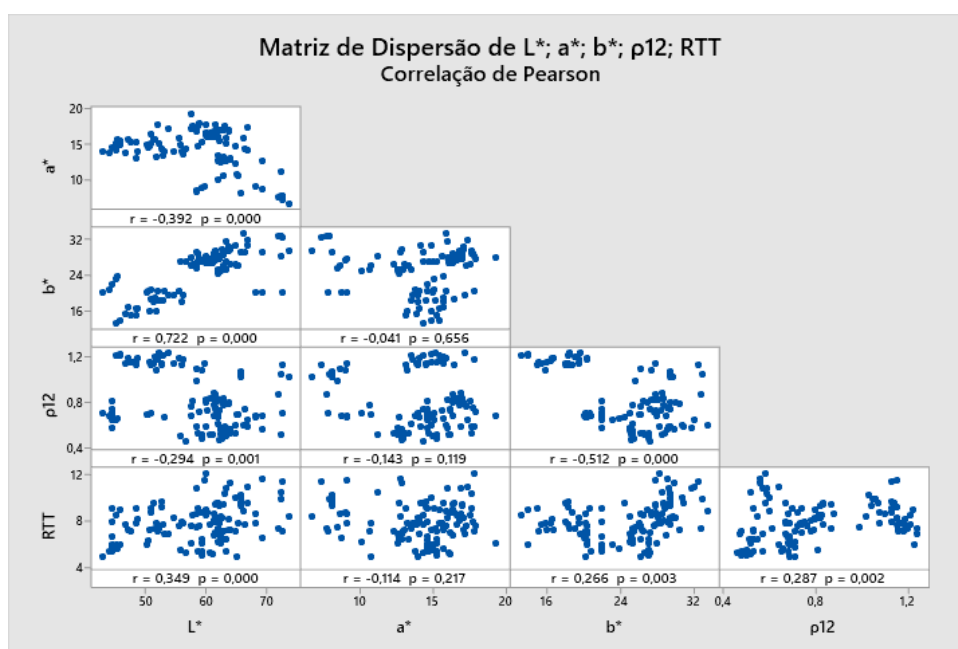
A. APÊNDICE

Figura A. 1 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Radial Total (RRT)



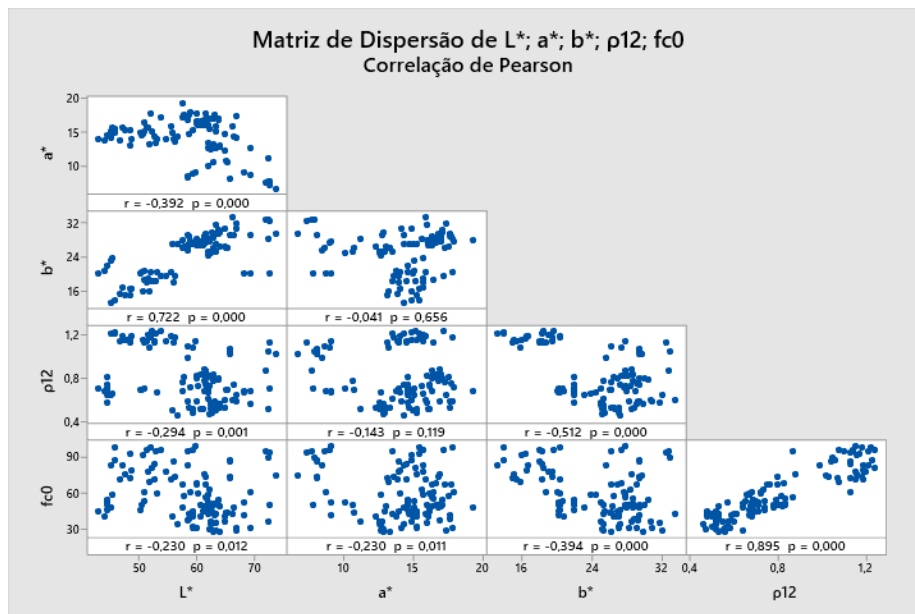
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 2 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a Retração Tangencial Total (RTT)



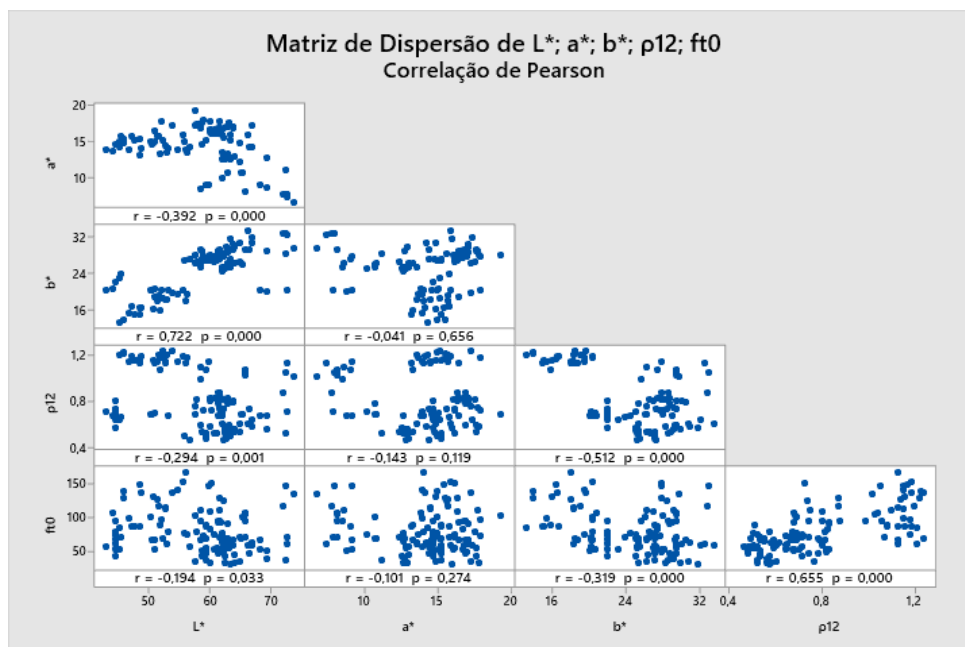
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 3 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}).



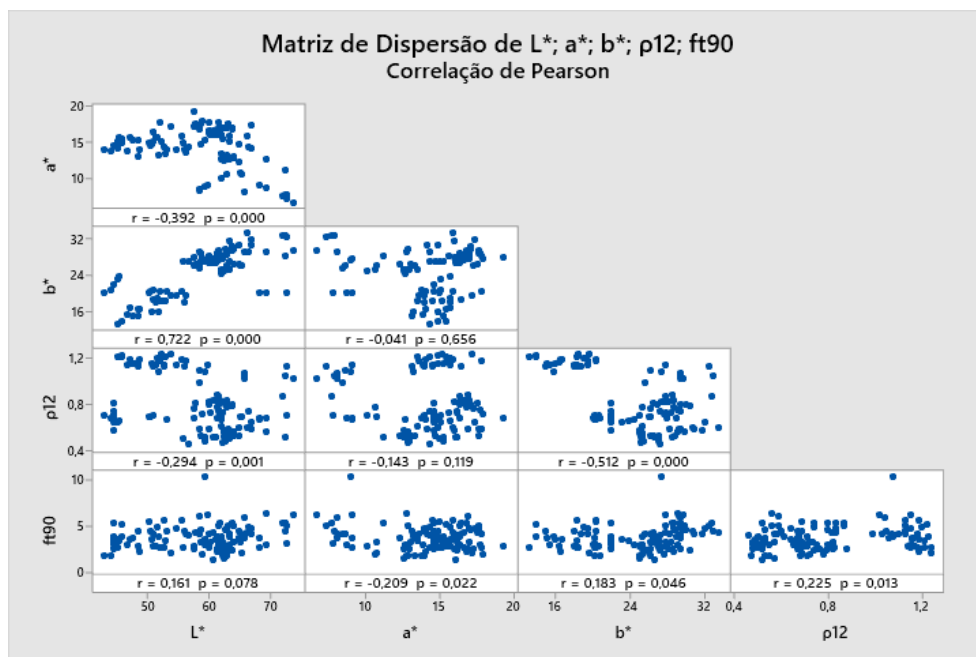
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 4 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}).



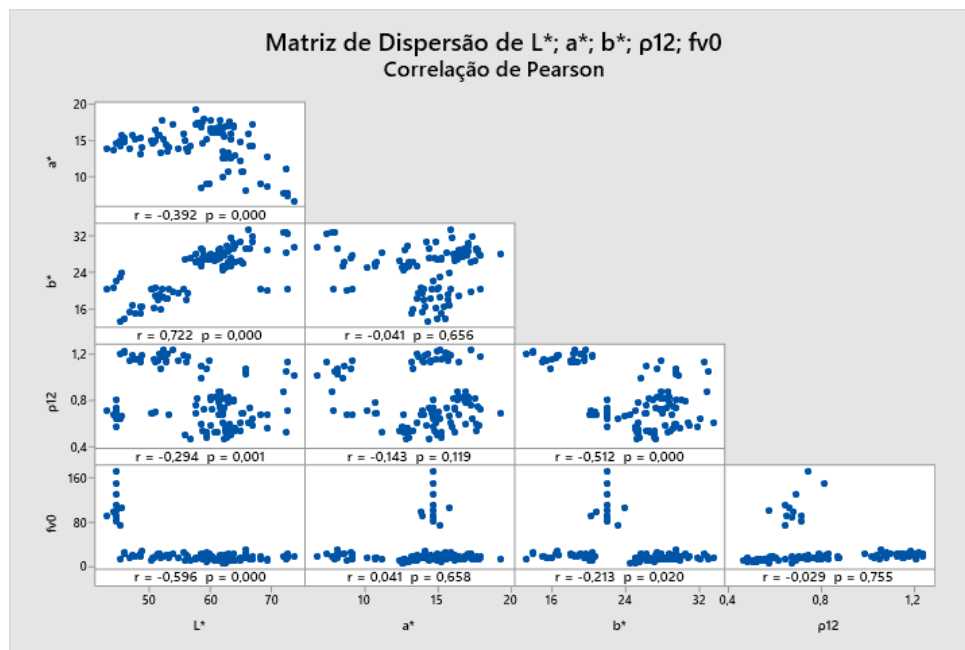
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 5 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência à tração normal às fibras (f_{t90})



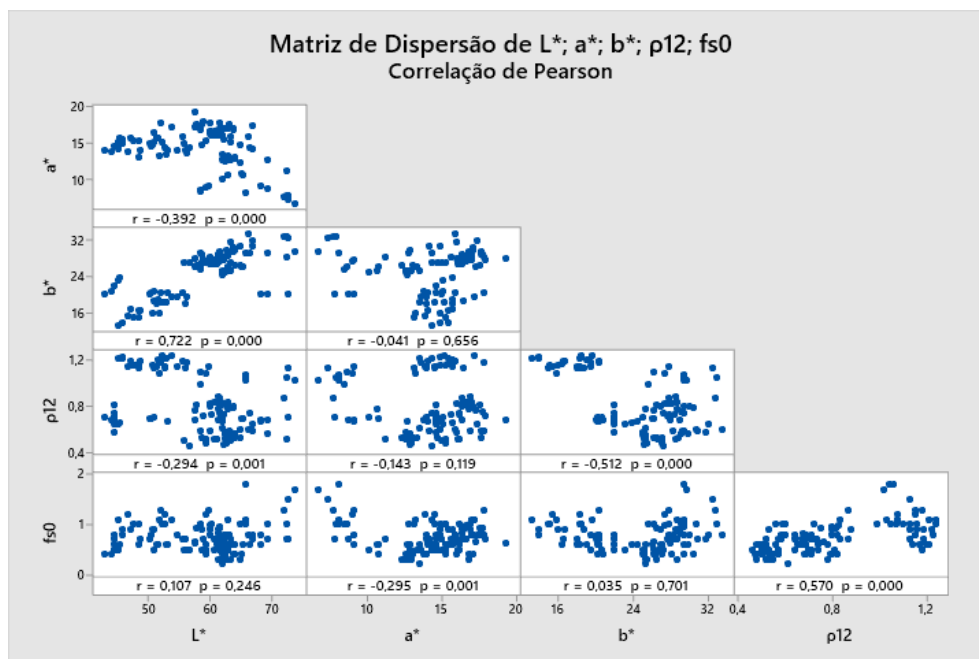
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 6 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0})



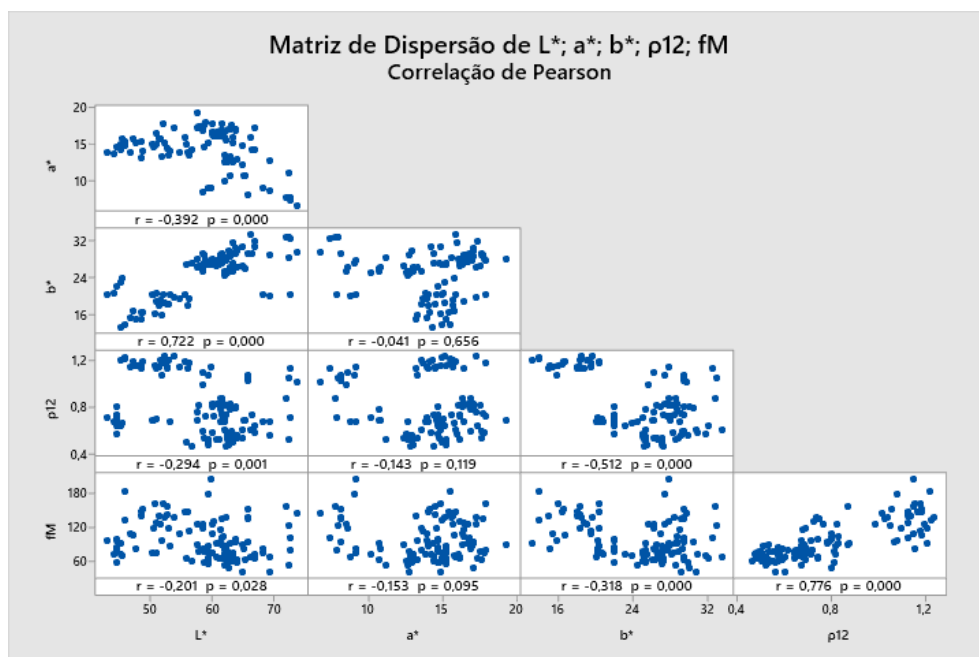
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 7 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência ao fendilhamento (f_{s0})



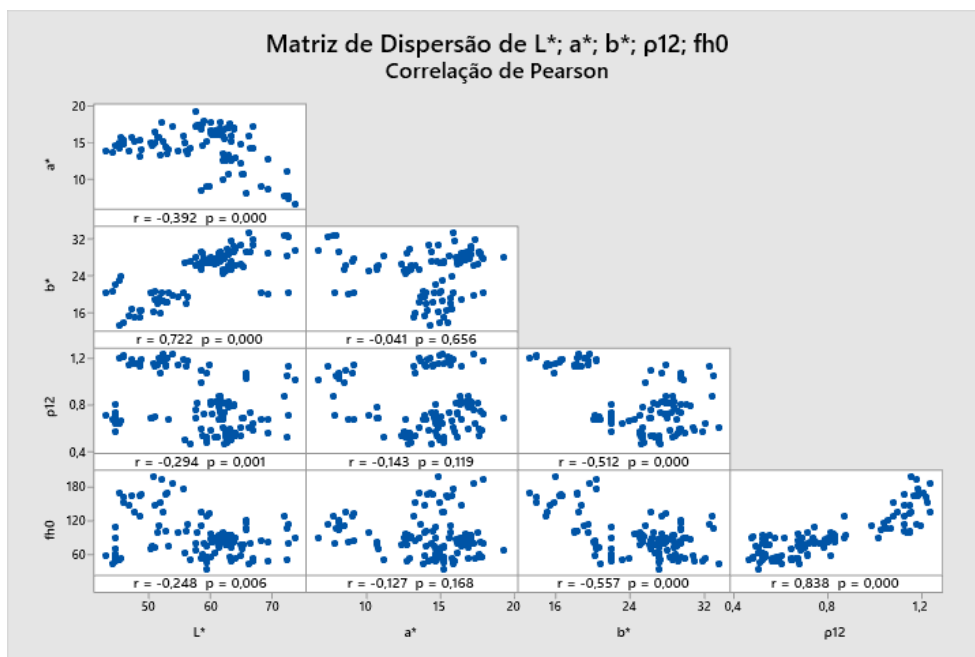
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 8 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a resistência convencional no ensaio de flexão estática (f_M)



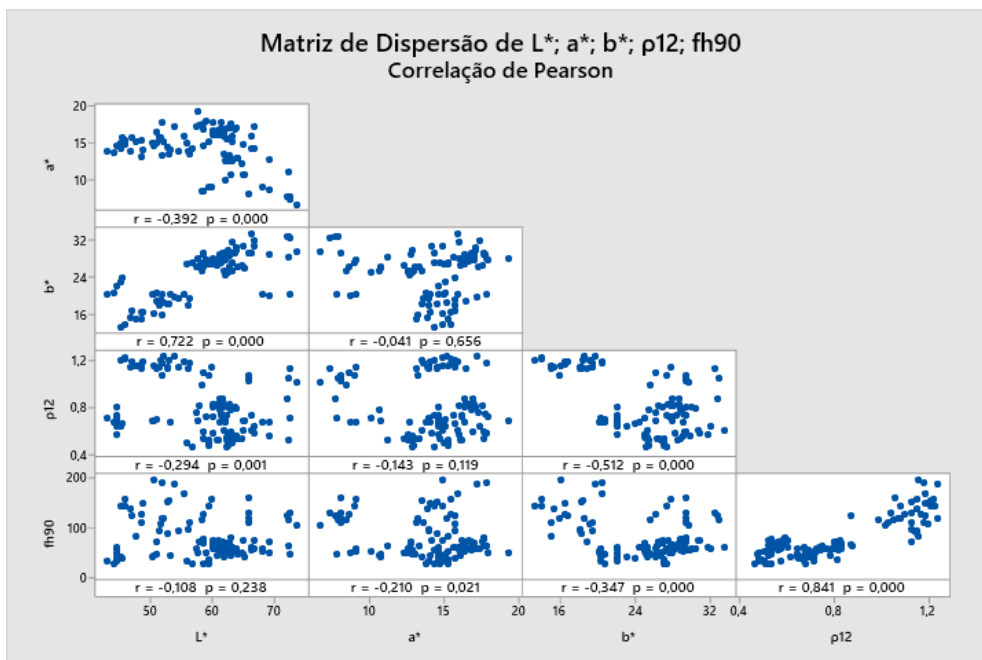
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 9 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza paralela às fibras (f_{h0})



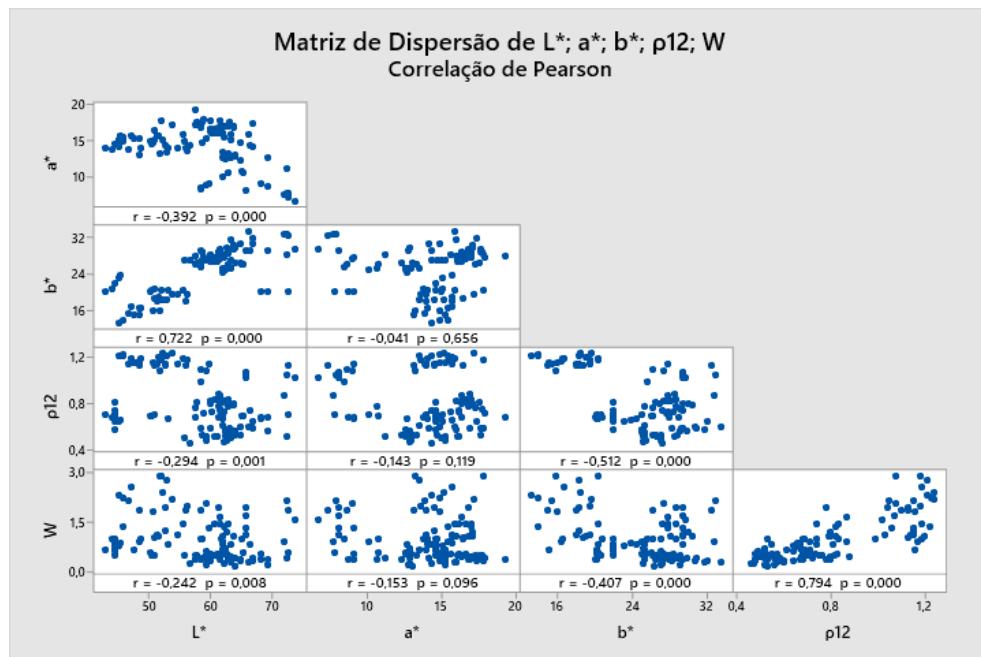
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 10 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a dureza normal às fibras (f_{h90})



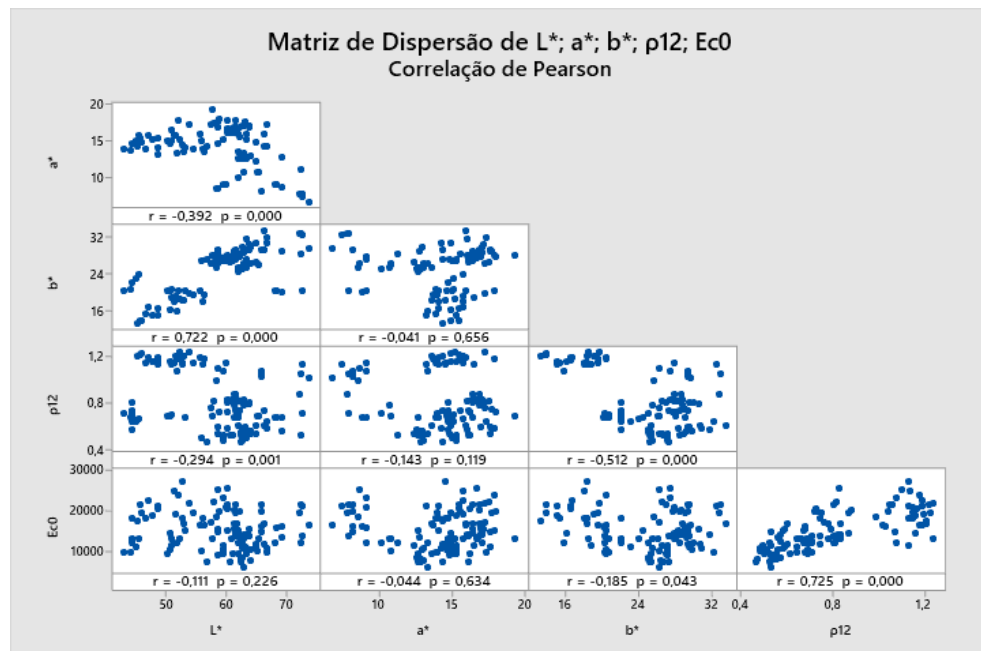
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 11 - Valor de Correlação de Pearson (r) para a tenacidade (W)



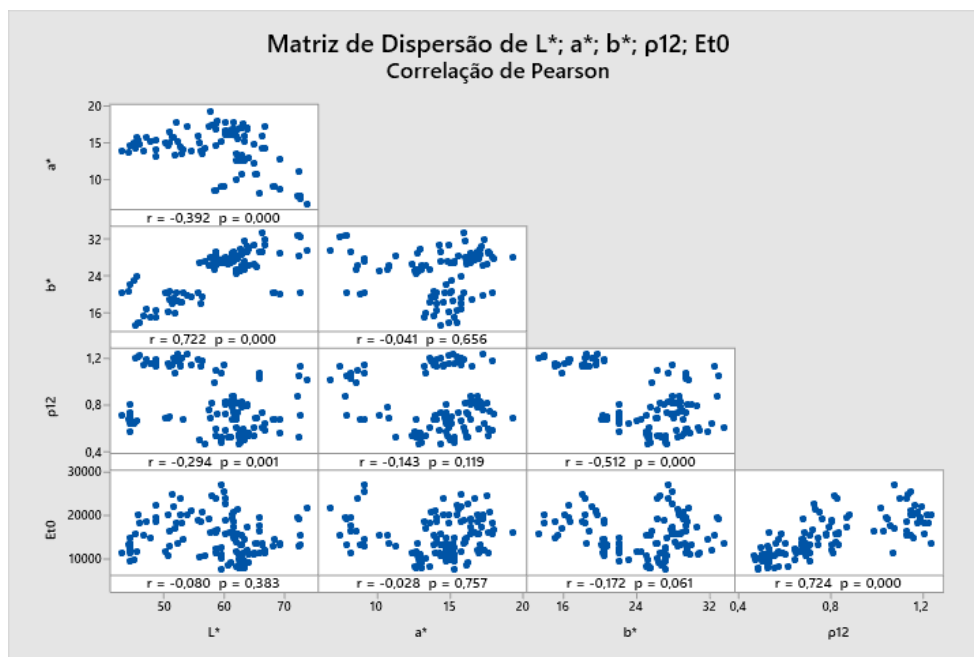
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 12 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})



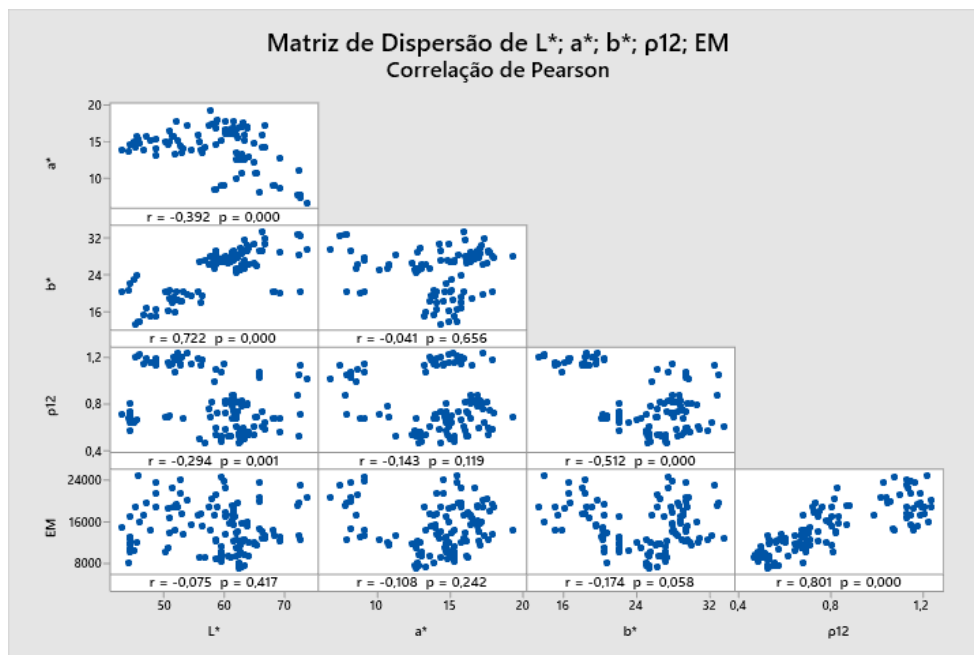
Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 13 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0})



Fonte: Autoria Própria (2021).

Figura A. 14 - Valor de Correlação de Pearson (r) para o módulo de elasticidade na flexão estática (E_M)



Fonte: Autoria Própria (2021).