

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Anderson Renato Vobornik Wolenski

**ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA ESTIMATIVA DAS
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ VISANDO O
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Belo Horizonte, Brasil
2022

Anderson Renato Vobornik Wolenski

**ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA ESTIMATIVA DAS
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ VISANDO O
DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA**

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito necessário para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Guerra Peixoto

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Christoforo

Belo Horizonte, Brasil

2022

W852a Wolenski, Anderson Renato Vobornik.
Abordagem probabilística para estimativa das propriedades de resistência e rigidez visando o dimensionamento de estruturas de madeira [recurso eletrônico] / Anderson Renato Vobornik Wolenski. - 2022.
1 recurso online (136 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodrigo Guerra Peixoto.
Coorientador: André Luís Christoforo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 122-136.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Madeira - Teses. 3. Madeira - Estruturas - Teses. 4. Probabilidades - Teses. I. Peixoto, Rodrigo Guerra. II. Christoforo, André Luís. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



ATA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 86 DO ALUNO ANDERSON RENATO VOBORNIK WOLENSKI.

Às **13:00** horas do dia **22** do mês de **junho** de **2022**, reuniu-se em ambiente virtual, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **12 de maio de 2022**, para julgar a defesa da Tese de Doutorado intitulada "**Abordagem Probabilística para Estimativa das Propriedades de Resistência e Rigidez Visando o Dimensionamento de Estruturas de Madeira**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de DOUTOR EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Rodrigo Guerra Peixoto**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Prof. Dr. Rodrigo Guerra Peixoto - DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. André Luis Christoforo - UFSCar (Coorientador)

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues - DEES - UFMG

Prof. Dr. Marília da Silva Bertolini - UNESP

Prof. Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja - UNESP

Prof. Dr. Túlio Hallal Panzera - UFSJ

Após reunião, a Comissão considerou o candidato **APROVADO**, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 22 de junho de 2022.

Observações:

1. A aprovação do candidato na defesa da Tese de Doutorado não significa que o mesmo tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Estruturas;
2. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Guerra Peixoto, Professor do Magistério Superior**, em 22/06/2022, às 18:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Rodrigues, Assessor(a) especial**, em 23/06/2022, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marília da Silva Bertolini, Usuária Externa**, em 23/06/2022, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tulio Hallak Panzera, Usuário Externo**, em 27/06/2022, às 08:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis Christoforo, Usuário Externo**, em 19/07/2022, às 07:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano dos Anjos Azambuja, Usuário Externo**, em 19/07/2022, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felicio Bruzzi Barros, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 28/03/2023, às 08:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1532177** e o código CRC **552D8E80**.

Aos meus mentores... meu profundo respeito.

Agradecimentos

Esta tese é fruto do trabalho de muitas mãos e mentes, afinal, depois de anos de pesquisa olha-se para trás e percebe-se que inúmeras pessoas estiveram presentes, direta ou indiretamente, de modo fundamental para concepção deste trabalho.

Citar familiares, parentes, amigos e colegas seria incorrer no erro de esquecer de algum personagem, que de alguma forma, esteve presente, auxiliou, discordou, compreendeu, somou ou simplesmente emanou algum pensamento positivo capaz de refletir em boas energias que foram convertidas nas inúmeras linhas deste texto.

Meus orientadores, Professores Rodrigo Guerra Peixoto e André Luís Christoforo, foram peças essenciais durante as adversidades até chegar aqui. Me resta agradecê-los, fortemente, por acreditar neste trabalho.

Aos amigos e colegas das instituições que percorri, gratidão por tantas trocas conceituais, estudos, discussões, seja na construção de artigos científicos ou no presente trabalho. Em especial, aos amigos do INSANE e LAMEM, da UFMG, USP e IFSC, e tantos outros locais em que pude encontrar bons amigos para dar o mais importante dos apoios: o engastamento psico-emocional.

Aos professores da UFMG, em especial aos Professores Roque Luiz da Silva Pitangueira e Felício Bruzzi Barros: minha admiração e agradecimento por tantas vivências trocadas. Aos professores/servidores do LAMEM, em especial ao Professor Francisco Antonio Rocco Lahr pela longínqua e profícua parceria em nossas pesquisas acadêmicas. Aos professores da banca, meus agradecimentos pela disponibilidade e contribuição para a versão final desta tese.

A minha família, pai, mãe, irmãs, esposa e minha querida e pequena Flora. Muito obrigado pela paciência e compreensão durante todo este percurso.

Por fim, aos meus mentores, meu profundo respeito.

”É exatamente disso que a vida é feita... de momentos. Momentos que temos que passar, sendo bons ou ruins, para o nosso próprio aprendizado. Nunca esquecendo do mais importante: nada nessa vida é por acaso. Absolutamente nada”.

Chico Xavier

Resumo

Wolenski, A.R.V., 2022. **Abordagem Probabilística para Estimativa das Propriedades de Resistência e Rigidez visando o Dimensionamento de Estruturas de Madeira.** Tese, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

A norma ABNT NBR 7190 (1997), que discorre sobre a normatização para projetos de estruturas de madeira, possui fundamental importância para profissionais e pesquisadores que empregam a madeira para fins estruturais, pois continua sendo a principal fonte nacional para consulta acerca dessa temática. Um dos aspectos primordiais tratados no documento prevê, para um dimensionamento estrutural dentro das exigências de segurança, que a resistência para determinada solicitação mecânica seja calculada com base em seu valor característico, correspondente ao percentil de 5% de um determinado modelo de distribuição de probabilidades. Para tanto, a norma brasileira estabelece relações para estimar a resistência característica da madeira, que podem resultar em diferença significativa dos valores obtidos quando comparado a diferentes modelos probabilísticos. Tal questão evidencia a necessidade por pesquisas que avaliem as relações propostas nessa normativa, com ênfase especial na confiabilidade das equações para obtenção das propriedades de resistência e rigidez, sendo estas de grande relevância na análise estrutural. Ao considerar, respectivamente, os resultados das resistências (f_{c0} ; f_{t0}) e das rigidezes (E_{c0} ; E_{t0}) na compressão e tração paralelas às fibras de 60 espécies de madeiras tropicais, tomou-se a análise de variância (ANOVA) em conjunto com modelos de regressão, funções densidade de distribuição de probabilidades e análise discriminante de observações, com o objetivo principal de avaliar a equivalência estatística e estabelecer novos modelos probabilísticos e classes de alocação para os valores característicos de resistência, de modo a contribuir para obtenção de parâmetros estatisticamente confiáveis para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Palavras-chave: Madeiras Tropicais, Resistência Característica, Modelos de Regressão, Funções de Distribuição de Probabilidades, Classes de Resistência.

Abstract

Wolenski, A.R.V., 2022. **Probabilistic Approach to Estimation of Strength and Stiffness Properties for the Design of Wood Structures**. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.

The ABNT Standard (1997), referring to standards for wooden structures projects, is the main national reference for professionals and researchers who use wood for structural purposes. According to this document, a given mechanical strength property must be calculated based on its characteristic value, which corresponds to the 5th percentile of a given probability distribution model, to ensure structural performance within safety requirements. Thus, the Brazilian Standard establishes relationships to estimate characteristic values of wood strength, but the results obtained may differ significantly from the different probabilistic models. This fact indicates the need for research to evaluate the equations proposed in the Standard, with special emphasis on the reliability of relationships for strength and stiffness properties, which are highly relevant in structural analysis. Considering the results of compressive and tensile strength (f_{c0} ; f_{t0}) and stiffness (E_{c0} ; E_{t0}) in the direction parallel to the grain of 60 tropical woods, analysis of variance (ANOVA) was used along with regression models, distribution functions of probability and discriminant analysis of observations to evaluate the statistical equivalence and establish new probabilistic models and allocation classes to the characteristic strength values. These new statistically reliable parameters will contribute to the structural design of wood.

Keywords: Tropical Woods, Characteristic Strength, Regression Models, Probability Distribution Functions, Strength Classes.

Lista de Figuras

2.1	Mapa conceitual com as palavras mais citadas nos artigos sistematizados para esta revisão de literatura (Fonte: Software RStudio (2022)).	26
2.2	Mapa global com os principais países que publicaram sobre a caracterização físico e mecânica da madeira (Fonte: Software RStudio (2022)).	27
2.3	Mapa global compondo os países mais citados em trabalhos envolvendo a estimativa de propriedades da madeira (Fonte: Software RStudio (2022)).	30
3.1	Esquema de extração dos corpos de prova para os ensaios de compressão e de tração paralelos às fibras.	37
3.2	Diagrama tensão×deformação na compressão (ABNT NBR 7190 (1997), fonte adaptada).	41
3.3	Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à compressão (ABNT NBR 7190 (1997), fonte adaptada).	41
3.4	Corpo-de-prova para os ensaios de compressão paralela às fibras para uma amostra da espécie Caixeta.	42
3.5	Padrão de fixação dos relógios comparadores no corpo de prova para uma amostra da espécie Caixeta.	42
3.6	Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores para ensaio de compressão paralela às fibras para um exemplar da espécie Caixeta.	43
3.7	Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios da f_{t0} , representada por exemplares da espécie Caixeta.	43
3.8	Vistas do corpo de prova para os ensaios da f_{t0} , representado por um exemplar da espécie Caixeta.	44
3.9	Máquina de ensaio universal adotada nos ensaios, com um corpo de prova na tração, durante e após o rompimento.	45
3.10	Fluxograma para a análise estatística dos modelos de regressão.	50
3.11	Fluxograma para a análise estatística dos modelos probabilísticos.	51
3.12	Fluxo para análise discriminante para validar uma nova classificação para $f_{c0,k}$	52
4.1	Estatísticas descritivas da f_{c0} e f_{t0} para as 60 espécies.	74

4.2	Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a <i>Transformação de Johnson</i> para a relação simplificada expressa na Equação 3.12.	77
4.3	Regressão Linear para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$	78
4.4	Regressão Exponencial para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$	79
4.5	Regressão Logarítmica para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$	79
4.6	Regressão Geométrica para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$	79
4.7	Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a <i>Transformação de Johnson</i> para a relação entre as rigidezes.	81
4.8	Exemplo do teste de qualidade para escolha do MDP de melhor aderência para a espécie 01-Abiú na compressão.	84
4.9	Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a <i>Transformação de Johnson</i>	89
4.10	Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias dos grupos avaliados.	89
4.11	Verificação da premissa de normalidade dos resíduos para ANOVA.	90
4.12	Resultados para $f_{c0,k}$ a partir do valor médio das 60 espécies estudadas: norma brasileira ($f_{c0,k}^{NBR}$) e modelo probabilístico proposto ($f_{c0,k}^{Prob}$).	91
4.13	Exemplo do teste de qualidade para escolha do MDP de melhor aderência para a espécie 59-Tatajuba na tração.	93
4.14	Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a <i>Transformação de Johnson</i>	97
4.15	Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias dos grupos avaliados.	98
4.16	Verificação da premissa de normalidade dos resíduos para ANOVA.	99
4.17	Resultados para $f_{t0,k}$ a partir do valor médio das 60 espécies estudadas: norma brasileira ($f_{t0,k}^{NBR}$) e modelo probabilístico proposto ($f_{t0,k}^{Prob}$).	99
4.18	Comportamento da atual classificação da norma: gráfico de valores individuais (a); boxplot de $f_{c0,k}$ (b) e Teste Q de Dixon (c).	108
4.19	Diagrama de pontos alocados em classes de resistência: (a) classificação atual da norma ($f_{c0,k}^{NBR}$) e (b) classificação proposta nesta tese ($f_{c0,k}^{Prob}$).	112
4.20	Comportamento da nova classificação proposta: gráfico de valores individuais (a) e boxplot de $f_{c0,k}^{Prob}$ (b).	113
4.21	Verificação da normalidade da distribuição dos dados.	115
4.22	Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias das CRs utilizadas na ANOVA.	116
4.23	Verificação da premissa de independência dos resíduos da ANOVA.	116
4.24	Dispersão dos coeficientes de variação em função da resistência $f_{c0,k}^{Prob}$	119

Lista de Tabelas

3.1	Identificação, nomes popular e científico para as 60 espécies avaliadas: Parte 1.	38
3.2	Identificação, nomes popular e científico para as 60 espécies avaliadas: Parte 2.	39
3.3	Classes de Resistência das folhosas.	48
4.1	Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{c0} (MPa) - Parte I. . . .	61
4.2	Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{c0} (MPa) - Parte II. . . .	62
4.3	Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{c0} (MPa) - Parte I. . . .	63
4.4	Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{c0} (MPa) - Parte II. . . .	64
4.5	Classes de resistência (CR) e resistências características para compressão paralela às fibras da madeira, $f_{c0,k}$ (MPa) - Parte I.	65
4.6	Classes de resistência (CR) e resistências características para compressão paralela às fibras da madeira, $f_{c0,k}$ (MPa) - Parte II.	66
4.7	Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{t0} (MPa) - Parte I. . . .	67
4.8	Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{t0} (MPa) - Parte II. . . .	68
4.9	Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{t0} (MPa) - Parte I. . . .	69
4.10	Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{t0} (MPa) - Parte II. . . .	70
4.11	Resultados das resistências características para tração paralela às fibras da madeira, $f_{t0,k}$ (MPa) - Parte I.	71
4.12	Resultados das resistências características para tração paralela às fibras da madeira, $f_{t0,k}$ (MPa) - Parte II.	72
4.13	Resistência característica experimental e estimada para as 60 espécies. . . .	76
4.14	Resultados da ANOVA para a condição da Equação 3.12.	77
4.15	Resultados dos modelos de regressão para a estimativa das resistências $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$	78
4.16	Resultados da ANOVA para a condição da Equação 3.13.	80
4.17	Valores característicos da resistência $f_{c0,k}^{MDP}$, segundo o MDP de melhor aderência estatística.	83
4.18	Resultados da ANOVA para $f_{c0,k}^{Prob}$ via equação probabilística 4.1.	85
4.19	Resultados da ANOVA para $f_{c0,k}^{Prob}$ para equação 4.2.	86
4.20	Valores característicos para $f_{c0,k}^{NBR}$ (ABNT NBR 7190, 1997); $f_{c0,k}^{MDP}$ com o modelo mais aderente; e $f_{c0,k}^{Prob}$ proposta na equação 4.2.	87

4.21	Resultados da ANOVA para comparação dos grupos: $f_{c0,k}^{NBR}$ X $f_{c0,k}^{Prob}$	88
4.22	Valores característicos da resistência $f_{t0,k}^{MDP}$, segundo o MDP de melhor aderência estatística.	92
4.23	Resultados da ANOVA para $f_{t0,k}^{Prob}$ via função probabilística 4.3.	94
4.24	Resultados da ANOVA para $f_{t0,k}^{Prob}$ via função probabilística 4.4.	95
4.25	Valores característicos para $f_{t0,k}^{NBR}$ (ABNT NBR 7190, 1997), $f_{t0,k}^{MDP}$ (modelo mais aderente) e $f_{t0,k}^{Prob}$ proposto nesta tese segundo equação 4.4.	96
4.26	Resultados da ANOVA para $f_{t0,k}^{NBR}$ e $f_{t0,k}^{Prob}$	97
4.27	Valores característicos de $f_{c0,k}^{MDP}$ (em <i>MPa</i>) com uso de um conjunto amostral de 30 e 12 amostras, respectivamente.	101
4.28	Valores característicos $f_{c0,k}^{Prop30}$ e $f_{c0,k}^{Prop12}$ (em <i>MPa</i>) com uso dos modelos das Equações 4.5 e 4.6.	102
4.29	Resultados da ANOVA para os dois grupos de valores característicos informados na Tabela 4.28.	102
4.30	Valores característicos de $f_{t0,k}^{MDP}$ (em <i>MPa</i>) com uso de um conjunto amostral de 30 e 12 amostras, respectivamente.	103
4.31	Valores característicos $f_{t0,k}^{Prop30}$ e $f_{t0,k}^{Prop12}$ (em <i>MPa</i>) com uso dos modelos das Equações 4.5 e 4.6.	104
4.32	Resultados da ANOVA para os dois grupos de valores característicos informados na Tabela 4.31.	104
4.33	Valores de $f_{c0,k}$ calculados e alocados conforme equações e as CRs da ABNT NBR 7190 (1997).	106
4.34	Análise discriminante da classificação da ABNT NBR 7190 (1997).	106
4.35	Análise discriminante para uma nova classificação entre classes.	109
4.36	Valores de $f_{c0,k}$ obtidos via modelo probabilístico proposto (Eq. 4.2) e alocados segundo novas CRs propostas.	110
4.37	Análise discriminante para novas CRs e valores característicos obtidos via modelo probabilístico.	111
4.38	Resultados da ANOVA para o fator CR_{Proposta}	114
4.39	Comparação de Tukey para CR_{Proposta}	114
4.40	Nova classificação para os valores característicos de $f_{c0,k}^{Prob}$ (<i>MPa</i>), a partir do modelo probabilístico desta tese - Parte I.	117
4.41	Nova classificação para os valores característicos de $f_{c0,k}^{Prob}$ (<i>MPa</i>), a partir do modelo probabilístico desta tese - Parte II.	118

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A organização da lista de símbolos é realizada na ordem em que aparecem ao longo do texto. Sequencialmente, as abreviaturas e siglas estão em ordem alfabética.

Símbolos

f_{c0}	Resistência na compressão paralela às fibras
f_{t0}	Resistência na tração paralela às fibras
k_{mod}	Coefficientes de modificação
$f_{c0,d}$	Valor de cálculo da resistência na compressão paralela às fibras
$f_{t0,d}$	Valor de cálculo da resistência na tração paralela às fibras
E_{c0}	Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras
E_{t0}	Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras
$E_{c0,ef}$	Valor efetivo do módulo na compressão paralela às fibras
$E_{t0,ef}$	Valor efetivo do módulo na tração paralela às fibras
$f_{c0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras
$f_{t0,k}$	Resistência característica à tração paralela às fibras
$f_{v0,k}$	Resistência característica ao cisalhamento paralela às fibras
$F_{c0,max}$	Força de compressão máxima
A	Área da seção transversal do corpo de prova
$\sigma_{10\%}$	Tensão à 10% da resistência mensurada no 3º ciclo de carregamento
$\sigma_{50\%}$	Tensão à 50% da resistência mensurada no 3º ciclo de carregamento
$\varepsilon_{10\%}$	Deformação à 10% da resistência obtida no 3º ciclo de carregamento
$\varepsilon_{50\%}$	Deformação à 50% da resistência obtida no 3º ciclo de carregamento
f_{12}	Resistência corrigida para a umidade de 12%
$f_{U\%}$	Resistência para o teor de umidade $U\%$
E_{12}	Módulo de elasticidade corrigido para a umidade de 12%
$E_{U\%}$	Módulo de elasticidade para o teor de umidade $U\%$

$f_{w,k}$	Valor característico para determinada resistência
f_m	Valor médio para determinada resistência
δ	Coefficiente de variação
n	Número de corpos de prova para uma dada propriedade mecânica
f_n	Resistência à determinada solicitação para n resultados
z_b	Estimador do valor característico
$\rho_{bas,m}$	Densidade básica média
ρ_{ap}	Densidade aparente
f_{v0}	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
f_{t90}	Resistência na tração normal às fibras
E_M	Módulo de elasticidade na flexão estática
T	Tenacidade
ρ	Densidade
H_0	Hipótese nula para ANOVA
H_1	Hipótese alternativa para ANOVA
Valor- p	Parâmetro do teste de significância para ANOVA
Valor- F	Estatística do teste F
AD	Estatística de <i>Anderson-Darling</i>
Y_i	Variável dependente para os modelos de regressão
\bar{y}	Valor médio da variável aleatória Y_i
\hat{y}_i	Valor predito da variável aleatória Y_i
X_i	Variável independente para os modelos de regressão
a, b	Variáveis constantes para os modelos de regressão
α_0	Estimativa inicial no processo iterativo via MMQ
α	Coefficiente ótimo obtido via MMQ
$f(\alpha)$	Função estimativa para estimar α
f_{c0,k_i}	Resistência característica na compressão no passo i do MMQ
f_{t0,k_i}	Resistência característica na tração no passo i do MMQ
R^2	Coefficiente de determinação
Y_i	Variável aleatória associada à i -ésima observação
\bar{y}	Valor médio dentre as propriedades de resistência avaliadas
y_i	i -ésimo valor corrente
\hat{y}_i	i -ésimo valor predito

$f(x)$	Função densidade de probabilidades
σ	Desvio padrão da função $f(x)$
μ	Média populacional das funções normal e logarítmica
β	Parâmetro de forma da função Weibull
γ	Parâmetro de escala da função Weibull
λ	Parâmetro da taxa de distribuição da função exponencial
\bar{x}	Valor médio de determinada propriedade mecânica
min	Valor mínimo de determinada propriedade mecânica
max	Valor máximo de determinada propriedade mecânica
$CV\%$	Coefficiente de variação percentual
IC	Intervalo de confiança
ε	Parâmetro que define o erro aleatório no MMQ
β_i	Coefficientes ajustados via MMQ
$f_{w,k}^{NBR}$	Valor característico via ABNT NBR 7190 (1997)
$f_{w,k}^{MDP}$	Valor característico via modelo densidade de probabilidade mais aderente
$f_{w,k}^{Prob}$	Valor característico via modelo probabilístico

Abreviaturas e Siglas

ANOVA Análise de Variância

AD Estatística de *Anderson-Darling*

CE-002:126.010 Comissão de Estudos de Estruturas de Madeiras

CB-002 Comitê Brasileiro da Construção Civil

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CR Classes de resistência

DEES Departamento de Engenharia de Estruturas

ELS Estado Limite de Serviço

ELU Estado Limite Último

FAPEMIG Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

IFSC Instituto Federal de São Carlos

LAMEM Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira

MDP Modelo de Densidade de Probabilidades

MMQ Método dos Mínimos Quadrados

PROPEEs Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

SET Departamento de Engenharia da USP-São Carlos

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

USP Universidade de São Paulo

UFSCar Universidade Federal de São Carlos

XML eXtensible Markup Language

Sumário

Resumo	8
Abstract	9
Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Símbolos e Abreviaturas	14
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Justificativa	22
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos Específicos	23
1.3 Organização do Texto	24
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 Caracterização Físico-Mecânica	26
2.2 Estimativa de Propriedades Físico-Mecânicas	30
2.3 Determinação de Valores Característicos	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Determinação das Propriedades Mecânicas	36
3.1.1 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras	40
3.1.2 Ensaio de Tração Paralela às Fibras	43
3.2 Determinação dos Valores Característicos	45
3.3 Relações entre Propriedades	48
3.4 Análises Estatísticas	49
3.4.1 Análise de Variância (ANOVA)	52
3.4.2 Modelos de Regressões	54
3.4.3 Modelos Densidade de Probabilidades	56
3.4.4 Análise Discriminante	58

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Valores Experimentais	60
4.1.1	Compressão Paralela às Fibras da Madeira	60
4.1.2	Tração Paralela às Fibras da Madeira	67
4.1.3	Variabilidade Experimental	73
4.2	Modelos de Regressão	75
4.2.1	Relação entre as Resistências Características	75
4.2.2	Relação entre os Módulos de Elasticidade	80
4.3	Proposta de Novos Modelos Probabilísticos	81
4.3.1	Resistência Característica à Compressão	82
4.3.2	Resistência Característica à Tração	91
4.3.3	Estudo sobre o Tamanho Amostral	100
4.4	Proposta de Novas Classes de Resistência	104
4.4.1	Valores Característicos segundo NBR 7190 (1997)	105
4.4.2	Classes de Resistência via Modelo Probabilístico	110
5	CONCLUSÕES	120
	REFERÊNCIAS	122

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A madeira possui elevado potencial de aplicabilidade no Brasil dada a numerosa quantidade de espécies existentes na Floresta Amazônica, o que proporciona a maior biodiversidade de espécies do planeta (Beech et al., 2017). Como elemento estrutural, contudo, seu uso ainda é escasso quando comparado as estruturas de concreto e aço. De acordo com Araujo et al. (2018), ao somar o evidente potencial de reflorestamento e a grande demanda por infraestruturas, o uso da madeira no país ainda é insignificante, mesmo com o status de material do futuro (Zmijewki e Wojtowicz-Jankowska, 2017) e das variadas aplicações na construção civil em plena expansão nos países desenvolvidos (Wieruszewski e Mazela, 2017).

Esse cenário decorre do fato da madeira ser uma matéria-prima natural, biodegradável, renovável, reciclável e, portanto, ambientalmente correta (Wang et al., 2014, Araujo et al., 2016, Lima Jr et al., 2018), além de apresentar atributos que a tornam um material estruturalmente eficiente, quando comparada aos materiais tradicionais, como o aço e o concreto (Ramage et al., 2017).

Ao mesmo tempo, o Brasil possui uma área de cobertura de espécies nativas de 60,7% do território nacional de grande potencial florestal (Vidal et al., 2015), mas que é sub-aproveitada face ao que representam. Segundo Steege et al. (2016), até 2015 haviam sido catalogadas mais de 10 mil espécies, número expressivo que corrobora para o desenvolvimento de pesquisas com espécies potencialmente substitutivas àquelas comumente

adotadas nos projetos em madeira, assim como nos trabalhos de Carreira et al. (2012), da Silva et al. (2014), Andrade Jr. et al. (2014) e dos Reis et al. (2018) que estudaram distintas espécies para fins estruturais.

A elevação do uso da madeira, para tal finalidade, perpassa pelo conhecimento de importantes propriedades mecânicas, tais como as resistências na compressão (f_{c0}) e tração (f_{t0}) paralelas às fibras, necessárias na verificação da capacidade resistente à ruptura e a estabilidade de peças no Estado Limite Último (ELU), assim como suas respectivas rigidezes (E_{c0} e E_{t0}) que fornecem subsídios para verificar as deformações em atendimento à segurança no Estado Limite de Serviço (ELS).

Tais verificações, anteriormente regulamentadas pela ABNT NBR 7190 (1997) e, mais recentemente, pelo documento vigente dividido em ABNT NBR 7190-1 (2022), ABNT NBR 7190-2 (2022), ABNT NBR 7190-3 (2022), ABNT NBR 7190-4 (2022), ABNT NBR 7190-5 (2022), ABNT NBR 7190-6 (2022) e ABNT NBR 7190-7 (2022), aprovado pela Comissão de Estudos de Estruturas de Madeiras (CE-002:126.010), vinculado ao Comitê Brasileiro da Construção Civil (ABNT/CB-002). Dentre os principais pontos, têm-se os condicionantes para elaboração de projetos e as exigências para execução e controle de estruturas de madeira. Para tanto, a norma avalia diferentes propriedades mecânicas, destacando-se as resistências e rigidezes na compressão e tração paralelas as fibras, que após multiplicadas pelos respectivos coeficientes de modificação (k_{mod}), resultam nas propriedades mecânicas de cálculo e efetiva adotadas nas verificações do ELU e ELS sendo, portanto, imprescindíveis para a elaboração racional de projetos estruturais em madeira.

Especificamente para às solicitações mecânicas da madeira, a norma pressupõe distribuições normais de probabilidades, ao condicioná-las a um valor característico correspondente ao percentil de 5%, em conjunto ao valor limite para o coeficiente de variação igual a $\delta = 18\%$ para esforços normais. Tal valor está vinculado a um equacionamento empírico que não leva em consideração as características intrínsecas e distintas da madeira quando solicitadas na compressão e tração, sendo esta última de rompimento frágil

e distinto quando comparado à ruptura das fibras quando comprimidas. Logo, é relevante propor trabalhos que objetivem equações para estimar as solicitações mecânicas para diferentes espécies de uso estrutural, como forma de propor subsídios teórico-experimentais para a ABNT NBR 7190 (1997) e a sua versão atualizada.

A relevância destas estimativas conduz ao objetivo de avaliar 60 espécies de madeiras tropicais do grupo das folhosas, frente ao grupo de 43 espécies nativas e de reflorestamento, apresentadas na ABNT NBR 7190 (1997, p. 90, Anexo E). Um maior conjunto amostral, associado a análises estatísticas confiáveis, portanto, busca elevar o grau de confiabilidade dos modelos probabilísticos e, por consequência, obter equações seguras para o dimensionamento de estruturas de madeira.

1.1 Justificativa

Conforme abordado por Logsdon et al. (2010), o modelo empírico da norma brasileira pode conduzir a valores conservadores no que se refere a obtenção dos valores característicos das resistências e, como alternativa, propõem um modelo probabilístico mais adequado. Tal preocupação também é colocada por Martínez-Espinosa et al. (2004), que recomendam verificar se os dados experimentais seguem uma distribuição normal antes do cálculo do seu valor característico via equações da norma. Isto porque, segundo Pinto et al. (2004), esse valor pode resultar em diferença significativa quando comparado a um valor característico associado a uma função densidade de probabilidade adequada.

Enquanto os estudos anteriores se restringiram a análise com poucas espécies, Dias e Lahr (2004) reporta o estudo de 40 espécies de madeira tropicais para avaliar as equações simplificadas da ABNT NBR 7190 (1997, p. 15), visando à obtenção dos valores característicos para as resistências mecânicas e concluem que algumas equações não possuem equivalência estatística quando comparado ao conjunto experimental avaliado. Os autores destacam que a norma, ao trazer tais equacionamentos simplificados, não faz distinção entre os grupos das dicotiledôneas e coníferas, mesmo apresentando características anatô-

micas e fisiológicas distintas e, conseqüentemente, comportamentos mecânicos diferentes.

Tais problemáticas colaboram, portanto, para justificar este trabalho ao propor novas equações probabilísticas para o cálculo das resistências características, a fim de fornecer modelos confiáveis para o dimensionamento em madeira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Objetiva-se adotar funções densidade de probabilidades, validadas via ANOVA para 60 espécies de madeiras tropicais, no cálculo das resistências características sujeitas a esforços normais – compressão e tração – de modo a estabelecer novas relações que contribuam no dimensionamento de estruturas de madeira, o que inclui uma nova classificação – classes C50 e C70 – para resistência à compressão pautada nos modelos probabilísticos, resultado central desta pesquisa.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se citar os seguintes pontos:

- apresentar as propriedades mecânicas de resistência e de módulo de elasticidade para compressão e tração, relevantes no dimensionamento estrutural, para 60 espécies de madeiras;
- avaliar a variabilidade dos resultados experimentais, a fim de discutir os coeficientes de variação e suas implicações na obtenção dos valores característicos para resistências normais, na compressão e tração;
- obter modelos de regressão, a partir de dados experimentais, como alternativa simplificada das equações da norma de estruturas de madeira (ABNT NBR 7190 (1997) e sua versão revisada em 2022);
- avaliar os modelos probabilísticos quando formulados com diferentes tamanhos amostrais, de modo validar os equacionamentos propostos nesta tese.

1.3 Organização do Texto

O presente trabalho está organizado em 5 (cinco) capítulos. Além do Capítulo 1, que introduz, justifica e traz os objetivos desta pesquisa, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o tema, pautada na discussão sobre a obtenção de estimativas simplificadas e dos modelos probabilísticos para as propriedades mecânicas de resistência e rigidez.

No Capítulo 3, a metodologia adotada para a caracterização da madeira é exposta tendo a norma brasileira como norteadora, com destaque as resistências características à compressão ($f_{c0,k}$) e tração ($f_{t0,k}$) paralelas às fibras e seus respectivos módulos de elasticidade. Foco desse trabalho, a análise de variância (ANOVA) e os modelos de regressão, de distribuição de probabilidades e de análise discriminante de observações são apresentados, a fim de avaliar as equações da norma, na obtenção dos valores característicos, $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, bem como suas classes de resistência.

No Capítulo 4, os resultados das análises estatísticas são apresentadas, o que inclui os valores médios para as propriedades de resistência e rigidez. As análises ANOVA são avaliadas em conjunto com suas respectivas equações estimadas. Equações estruturadas em funções densidade de probabilidade são adotadas na formulação de novos modelos probabilísticos, a fim de obter propriedades de resistência estatisticamente confiáveis e, portanto, relevantes para dimensionamento em madeira. Por fim, novas classes de resistência são propostas e construídas a partir do modelo probabilístico na compressão.

No Capítulo 5, as conclusões são apresentadas, com enfoque nas principais contribuições originadas pela presente pesquisa de tese.

Por fim, as Referências trazem artigos, dissertações e teses sobre o tema abordado, além de literaturas, embora datadas com mais de uma década, essenciais para esta tese. Ressalta-se que toda documentação segue as normativas para elaboração de documentos técnicos (ABNT NBR 6023, 2002, ABNT NBR 14724, 2011, ABNT NBR 10520, 2002).

Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURA

Buscaram-se trabalhos técnico-científicos que abordassem as diferentes propriedades físico-mecânicas das 60 espécies de madeiras estudadas, bem como nos temas acerca da modelagem probabilística de parâmetros necessários para o dimensionamento de estruturas de madeira. Para tanto, uma revisão sistemática foi realizada nas principais bases de pesquisas, sendo o Portal de Periódicos da CAPES (2018) e as bases Scholar (2018), Scopus (2022) e Web of Science (2022), com intuito de encontrar publicações que remetessem a temática aqui abordada.

Os termos *physical AND mechanical properties AND tropical woods OR characteristic strength OR probabilistic AND regression models OR ANOVA* foram adotados por meio de uma busca sistematizada pautada na metodologia proposta por Aria e Cuccurullo (2017), Baldam (2020). Posteriormente, estes dados foram tabulados e tratados via *software* RStudio (RStudio, 2022), de modo a detalhar os artigos mais relevantes, suas temáticas, origens, autorias e fontes.

Na Figura 2.1 é ilustrado um mapa conceitual com as palavras mais citadas nos artigos sistematizados nas bases de pesquisa. Tais terminologias são condizentes com as palavras-chave e objetivos abordados nesta tese e podem ser úteis para visualizar quais assuntos foram mais recorrentes nos estudos ao redor do mundo.

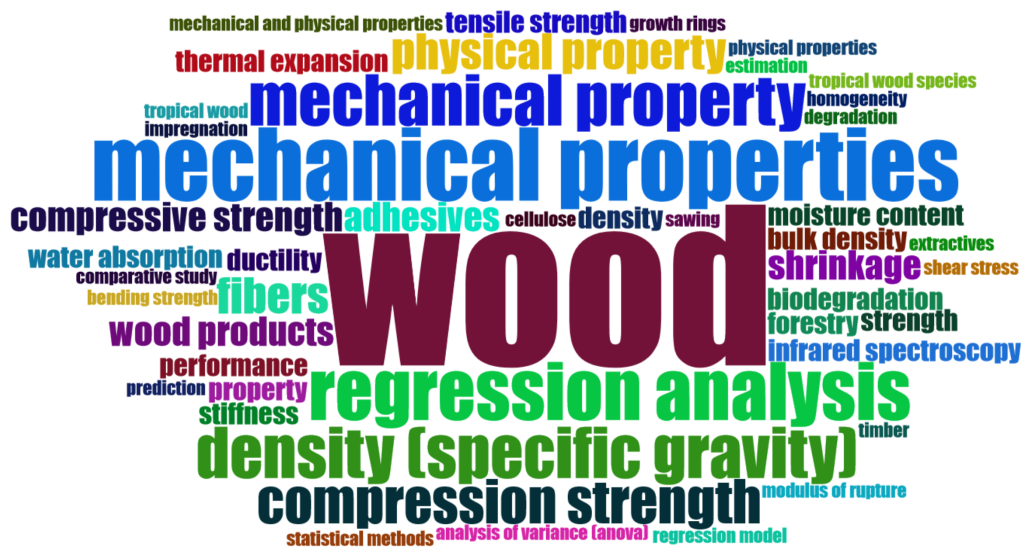


Figura 2.1: Mapa conceitual com as palavras mais citadas nos artigos sistematizados para esta revisão de literatura (Fonte: Software RStudio (2022)).

Na seqüência, direcionou-se a revisão sistemática em três partes, sendo os estudos para caracterização físico-mecânica (Cap. 2.1), para estimativa das propriedades físico-mecânicas (Cap. 2.2) e para determinação de valores característicos para resistências mecânicas (Cap. 2.3), sendo este último o tema central desta tese.

2.1 Caracterização Físico-Mecânica

A normativa ABNT NBR 7190 (1997, Anexo E) traz a caracterização completa de 17 espécies de reflorestamento e 26 nativas, dessas 19 foram foco desta tese¹. Dentre as propriedades físico-mecânicas destacam-se a densidade aparente (ρ_{ap}), as resistências à compressão (f_{c0}), à tração (f_{t0}) e ao cisalhamento (f_{v0}), na direção paralela às fibras e na tração normal às fibras (f_{t90}), os módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) e na flexão estática (E_M).

Muitas destas propriedades são foco de pesquisas em diferentes países. Ao adotar um busca sistemática com os termos: *physical AND mechanical properties AND tropical woods OR wood structures*, obteve-se um mapa global dos países que publicaram sobre a

¹ Cafearana, Canafístula, Castelo, Cedro-amargo, Cedro-doce, Champagne, Cutiúba, Garapa, Guaiçara, Guarucaia, Jatobá, Louro-preto, Maçaranduba, Mandioqueira, Oiticica-amarela, Quarubarana, Supupira, Tatajuba.

Rigg-Aguilar e Moya (2018) avaliaram as propriedades da espécie Cedro-amargo de duas distintas populações de reflorestamento. Dentre as propriedades físicas, destacam-se a ρ_{ap} e as retratibilidades volumétrica, tangencial e radial, que não apresentaram diferenças significativas entre as duas populações estudadas. Já para as propriedades mecânicas f_{t0} , f_{t90} , f_{c0} , f_{v0} , E_{c0} e E_M apresentaram diferenças significativas. Da mesma forma, Logsdon (2004) avaliou a estimativa das propriedades físicas em função da ρ para 28 espécies².

Propondo testes não-destrutivos como alternativa para os ensaios convencionais, dada a demanda por volumes significativos para a realização de ensaios, Tippner et al. (2016) buscaram obter as propriedades f_{c0} , E_{c0} , f_{c90} e E_{c90} a partir de ensaios acústicos. Com o objetivo de estimar a ρ , Thiersch et al. (2006), Wu et al. (2011) e Kloiber et al. (2014) usaram o *Pilodyn*³, López et al. (2013) adotaram a termografia por infravermelho⁴, Lestander et al. (2008) e Han et al. (2016) usaram ensaios de espectroscopia por infravermelho e Fernandes et al. (2017) usaram técnicas de raios-X. da Silva et al. (2014), por sua vez, usaram ondas ultrassônicas⁵ para estimar a dureza, enquanto Soriano et al. (2015) adotaram o método esclerométrico⁶ para obter a ρ . Em destaque, os dois últimos foram os únicos, entre os citados, a pesquisar algumas das espécies tropicais aqui estudadas⁷.

Oliveira e Sales (2002) avaliaram propriedades mecânicas das madeiras de Cupiúba, Jatobá, dentre outras e a sua relação, por meio de modelos de regressão e ensaio por ultrassom. Os autores avaliaram as propriedades ρ , f_{c0} , E_{c0} , E_M e f_M (obtidos de corpos de prova de pequenas dimensões e de peças com dimensões estruturais), com resultados pouco

² Deste total, foram aqui estudadas: Angelim-saia, Garapa, Jatobá, Sucupira e Tatajuba.

³ É um equipamento composto por uma haste metálica que é cravada com uso de um martelo, correlacionando a profundidade com as propriedades de resistência e densidade da madeira. Segundo o *Google Scholar*, aproximadamente 660 artigos usaram este equipamento em suas pesquisas para obtenção da resistência, densidade, entre outras propriedades.

⁴ O método é baseado na medição da radiação infravermelha emitida por um objeto em resposta à sua temperatura. No caso da madeira, a densidade afeta a capacidade da madeira de reter calor, o que possibilita obter uma imagem térmica que refletem as diferenças de densidade da madeira.

⁵ As ondas ultrassônicas foram adotadas para medir a velocidade de propagação na madeira, correlacionando-a com a dureza da madeira obtida por meio de testes de penetração.

⁶ O esclerômetro é composto por um pequeno martelo e um mecanismo de mola que visam impactar a superfície da madeira, a fim de medir sua deformação e consequente resistência mecânica.

⁷ da Silva et al. (2014) ensaiaram as espécies de Itaúba, Louro-branco e Louro-preto, enquanto Soriano et al. (2015) as espécies de Cedro-doce, Garapa e Champagne.

expressivos para as regressões testadas e com as propriedades mecânicas não fornecendo bons ajustes. Em contrapartida, Hein e Brancheriau (2018), embora restrito a espécie *Eucalyptus grandis*, compararam f_M e E_M obtidos em ensaios de flexão em 3 e 4 pontos, obtendo correlações lineares entre as resistências, além de ajustes para as resistências em função dos módulos, sendo todas as regressões consideradas significativas.

Faria et al. (2008) investigaram a influência de diferentes teores de umidade na determinação do módulo E_M para diferentes espécies de madeiras⁸. Os valores obtidos com os modelos ajustados levaram a resultados equivalentes para com aqueles estabelecidos na ABNT NBR 7190 (1997). Carreira et al. (2012) avaliaram duas técnicas para avaliação da mesma propriedade em vigas das espécies Teca e Guajará, sendo essa aqui estudada. Pela boa correlação entre a resistência mecânica e a rigidez à flexão, os autores afirmam que essa última tem sido adotada na estimativa da resistência mecânica de peças de madeira serrada desde a década de 1960.

Além das propriedades citadas, outras não são parte integrante das propriedades comumente investigadas na caracterização de madeiras. Dentre estas, a tenacidade (T) é de grande interesse no projeto estrutural ao considerar o impacto de carga na análise. Assim, Stolf et al. (2015) estudaram a orientação do anel de crescimento de madeiras para sua obtenção. Christoforo et al. (2014), por sua vez, estimaram a T em função da ρ_{ap} e da f_M para 15 espécies⁹, adotando distintos modelos de regressão com ajustes considerados significativos pela análise de variância (ANOVA) e apto para estimar tais propriedades.

Por fim, estudos buscaram aplicações com objetivos diferentes, contudo, também adotaram algumas das espécies aqui avaliadas. Os autores Silveira et al. (2012) agruparam espécies da Amazônia Central¹⁰ para compor cargas mistas para secagem em câmaras industriais. Por outro lado, Iwakiri et al. (2012) apresentaram propriedades físico-mecânicas

⁸ Consideraram as espécies de Jatobá, Maçaranduba, Canafístula, Cupiúba, Branquilha e Copaíba, todas também foram aqui avaliadas.

⁹ Deste total, as espécies aqui estudadas foram: C20 (Cedro-doce, Cedrorana, Quarubarana); C30 (Canafístula, Cedro-amargo); C40 (Branquilha, Cafearana, Louro-preto); C50 (Castelo, Angico-preto, Catanudo) e C60 (Garapa, Champagne, Sucupira).

¹⁰ As espécies *Mezilaurus itauba*, *Manilkara huberi* e *Clarisia racemosa* foram aqui estudadas.

de painéis aglomerados com espécies de madeiras tropicais da Amazônia¹¹.

2.2 Estimativa de Propriedades Físico-Mecânicas

A caracterização da madeira é de fundamental importância para proporcionar sua aplicabilidade, tendo a densidade (ρ) como uma das propriedades obtidas pela sua capacidade de estimar a qualidade do material. Logo, ao sistematizar as buscas para a estimativa das propriedades físicas e mecânicas a partir da ρ , encontrou-se inúmeras pesquisas a partir dos termos: *density AND physical AND mechanical properties AND regression analysis*. A Figura 2.3 ilustra o mapa global dos países que publicaram tomando como base tais critérios.

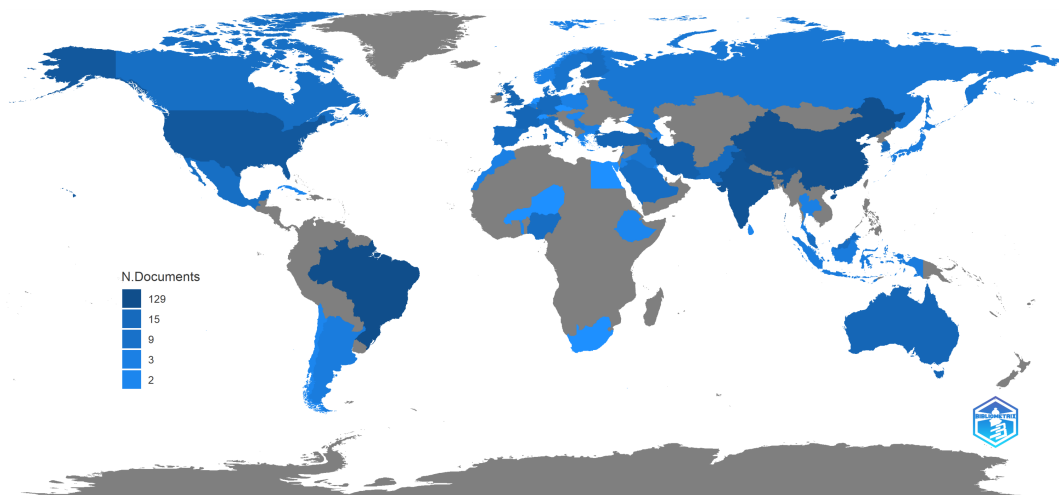


Figura 2.3: Mapa global composto os países mais citados em trabalhos envolvendo a estimativa de propriedades da madeira (Fonte: Software RStudio (2022)).

Ao sistematizar os dados extraídos observou-se um total de 211 trabalhos, destes 30 são do Brasil, seguidos pela Índia (27), China (23), Estados Unidos (15), Irã (13), Turquia (9), Canadá e Reino Unido (5), Alemanha e Arábia Saudita (5), além de outros 36 países com alguma publicação. Dentre as instituições destacam-se novamente a USP e UFSCar, além de instituições tecnológicas na China, Turquia, Índia e Reino Unido.

Novamente, buscou-se selecionar as pesquisas mais relevantes, pautadas pelo fator de impacto do periódico e a sua correlação com os objetivos desta tese. A começar por

¹¹ As espécies *Copaifera multijuga* Hayne e *Ocotea* sp também foram aqui avaliadas.

Almeida et al. (2017) que afirmam que a ρ é uma propriedade de fácil mensuração e seu uso como um estimador de outras propriedades é muito comum para fins estruturais. Dentre as possibilidades, destacam-se os modelos matemáticos de regressão, que podem fornecer, por exemplo, relações para as propriedades de resistência e rigidez em função da ρ de modo alternativo às relações empíricas estabelecidas em normas técnicas.

Para Guller (2007), que estudou as propriedades ρ , f_{c0} e E_{c0} , existe forte correlação entre a ρ e a resistência f_{c0} . Shida e Hiziroglu (2010) constataram que a ρ é um importante parâmetro capaz de influenciar nos resultados da f_{v0} . Thiersch et al. (2006) usaram modelos matemáticos para estimativa da ρ . Em comum, todos os estudos adotaram espécies de reflorestamento e/ou de regiões de origem da pesquisa, que por sua vez não são aqui estudadas¹².

Empregando técnicas de redes neurais, dos Reis et al. (2018) estimaram, para diferentes espécies amazônicas, propriedades físico-mecânicas em função da ρ . A pesquisa mostrou serem viáveis as estimativas das retratibilidades tangencial, radial e volumétrica, assim como, a f_{c0} e o E_{c0} , todos tendo como estimador a ρ .

Cavalheiro et al. (2016) investigaram a estimativa da retratibilidade (longitudinal, radial, tangencial, volumétrica) e do coeficiente de anisotropia em função da ρ_{ap} e da ρ_{bas} para ambos os grupos de madeiras, coníferas e dicotiledôneas¹³, obtendo como único ajuste significativo pela ANOVA, o modelo de regressão linear entre a ρ_{ap} e a ρ_{bas} . Similarmente, Christoforo et al. (2016) estimaram as retratibilidades (radial, tangencial, volumétrica) em função da ρ_{ap} ¹⁴, ao adotar modelos de regressão com ANOVA, com os melhores ajustes advindos das retrações tangencial e volumétrica para um modelo exponencial.

Almeida et al. (2017) usaram a ρ_{ap} como estimador da estabilidade dimensional de madeiras tropicais¹⁵, a partir das retratibilidades radial, axial, tangencial e volumé-

¹² Guller (2007) avaliaram a espécie *Pinus*, Thiersch et al. (2006) clones de *Eucalyptus* sp e Shida e Hiziroglu (2010) as espécies japonesas *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obusta*, *Thuopsis dolabrata* e *Larix leptlepis*.

¹³ Os autores estudaram as espécies *Pinus* sp e *Pinus oocarpa*, a Paricá, Jatobá e *Lyptus*.

¹⁴ Adotaram: Angelim-araroba, Angelim-vermelho, Cedro-doce, Canafistula e Mandioqueira.

¹⁵ Estudaram: Cedro-doce, Canafistula, Angelim-araroba, Angelim-vermelho e Mandioqueira.

trica. Quatro modelos de regressão foram adotados, todos considerados significativos pela ANOVA. Contudo, os autores concluíram que a ρ_{ap} não se apresenta como um bom estimador das propriedades investigadas. Almeida et al. (2016), por sua vez, avaliaram a possibilidade do uso da ρ_{ap} como estimador da f_{c0} ¹⁶. Diferentes modelos de regressão foram adotados, sendo significativos pela ANOVA, sendo a ρ_{ap} um bom estimador da f_{c0} para as madeiras investigadas.

Dias (2000) investigou distintos modelos de regressão para estimar as propriedades físico-mecânicas em função da ρ_{ap} . O trabalho pautou-se no experimento de 40 espécies do grupo das folhosas, sendo este grupo de espécies também adotado nas análises estatísticas do presente trabalho, juntamente com um novo grupo de 20 espécies, de modo a compor um amplo conjunto de 60 espécies de madeiras tropicais.

Por fim, todas as pesquisas anteriores afirmam ser possível estimar as propriedades físico-mecânicas em função da ρ . Destacam-se alguns trabalhos que mostram a abrangência global desse tema e consolidam as pesquisas com esse foco: Brancheriau et al. (2002), Ellis e Steiner (2002), Kim et al. (2011), Nugroho et al. (2012), Chowdhury et al. (2013), Almeida et al. (2014), Igartúa et al. (2015), Trevisan et al. (2016), Tenorio e Moya (2018), Lahr et al. (2021a), Teixeira et al. (2021), Lahr et al. (2021b), entre outros.

Por outro lado, destaca-se o fato desses autores trabalharem com um número pequeno de espécies. Além disso, tais pesquisas pautaram-se na caracterização e/ou em correlações físico-mecânicas sem focar na avaliação dos valores característicos de propriedades mecânicas, sendo estas fundamentais para o dimensionamento em madeiras e, portanto, de grande relevância no âmbito da Engenharia de Estruturas.

2.3 Determinação de Valores Característicos

Dentre os temas com potencial para o presente trabalho, destacam-se aqueles que buscaram determinar valores característicos para as diferentes resistências mecânicas.

¹⁶ Estudaram as espécies de Canafístula, Angelim-araroba e Castelo.

Reforça-se o fato de terem sido poucos os estudos encontrados e, daqueles que foram aqui elencados, todos versaram acerca da confiabilidade dos modelos empíricos *versus* estatísticos ao estimar um determinado valor característico.

Logo, as buscas sistematizadas foram realizadas a partir dos termos: *characteristic strength* AND *probability distribution functions* AND *tropical woods* AND *ANOVA*. Foram testadas várias combinações de busca, com a exclusão de alguns termos, visando confirmar a ausência de pesquisas com a mesma proposição discutida no presente trabalho de tese. No total, apenas 10 artigos foram encontrados, o que contribui para justificar o ineditismo atrelado ao presente trabalho de tese, ao demonstrar a inexistência de pesquisas com os mesmos objetivos aqui propostos. Na sequência, tais trabalhos são descritos como forma de correlacionar as pesquisas envolvendo modelos probabilísticos.

Os autores Logsdon et al. (2010) buscaram aferir o modelo para estimar a resistência $f_{c0,k}$, objetivando um modelo estatístico mais adequado. Para tanto, $n = 100$ corpos de prova de Angelim-pedra foram ensaiados, levando a conclusão que as equações da ABNT NBR 7190 (1997) são mais conservadoras por fornecem valores menores para $f_{c0,k}$. Martínez-Espinosa e Calil Jr. (2000), por sua vez, estudaram as espécies de Maçaranduba (com $n = 12$) e de *Eucalyptus grandis* (com $n = 100$), com distribuições de probabilidade simétricas e assimétricas e concluíram que o uso das equações da norma brasileira é permissível apenas para dados com uma distribuição normal aproximada. Como alternativa, o trabalho ilustra algumas distribuições assimétricas, com destaque ao modelo de *Weibull*.

Pinto et al. (2004) também enfatizam a condição de normalidade de dados experimentais para determinação dos valores característicos via método empírico da normativa brasileira. A conclusão do estudo apresentou um erro não conservador de até 12% para o método da norma, quando comparado ao uso de uma distribuição assimétrica (com $n > 30$) pelo Método dos Percentis (Martínez-Espinosa et al., 2004), algo comum em se tratando de dados experimentais para madeiras.

Matos e Molina (2016) estudaram a correlação entre $f_{v0,k}$ e $f_{c0,k}$, comparando as

respostas da ABNT NBR 7190 (1997) com aquelas da ISO (2005), para $n = 12$ ensaios. Concluíram que os resultados via norma brasileira são superiores àqueles da norma europeia. Reforça-se, contudo, o fato dos autores terem ensaiado apenas duas espécies, sendo madeiras de reflorestamento de *Pinus elliotti* e *Eucalyptus citriodora*.

Wolenski et al. (2019) avaliaram $f_{t0,k}$ para 40 espécies do grupo das folhosas a partir de 480 experimentos, enquanto Wolenski et al. (2020a) avaliaram $f_{c0,k}$, $f_{t0,k}$ e $f_{v0,k}$ para 30 espécies a partir de 1080 experimentos. Em ambas as pesquisas, diferentes funções densidade de distribuição de probabilidades foram adotadas. O equacionamento proposto no primeiro trabalho alcançou um erro não conservador de $\approx 14\%$ quando comparado a norma brasileira, indo ao encontro dos resultados de Martínez-Espinosa et al. (2004) e Pinto et al. (2004), embora estes tenham adotado um número amostral superior, $n > 30$ frente a $n = 12$, questão esta discutida nos capítulo 4. A segunda pesquisa, por sua vez, resultou em modelos com coeficientes de confiabilidade superiores à 90% de significância.

Os trabalhos de Wolenski et al. (2020b) e Wolenski et al. (2020c) adotaram um conjunto de 40 espécies a partir de 960 experimentos em madeiras tropicais do grupo das folhosas, com a proposição de obter modelos probabilísticos a partir de equações de regressão. O primeiro trabalho pautou-se na obtenção de valores de $f_{v0,k}$, enquanto o segundo na obtenção de $f_{t0,k}$, ambas a partir de $f_{c0,k}$, atingindo coeficientes de confiabilidade de 53% e 65% de significância, respectivamente, a partir de modelos de regressão logarítmica com aplicabilidade teórica e experimental.

Por fim, Wolenski et al. (2020d) adotaram um conjunto de 36 espécies a partir de 1296 experimentos em madeiras tropicais do grupo das folhosas, com objetivo de obter modelos probabilísticos a partir de equações de regressão, com a obtenção dos valores de $f_{t0,k}$ e $f_{v0,k}$ a partir de $f_{c0,k}$. Os autores obtiveram coeficientes de confiabilidade de 63% e 70% de significância, respectivamente, a partir de modelos de regressão logarítmica. Em adição, avaliaram as equações simplificadas da norma (ABNT NBR 7190, 1997) e concluíram que a relação $f_{v0,k}$ e $f_{t0,k}$, atingiu um valor significativamente superior (na

ordem de 90%) daquele proposto pela normativa.

Notadamente, os referidos trabalhos reforçam a importância de pesquisas capazes de analisar, do ponto de vista estatístico, as resistências características para distintas espécies, sob o entendimento de que a norma brasileira é frágil no que condiz ao seu método para determinação dos valores característicos a partir de dados experimentais muitas vezes assimétricos e que acabam por exigir modelos probabilísticos não-paramétricos, ou seja, distintos daqueles pautados em uma distribuição normal e paramétrica, como propõe o modelo empírico da norma.

É relevante destacar, portanto, o ineditismo atrelado as 60 espécies de madeiras tropicais aqui avaliadas, questão esta que visa ampliar a variabilidade das propriedades mecânicas estudadas, de modo a fornecer maior confiabilidade das análises estatísticas e dos respectivos modelos probabilísticos oriundos desta tese. Ao mesmo tempo, uma investigação acerca da relevância do tamanho amostral para cada espécie é avaliada, a fim de inferir sobre o conjunto de experimentos mínimos, capazes de resultar no valor característico confiável para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia experimental para obtenção das propriedades mecânicas de resistência e rigidez – na compressão e tração – são apresentadas tendo a norma brasileira, ABNT NBR 7190 (1997, Anexo B), como norteadora. Tais propriedades são imprescindíveis para compor um amplo conjunto amostral de espécies de madeiras tropicais adotadas nas análises probabilísticas desenvolvidas nesta tese.

Na sequência, são detalhados distintos modelos de densidade de probabilidades e de regressão, fundamentados na análise de variância (ANOVA), com objetivos de propor equações simplificadas de correlação dentre tais propriedades e da avaliação dos equacionamentos que compõe o cálculo da resistência característica, essenciais no dimensionamento de estruturas de madeiras.

3.1 Determinação das Propriedades Mecânicas

A madeira apresenta características distintas dentre suas propriedades mecânicas, dada a dependência dos esforços (flexão, compressão, tração e cisalhamento) e das direções de aplicação de cargas (longitudinal, tangencial e radial), fato intrinsecamente ligado a sua característica anisotrópica (Miyoshi et al., 2018). Logo, a variação entre árvores da mesma espécie e a forma como é beneficiada deve ser feita dentro de uma certa amostragem, a fim de estratificá-la estatisticamente.

Para tanto, a norma brasileira prevê para uma caracterização simplificada (espécies usuais) e mínima (espécies pouco conhecidas), um número de 6 (seis) e 12 corpos de

prova, respectivamente, para cada ensaio a ser realizado. Este conjunto amostral deve ser extraído, aleatoriamente, a partir de um lote homogêneo de até 12 m^3 de madeira serrada.

A Figura 3.1 esquematiza como foram realizadas a forma de extração e confecção dos corpos de prova dos ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM) pertencente ao Departamento de Engenharia (SET) da Universidade de São Paulo (USP), câmpus São Carlos-SP, cujos experimentos de 40 espécies compuseram o trabalho de Dias (2000), conforme abordado no Capítulo 2, somados a 20 novas espécies ensaiadas originalmente nesta tese.

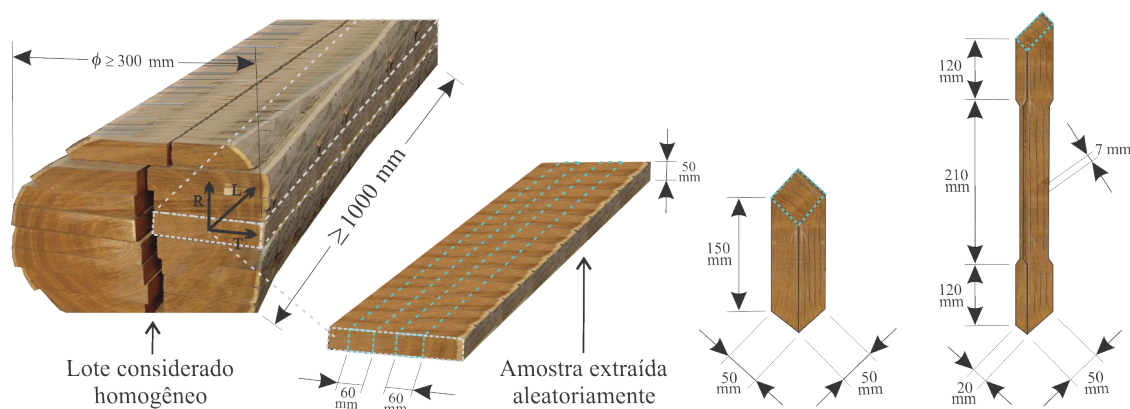


Figura 3.1: Esquema de extração dos corpos de prova para os ensaios de compressão e de tração paralelos às fibras.

Os resultados foram obtidos sob as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira, a partir do número de determinações experimentais com total de 1800 ensaios¹, considerando as propriedades das 60 espécies de madeira tropicais do grupo das folhosas, conforme detalhado nas Tabelas 3.1 e 3.2. Deste grupo destacam-se 10 espécies (em negrito nas tabelas), com $n = 30$ corpos de prova, que foram adotadas na avaliação da influência do tamanho amostral na determinação dos valores característicos para as resistências na compressão e tração.

¹ No total foram adotados $(12 \times 50 \times 2) + (30 \times 10 \times 2) = 1800$ experimentos, com $n = 12$ para 50 espécies e $n = 30$ para 10 espécies, para cada uma das propriedades mecânicas, totalizando um amplo conjunto amostral de 60 espécies estudadas.

ID	Nome Popular	Nome Científico ¹
1	Abiú	<i>Pouteria</i> cf. <i>guianensis</i> Aubl.
2	Angelim-amargoso	<i>Vatairea fusca</i> (Ducke) Ducke
3	Angelim-araroba	<i>Vataireopsis araroba</i> (Aguiar) Ducke
4	Angelim-ferro	<i>Hymenolobium</i> cf. <i>heterocarpum</i> Ducke
5	Angelim-pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i> Ducke
6	Angelim-saia	<i>Vatairea</i> cf. <i>guianensis</i> Aubl.
7	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke
8	Angico-branco	<i>Parkia</i> cf. <i>p1endula</i> (Willd.) Benth. ex Walp.
9	Angico-preto	<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul
10	Branquilha	<i>Sebastiania commersoniana</i> (Baill.) L.B.Sm. & Downs
11	Breu-vermelho	<i>Protium</i> cf. <i>altissimum</i> (Aubl.) Marchand
12	Cafearana	<i>Andira anthelmia</i> (Vell.) Benth
13	Caixeta	<i>Croton piptocalyx</i> Müll.Arg.
14	Cambará	<i>Vochysia divergens</i> Pohl
15	Cambará-rosa	<i>Erisma</i> cf. <i>fuscum</i> Ducke
16	Canafístula	<i>Cassia ferruginea</i> (Schrad.) Schrad. ex DC.
17	Canelão	<i>Ocotea</i> cf. <i>spixiana</i> (Nees) Mez
18	Canela-parda	<i>Ocotea</i> cf. <i>odorifera</i> (Vell.) Rohwer
19	Casca-grossa	<i>Pouteria</i> cf. <i>pachyphylla</i> T.D.Penn.
20	Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.
21	Castelo	<i>Calycophyllum multiflorum</i> Griseb.
22	Catanudo	<i>Calophyllum longifolium</i> Willd.
23	Cedro-amargo	<i>Cedrela odorata</i> L.
24	Cedro-amazonense	<i>Cedrela</i> sp.
25	Cedro-doce	<i>Cedrela</i> cf. <i>fissilis</i> Vell.
26	Cedrorana	<i>Cedrelinga cateniformis</i> (Ducke) Ducke
27	Champanhe	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.
28	Copaíba	<i>Copaifera multijuga</i> Hayne
29	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.
30	Cutiúba	<i>Goupia paraensis</i> Huber
31	Embireira	<i>Gutteria</i> sp. Ruiz & Pav
32	Envira	<i>Xylopia</i> cf. <i>benthamii</i> R.E.Fr.
33	Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vog.) Macbr.
34	Goiabão	<i>Planchonella</i> Pires
35	Guaçara	<i>Luetzelburgia</i> cf. <i>guaissara</i> Toledo
36	Guajará	<i>Micropholis venulosa</i> (Mart. & Eichler) Pierre
37	Guanandi	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.
38	Guarucaia	<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.
39	Ipê	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.Grose

(1) Fonte: (REFLORA, 2018, Backes e Irgang, 2009, de Andrade et al., 2012).

Tabela 3.1: Identificação, nomes popular e científico para as 60 espécies avaliadas: Parte 1.

ID	Nome Popular	Nome Científico ¹
40	Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez
41	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.
42	Louro-preto	<i>Ocotea neesiana</i> (Miq.) Kosterm.
43	Louro-verde	<i>Sextonia cf. rubra</i> (Mez) van der Werff
44	Maçaranduba	<i>Manilkara cf. inundata</i> (Ducke) Ducke
45	Mandioqueira	<i>Qualea paraensis</i> Ducke
46	Marupá	<i>Simarouba amara</i> Aubl.
47	Oiticica-amarela	<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav.
48	Oiuchu	<i>Pradosia</i> sp. Liais
49	Parinari	<i>Parinari excelsa</i> Sabine
50	Pau-óleo	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.
51	Piolho	<i>Tapirira</i> sp. Aubl.
52	Quaruba-rosinha	<i>Vochysia floribunda</i> Mart.
53	Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i> Warm.
54	Quina-rosa	<i>Geissospermum sericeum</i> Miers
55	Rabo-de-araia	<i>Vochysia haenkeana</i> Mart.
56	Roxinho	<i>Peltogyne lecointei</i> Ducke
57	Sucupira	<i>Diplostropis</i> sp. Benth.
58	Tachi	<i>Tachigali glauca</i> Tul.
59	Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.
60	Umirana	<i>Ruizterania retusa</i> (Spruce ex Warm.) Marc.-Berti

(1) Fonte: (REFLORA, 2018, Backes e Irgang, 2009, de Andrade et al., 2012).

Tabela 3.2: Identificação, nomes popular e científico para as 60 espécies avaliadas: Parte 2.

Destaca-se que o número amostral, $n = 12$, possibilita o uso prático dos modelos probabilísticos aqui propostos, indo ao encontro ao exigido pela ABNT NBR 7190 (1997) e mantido em sua versão revisada ABNT NBR 7190-3 (2022), para uma caracterização mínima de espécies pouco conhecidas. Contudo, entende-se como relevante a avaliação do real impacto frente a um número amostral superior, assim como proposto em Pinto et al. (2004) ao adotar um método assimétrico com $n = 30$ (tamanho amostral suficientemente grande, do ponto de vista estatístico), como alternativa ao modelo simétrico e empírico proposto na norma brasileira.

Barbetta et al. (2010) esclarecem que a essência da análise estatística é prover conclusões sobre uma população com base em um conjunto amostral de observações. Ao mesmo tempo reforçam que a definição da amostragem não perfaz um caminho trivial,

uma vez que para determinar o tamanho da amostra, a variabilidade da população, em termos da variável de estudo, deve ser compreendida.

Portanto, optou-se pela seleção de 10 espécies (em negrito nas Tabelas 3.1 e 3.2) de madeiras tropicais² escolhidas para compor um número amostral ampliado, com $n = 30$, de modo a avaliar a variabilidade amostral e a qualidade do estimador quando sujeito a um número suficientemente grande de amostras.

3.1.1 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

Objetiva-se determinar a resistência e a rigidez à compressão da madeira de um lote considerado homogêneo. Define-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) como a razão entre a máxima força de compressão ($F_{c0,max}$) e a área da seção transversal (A) do corpo de prova, assim como expressa a Equação 3.1:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} . \quad (3.1)$$

O módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) é obtido pela inclinação do trecho linear da reta secante à curva tensão×deformação (Figura 3.2 e Equação 3.2), em que $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$, $\varepsilon_{50\%}$ correspondem às tensões e às deformações de compressão correspondentes a 10% e 50%, respectivamente, da f_{c0} medidas no terceiro ciclo de carregamento e representadas pelos pontos 81 e 85, como ilustra o diagrama de carregamento da Figura 3.3.

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} . \quad (3.2)$$

² As espécies em negrito, apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, fazem parte do grupo com um número amostral considerado grande, do ponto de vista estatístico ($n > 30$), sendo as espécies Argelim-ferro (C60), Argelim-pedra (C50), Cambará (C30), Casca-grossa (C50), Cedro-amargo (C30), Cupiúba (C40), Ipê (C50), Itaúba (C60), Louro-preto (C50) e Maçaranduba (C60).

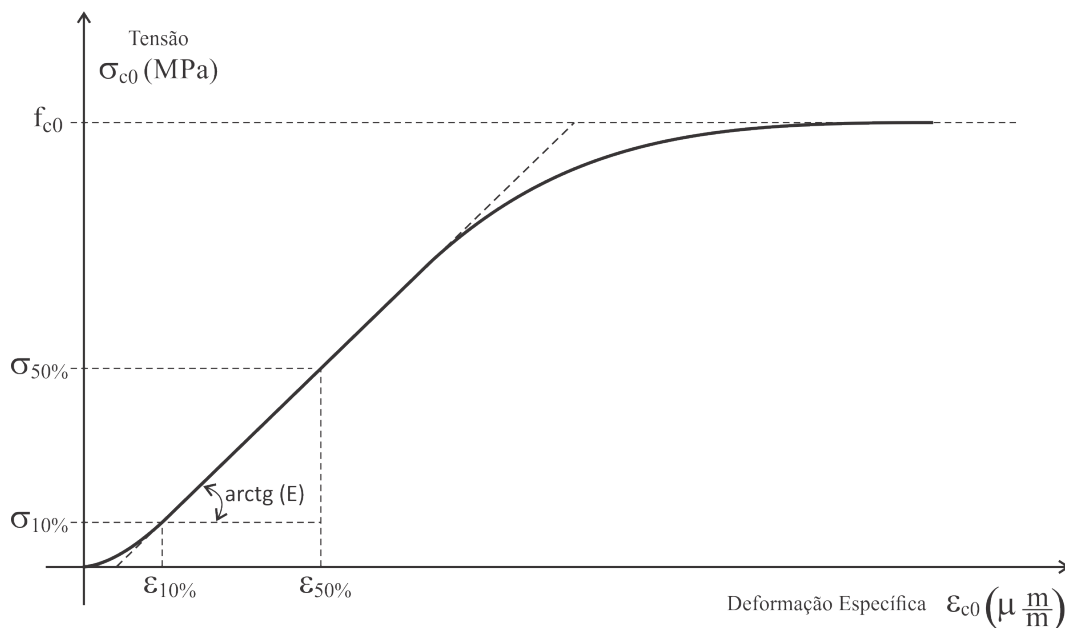


Figura 3.2: Diagrama tensão x deformação na compressão (ABNT NBR 7190 (1997), fonte adaptada).

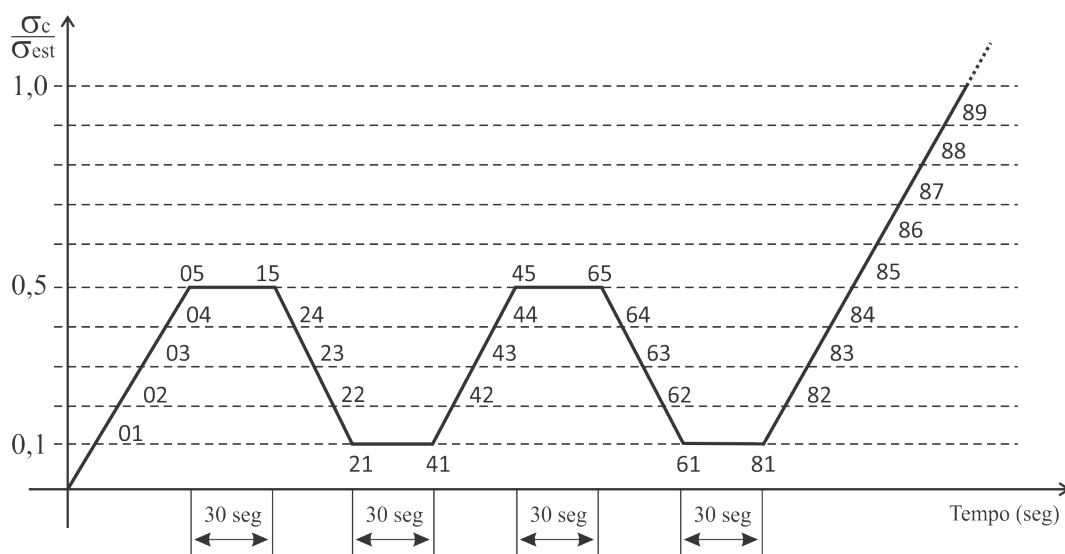


Figura 3.3: Diagrama de carregamento para a determinação da rigidez à compressão (ABNT NBR 7190 (1997), fonte adaptada).

A norma estabelece, para determinar f_{c0} e E_{c0} , que o corpo de prova seja prismático, de seção transversal quadrada $50 \times 50 \text{ mm}^2$ de lado e 150 mm de comprimento na direção das fibras, com precisão dada em milímetros (mm), conforme ilustração da Figura 3.1 e do exemplar para a espécie Caixeta na Figura 3.4.

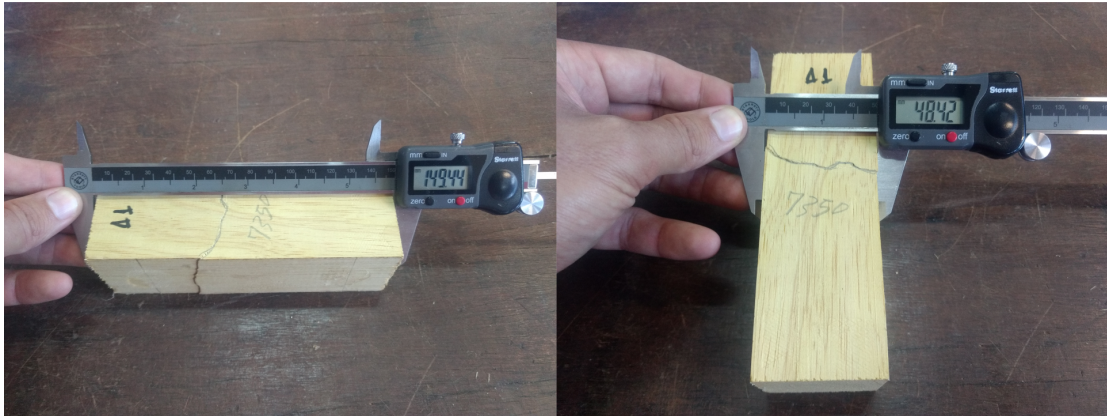


Figura 3.4: Corpo-de-prova para os ensaios de compressão paralela às fibras para uma amostra da espécie Caixeta.

Dada a característica anisotrópica da madeira, oriunda da sua natureza orgânica heterogênea, é admissível a ocorrência de distintas deformações nas diferentes faces do corpo de prova. Contudo, por simplificação, a norma brasileira admite a fixação dos relógios comparadores em duas faces opostas (mínimo) do corpo de prova e posicionados em cantoneiras metálicas a uma distância de 100 *mm* (Figura 3.5).



Figura 3.5: Padrão de fixação dos relógios comparadores no corpo de prova para uma amostra da espécie Caixeta.

Por fim, a deformação característica será resultante da média das deformações registradas em cada relógio comparador com resolução de 0,001 *mm*, com a carregamento monotônico crescente aplicado a uma taxa de aproximadamente 10 *MPa/min*, com o relógio e fixador ilustrados na Figura 3.6.



Figura 3.6: Posicionamento do corpo de prova e dos relógios comparadores para ensaio de compressão paralela às fibras para um exemplar da espécie Caixeta.

3.1.2 Ensaio de Tração Paralela às Fibras

Objetiva-se determinar a resistência e a rigidez à tração paralela às fibras da madeira. Segundo a normativa brasileira, a resistência f_{t0} é a máxima tensão de tração que pode ser aplicada ao corpo de prova (Figura 3.7), conforme expressão:

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} . \quad (3.3)$$



Figura 3.7: Corpo de prova de seção transversal retangular para ensaios da f_{t0} , representada por exemplares da espécie Caixeta.

O módulo de elasticidade E_{t0} é determinado pela inclinação do trecho linear da reta secante do diagrama tensão×deformação (análoga a Figura 3.3) definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}, \sigma_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}, \varepsilon_{50\%})$ correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da resistência

f_{t0} no ensaio, dado por:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}. \quad (3.4)$$

Para determinação da f_{t0} e E_{t0} , a norma brasileira permite dois tipos de corpos de prova, diferenciando-os pelas suas sessões transversais: circular e retangular. Nesta tese, os experimentos são oriundos de corpos de prova retangulares com dimensões $50 \times 20 \text{ mm}^2$ de lado e comprimento de 450 mm na direção paralela às fibras, com precisão dada em milímetros (mm) (Figura 3.8).



Figura 3.8: Vistas do corpo de prova para os ensaios da f_{t0} , representado por um exemplar da espécie Caixeta.

Análogo ao ensaio de compressão, a deformação na tração será resultante da média das deformações registradas em cada relógio comparador, com carregamento monotônico crescente aplicado a uma taxa aproximada de $10 \text{ MPa}/\text{min}$.

A Figura 3.9 ilustra a prensa universal AMSLER com capacidade de 250 kN adotada durante os ensaios.



Figura 3.9: Máquina de ensaio universal adotada nos ensaios, com um corpo de prova na tração, durante e após o rompimento.

Reforça-se o fato desta prensa estar devidamente calibrada e apta para o fornecimento de resultados experimentais confiáveis.

3.2 Determinação dos Valores Característicos

Nas determinações experimentais os corpos de prova foram estocadas obedecendo a exigência da norma brasileira, com um teor de umidade próximo a 12%, sendo esta a umidade de equilíbrio para madeiras. Na sua variação, as propriedades mecânicas foram corrigidas para a umidade de referência, dadas pelas Equações 3.5 e 3.6, respectivamente:

$$f_{12} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right], \quad (3.5)$$

em que f_{12} é a resistência corrigida para a umidade de 12% e $f_{U\%}$ a resistência para o teor de umidade $U\%$; e,

$$E_{12} = E_{U\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right], \quad (3.6)$$

sendo E_{12} o módulo de elasticidade corrigido para a umidade de 12% e $E_{U\%}$ o módulo para o teor de umidade $U\%$.

Para a determinação da resistência característica, necessária para compor a resistência de cálculo para uma determinada solicitação em um projeto estrutural, deve-se considerar os valores das resistências às solicitações mecânicas das madeiras, obtidos a partir do seu valor característico ($f_{w,k}$), correspondendo a um percentil de 5% da distribuição de resistências, expresso como:

$$f_{w,k} = f_m(1 - 1,645 \delta), \quad (3.7)$$

sendo f_m o valor médio da resistência e δ o respectivo coeficiente de variação.

Em adição, a ABNT NBR 7190 (1997, pg. 18, item 6.4.7) exige que os projetos de estruturas de madeira sejam dimensionadas sob a hipótese de linearidade geométrica (admitindo pequenos deslocamentos), além de exigir resistência à ação das forças atuantes. Assim, a metodologia probabilística da referida norma supõe a normalidade nas distribuições, a favor da segurança, ao considerar um coeficiente de variação $\delta = 18\%$, resultando em uma equação para resistência característica sob a hipótese de uma distribuição normal de probabilidades, ou seja:

$$f_{w,k} = f_m(1 - 1,645 \delta) \approx 0,70 f_m. \quad (3.8)$$

Por outro lado, a norma prevê, para uma investigação direta da resistência, uma função para estimativa da resistência característica, $f_{w,k}$, na forma:

$$f_{w,k} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_{\left(\frac{n}{2}-1\right)}}{\left(\frac{n}{2} - 1\right)} - f_{\left(\frac{n}{2}\right)} \right) \cdot 1,10, \quad (3.9)$$

em que f_n corresponde a n resultados da resistência à determinada solitação, devendo ser colocados em ordem crescente ($f_1 < f_2 < f_3 < \dots < f_n$), desprezando-se o maior valor se o número de corpos de prova for ímpar.

Ressalta-se que tal equação baseia-se no estimador z_b , que possui uma distribuição de extremos centrado no valor característico, acrescido em 10%, logo:

$$z_b = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{(m-1)}}{(m-1)} - x_m \right), \quad (3.10)$$

para uma amostra de $2m$ valores x_1, x_2, \dots, x_{2m} .

Com base nessas equações, portanto, a norma brasileira adota como valor de $f_{w,k}$, o maior dos valores compreendidos entre a resistência f_1 , a resistência inferior a 70% do valor de f_m (Equação 3.8 obtidas pela média das amostras ensaiadas) e o valor obtido pela Equação 3.9 (ABNT NBR 7190, 1997, pg. 18), ou seja:

$$f_{w,k} = \max : \{(f_1); (0, 70 \cdot f_m); (z_b \cdot 1, 10)\} . \quad (3.11)$$

Ressalta-se que a Equação 3.11 é aplicada para distintas resistências, sejam estas de compressão, tração ou cisalhamento, mesmo embora a norma ABNT NBR 7190 (1997, p. 15) defina um $\delta = 18\%$ e 28% para solitações normais e tangenciais, respectivamente. Tal questão é enfatizada por de Freitas (1978) ao afirmar que para lotes homogêneos tal coeficiente dificilmente atinge o valor de 15%. Esta questão demonstra a relevância pelo estudo acerca da variabilidade do coeficiente δ para diferentes espécies de madeiras e, inclusive, na verificação dos tamanhos amostrais, pequeno ($n = 12$) e grande ($n > 30$), questão esta discutida no Capítulo 4.3.3.

Por fim, a ABNT NBR 7190 (1997, pg. 16, item 6.3.5) enquadra as diversas espécies de madeira em 04 (quatro) classes de resistência (CR), para o grupo das folhosas, a partir do valor característico da resistência $f_{c0,k}$ (Tabela 3.3), o que reforça a relevância no estudo de modelos probabilísticos de maior confiabilidade para determinação dessa propriedade, em conjunto com a possibilidade de revisão desta classificação, dada sua importância no

dimensionamento de estruturas de madeira.

Classes (CR)	$f_{c0,k}$ (MPa)	E_{c0} (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (kg/m ³)	ρ_{ap} (kg/m ³)
C20	20,00	9500,00	500,00	650,00
C30	30,00	14500,00	650,00	800,00
C40	40,00	19500,00	750,00	950,00
C60	60,00	24500,00	800,00	1000,00

Tabela 3.3: Classes de Resistência das folhosas.

Pela Tabela 3.3, os valores representativos do módulo longitudinal são calculados a partir de seus valores médios (E_{c0} , E_{t0}), enquanto que a resistência $f_{c0,k}$ está pautada em seus valores característicos. Assim, para as 60 espécies avaliadas, as resistências características, segundo a norma brasileira, foram avaliadas a partir da Equação 3.11, com resultados discutidos no Capítulo 4.

3.3 Relações entre Propriedades

A normativa brasileira possibilita uma caracterização simplificada da madeira com base nos resultados de compressão na direção paralela às fibras. Para tanto, a mesma prevê algumas relações, com destaque para a Equação 3.12, que prevê a obtenção das resistências características $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$, na forma:

$$f_{c0,k} = 0,77 \cdot f_{t0,k} . \quad (3.12)$$

A norma admite ainda que os valores médios dos módulos de elasticidade E_{c0} e E_{t0} sejam equivalentes entre si, ou seja:

$$E_{c0} = E_{t0} . \quad (3.13)$$

Ressalta-se que tal equação se restringe a caracterização de espécies usuais de madeira que, por ventura, tenham ausência de resultados experimentais advindos de uma caracterização completa, o que amplia a importância da sua aplicação, uma vez que a

caracterização completa de uma espécie demanda elevados custos, atrelados a necessidade de laboratórios especializados e da aquisição da madeira serrada.

Notadamente, a simplicidade exposta pelas equações lineares supracitadas podem não ser coerentes com resultados reais advindos de análises experimentais. Neste contexto, buscou-se discutir tal questão, ao avaliar a equivalência estatística das Equações 3.12 e 3.13, ao comparar os valores experimentais para as 60 espécies de madeira tropicais apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

3.4 Análises Estatísticas

Todas as análises, elencadas nesta sessão, buscam cumprir com os objetivos deste trabalho. A começar pela Análise de Variância (ANOVA), necessária para confrontar as propriedades mecânicas – compressão e tração – e suas respectivas formulações, além de avaliar as diferenças significativas entre dados experimentais e estimados e entre as formulações empírica e a probabilística.

Para adentrar nas formulações teóricas aqui adotadas, os fluxogramas, a seguir, sintetizam como as análises estatísticas foram construídas para a obtenção dos modelos de regressão, dos modelos probabilísticos para os valores característicos, $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, e da análise discriminante para as classes de resistência.

A Figura 3.10 ilustra as análises para obtenção dos modelos de regressão, com o objetivo de correlacionar as resistências características, $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, como alternativa ao equacionamento da norma brasileira.

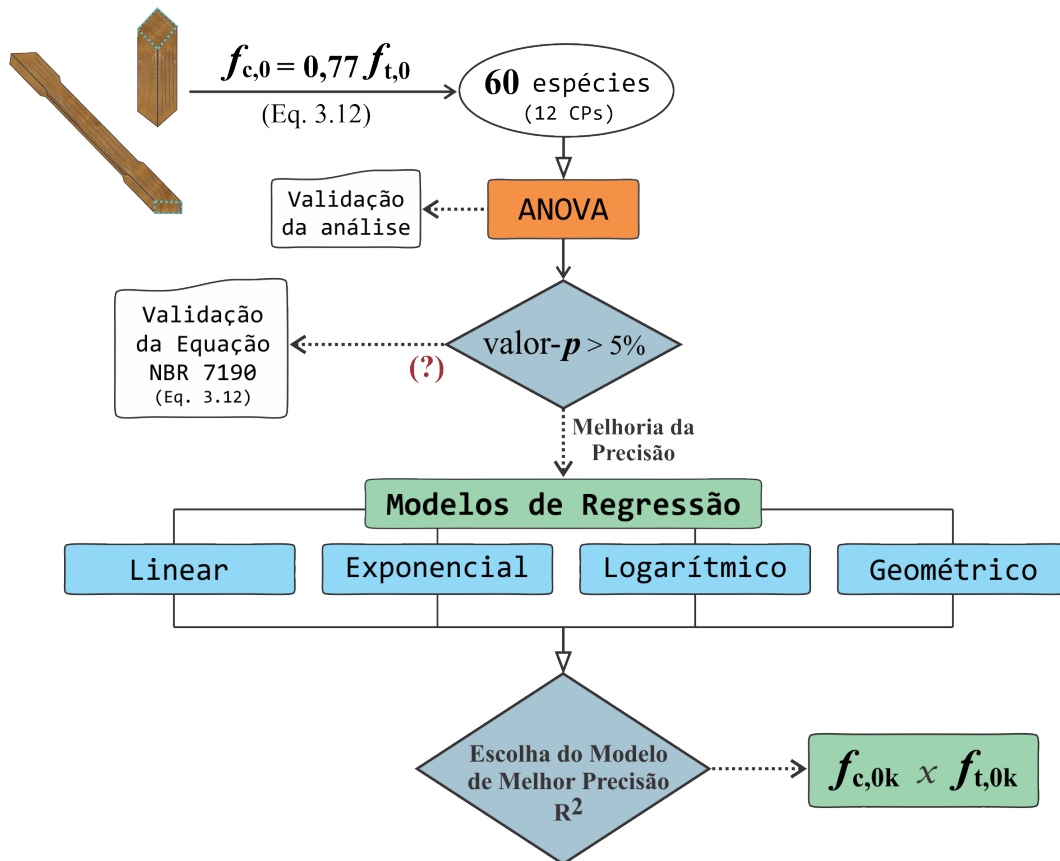


Figura 3.10: Fluxograma para a análise estatística dos modelos de regressão.

Na sequência, como principal objetivo desta pesquisa, a Figura 3.11 elucida as análises para construção dos modelos probabilísticos para as resistências características, $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, via teste de aderência.

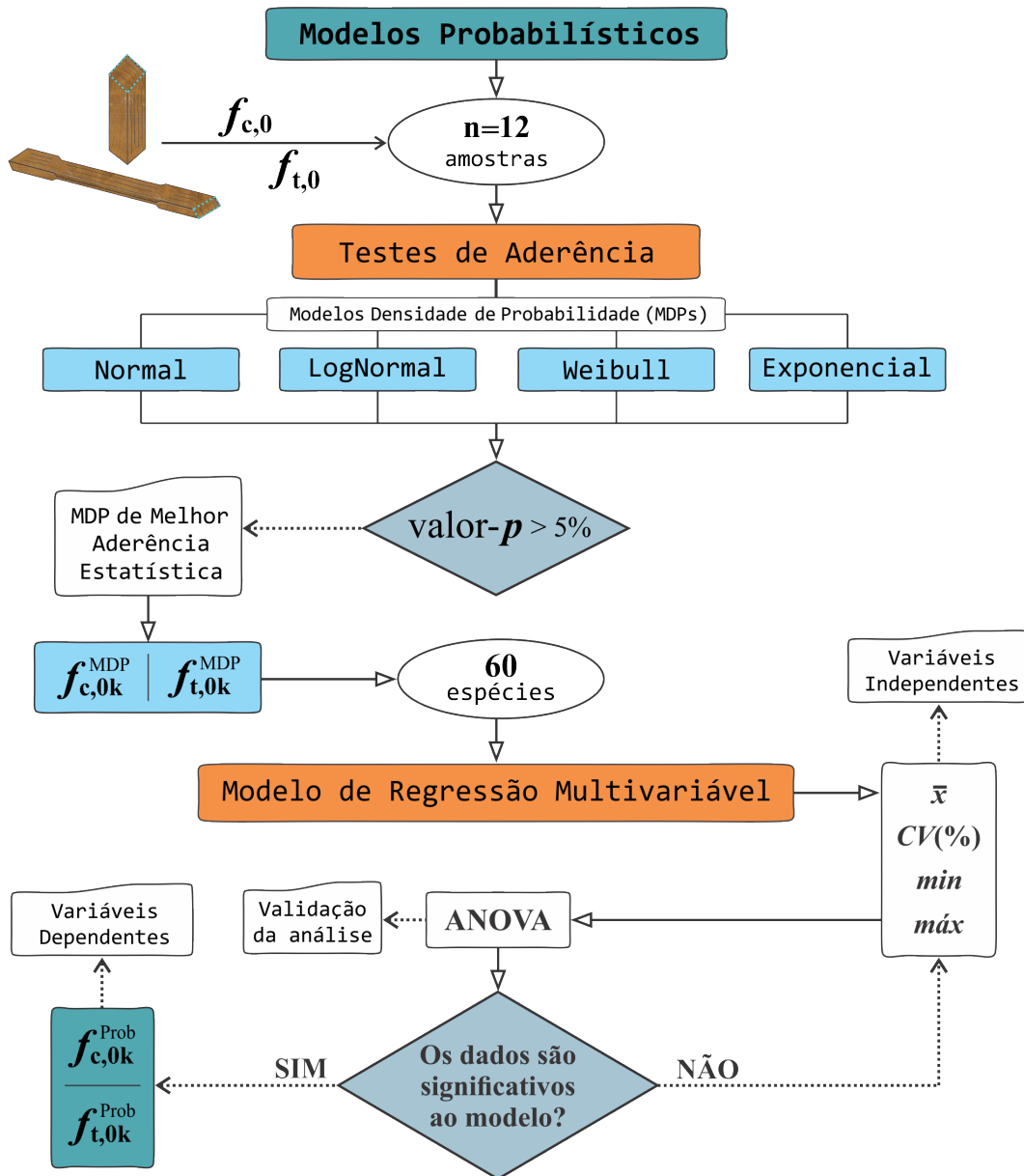


Figura 3.11: Fluxograma para a análise estatística dos modelos probabilísticos.

Como complemento da análise anterior, a Figura 3.12 traz o fluxo das análises realizadas para avaliar as classes de resistência, a partir da compressão característica, $f_{c0,k}$, seja quando obtida via norma ou pelo modelo probabilístico proposto.

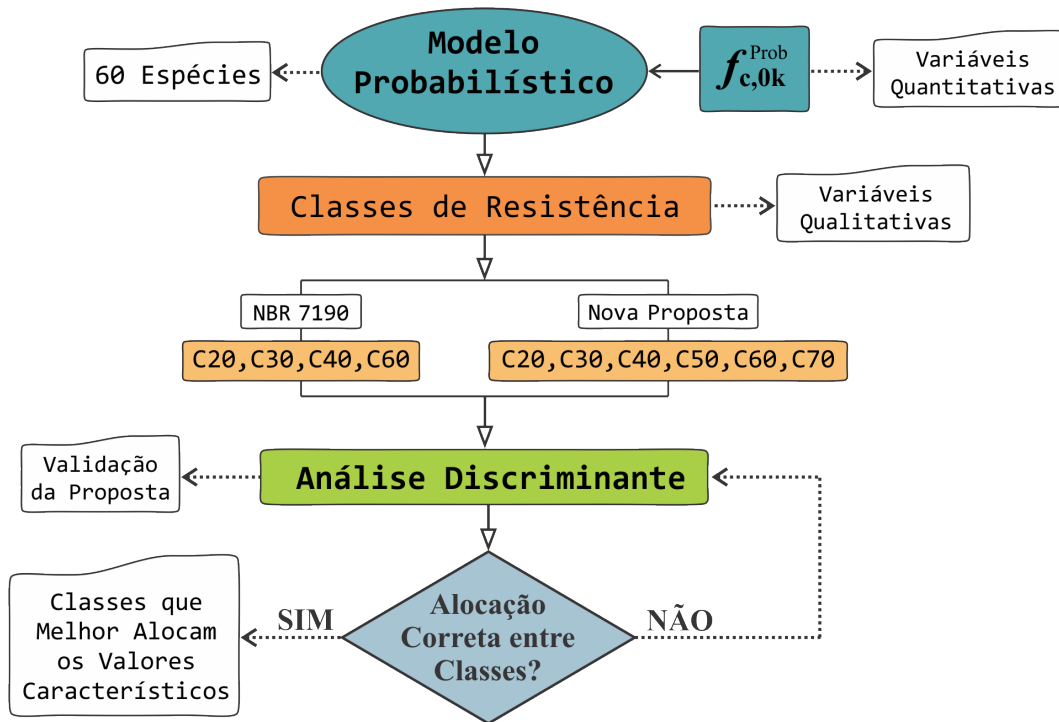


Figura 3.12: Fluxo para análise discriminante para validar uma nova classificação para $f_{c0,k}$.

Os fluxogramas apresentados, portanto, permitem sintetizar como as análises foram pensadas ao longo da construção do presente trabalho. A seguir, as formulações para tais análises são apresentadas com a mesma sequência lógica.

3.4.1 Análise de Variância (ANOVA)

A análise estatística, para comparação de grupos independentes de dados, é avaliada tradicionalmente pela análise de variância (ANOVA). Avaliou-se a equivalência dos dados experimentais para as propriedades mecânicas – compressão e tração – das 60 espécies de madeira tropicais aqui estudadas.

Segundo a ANOVA a hipótese nula (H_0) consiste em considerar que determinada propriedade analisada é equivalente (ou representativa) para a mesma propriedade, ao considerar o conjunto de todos os resultados avaliados, e na diferença das médias dos dois grupos como hipótese alternativa (H_1). Como parâmetro para mensurar tais hipóteses, adotou-se o teste de significância, avaliado a partir da probabilidade de significância p , denominada como valor- p .

Segundo Barbetta et al. (2010) o valor- p pode ser definido como a probabilidade da estatística do teste acusar um resultado tão ou mais distante do esperado. Logo, a aplicação deste teste serve para verificar se os dados fornecem evidência suficiente para aceitar como verdadeira a hipótese alternativa, H_1 , com certa segurança de que as diferenças observadas nos dados não são meramente casuais.

Logo, as propriedades mecânicas são avaliadas ao admitir um valor- p , ao nível de 5% de significância. Logo, valor- $p > 0,05$ implica em assumir a equivalência das médias dos dois grupos (aceitar, H_0) e valor- $p \leq 0,05$ de assumir a não equivalência em caso contrário (refutar, H_1).

Tal equivalência também pode ser obtida via método de *Tukey* (Tukey, 1949), que possibilita realizar comparações múltiplas para diferentes grupos de valores, a fim de identificar se os agrupamentos possuem distinção entre si. Este método foi empregado apenas na avaliação das classes de resistência, por se tratar de múltiplas classes a serem confrontadas entre si.

Por fim, antes de assumir a validade dos resultados oriundos da ANOVA, algumas premissas devem ser satisfeitas, o que inclui a normalidade na distribuição dos resíduos, a igualdade de variâncias e a independência dos resíduos. Todas estas análises foram realizadas via *Software Minitab*³.

Assim, a normalidade na distribuição dos resíduos pode ser avaliada com o teste de *Anderson-Darling* (Weerahandi, 1995), em que um valor- p igual ou superior ao nível de significância (5%) implica em aceitar a normalidade na distribuição e de rejeitar esta hipótese, caso contrário. Já a verificação da igualdade de variância pode ser obtida via método das comparações múltiplas e/ou pelo teste de *Levene*, ambos devendo resultar em nível de significância superior a 5%. Por fim, a independência dos resíduos é obtida ao avaliar o gráfico de resíduos x valores ajustados, cujos dados devem estar dispostos de modo aleatório.

³ Minitab - Versão 18 Minitab (2018).

As ferramentas estatísticas apresentadas, portanto, foram adotadas na análise e construção dos modelos de regressão e das funções de densidade de probabilidades, detalhados na sequência, sendo estas fundamentais para a proposição dos modelos probabilísticos para cálculo das resistências características na compressão e tração e da avaliação para as classes de resistência. As propriedades de rigidez, por sua vez, serão conduzidas conforme prevê a norma brasileira, que considera apenas seus valores médios para fins de dimensionamento.

3.4.2 Modelos de Regressões

Como alternativa às relações simplificadas da norma brasileira, propõe-se estimar as relações entre as propriedades mecânicas das 60 espécies aqui estudadas, por meio de quatro diferentes modelos de regressão, sendo as funções Linear, Exponencial, Logarítmica e Geométrica expressas, respectivamente, por:

$$Y_i = a + b \cdot X_i , \quad (3.14)$$

$$Y_i = a \cdot e^{b \cdot X_i} , \quad (3.15)$$

$$Y_i = a + b \cdot \log(X_i) , \quad (3.16)$$

$$Y_i = a \cdot X_i^b , \quad (3.17)$$

sendo a e b as variáveis constantes atribuídas ao modelo ajustado; Y_i e X_i as variáveis dependente e independente, respectivamente, associadas à i -ésima observação dentre as propriedades mecânicas – compressão e tração – avaliadas.

Para obtenção destas funções, foram geradas a partir da alimentação das variáveis dependentes e independentes (Y e X) em arquivos XML contendo as propriedades mecânicas, médias ou características. Para tanto, um *Script* lido pelo compilador **GnuPlot**,

via LaTeX, fornece os valores para as constantes a e b , conforme os dados de entrada dispostos no referido arquivo de entrada.

Uma vez obtidos os modelos de regressão, a qualidade do ajuste é obtida a partir dos valores do coeficiente de determinação (R^2), ou seja, pode-se avaliar as variações de determinada propriedade em inferir ou não na variável analisada. Assim, o maior valor de R^2 permite eleger, dentre os modelos significativos, aquele de melhor ajuste, sendo:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.18)$$

onde \bar{y} é o valor médio; y_i e \hat{y}_i são os i -ésimos valores corrente e predito, respectivamente, referentes a variável aleatória Y_i , sendo esta associada à i -ésima observação dentre as propriedades mecânicas aqui avaliadas (compressão e tração).

Em adição, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (Christoforo et al., 2011, 2012) é adotado, de forma alternativa e complementar ao modelos de regressão, na determinação do coeficiente ótimo (α) das relações entre os valores característicos, a partir do Método de *Newton* para uma aproximação quadrática, com a convergência para a solução ótima independente da estimativa inicial (α_0) no processo iterativo, ou seja:

$$f(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (f_{c0,k_i} - \alpha \cdot f_{t0,k_i})^2, \quad (3.19)$$

$$\alpha = \alpha_0 - \left(\frac{d^2}{d\alpha^2} [f(\alpha_0)] \right)^{-1} \cdot \frac{d}{d\alpha} [f(\alpha_0)]. \quad (3.20)$$

A avaliação da proposição da norma brasileira (Equações 3.12 e 3.13), portanto, pode ser alternativamente calculada via modelos de regressão (Equações 3.14 a 3.17) e o coeficiente α (Equações 3.19 e 3.20), e avaliadas via ANOVA, como forma de validar as relações simplificadas da norma frente as equações aqui propostas.

3.4.3 Modelos Densidade de Probabilidades

Os modelos probabilísticos são aplicados em situações que envolvam algum tipo de incerteza ou variabilidade, mais especificamente, considera-se a presença de algum experimento aleatório como princípio para a construção destes modelos (Barbetta et al., 2010). No presente trabalho, objetivou-se determinar modelos para o conjunto de experimentos necessários à determinação das resistências características $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, fundamentais no dimensionamento de estruturas de madeiras.

Para tanto, adotaram-se 04 (quatro) funções de distribuições de probabilidades (f), sendo a variável aleatória x expressa como funções Normal, LogNormal, *Weibull* e Exponencial, respectivamente, por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad x \in (-\infty, \infty), \quad (3.21)$$

em que σ é o desvio padrão e μ a média populacional da função normal;

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\cdot\sigma\cdot\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}, & \text{se } x > 0 \\ 0 & , \text{ se } x \leq 0, \end{cases} \quad (3.22)$$

sendo σ o desvio padrão e μ a média populacional logarítmica;

$$f(x) = \frac{\beta}{\gamma^\beta} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\beta}, \quad x > 0, \quad (3.23)$$

onde β e γ são os parâmetros de forma e de escala, respectivamente;

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, \quad x > 0, \quad (3.24)$$

em que λ é o parâmetro de taxa de distribuição da função exponencial.

Para avaliar tais modelos, tomou-se uso dos testes de aderência que, segundo Barbetta et al. (2010), objetivam verificar se os dados de um conjunto amostral comportam-se de acordo com uma determinada distribuição teórica. Os testes de aderência foram adotados para verificar o melhor modelo de distribuição, ao nível de 95% de confiança, dentre as quatro funções apresentadas, avaliadas a partir do Software Minitab® (Minitab, 2018).

Obtidos os valores característicos $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, dentre os quatro modelos de distribuição de probabilidade (Equações 3.21 a 3.24), os resultados são relacionados com o valor médio (\bar{x}), o coeficiente de variação ($CV\%$) e com o menor (min) e maior (max) valores das resistências f_{c0} ou f_{t0} , por meio de um modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na ANOVA, cuja qualidade do ajuste pode ser avaliada pelo coeficiente R^2 , descrito pela expressão:

$$f_{w,k}^{Prob} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \bar{x} + \beta_2 \cdot CV + \beta_3 \cdot min + \beta_4 \cdot max + \varepsilon, \quad (3.25)$$

em que β_i consistem nos coeficientes ajustados pelo MMQ e ε é o erro aleatório.

De acordo com Barbetta et al. (2010), na análise de regressão múltipla, objetiva-se construir um modelo estatístico-matemático para se estudar a relação entre as variáveis independentes e a variável dependente e, a partir do modelo, conhecer a influência de cada variável independente, como também, predizer a variável dependente em função do conhecimento das variáveis independentes.

Assim, a ANOVA é usada para verificar a precisão da Equação 3.25, ao nível de 5% de significância. Pelas hipóteses admitidas na formulação, valor- $p > 0,05$ implica em se aceitar a hipótese nula (H_0), ou seja, o modelo ou seus coeficientes não são representativos (variações dos fatores não explicam variações na variável dependente), e representativos no caso de valor- $p < 0,05$ (hipótese alternativa, H_1). Isto significa dizer que, caso determinada variável resulte em um valor- $p > 0,05$, ela não promove representatividade estatística para o modelo e, portanto, poderá ser excluída do equacionamento sem prejuízos a qualidade da formulação.

Uma vez avaliados todos os termos representativos ao modelo, a ANOVA deve ser validada. Assim, a normalidade na distribuição dos resíduos é testada via teste de *Anderson-Darling*⁴, ao avaliar o gráfico dos resíduos *versus* valores ajustados (análise da

⁴ Na formulação do teste, valor- p igual ou superior ao nível de significância (5%) implica em aceitar a normalidade na distribuição dos resíduos e, em caso contrário, de rejeitar essa hipótese (Software Minitab®).

homogeneidade das variâncias e da independência dos resíduos).

Por fim, destaca-se o fato do modelo ser construído a partir de termos experimentais (\bar{x} , CV , min , max), visando seu fomento teórico-prático, a fim de torná-lo um importante instrumento para a obtenção dos parâmetros das resistências – compressão e tração – fundamentais no dimensionamento de estruturas de madeiras.

Portanto, após obtenção dos modelos, pautados em testes de aderência à melhor curva de distribuição estatística, o modelo empírico da norma brasileira (Eq. 3.9) pôde ser avaliado quanto a sua precisão, de modo a inferir na confiabilidade e aplicabilidade dos modelos probabilísticos, resultado principal deste trabalho.

3.4.4 Análise Discriminante

A fim de verificar o enquadramento das resistência característica $f_{c0,k}$, frente ao novo modelo probabilístico aqui proposto, realizou-se uma análise discriminante de observações, a fim de avaliar a real alocação dos valores de $f_{c0,k}$, frente a sua alocação dentre as classes de resistência, segundo a norma brasileira e frente a alocação para um novo sistema de classificação proposto neste trabalho.

Segundo Fávero et al. (2009), o objetivo principal da análise discriminante multivariada é identificar as variáveis que discriminam os grupos e, assim, elaborar previsões a respeito de uma nova observação, identificando o grupo mais adequado a que ela deverá pertencer, em função de suas características.

Varella (2004) complementa que a análise consiste em se obter uma combinação linear de características observadas que apresente maior poder de discriminação entre populações. Esta combinação linear é denominada função discriminante. Tal função tem a propriedade de minimizar as probabilidades de má classificação, quando as populações são normalmente distribuídas com média e variância conhecidas.

Com isso, ao adotar tal análise pressupõe-se a existência de uma variável qualitativa, dependente de variáveis explicativas que possam ser quantificadas, ou seja, uma vez

quantificados os valores característicos para $f_{c0,k}$, seja pelo modelo da norma brasileira ou pelo probabilístico aqui proposto, podem-se agrupá-los de forma a qualificá-los em diferentes classes de resistência.

Portanto, o uso da análise discriminante foi fundamental ao validar o novo modelo probabilístico em uma correta alocação dos valores oriundos deste modelo, dado um novo sistema de classes de resistência aqui proposto.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões foram subdivididos conforme os objetivos propostos, sendo organizados em função das propriedades investigadas, sejam estas de resistência/-rigidez para compressão e tração na direção paralelas às fibras.

As análises estatísticas levaram em consideração as propriedades mecânicas das 60 espécies de madeira descritas no Capítulo 3, com todos os ensaios realizados no LaMEM, destacando-se as 20 novas espécies tropicais, do grupo das folhosas, ensaiadas durante o desenvolvimento desta tese, além das 10 espécies (em negrito nas próximas tabelas) que possuem um tamanho amostral de 30 corpos de prova.

4.1 Valores Experimentais

4.1.1 Compressão Paralela às Fibras da Madeira

Os valores médios amostrais são apresentados nas Tabelas 4.1 (Parte I) e 4.2 (Parte II) para a resistência f_{c0} (MPa) na compressão paralela às fibras das 60 espécies avaliadas, em conjunto com o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV %), o menor (*min*) e maior (*max*) valor e o intervalo de confiança (IC) da média ao nível de 5% de significância.

ID	Espécies	f_{c0}	DP	CV	min	max	IC
1	Abiú	56,00	6,62	11,82	41,00	65,00	(51,24; 60,76)
2	Argelim-amargoso	60,17	7,73	12,85	47,00	70,00	(55,40; 64,93)
3	Argelim-araroba	50,73	6,27	12,37	40,40	63,00	(46,96; 55,49)
4	Argelim-ferro	79,71	11,24	14,10	53,00	105,00	(76,70; 82,72)
5	Argelim-pedra	57,18	10,61	18,56	39,00	85,50	(54,17; 60,19)
6	Argelim-saia	63,11	8,84	14,02	47,30	76,00	(58,34; 67,87)
7	Argelim-vermelho	77,53	5,85	7,54	66,30	90,30	(72,77; 82,30)
8	Angico-branco	44,35	3,79	8,54	35,23	48,46	(39,59; 49,12)
9	Angico-preto	72,52	14,33	19,76	54,30	102,50	(67,75; 77,28)
10	Branquilha	48,47	3,80	7,84	43,00	54,60	(43,71; 53,24)
11	Breu-vermelho	87,42	9,77	11,18	60,43	96,73	(82,66; 92,19)
12	Cafearana	57,58	12,13	21,06	34,10	78,10	(52,82; 62,35)
13	Caixeta	34,25	1,26	3,66	31,52	35,86	(29,48; 39,01)
14	Cambará	41,68	8,03	19,27	26,88	58,20	(38,67; 44,70)
15	Cambará-rosa	34,48	5,09	14,75	27,30	42,60	(29,72; 39,25)
16	Canafistula	51,96	9,81	18,88	34,90	64,70	(47,19; 56,72)
17	Canelão	52,50	5,07	9,66	44,32	60,17	(47,74; 57,27)
18	Cajueiro	39,71	4,24	10,69	28,87	44,65	(34,96; 44,45)
19	Casca-grossa	59,14	11,57	19,57	42,80	88,70	(56,13; 62,16)
20	Castanheira	48,17	6,69	13,89	37,75	58,99	(43,41; 52,94)
21	Castelo	54,80	2,81	5,12	50,30	59,20	(50,04; 59,56)
22	Catanudo	50,58	3,34	6,61	45,60	56,70	(45,81; 55,34)
23	Cedro-amargo	38,75	6,18	15,98	28,00	52,95	(35,74; 41,76)
24	Cedro-amazonense	46,33	2,20	5,39	42,00	51,00	(41,57; 51,09)
25	Cedro-doce	31,48	5,63	17,88	27,00	44,40	(26,71; 36,24)
26	Cedrorana	41,52	9,46	22,77	27,10	53,70	(36,75; 46,28)
27	Champagne	92,33	4,14	4,48	84,90	102,50	(87,56; 97,09)
28	Copaíba	50,22	5,95	11,85	41,70	60,90	(45,45; 54,98)
29	Cupiúba	55,90	10,34	18,50	39,50	74,00	(52,89; 58,92)
30	Cutiúba	82,05	11,98	14,61	61,00	98,90	(77,29; 86,81)
31	Embireira	38,50	2,91	7,55	35,00	44,00	(33,74; 43,26)
32	Envira	66,60	7,07	10,61	54,20	77,50	(61,84; 71,36)
33	Garapa	74,03	8,48	11,45	61,40	87,10	(69,26; 78,79)
34	Goiabão	48,46	5,98	12,34	40,90	60,80	(43,69; 53,22)
35	Guaçara	71,41	8,89	12,46	58,10	83,70	(66,64; 76,17)
36	Guajará	74,94	6,05	8,07	67,76	84,48	(70,18; 79,70)
37	Guanandi	59,19	6,07	10,25	47,00	67,00	(54,43; 63,95)
38	Guarucaia	62,38	5,67	9,09	53,30	71,00	(57,62; 67,15)
39	Ipê	74,42	11,96	16,07	49,90	98,50	(71,41; 77,43)
40	Itaúba	67,80	5,79	8,54	53,00	77,00	(64,79; 70,81)

Tabela 4.1: Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{c0} (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	f_{c0}	DP	CV	min	max	IC
41	Jatobá	93,42	7,37	7,89	79,70	105,80	(88,65; 98,18)
42	Louro-preto	56,80	8,17	14,39	40,00	69,00	(53,79; 59,81)
43	Louro-verde	52,95	5,67	10,71	45,07	64,05	(48,18; 57,71)
44	Maçaranduba	83,63	8,34	9,97	64,00	102,00	(80,62; 86,65)
45	Mandioqueira	69,17	11,09	16,04	53,70	93,40	(64,40; 73,93)
46	Marupá	30,35	2,46	8,10	23,00	32,45	(25,58; 35,11)
47	Oiticica-amarela	70,33	6,86	9,76	58,00	79,00	(65,56; 75,09)
48	Oiuchu	77,35	8,53	11,03	65,00	93,80	(72,59; 82,11)
49	Parinari	60,56	5,06	8,35	47,30	65,30	(55,79; 65,32)
50	Pau-óleo	53,34	8,06	15,10	43,70	71,70	(48,58; 58,11)
51	Piolho	61,88	13,34	21,55	39,80	85,50	(57,12; 66,65)
52	Quaruba-rosinha	58,25	10,07	17,29	45,00	83,00	(53,49; 63,01)
53	Quarubarana	37,83	9,62	25,42	27,20	58,90	(33,07; 42,60)
54	Quina-rosa	59,17	2,62	4,43	55,00	64,00	(54,40; 63,93)
55	Rabo-de-arraia	56,81	11,32	19,92	43,80	76,20	(52,04; 61,57)
56	Roxinho	82,83	6,05	7,31	75,75	92,90	(78,07; 87,60)
57	Sucupira	94,53	7,17	7,59	85,00	105,60	(89,77; 99,30)
58	Tachi	87,75	9,73	11,08	72,90	99,90	(82,99; 92,51)
59	Tatajuba	80,16	14,88	18,56	45,20	99,40	(75,39; 84,92)
60	Umirana	53,27	4,11	7,72	46,60	61,00	(48,50; 58,03)

Tabela 4.2: Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{c0} (MPa) - Parte II.

Analogamente, nas Tabelas 4.3 (Parte I) e 4.4 (Parte II) são apresentados os resultados para o módulo de elasticidade E_{c0} (MPa) na compressão paralela às fibras das 60 espécies avaliadas.

ID	Espécies	E_{c0}	DP	CV	min	max	IC
1	Abiú	17039	3402	19.97	9830	21815	(15547; 18532)
2	Argelim-amargoso	15940	2036	12.77	13291	18740	(14448; 17433)
3	Argelim-araroba	12714	2395	18.84	9850	18308	(11221; 14206)
4	Argelim-ferro	20274	3318	16,37	13135	26547	(19330; 21218)
5	Argelim-pedra	11783	2472	20,98	8367	17706	(10839; 12727)
6	Argelim-saia	19748	3256	16.49	13274	25713	(18255; 21240)
7	Argelim-vermelho	16695	2974	17.82	9494	20935	(15202; 18187)
8	Angico-branco	14962	2886	19.29	11683	19016	(13442; 16482)
9	Angico-preto	15867	4397	27.71	10564	24566	(13855; 16895)
10	Branquilha	13813	1956	14.16	11394	16595	(12321; 15306)
11	Breu-vermelho	15301	2931	19.15	11348	19859	(13642; 16626)
12	Cafearana	14089	3671	26.06	9727	20777	(12597; 15582)
13	Caixeta	11258	2078	18.46	8057	15938	(9766; 12750)
14	Cambará	10471	2927	27.95	7018	18024	(9527; 11415)
15	Cambará-rosa	12967	2335	18.00	9732	16960	(11475; 14459)
16	Canafístula	14613	2718	18.60	9882	17982	(13121; 16105)
17	Canelão	15544	3230	20.78	10198	20614	(14051; 17036)
18	Cajueiro	11528	2571	22,30	6968	14871	(10037; 13019)
19	Casca-grossa	16812	3823	22.74	10015	24594	(15868; 17755)
20	Castanheira	13639	2723	19.96	9683	19109	(12146; 15131)
21	Castelo	11188	1219	10.90	9249	13128	(9696; 12680)
22	Catanudo	14279	1796	12.58	11708	17950	(12787; 15771)
23	Cedro-amargo	9846	1145	11.63	7394	12329	(8902; 10790)
24	Cedro-amazonense	12952	1912	14.76	10574	16685	(11460; 14444)
25	Cedro-doce	9593	1242	12.95	7394	11515	(8100; 11085)
26	Cedrorana	10394	1332	12.81	8484	12913	(8902; 11886)
27	Champagne	23002	2476	10.76	18480	26550	(21510; 24495)
28	Copaíba	12662	2193	17.32	9416	16018	(11170; 14154)
29	Cupiúba	13751	2949	21,45	9023	19036	(12807; 14695)
30	Cutiúba	19333	4008	20.73	12916	26008	(17841; 20825)
31	Embireira	12452	1834	14.73	8360	14480	(10960; 13945)
32	Envira	18328	3049	16.63	11268	22618	(16836; 19820)
33	Garapa	17716	2610	14.73	12583	21222	(16224; 19208)
34	Goiabão	18717	2728	14.58	13501	22752	(17225; 20209)
35	Guaíçara	15302	2429	15.88	11073	17959	(13809; 16794)
36	Guajará	14489	1612	11.13	11281	16747	(12997; 15982)
37	Guanandi	16704	1777	10.64	14293	19344	(15212; 18196)
38	Guarucaia	17022	2246	13.19	13853	20582	(15530; 18514)
39	Ipê	17335	2216	12.78	11842	21427	(16391; 18278)
40	Itaúba	17436	1392	7.98	14619	19691	(16492; 18379)

Tabela 4.3: Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{c0} (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	E_{c0}	DP	CV	min	max	IC
41	Jatobá	20438	1865	9.13	17155	23221	(18946; 21930)
42	Louro-preto	14337	2638	18.40	7594	18955	(13393; 15281)
43	Louro-verde	14649	2333	15.92	10577	18929	(13157; 16141)
44	Maçaranduba	21832	2270	10.40	17832	27450	(20889; 22776)
45	Mandioqueira	19498	2615	13.41	14169	23297	(18005; 20990)
46	Marupá	12774	1063	8.32	10834	14143	(11282; 14267)
47	Oiticica-amarela	14719	1362	9.25	11994	16889	(13227; 16211)
48	Oiuchu	17700	4199	23.72	13079	26910	(16208; 19192)
49	Parinari	22088	2755	12.47	18472	28731	(20595; 23580)
50	Pau-óleo	13334	2736	20,52	9416	16850	(11841; 14826)
51	Piolho	13404	3082	23,00	9165	17886	(11911; 14826)
52	Quaruba-rosinha	12606	2098	16,64	9960	16566	(11114; 14098)
53	Quarubarana	9067	2452	27,05	5968	15144	(7575; 10559)
54	Quina-rosa	22483	2784	12,38	18239	28123	(20991; 23976)
55	Rabo-de-arraia	13402	2084	15,55	11103	18620	(11910; 14894)
56	Roxinho	21913	4669	21,31	16105	28389	(20421; 23406)
57	Sucupira	21166	2259	10,67	16284	24175	(19673; 22658)
58	Tachi	19901	3051	15,33	14745	25239	(18409; 21394)
59	Tatajuba	18238	2756	15,11	10566	21138	(16746; 19730)
60	Umirana	9880	1359	13,76	7233	12101	(8387; 11372)

Tabela 4.4: Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{c0} (MPa) - Parte II.

Na sequência, os valores característicos para compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), obtidos pelos valores amostrais de f_{c0} para $n = 12$ ou 30 corpos de prova, foram calculados pela Eq. 3.11, sendo estes imprescindíveis na avaliação das equações simplificadas da norma brasileira e necessários para a proposição dos novos modelos probabilísticos resultantes do objetivo central deste trabalho.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 (Partes I e II) destacam-se a existência de 04 (quatro) classes homogêneas de resistência (CR), sendo C20 ($f_{c0,k} \leq 29$ MPa), C30 (30 MPa $\leq f_{c0,k} \leq 39$ MPa), C40 (40 MPa $\leq f_{c0,k} \leq 59$ MPa) e C60 ($f_{c0,k} \geq 60$ MPa), conforme propõe o documento normativo brasileiro para o grupo das folhosas.

ID	Espécies	$f_{c0,1}$ (Mínimo)	f_{c0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{c0,k}$ (Característico) ¹	CR
1	Abiú	41,00	56,00	44,40	48,84	C40
2	Argelim-amargoso	47,00	60,17	43,20	47,52	C40
3	Argelim-araroba	40,40	50,17	40,00	44,00	C40
4	Argelim-ferro	53,00	79,71	61,31	67,44	C60
5	Argelim-pedra	39,00	57,18	42,06	46,26	C40
6	Argelim-saia	47,30	63,11	46,42	51,06	C40
7	Argelim-vermelho	66,30	77,53	66,12	72,73	C60
8	Angico-branco	35,23	44,35	38,06	41,87	C40
9	Angico-preto	54,30	72,52	50,50	55,55	C40
10	Branquilha	43,00	48,47	41,44	45,58	C40
11	Breu-vermelho	60,43	87,42	72,33	79,57	C60
12	Cafearana	34,10	57,58	36,82	40,50	C40
13	Caixeta	31,52	34,25	32,37	35,60	C30
14	Cambará	26,88	41,68	27,37	30,11	C30
15	Cambará-rosa	27,30	34,48	23,84	27,30	C20
16	Canafístula	34,90	51,96	28,94	36,37	C30
17	Canelão	44,32	52,50	42,28	46,51	C40
18	Cajueiro	28,87	39,71	32,09	35,30	C30
19	Casca-grossa	42,80	59,14	43,36	47,69	C40
20	Castanheira	37,75	48,17	35,39	38,93	C30
21	Castelo	50,30	54,80	49,58	54,54	C40
22	Catanudo	45,60	50,58	46,28	50,91	C40
23	Cedro-amargo*	28,00	38,75	26,95	29,64	C20
24	Cedro-amazonense	42,00	46,33	42,40	46,64	C40
25	Cedro-doce	27,00	31,48	27,26	29,99	C20
26	Cedrorana	27,10	41,52	22,58	29,06	C20
27	Champagne	84,90	92,33	87,42	96,16	C60
28	Copaíba	41,70	50,21	40,12	44,13	C40
29	Cupiúba	30,80	52,83	34,29	37,71	C30
30	Cutiúba	50,50	78,97	49,88	55,28	C40
31	Embireira	35,00	38,50	35,00	38,50	C30
32	Envira	54,20	66,60	54,74	60,21	C60
33	Garapa	61,40	74,03	59,42	65,36	C60
34	Goiabão	40,90	48,46	39,18	43,10	C40
35	Guaçara	58,10	71,41	53,56	58,92	C40
36	Guajará	72,37	74,94	65,79	72,37	C60
37	Guanandi	47,00	59,19	45,40	49,94	C40
38	Guarucaia	53,30	62,38	51,22	56,34	C40
39	Ipê	49,90	74,42	51,64	56,81	C40
40	Itaúba	53,00	67,78	57,61	63,38	C60

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{c0,1}), (0,70 \cdot f_{c0}) \text{ e } (z_b \cdot 1,10)\}$

Tabela 4.5: Classes de resistência (CR) e resistências características para compressão paralela às fibras da madeira, $f_{c0,k}$ (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	$f_{c0,1}$ (Mínimo)	f_{c0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{c0,k}$ (Característico) ¹	CR
41	Jatobá	79,60	93,27	81,78	89,96	C60
42	Louro-preto	40,00	56,76	42,93	47,22	C40
43	Louro-verde	45,07	52,95	44,67	49,14	C40
44	Maçaranduba	64,00	83,64	71,27	78,40	C60
45	Mandioqueira	53,70	69,17	55,94	61,53	C60
46	Marupá	23,00	30,35	26,50	29,15	C20
47	Oiticica-amar.	58,00	70,33	56,74	62,41	C60
48	Oiuchu	65,00	77,35	65,76	72,34	C60
49	Parinari	47,30	60,56	50,20	55,22	C40
50	Pau-óleo	43,70	53,34	40,96	45,06	C40
51	Piolho	39,80	61,88	39,76	43,74	C40
52	Quaruba-rosinha	45,00	58,25	48,20	53,02	C40
53	Quarubarana	27,20	37,83	23,58	27,20	C20
54	Quina-rosa	55,00	59,17	56,00	61,60	C60
55	Rabo-de-arraia	43,80	57,58	40,72	44,79	C40
56	Roxinho	75,75	82,83	73,19	80,51	C60
57	Sucupira	85,00	94,53	84,56	93,02	C60
58	Tachi	72,90	87,75	68,60	75,46	C60
59	Tatajuba	45,20	80,16	54,40	59,84	C40
60	Umirana	46,60	53,27	46,62	51,28	C40

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{c0,1}), (0, 70 \cdot f_{c0}) \text{ e } (z_b \cdot 1, 10)\}$

Tabela 4.6: Classes de resistência (CR) e resistências características para compressão paralela às fibras da madeira, $f_{c0,k}$ (MPa) - Parte II.

Como forma de comparar alguns dos resultados aqui obtidos, destaca-se que muitas espécies foram foco de estudos em outras pesquisas, o que possibilita uma comparação com seus valores médios e intervalos de confiança (ICs).

Ao comparar as propriedades de resistência e rigidez na compressão com as espécies da ABNT NBR 7190 (1997), p. 90, Anexo E, verificam-se que estão dentro dos ICs, com os valores médios em sua maioria próximos aos aqui obtidos. Destacam-se, para f_{c0} , valores médios dentro do IC para as espécies: Copaíba (*Copaifera multijuga*) – $f_{c0} = 50$ MPa (Aquino et al., 2018), Castelo (*Gossypiospermum praecox*) – $f_{c0} = 55$ MPa (Christoforo et al., 2017), Cambará-rosa (*Erismia* sp) – $f_{c0} = 34$ MPa (Lahr et al., 2016a) e Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke.) – $f_{c0} = 56$ MPa (Teixeira et al., 2020a). Para o E_{c0} , citam-se os obtidos por Lahr et al. (2016b) para o Jatobá (*Hymenaea* sp) extraído

em três regiões distintas, com um valor médio $E_{c0} = 21881 \text{ MPa}$, sendo este superior ao valor médio aqui obtido, mas dentro do IC.

4.1.2 Tração Paralela às Fibras da Madeira

Os valores médios amostrais, para as 60 espécies avaliadas na tração paralela às fibras, são apresentados nas Tabelas 4.7 (Parte I) e 4.8 (Parte II) para a resistência f_{t0} (MPa), em conjunto com o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV %), o menor (min) e maior (max) valores, além do intervalo de confiança (IC) da média ao nível de 5% de significância.

ID	Espécies	f_{t0}	DP	CV	min	max	IC
1	Abiú	118,75	27,05	25,78	66,0	167,0	(105,4; 132,1)
2	Argelim-amargoso	75,08	20,05	26,71	46,0	105,0	(61,74; 88,43)
3	Argelim-araroba	73,60	23,43	31,83	42,7	117,0	(60,26; 86,94)
4	Argelim-ferro	124,65	36,89	29,59	60,0	197,0	(116,2; 133,1)
5	Argelim-pedra	72,06	19,69	27,32	36,0	132,2	(63,62; 80,5)
6	Argelim-saia	98,70	24,34	24,66	63,0	152,0	(85,36; 112,0)
7	Argelim-vermelho	104,90	34,58	32,96	58,8	198,0	(91,56; 118,2)
8	Angico-branco	64,70	10,79	16,67	53,9	85,0	(51,36; 78,04)
9	Angico-preto	109,46	32,57	29,76	51,0	161,3	(96,11; 122,8)
10	Branquilha	87,88	19,14	21,78	67,2	124,0	(74,5; 101,2)
11	Breu-vermelho	96,11	17,70	18,42	69,8	121,1	(82,8; 109,5)
12	Cafearana	80,42	23,85	29,66	45,0	111,1	(67,08; 93,77)
13	Caixeta	55,67	9,67	17,37	41,1	73,6	(42,33; 69,01)
14	Cambará	61,01	19,76	32,39	26,6	110,7	(52,57; 69,01)
15	Cambará-rosa	45,41	13,80	30,39	30,6	66,7	(32,06; 58,75)
16	Canafístula	84,92	21,52	25,34	40,0	109,2	(71,57; 98,26)
17	Canelão	90,14	18,30	20,30	50,2	124,6	(76,8; 103,49)
18	Cajueiro	83,69	28,00	33,46	34,10	126,7	((70,27; 97,11)
19	Casca-grossa	125,26	26,22	20,93	82,3	195,4	(116,8; 133,7)
20	Castanheira	88,50	21,74	24,56	54,0	118,0	(75,2; 101,8)

Tabela 4.7: Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{t0} (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	f_{t0}	DP	CV	min	max	IC
21	Castelo	103,64	15,11	14,58	80,1	125,3	(90,3; 116,99)
22	Catanudo	65,37	24,89	38,07	45,9	129,5	(52,5; 79,19)
23	Cedro-amargo	57,88	12,08	20,88	37,1	88,0	(49,44; 66,32)
24	Cedro-amazonense	92,00	21,80	23,7	61,0	128,0	(78,7; 105,4)
25	Cedro-doce	67,23	15,33	22,80	44,0	97,7	(53,89; 80,58)
26	Cedrorana	61,85	16,63	26,89	46,3	93,0	(48,51; 75,19)
27	Champagne	123,64	22,82	18,45	90,8	173,3	(110,3; 136,9)
28	Copaíba	71,24	16,44	23,08	50,3	101,2	(57,9; 84,59)
29	Cupiúba	70,98	21,53	30,34	42,2	117,4	(62,54; 79,42)
30	Cutiúba	107,50	35,30	32,81	66,2	165,6	(94,1; 120,8)
31	Embireira	65,58	10,79	16,45	50,0	90,0	(52,24; 78,93)
32	Envira	153,78	27,07	17,61	95,0	180,9	(140,4; 167,1)
33	Garapa	114,30	35,90	31,41	72,4	188,2	(101,1; 127,7)
34	Goiabão	119,30	35,40	29,70	65,7	178,6	(106,0; 132,7)
35	Guaçara	115,13	23,32	20,25	69,3	153,0	(102,4; 129,1)
36	Guajará	119,18	27,34	22,94	64,5	160,2	(105,8; 132,5)
37	Guanandi	81,17	16,57	20,42	60,0	105,0	(67,82; 94,51)
38	Guarucaia	72,77	11,11	15,27	54,3	101,0	(59,43; 86,12)
39	Ipê	96,98	29,28	30,19	52,8	160,8	(88,5; 105,4)
40	Itaúba	99,73	21,35	21,41	56,0	154,0	(91,3; 108,2)
41	Jatobá	165,33	29,44	18,95	115,7	210,2	(141,9; 168,7)
42	Louro-preto	74,03	14,74	19,75	41,0	100,0	(66,19; 83,07)
43	Louro-verde	82,80	10,40	12,55	65,5	104,5	(69,46; 96,14)
44	Maçaranduba	135,73	22,99	16,94	103,0	175,0	(127,3; 144,2)
45	Mandioqueira	93,04	30,23	32,49	40,7	140,0	(79,7; 106,39)
46	Marupá	37,61	2,83	7,52	33,5	42,1	(24,27; 50,96)
47	Oiticica-amarela	85,83	12,82	14,94	53,3	106,5	(72,48; 99,17)
48	Oiuchu	121,80	35,60	29,25	80,2	201,6	(108,5; 135,2)
49	Parinari	113,40	35,90	31,64	53,8	169,1	(100,0; 126,7)
50	Pau-óleo	69,29	17,40	25,11	50,3	101,2	(55,95; 82,64)
51	Piolho	73,05	23,93	32,76	40,4	102,3	(59,71; 86,39)
52	Quaruba-rosinha	114,00	23,53	20,04	73,0	154,0	(100,7; 127,3)
53	Quarubarana	58,05	13,11	22,58	32,7	76,4	(44,71; 71,39)
54	Quina-rosa	116,33	26,93	23,15	77,0	171,0	(102,9; 129,7)
55	Rabo-de-arraia	68,94	17,61	25,66	48,4	110,1	(55,3; 81,99)
56	Roxinho	104,70	45,40	43,33	55,1	194,5	(91,0; 118,0)
57	Sucupira	130,94	22,36	17,07	98,0	164,5	(117,6; 144,3)
58	Tachi	106,75	27,45	25,71	61,5	147,9	(93,4; 120,1)
59	Tatajuba	92,92	20,90	22,49	48,0	126,5	(79,58; 106,3)
60	Umirana	58,58	15,91	27,16	40,6	89,8	(45,24; 71,93)

Tabela 4.8: Estatísticas com os valores médios amostrais da f_{t0} (MPa) - Parte II.

Analogamente, os valores médios amostrais, o desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV %), o menor (*min*) e maior (*max*) valores, além do intervalo de confiança (IC) da média ao nível de 5% de significância para o módulo, E_{t0} (MPa) das 60 espécies avaliadas na tração paralela às fibras, são apresentados nas Tabelas 4.9 (Parte I) e 4.10 (Parte II).

ID	Espécies	E_{t0}	DP	CV	<i>min</i>	<i>max</i>	IC
1	Abiú	16881	2830	16,76	10855	20187	(15464; 18297)
2	Argelim-amargoso	16023	2753	17,18	11232	19598	(14606; 17440)
3	Argelim-araroba	12371	1985	16,04	9383	16093	(10954; 13788)
4	Argelim-ferro	20376	3067	15,05	13556	26354	(19480; 21272)
5	Argelim-pedra	11570	2908	25,13	8265	19779	(10673; 12466)
6	Argelim-saia	20149	2664	13,22	16037	24555	(18732; 21565)
7	Argelim-vermelho	17024	2912	17,11	12842	22730	(15608; 18441)
8	Angico-branco	14424	2503	17,36	10437	19451	(13007; 15841)
9	Angico-preto	15563	1995	12,82	12484	19505	(14146; 16980)
10	Branquilha	14355	2078	14,48	11865	18762	(12939; 15772)
11	Breu-vermelho	16720	2330	13,94	10858	19809	(15303; 18137)
12	Cafearana	13212	2665	20,17	9335	18471	(11795; 14628)
13	Caixeta	13812	3829	27,72	8779	22656	(12395; 15229)
14	Cambará	10609	3130	29,51	4519	19421	(9713; 11505)
15	Cambará-rosa	12764	1832	14,35	10800	15887	(11347; 14181)
16	Canafístula	14087	2452	17,40	9021	17034	(12670; 15504)
17	Canelão	12507	3198	25,57	7518	19638	(11078; 13936)
18	Cajueiro	13548	1446	10,67	10591	15482	(12131; 14965)
19	Casca-grossa	17569	3006	17,11	12686	23025	(16673; 18465)
20	Castanheira	12501	1097	8,77	11065	14641	(11084; 13918)
21	Castelo	12920	1900	14,71	10524	16395	(11503; 14337)
22	Catanudo	14755	1744	11,82	11979	17409	(13338; 16172)
23	Cedro-amargo	10182	1331	13,07	7386	12649	(9286; 11078)
24	Cedro-amazonense	12628	1092	8,64	10700	14066	(11211; 14045)
25	Cedro-doce	10113	1512	14,95	7386	12649	(8696; 11530)
26	Cedrorana	10967	1649	15,03	8113	13304	(9551; 12384)
27	Champagne	23053	1962	8,51	20056	26607	(21636; 24469)
28	Copaíba	13188	1639	12,43	10591	15482	(11771; 14605)
29	Cupiúba	13242	3752	28,34	11052	19487	(12345; 14138)
30	Cutiúba	19805	3766	19,02	14887	27076	(18389; 21222)

Tabela 4.9: Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{t0} (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	E_{t0}	DP	CV	min	max	IC
31	Embireira	12146	1714	14,11	9464	15694	(10729; 13563)
32	Envira	18558	2750	14,82	11989	21524	(17141; 19975)
33	Garapa	16698	2474	14,82	12994	20673	(15281; 18114)
34	Goiabão	18267	3105	17,00	11468	22685	(16851; 19684)
35	Guaçara	16055	2116	13,18	12423	19702	(14638; 17472)
36	Guajará	14757	1906	12,91	12421	18012	(13340; 16174)
37	Guanandi	1640	2407	14,67	13187	20855	(14984; 17817)
38	Guarucaia	17097	2630	15,38	12807	21505	(15680; 18513)
39	Ipê	17031	2607	15,31	12147	22805	(16135; 17927)
40	Itaúba	17519	1464	8,35	14030	20136	(16623; 18415)
41	Jatobá	21530	2457	11,41	16576	26511	(20113; 22946)
42	Louro-preto	13613	1929	14,17	8567	16884	(12311; 15923)
43	Louro-verde	14026	2325	16,58	11339	19467	(12609; 15442)
44	Maçaranduba	21836	2326	10,65	14787	26873	(20940; 22732)
45	Mandioqueira	18590	1749	9,41	15375	21391	(17173; 20007)
46	Marupá	9274	2253	24,29	7309	15576	(7857; 10691)
47	Oiticica-amarela	14382	1382	9,61	12216	16327	(12965; 15799)
48	Oiuchu	17944	3484	19,41	13016	23867	(16528; 19361)
49	Parinari	19804	2162	10,92	16614	22839	(18387; 21220)
50	Pau-óleo	13548	1446	10,67	10591	15482	(12131; 14965)
51	Piolho	13453	2082	15,48	10292	16199	(12037; 14965)
52	Quaruba-rosinha	12827	1453	11,33	10029	15009	(11410; 14244)
53	Quarubarana	9172	1443	15,74	7647	11580	(7756; 10589)
54	Quina-rosa	20986	3493	16,65	16592	27202	(19569; 22403)
55	Rabo-de-arraia	13869	2995	21,59	8483	17985	(12452; 15286)
56	Roxinho	21379	3458	16,17	15909	25209	(19962; 22889)
57	Sucupira	21473	2773	12,91	18073	26209	(18059; 20893)
58	Tachi	19476	4577	23,50	11302	27315	(18059; 20893)
59	Tatajuba	17319	2087	12,05	14292	21940	(15903; 18736)
60	Umirana	10442	1840	17,62	7620	13707	(9025; 11858)

Tabela 4.10: Estatísticas com os valores médios amostrais do E_{t0} (MPa) - Parte II.

Na sequência, os valores característicos para tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$), obtidos a partir dos valores amostrais das 60 espécies com $n = 12$ e $n = 30$ corpos de prova, foram calculados pela Eq. 3.11 e sintetizados na Tabela 4.11 (Parte I) e 4.12 (Parte II), valores estes imprescindíveis na avaliação do equacionamento simplificado da normativa brasileira e apresentado no item 4.2.1.

ID	Espécies	$f_{t0,1}$ (Mínimo)	f_{t0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{t0,k}$ (Característico) ¹
1	Abiú	66,00	118,75	75,00	83,13
2	Argelim-amargoso	45,00	75,08	45,60	52,56
3	Argelim-araroba	42,70	69,48	38,74	48,63
4	Argelim-ferro	60,00	124,65	62,90	87,25
5	Argelim-pedra	36,00	72,06	50,49	55,53
6	Argelim-saia	33,30	95,88	40,90	67,12
7	Argelim-vermelho	58,80	104,90	70,02	72,02
8	Angico-branco	53,94	67,10	48,58	53,94
9	Angico-preto	51,00	109,50	53,40	76,65
10	Branquilha	67,20	87,88	59,72	67,20
11	Breu-vermelho	58,80	88,61	53,42	62,03
12	Cafearana	45,00	80,42	40,78	56,30
13	Caixeta	41,09	55,67	41,68	45,85
14	Cambará	26,63	61,01	33,01	42,71
15	Cambará-rosa	30,60	45,41	28,60	31,79
16	Canafístula	40,00	84,92	41,14	59,44
17	Canelão	50,23	90,14	66,62	73,29
18	Cajueiro	34,10	83,69	28,96	58,59
19	Casca-grossa	82,30	125,26	80,24	88,27
20	Castanheira	54,00	88,50	43,60	61,95
21	Castelo	80,10	103,64	78,56	86,42
22	Catanudo	45,90	65,37	44,35	48,79
23	Cedro-amargo	37,10	57,88	42,91	47,20
24	Cedro-amazonense	61,00	92,00	55,80	64,40
25	Cedro-doce	44,40	67,23	44,14	48,55
26	Cedrorana	46,30	61,85	45,52	50,07
27	Champagne	90,80	123,64	90,70	123,64
28	Copaíba	50,30	71,13	47,88	52,67
29	Cupiúba	39,40	71,48	34,10	50,04
30	Cutiúba	66,20	107,50	62,44	75,22
31	Embireira	50,00	65,58	53,60	58,96
32	Envira	95,00	153,78	99,32	109,25
33	Garapa	72,40	107,64	74,20	81,62
34	Goiabão	65,70	119,30	63,76	83,54
35	Guaçara	69,30	115,13	69,25	80,59
36	Guajará	64,50	119,18	66,30	83,43
37	Guanandi	60,30	81,17	55,60	61,16
38	Guarucaia	54,30	74,88	58,16	63,98
39	Ipê	52,80	96,98	56,30	67,89
40	Itaúba	56,30	99,72	66,63	73,29

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{t0,1}), (0,70 \cdot f_{t0}) \text{ e } (z_b \cdot 1,10)\}$

Tabela 4.11: Resultados das resistências características para tração paralela às fibras da madeira, $f_{t0,k}$ (MPa) - Parte I.

ID	Espécies	$f_{t0,1}$ (Mínimo)	f_{t0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{t0,k}$ (Característico) ¹
41	Jatobá	103,30	165,27	113,90	125,29
42	Louro-preto	41,00	74,59	46,13	52,22
43	Louro-verde	65,48	82,80	63,52	69,87
44	Maçaranduba	103,00	135,79	100,51	110,57
45	Mandioqueira	40,70	93,04	36,38	65,13
46	Marupá	33,51	37,61	33,61	36,97
47	Oiticica-amarela	53,30	85,83	67,48	74,23
48	Oiuchu	80,20	121,80	68,74	85,29
49	Parinari	53,80	113,40	52,70	79,35
50	Pau-óleo	50,30	69,29	42,28	50,30
51	Piolho	40,40	73,05	35,30	51,14
52	Quaruba-rosinha	73,00	114,00	69,00	79,80
53	Quarubarana	32,70	58,05	35,16	40,64
54	Quina-rosa	77,00	116,64	38,50	81,65
55	Rabo-de-arraia	48,40	70,94	46,72	51,39
56	Roxinho	55,09	104,68	47,96	73,28
57	Sucupira	98,00	130,94	86,88	98,00
58	Tachi	61,50	106,75	59,10	74,73
59	Tatajuba	48,00	92,92	56,56	65,05
60	Umirana	32,60	57,13	30,94	39,99

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{t0,1}), (0,70 \cdot f_{t0}) \text{ e } (z_b \cdot 1,10)\}$

Tabela 4.12: Resultados das resistências características para tração paralela às fibras da madeira, $f_{t0,k}$ (MPa) - Parte II.

Ao comparar a resistência f_{t0} com as espécies da ABNT NBR 7190 (1997), p. 90, Anexo E, verificam-se que estão dentro dos ICs e com valores médios próximos aos aqui obtidos. Ao destacar alguns valores para a f_{t0} cita-se o valor apresentado por Tenorio e Moya (2018) para duas populações de Cedro-amargo (*Cedrela odorata* Lin.), com o valor médio $f_{t0} = 42,89MPa$, sendo inferior ao valor médio e levemente abaixo do IC aqui calculado. Teixeira et al. (2020a) avaliou a espécie Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke.) extraídas de três locais distintos e obteve um valor médio de $f_{t0} = 73,25MPa$ e um módulo $E_{t0} = 10851 MPa$, ambos valores dentro do IC encontrado neste trabalho. Citam-se os valores médios para a espécie Jatobá (*Hymenaea* sp) extraído de três locais (Lahr et al., 2016b), com média igual a $E_{t0} = 21583 MPa$ e dentro do IC aqui obtido.

4.1.3 Variabilidade Experimental

Para discutir a variabilidade dos resultados experimentais, a Figura 4.1 sintetiza as descrições estatísticas, respectivamente, para as resistências f_{c0} e f_{t0} , com seus valores médios, intervalos de confiança (IC) (para 95%) e as taxas do coeficiente de variação (CV) para as 60 espécies investigadas.

Os CVs para f_{c0} estão, em maioria, dentro do limite de 18% para esforços normais. Do total, apenas 12 espécies excederam tal valor: 05-Argelim-pedra (18,6%); 09-Angico-preto (19,8%); 12-Cafearana (21,1%); 14-Cambará (19,3%); 16-Canafístula (18,9%); 19-Casca-grossa (19,6%); 26-Cedrorana (22,8%); 29-Cupiúba (18,5%); 51-Piolho (21,6%); 53-Quarubarana (25,4%); 55-Rabo-de-arraia (19,9%); 59-Tatajuba (18,6%); destacados (em azul) na Figura 4.1.

De modo contrário, como era de se esperar para f_{t0} , a maior parte das espécies alcançaram CVs superiores ao recomendado pela norma. Tais valores vão ao encontro da problemática levantada que expõe a dificuldade para realização do ensaio de tração, que tende a induzir ao fraturamento na área de engastamento e não na região preferencial de falha (centro do corpo de prova). Verificou-se que tal ocorrência se acentua e alcança CVs mais elevados, para espécies de alta resistência em que o controle de carga se torna mais sensível aos pequenos incrementos de carregamento. Tal variabilidade pode ser explicada, em partes, pela anatomia da madeira ligada a sua característica anisotrópica, como explicado por Boff et al. (2020) e Teixeira et al. (2020a). Como alternativa, adotar um controle de deslocamento no ensaio de ruptura à tração pode diminuir os riscos de fratura frágil, muito comum em experimentos que usam o controle de carga.

Dentre as espécies, 11 obtiveram CVs no limite normatizado: 08-Angico-branco (16,7%); 13-Caixeta (17,4%); 21-Castelo (14,6%); 31-Embireira (16,5%); 32-Envira (17,7%); 38-Guarucaia (15,3%); 43-Louro-verde (12,6%); 46-Marupá (7,5%); 44-Maçaranduba (16,9%); 47-Oiticica-amarela (14,9%); 57-Sucupira (17%). Todas as demais excederam 18% e estão em destaque (em verde) na Figura 4.1.

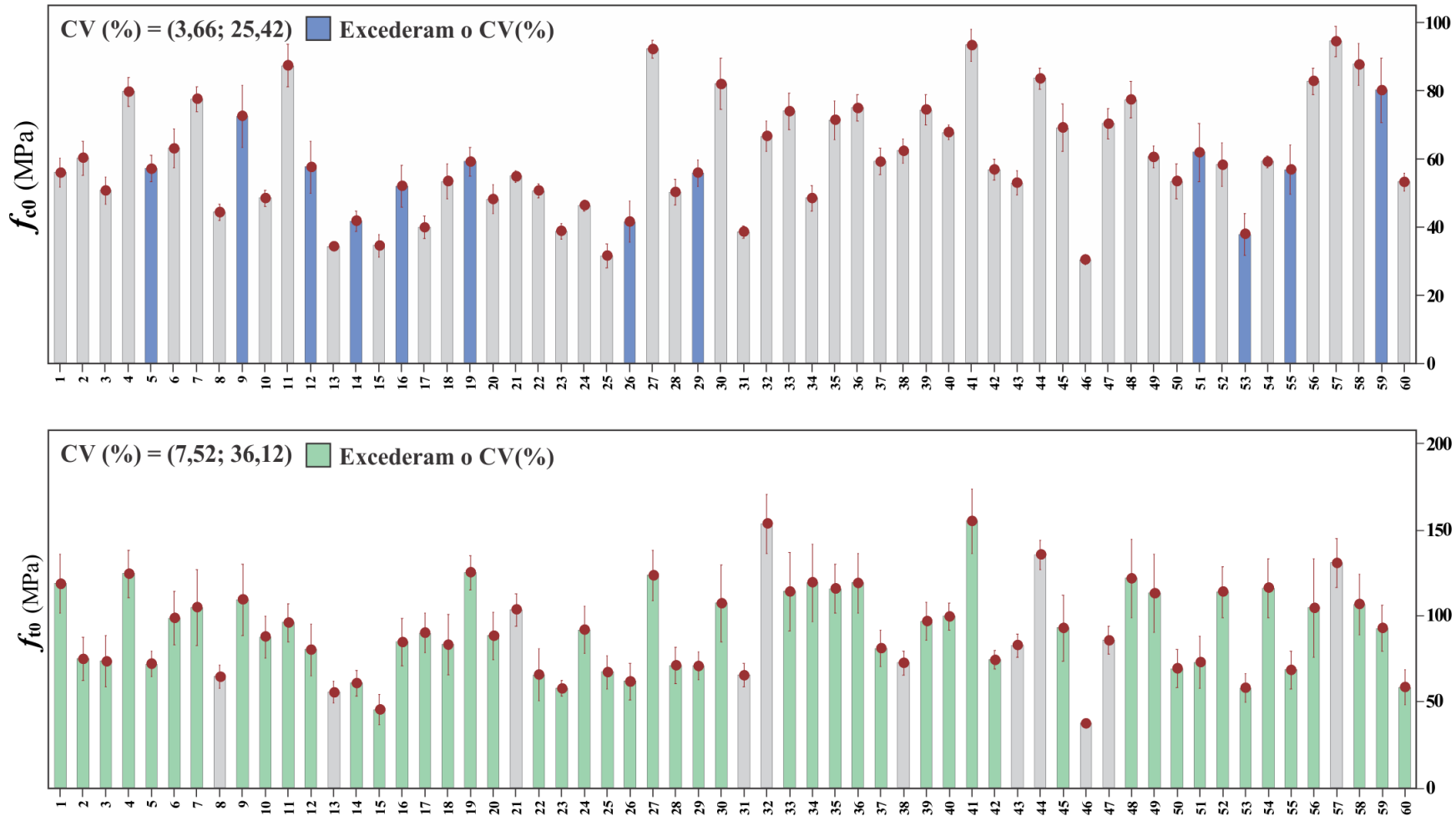


Figura 4.1: Estatísticas descritivas da f_{c0} e f_{t0} para as 60 espécies.

Notadamente, os resultados ilustrados na Figura 4.1 reforçam a importância da presente investigação sobre a variabilidade experimental que resulta em taxas de CVs para f_{t0} muito superiores a f_{c0} , frente ao documento normativo que considera um $CV = 18\%$, para ambas solicitações normais. Ao obter a simples média dos CVs, para as 60 espécies, encontram-se valores iguais a 12,5% e 24,4%, respectivamente, para compressão e tração, o que ratifica que a variabilidade experimental na tração é muito superior à compressão, com uma diferença relativa de $\approx 52\%$.

Tal questão, portanto, contribui para justificar a relevância nas discussões centrais deste trabalho, ao iniciar pelo estudo acerca dos equacionamentos entre as resistências características, seguida pela proposição de novos modelos probabilísticos capazes de fornecer maior confiabilidade aos valores característicos para compressão ($f_{c0,k}$) e tração ($f_{t0,k}$). Por fim, uma avaliação do sistema de classificação de resistência exigido pela ABNT NBR 7190 (1997), mantido na ABNT NBR 7190-3 (2022), é realizada a partir do modelo aqui desenvolvido ($f_{c0,k}^{Prob}$).

Tais modelos, portanto, nortearam os objetivos centrais desta tese, com equacionamentos pautados em um grande conjunto de espécies de madeiras tropicais, de modo a inferir na variabilidade amostral e, por consequência, na obtenção de equações confiáveis para uso no dimensionamento de estruturas de madeiras.

4.2 Modelos de Regressão

4.2.1 Relação entre as Resistências Características

A relação entre as resistências características $f_{t0,k}$ e $f_{c0,k}$, estabelecida na norma brasileira, é dada pela Equação 3.12. Adotou-se a ANOVA, com 5% de significância, para verificar a precisão da referida equação, confrontando os valores estimados para $f_{c0,k}$ (via Equação 3.12) com o conjunto de valores experimentais e calculados pela Equação 3.9 para $f_{c0,k}$. Tais valores são sintetizados na Tabela 4.13.

ID	Experimental		Estimado	ID	Experimental		Estimado
	$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$	$f_{c0,k}$ (Eq. 3.12)		$f_{c0,k}$	$f_{t0,k}$	$f_{c0,k}$ (Eq. 3.12)
1	48,84	88,13	64,01	31	38,50	58,96	45,40
2	47,52	52,56	40,47	32	66,60	109,25	84,12
3	44,00	48,63	37,45	33	65,36	81,62	62,82
4	67,44	87,12	67,19	34	43,10	83,54	64,33
5	46,26	55,53	42,75	35	58,92	80,59	62,05
6	51,06	67,12	51,68	36	72,37	83,43	64,24
7	72,73	77,02	59,31	37	49,94	61,16	47,09
8	41,87	53,94	41,53	38	56,34	63,98	49,26
9	55,55	76,65	59,02	39	74,42	67,89	52,27
10	45,58	67,20	51,74	40	63,38	73,29	56,43
11	79,57	79,69	61,36	41	89,96	125,29	96,47
12	40,50	56,30	43,35	42	56,76	55,22	40,21
13	35,60	45,85	35,30	43	49,14	69,87	53,80
14	30,11	42,71	32,88	44	78,40	110,57	85,14
15	27,30	31,79	24,48	45	61,53	65,13	50,15
16	36,37	59,44	45,77	46	29,15	36,97	28,47
17	46,51	73,29	56,43	47	62,41	74,23	57,16
18	35,30	58,59	45,11	48	72,34	85,29	65,67
19	47,69	88,27	67,97	49	55,22	79,35	61,10
20	38,93	61,95	47,70	50	45,06	50,30	38,73
21	54,54	86,42	66,54	51	43,74	51,14	39,37
22	50,91	48,79	37,56	52	58,25	79,80	61,45
23	29,64	47,20	36,34	53	27,20	40,64	31,29
24	46,33	64,40	49,59	54	61,60	81,65	62,87
25	29,99	48,55	37,39	55	44,79	51,39	39,57
26	29,06	50,07	38,56	56	80,51	73,28	56,42
27	96,16	99,77	76,82	57	94,53	98,00	75,46
28	44,13	52,67	40,55	58	75,46	74,73	57,54
29	37,71	50,04	38,53	59	59,84	65,05	50,09
30	55,28	75,22	57,92	60	51,28	39,99	30,79

Tabela 4.13: Resistência característica experimental e estimada para as 60 espécies.

4.2.1.1 Equação Simplificada da Norma Brasileira

A partir do conjunto de resultados da Tabela 4.13 os resultados da ANOVA para os dois grupos avaliados (experimental e estimado) são apresentados na Tabela 4.14. Cabe destacar que valor- p igual ou superior ao nível de significância (5%) implica em aceitar que os dois conjuntos possuem médias estatisticamente equivalentes (hipótese nula - H_0), o que implica na boa precisão da equação proposta para a estimativa da $f_{t0,k}$ pela norma brasileira, e da não representatividade (valor- $p < 0,05$) em caso contrário (médias dos

grupos estatisticamente diferentes - H_1).

Fonte	GL	SQ_{aj}	QM_{aj}	Valor- F	Valor- p
$f_{c0,k} \times f_{c0,k}$ (Eq. 3.12)	1	45,0	45,01	0,18	0,673
Erro	118	29742,0	252,05		
Total	119	29787,0			

* GL - graus de liberdade; SQ_{aj} - soma de quadrados; QM_{aj} - quadrados médios.

Tabela 4.14: Resultados da ANOVA para a condição da Equação 3.12.

A validação da ANOVA, resultante da normalidade da distribuição dos dados, é obtida via *Transformação de Johnson*. Logo, com um valor- $p=0,917$, superior a significância adotada de 5%, constata-se a normalidade dos dados para a condição analisada, ou seja, $f_{c0,k}$ (experimental) versus $f_{c0,k}$ (Eq. 3.12). A Figura 4.2 apresenta os dados originais (a) e transformados (b) via *Transformação de Johnson* em (c).

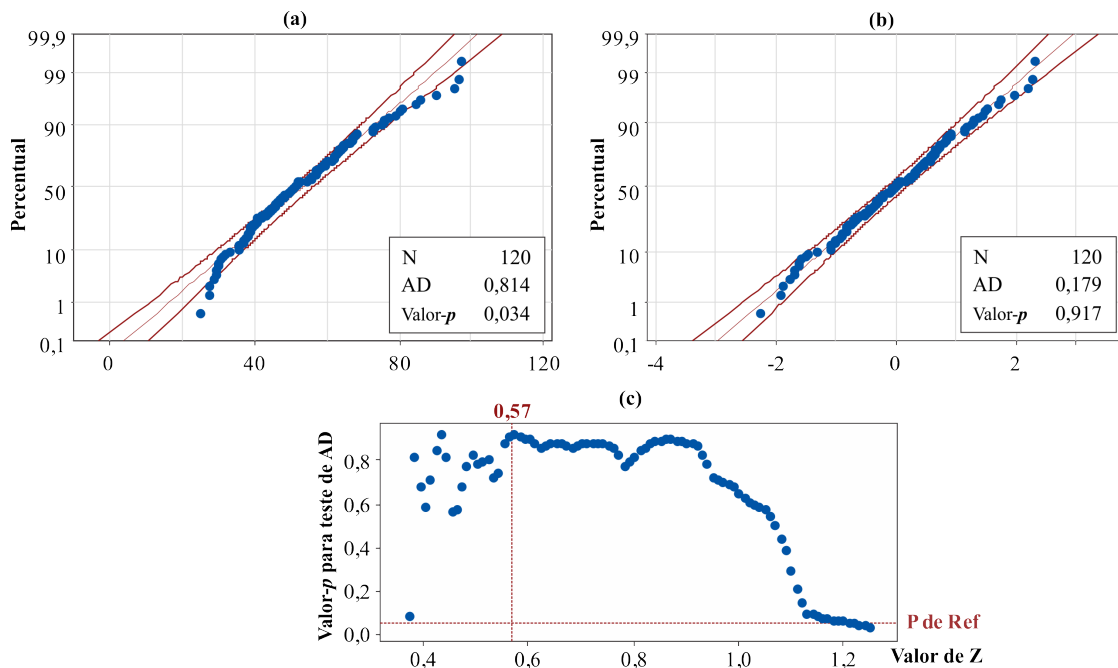


Figura 4.2: Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a *Transformação de Johnson* para a relação simplificada expressa na Equação 3.12.

Pelo valor- p da Tabela 4.14 e pelo teste de normalidade, da Figura 4.2, constata-se a equivalência das médias dos dois grupos confrontados, o que valida a Equação 3.12 proposta pela norma brasileira.

4.2.1.2 Regressões para as Resistências Características

Mesmo com a validação da Equação 3.12 via ANOVA, do ponto de vista acadêmico se faz relevante estudar modelos de regressão que possam servir como alternativa a proposição normativa. Sendo assim, na sequência são apresentados os modelos de regressão – linear, exponencial, logarítmico e geométrico – a dois parâmetros (a e b) baseados na análise de variância, ao nível de 5% de significância. A Tabela 4.15 sintetiza os resultados para os modelos de regressão, com destaque aos coeficientes de determinação R^2 superiores a 60%.

Modelos	Parâmetros		Valor- p	R^2
	a	b		
$f_{c0,k} = a + b \cdot (f_{t0,k})$ [Linear]	6,38	0,69	0,000	62,08%
$f_{c0,k} = a \cdot e^{b \cdot (f_{t0,k})}$ [Exponencial]	20,97	0,01	0,000	61,76%
$f_{c0,k} = a + b \cdot \log(f_{t0,k})$ [Logarítmico]	-140,26	46,37	0,000	61,25%
$f_{c0,k} = a \cdot (f_{t0,k})^b$ [Geométrico]	1,20	0,89	0,000	64,21%

Tabela 4.15: Resultados dos modelos de regressão para a estimativa das resistências $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$.

Da Tabela 4.15, todos os modelos foram considerados significativos (valor- $p < 0,05$) pela ANOVA. As Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, as regressões para as funções Linear, Exponencial, Logarítmico e Geométrico.

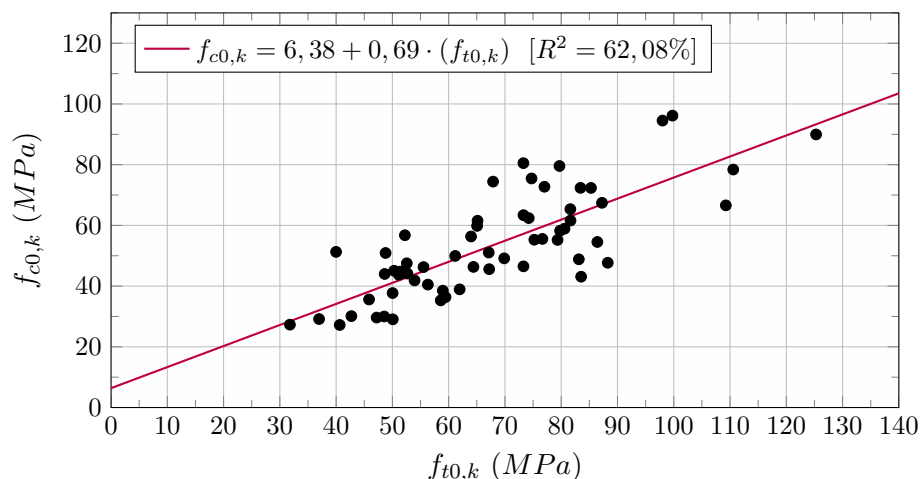


Figura 4.3: Regressão Linear para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$.

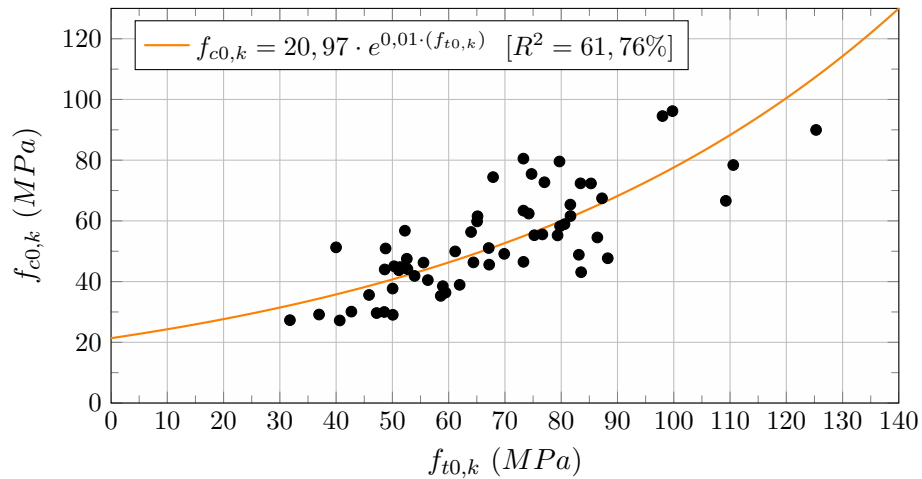


Figura 4.4: Regressão Exponencial para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$.

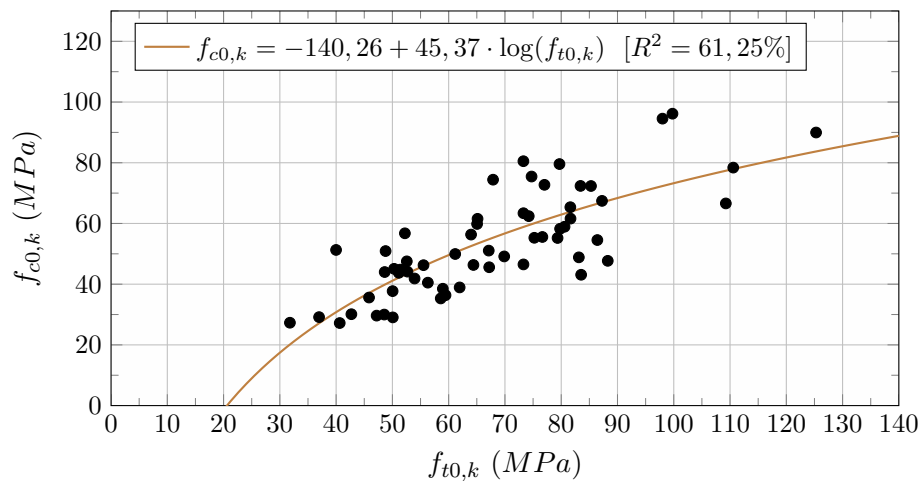


Figura 4.5: Regressão Logarítmica para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$.

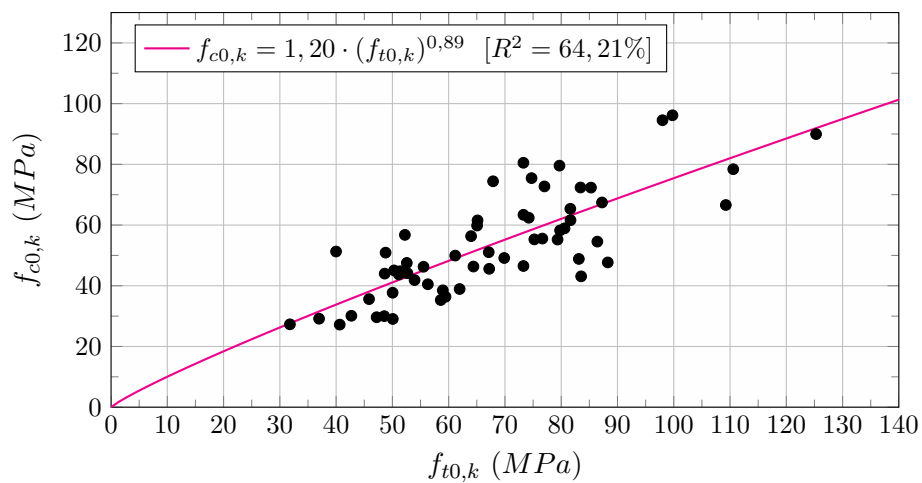


Figura 4.6: Regressão Geométrica para a resistência $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$.

Todos os modelos apresentaram ajustes superiores 60%, o que contribui para re-

afirmar que a Eq. 3.12 da norma condiz com os resultados aqui apresentados para com os modelos propostos, ao destacar o modelo linear. A avaliação por meio de modelos de regressão, portanto, reforçam a importância acerca da representatividade dessas equações, mostrando-se como um importante instrumento para validação da norma brasileira.

Por fim, de modo alternativo a estes modelos, pode-se obter um coeficiente ótimo (α), via Método dos Mínimos Quadrados (MMC) que correlacione diretamente $f_{c0,k}$ em função da $f_{t0,k}$, a partir dos dados experimentais avaliados. A aplicação das equações 3.19 e 3.20, resulta no coeficiente ótimo igual a $\alpha = 0,781$, que pode ser diretamente comparado ao valor fornecido pela normativa brasileira, expressa na Equação 3.12. Esta comparação resulta em uma diferença relativa de $\approx 1,4\%$ e corrobora com os resultados obtidos via modelos de regressão, cuja equivalência estatística também foi verificada.

4.2.2 Relação entre os Módulos de Elasticidade

Em se tratando da estimativa das propriedades de rigidez da madeira, a norma brasileira admite a igualdade das rigidezes E_{c0} e E_{t0} (Equação 3.13), como forma simplificada. Os valores de ambos os módulos envolvendo as 60 espécies de madeira aqui estudados foram igualados, a fim de avaliar a precisão desta relação a partir da análise ANOVA, para um nível de 5% de significância.

Na Tabela 4.16 são apresentados os resultados da análise ANOVA, com um valor- p superior ao nível de significância (5%), implica na boa representatividade do conjunto amostral e, portanto, na validação da equação da norma.

Fonte	GL	SQ_{aj}	QM_{aj}	Valor- F	Valor- p
$E_{c0} = E_{t0}$	1	102668	102668	0,01	0,928
Erro	118	1487106132	12602594		
Total	119	1487208799			

* GL - graus de liberdade; SQ_{aj} - soma de quadrados; QM_{aj} - quadrados médios.

Tabela 4.16: Resultados da ANOVA para a condição da Equação 3.13.

A validação da ANOVA (Figura 4.7) é verificada pela normalidade da distribui-

ção dos dados originais (a), a partir dos dados transformados (b) via *Transformação de Johnson* em (c).

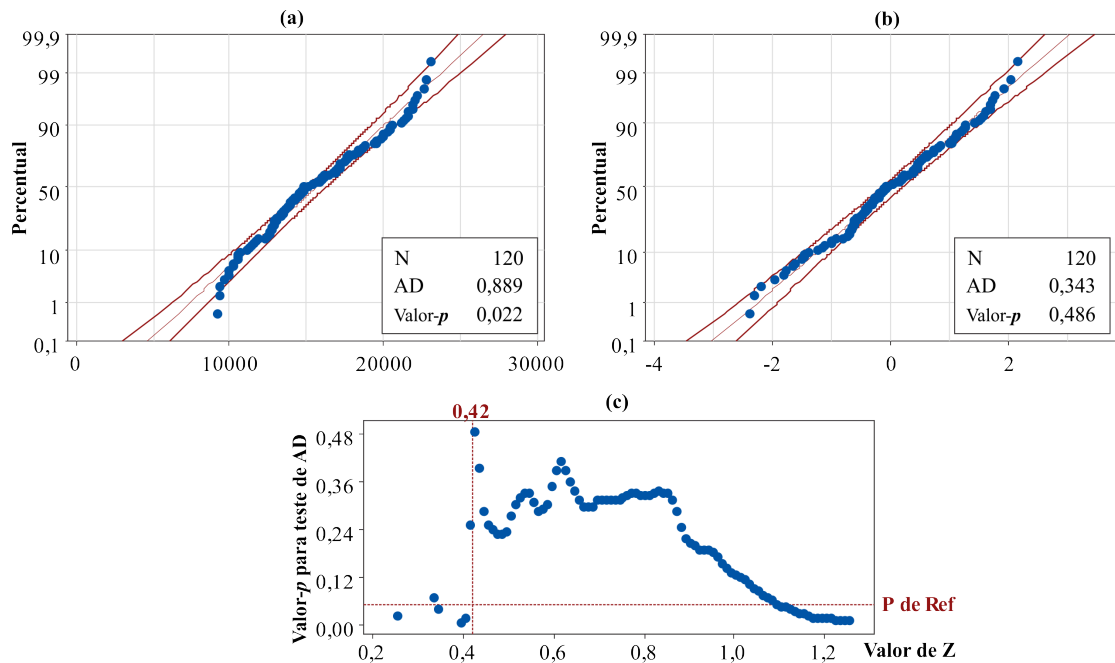


Figura 4.7: Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a *Transformação de Johnson* para a relação entre as rigidezes.

Pelo valor- p (Tab. 4.16) e pelo teste de normalidade (Fig. 4.7), portanto, constata-se a equivalência das médias dos dois grupos confrontados, de modo a validar a Equação 3.13 da norma brasileira. Por fim, obtém-se o coeficiente ótimo (α) ao correlacionar os dados experimentais de E_{c0} e E_{t0} , por meio das Equações 3.19 e 3.20, cujo coeficiente ótimo resulta em $\alpha = 1,004$. Ao compará-lo com o valor da norma (Eq. 3.13), a equivalência estatística, portanto, é ratificada.

4.3 Proposta de Novos Modelos Probabilísticos

Para cada conjunto de valores de $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$ foram empregados Modelos de Densidade de Probabilidade (MDPs) visando obter, dentre as 04 (quatro) funções probabilísticas (Eqs. 3.21 a 3.24) estudadas, aquela de melhor aderência estatística.

A partir deste conjunto de valores mais aderentes, pode-se ajustar os Modelos Probabilísticos via função de regressão linear multivariável, conforme descrito pela Equação

3.25, ao adotar como variáveis representativas para os modelos, os valores médios (em MPa), o coeficiente de variação ($CV\%$) e os menores (min) e maiores (max) valores para as resistências f_{c0} e f_{t0} , de modo a obter os modelos característicos ajustados, respectivamente, para $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$.

Na sequência, têm-se os resultados para $f_{c0,k}$ e $f_{t0,k}$, com a comparação dos valores obtidos via função densidade de melhor aderência (**MDP**) e os resultados para o modelo probabilístico (**Prob**), objetivo central desta tese, com uma comparação direta com o equacionamento proposto na norma brasileira (**NBR**).

4.3.1 Resistência Característica à Compressão

4.3.1.1 Modelos de Densidade de Probabilidade para Compressão

Com uso dos MDPs, apresentadas nas Equações 3.21 a 3.24, as resistências $f_{c0,k}^{MDP}$ foram calculadas para cada conjunto de resultados das 60 espécies pesquisadas, elegendo a função densidade de melhor aderência pelo maior valor- p encontrado dentre as 4 (quatro) funções, conforme detalha a Tabela 4.17.

ID	$f_{c0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs	ID	$f_{c0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs
1	45,11	0,517	Normal	31	33,97	0,391	LogNormal
2	47,45	0,558	Normal	32	54,98	0,438	Normal
3	41,13	0,959	LogNormal	33	60,93	0,758	LogNormal
4	62,32	0,763	LogNormal	34	39,42	0,809	LogNormal
5	41,93	0,590	LogNormal	35	55,88	0,250	Weibull
6	48,56	0,355	Normal	36	65,51	0,406	LogNormal
7	68,31	0,209	LogNormal	37	49,21	0,323	Normal
8	38,35	0,250	Weibull	38	53,06	0,905	Normal
9	51,90	0,804	LogNormal	39	54,75	0,293	Normal
10	42,51	0,882	LogNormal	40	58,27	0,557	Normal
11	74,00	0,250	Weibull	41	81,30	0,985	Normal
12	37,63	0,833	Normal	42	43,36	0,521	Normal
13	31,18	0,395	Normal	43	44,30	0,937	LogNormal
14	28,47	0,845	Normal	44	69,92	0,814	Normal
15	26,12	0,504	Normal	45	53,16	0,481	LogNormal
16	36,39	0,241	Weibull	46	27,70	0,010	Weibull
17	44,60	0,472	LogNormal	47	59,03	0,633	Normal
18	32,23	0,250	Weibull	48	64,41	0,657	LogNormal
19	42,64	0,473	LogNormal	49	53,51	0,250	Weibull
20	37,17	0,938	Normal	50	41,59	0,722	LogNormal
21	50,31	0,907	LogNormal	51	39,95	0,741	Normal
22	45,36	0,097	LogNormal	52	44,05	0,163	LogNormal
23	28,57	0,259	Normal	53	24,72	0,766	LogNormal
24	42,22	0,837	Normal	54	54,98	0,513	LogNormal
25	22,22	0,005	Normal	55	40,68	0,256	LogNormal
26	25,96	0,227	Normal	56	73,36	0,495	LogNormal
27	85,79	0,065	LogNormal	57	83,28	0,507	LogNormal
28	41,14	0,600	LogNormal	58	71,67	0,203	Weibull
29	40,60	0,224	LogNormal	59	55,68	0,265	Normal
30	62,34	0,796	Normal	60	46,81	0,956	LogNormal

Tabela 4.17: Valores característicos da resistência $f_{c0,k}^{MDP}$, segundo o MDP de melhor aderência estatística.

A Figura 4.8 exemplifica como o modelo Normal foi escolhido para a espécie 01-Abiú, tenho em vista o valor- \mathbf{p} =0,517, maior dentre os MDPs estudados. As curvas também contribuem para ilustrar a alocação, dentro do intervalo de confiança de 95%, dos dados amostrais para o modelo Normal.

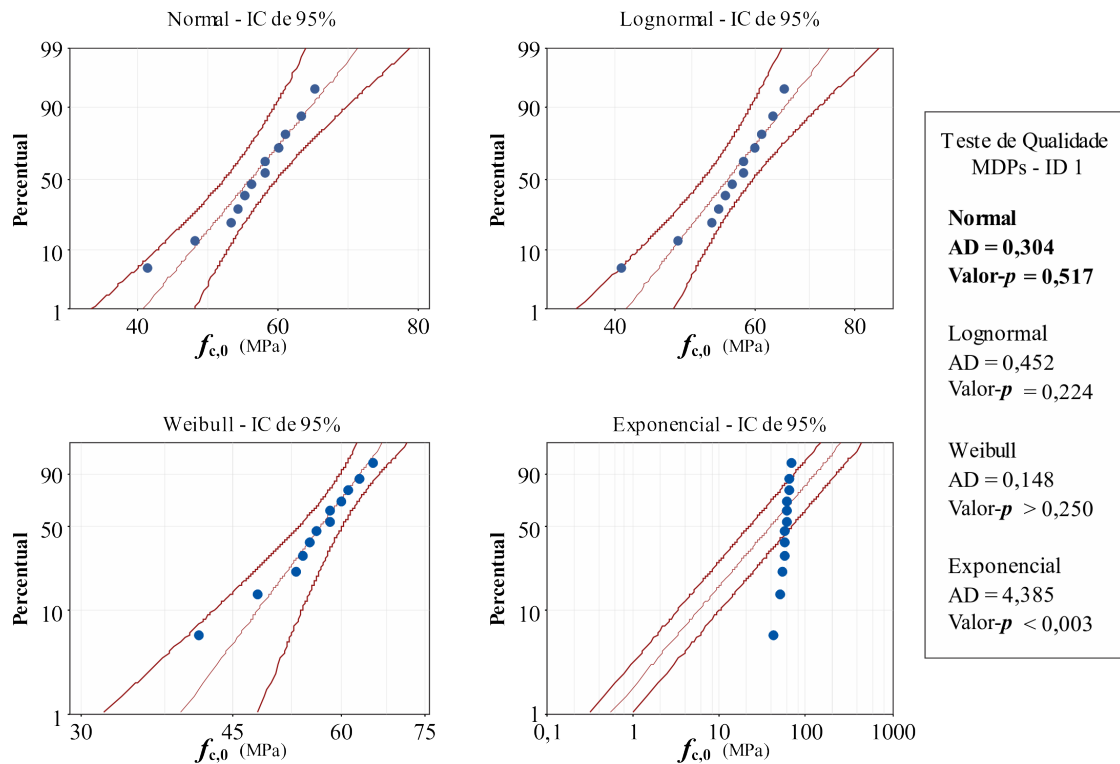


Figura 4.8: Exemplo do teste de qualidade para escolha do MDP de melhor aderência para a espécie 01-Abiú na compressão.

Das 60 espécies avaliadas 40% (24/60) obtiveram melhores ajustes pelo modelo de distribuição Normal, 47% (28/60) ajustadas pelo modelo LogNormal e 13% (8/60) pelo modelo de Weibull, sendo que o modelo Exponencial não forneceu ajuste significativo para nenhuma das espécies avaliadas.

Contudo, destaca-se o fato de todas as 60 espécies serem aderentes ao modelo Normal, ou seja, atingiram um valor- p superior ao nível de significância de 5%, como era de se esperar, uma vez que os resultados amostrais para cada conjunto de espécies, tendem a assumir uma normalidade na distribuição dos dados, quando oriundos da resistência à compressão, assim como afirma a ABNT NBR 7190 (1997), ao indicar um $CV = 18\%$ para solicitações axiais e distribuição normal para o conjunto amostral para peças isentas de defeitos.

4.3.1.2 Proposta do Modelo Probabilístico para $f_{c0,k}^{Prob}$

Uma vez eleitos os modelos de densidade para as 60 espécies, os valores médios (f_{c0} em MPa), o coeficiente de variação ($CV\%$) e os menores (min) e maiores (max) valores da resistência f_{c0} , apresentados anteriormente nas Tabelas 4.1 (Parte I) e 4.2 (Parte II), foram adotados na construção da equação para estimar a resistência $f_{c0,k}^{Prob}$, a partir da função de regressão multivariável apresentado na equação 3.25. Assim, a estimativa do valor característico $f_{c0,k}^{Prob}$ pode ser expressa pela equação 4.1, com os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 4.18.

$$f_{c0,k}^{Prob} = 6,84 + 0,582 f_{c0} - 0,604 CV + 0,274 min + 0,016 max [R^2 = 99,15\%] \quad (4.1)$$

Fonte	<i>GL</i>	<i>SQ_{adj}</i>	<i>QM_{adj}</i>	Valor- F	Valor- p
$f_{c0,k}^{Prob}$	1	115,5	115,461	72,38	0,000
<i>CV</i>	1	111,9	111,932	70,17	0,000
<i>min</i>	1	61,1	61,123	38,32	0,000
<i>max</i>	1	0,2	0,170	0,11	0,746
Error	55	87,7	1,595		
Total	59	13388,5			

GL: Graus de Liberdade; *SQ_{adj}*: soma de quadrados; *QM_{adj}*: quadrados médios.

Tabela 4.18: Resultados da ANOVA para $f_{c0,k}^{Prob}$ via equação probabilística 4.1.

Da análise de variância da função de regressão, expressa pela Tabela 4.18, a equação 4.1 mostra-se significativa com um coeficiente $R^2 = 99,15\%$, o que resulta em um erro inferior a 1%. Constata-se que 03 (três) termos são significativos (f_{c0} , $CV\%$, min) e apenas o termo referente ao máximo valor da resistência (max) não é significativo, o que possibilita excluí-lo do conjunto de coeficientes, sem influenciar na estimativa do modelo probabilístico.

Ao admitir, portanto, apenas os termos significativos para construir tal estimativa, adotam-se os três coeficientes com valor-**p** menor que 5%, conforme equação 4.2, com os

resultados da ANOVA expressos na Tabela 4.19.

$$f_{c0,k}^{Prob} = 6,655 + 0,601 f_{c0} - 0,586 CV + 0,273 min [R^2 = 99,18\%] \quad (4.2)$$

Fonte	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{c0,k}^{Prob}$	1	429,1	429,082	273,36	0,000
<i>CV</i>	1	227,7	227,713	145,07	0,000
<i>min</i>	1	61,0	60,960	38,84	0,000
Error	56	87,9	1,570		
Total	59	13388,5			

GL: Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.19: Resultados da ANOVA para $f_{c0,k}^{Prob}$ para equação 4.2.

Note que a exclusão do termo não significativo (*max*) não influenciou na obtenção do elevado valor do coeficiente $R^2 = 99,18\%$, resultado esperado, uma vez que a construção do modelo se dá a partir do 5–percentil inferior da curva de distribuição, ou seja, os valores máximos acabam por não influenciar no modelo, indo a favor da segurança estrutural.

4.3.1.3 Síntese dos Resultados

A Tabela 4.20 mostra os valores característicos estimados para $f_{c0,k}^{NBR}$, obtida via norma brasileira; $f_{c0,k}^{MDP}$ resultante do modelo de densidade de probabilidade de melhor aderência; e $f_{c0,k}^{Prob}$, resultado do modelo probabilístico proposto nesta tese (Eq. 4.2).

ID	Valores Característicos			ID	Valores Característicos		
	$f_{c0,k}^{NBR}$	$f_{c0,k}^{MDP}$	$f_{c0,k}^{Prob}$		$f_{c0,k}^{NBR}$	$f_{c0,k}^{MDP}$	$f_{c0,k}^{Prob}$
1	48,84	45,11	44,56	31	38,50	33,97	34,91
2	47,52	47,45	48,09	32	60,21	54,98	55,24
3	44,00	41,13	40,90	33	65,36	60,93	61,17
4	67,44	62,32	60,74	34	43,10	39,42	39,69
5	46,26	41,93	40,77	35	58,92	55,88	58,11
6	51,06	48,56	49,26	36	72,37	65,51	65,44
7	72,73	68,31	66,91	37	49,94	49,21	49,03
8	41,87	38,35	37,91	38	56,34	53,06	53,35
9	55,55	51,90	53,45	39	56,81	54,75	55,56
10	45,58	42,51	42,91	40	63,38	58,27	56,84
11	79,57	74,00	78,49	41	89,96	81,30	79,90
12	40,50	37,63	38,20	42	47,22	43,36	43,26
13	35,60	31,18	33,69	43	49,14	44,30	44,49
14	30,11	28,47	27,73	44	78,40	69,92	68,52
15	27,30	26,12	26,17	45	61,53	53,16	53,46
16	36,37	36,39	36,32	46	29,15	27,70	26,41
17	46,51	44,60	44,63	47	62,41	59,03	59,01
18	35,30	32,23	32,12	48	72,34	64,41	64,40
19	47,69	42,64	42,39	49	55,22	53,51	51,05
20	38,93	37,17	37,75	50	45,06	41,59	41,77
21	54,54	50,31	50,30	51	43,74	39,95	42,05
22	50,91	45,36	45,61	52	53,02	44,05	43,79
23	29,64	28,57	28,21	53	27,20	24,72	21,90
24	46,64	42,22	42,79	54	61,60	54,98	54,61
25	29,99	22,22	22,45	55	44,79	40,68	41,06
26	29,06	25,96	25,64	56	80,51	73,36	72,80
27	96,16	85,79	82,60	57	93,02	83,28	82,19
28	44,13	41,14	41,26	58	75,46	71,67	72,77
29	37,71	40,60	40,17	59	59,84	55,68	56,26
30	55,28	62,34	64,03	60	51,28	46,81	46,85

Tabela 4.20: Valores característicos para $f_{c0,k}^{NBR}$ (ABNT NBR 7190, 1997); $f_{c0,k}^{MDP}$ com o modelo mais aderente; e $f_{c0,k}^{Prob}$ proposta na equação 4.2.

Finalmente, a equivalência estatística entre a equação da norma brasileira (Eq. 3.9) e o modelo proposto nesta tese (Eq. 4.2) é avaliada pela ANOVA, para um nível de 95% de confiança, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.21.

Fonte	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{c0,k}^{NBR}$ x $f_{c0,k}^{Prob}$	1	466,8	466,8	1,87	0,174
Error	118	29439,1	249,5		
Total	119	29905,9			

GL : Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.21: Resultados da ANOVA para comparação dos grupos: $f_{c0,k}^{NBR}$ X $f_{c0,k}^{Prob}$.

É importante destacar a equivalência estatística para os grupos avaliados, $f_{c0,k}^{NBR}$ versus $f_{c0,k}^{Prob}$, para os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 4.21, com valor- $p > 0,05$. Contudo, é fundamental destacar que 97% dos resultados alcançados pelo modelo probabilístico, $f_{c0,k}^{Prob}$, foram inferiores a equação da norma, $f_{c0,k}^{NBR}$ e, portanto, a favor da segurança estrutural.

Por fim, como forma de validar os resultados do modelo aqui proposto, sabe-se que as análises estatísticas demandam premissas do tratamento dos grupos avaliados, como a normalidade dos dados e resíduos e igualdade de variâncias.

Na Figura 4.9 é apresentado os resultados para normalidade da distribuição com uso da *Transformação de Johnson*, que resultou em um valor- $p = 0,706$, ou seja, maior que o nível de significância de 5%, de modo a assumir que os dados transformados (b), a partir dos dados originais (a), seguem uma distribuição normal.

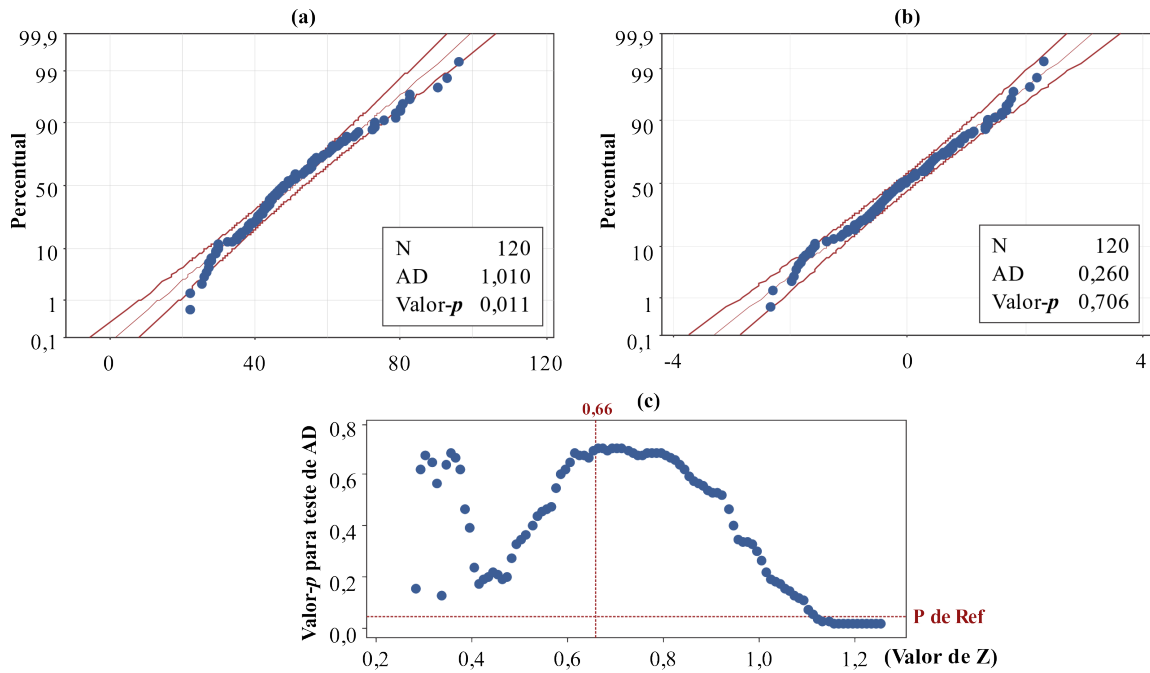


Figura 4.9: Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a *Transformação de Johnson*.

A verificação da igualdade de variâncias foi dada pelos intervalos de confiança para os desvios padrão ao nível de 95%, tendo como hipótese nula a igualdade de variâncias. Na Figura 4.10 tem-se os resultados para comparações múltiplas, com um valor- $p=0,472$, e para o teste de *Levene* com um valor- $p=0,638$, com ambos os testes resultando no aceite da hipótese nula.

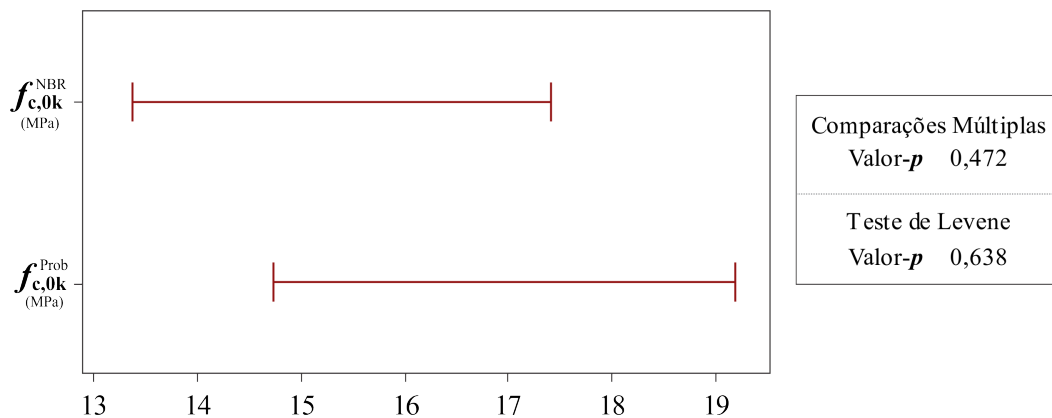


Figura 4.10: Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias dos grupos avaliados.

Com relação à normalidade dos resíduos, foi realizada a ANOVA sem a premissa de igualdade de variâncias e armazenamento dos resíduos via *Transformação de Johnson*

para avaliar sua normalidade.

A Figura 4.11 mostra uma estatística de *Anderson-Darling* igual a 0,260 e valor- $p=0,706$. Como a hipótese nula é de normalidade da distribuição dos resíduos, não há motivos estatísticos para que fosse desconsiderado tal hipótese.

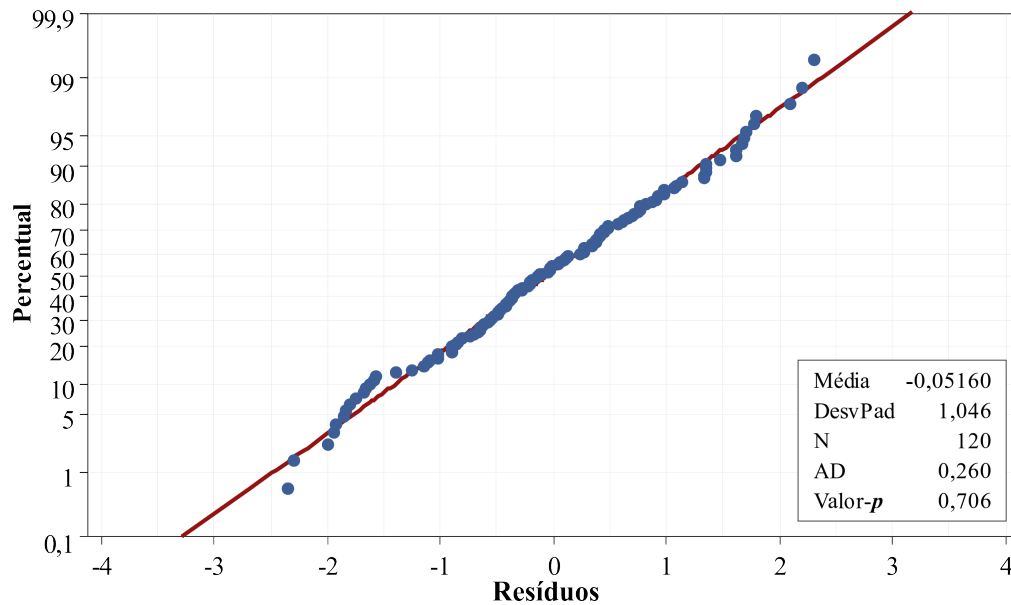


Figura 4.11: Verificação da premissa de normalidade dos resíduos para ANOVA.

Uma vez validadas as análises estatísticas, pode-se verificar os valores médios característicos, a partir dos dados das 60 espécies, usando o equacionamento da norma brasileira (Eq. 3.9) para $f_{c0,k}^{NBR}$, e a equação do modelo probabilístico proposto nesta tese (Eq. 4.2) para $f_{c0,k}^{Prob}$, conforme ilustra a Figura 4.12.

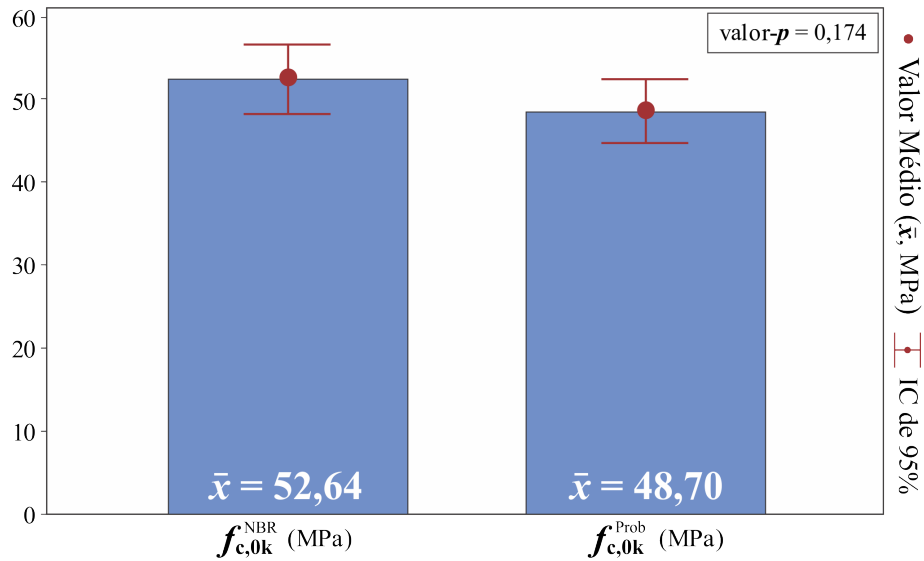


Figura 4.12: Resultados para $f_{c0,k}$ a partir do valor médio das 60 espécies estudadas: norma brasileira ($f_{c0,k}^{NBR}$) e modelo probabilístico proposto ($f_{c0,k}^{Prob}$).

O modelo proposto nesta tese alcançou um valor médio inferior de $\approx 8\%$ e dentro do intervalo de confiança (IC) daquele obtido via equação da norma brasileira. Destaca-se o fato do equacionamento aqui proposto estar estruturado em modelos de melhor aderência estatística para cada conjunto de dados dentre as 60 espécies estudadas, o que faz com que este modelo apresente grande confiabilidade estatística e, portanto, segurança para o dimensionamento de estruturas de madeira.

4.3.2 Resistência Característica à Tração

4.3.2.1 Modelos de Densidade de Probabilidade para Tração

Com uso dos MDPs, expressos nas equações 3.21 a 3.24, as resistências $f_{t0,k}^{MDP}$ foram calculadas para cada conjunto de resultados das 60 espécies pesquisadas, elegendo a função densidade de melhor aderência pelo maior valor- p encontrado dentre as 4 (quatro) funções, conforme detalha a Tabela 4.22.

ID	$f_{t_0,k}^{MDP}$	Valor- p	MDPs	ID	$f_{t_0,k}^{MDP}$	Valor- p	MDPs
1	74,26	0,688	Normal	31	49,95	0,364	LogNormal
2	46,06	0,668	LogNormal	32	116,30	0,023	Weibull
3	42,13	0,900	LogNormal	33	68,21	0,319	LogNormal
4	63,98	0,658	Normal	34	69,03	0,823	LogNormal
5	45,11	0,144	LogNormal	35	78,54	0,244	Weibull
6	64,38	0,983	LogNormal	36	74,21	0,893	Normal
7	62,45	0,045	LogNormal	37	52,85	0,189	Weibull
8	48,97	0,102	LogNormal	38	56,65	0,140	LogNormal
9	55,88	0,615	Normal	39	57,10	0,885	LogNormal
10	61,08	0,423	LogNormal	40	64,61	0,457	Normal
11	69,50	0,249	LogNormal	41	111,87	0,521	LogNormal
12	46,29	0,180	LogNormal	42	50,39	0,467	Normal
13	41,28	0,908	LogNormal	43	66,88	0,867	LogNormal
14	33,33	0,893	LogNormal	44	101,84	0,157	LogNormal
15	26,60	0,053	LogNormal	45	43,32	0,796	Normal
16	52,74	0,250	Weibull	46	33,16	0,760	LogNormal
17	60,05	0,071	Normal	47	64,55	0,250	Weibull
18	37,63	0,724	Normal	48	73,96	0,848	LogNormal
19	87,05	0,901	LogNormal	49	54,37	0,935	Normal
20	54,80	0,159	Weibull	50	45,50	0,292	LogNormal
21	80,66	0,768	LogNormal	51	39,09	0,214	LogNormal
22	38,15	0,153	LogNormal	52	75,29	0,417	Normal
23	40,81	0,145	LogNormal	53	36,49	0,527	Normal
24	56,13	0,823	Normal	54	77,23	0,756	LogNormal
25	45,18	0,764	LogNormal	55	45,36	0,427	LogNormal
26	33,31	0,038	Weibull	56	45,89	0,067	LogNormal
27	90,82	0,290	LogNormal	57	94,17	0,855	Normal
28	48,12	0,258	LogNormal	58	66,28	0,766	LogNormal
29	41,77	0,054	LogNormal	59	59,32	0,163	Weibull
30	59,63	0,268	LogNormal	60	37,61	0,328	LogNormal

Tabela 4.22: Valores característicos da resistência $f_{t_0,k}^{MDP}$, segundo o MDP de melhor aderência estatística.

A Figura 4.13 demonstra como o modelo *Weibull* foi escolhido para a espécie 59-Tatajuba, tendo em vista o valor- $p=0,163$, maior dentre os MDPs estudados. As curvas contribuem para ilustrar a alocação para todos os pontos amostrais dentro do intervalo de confiança de 95% para o modelo escolhido.

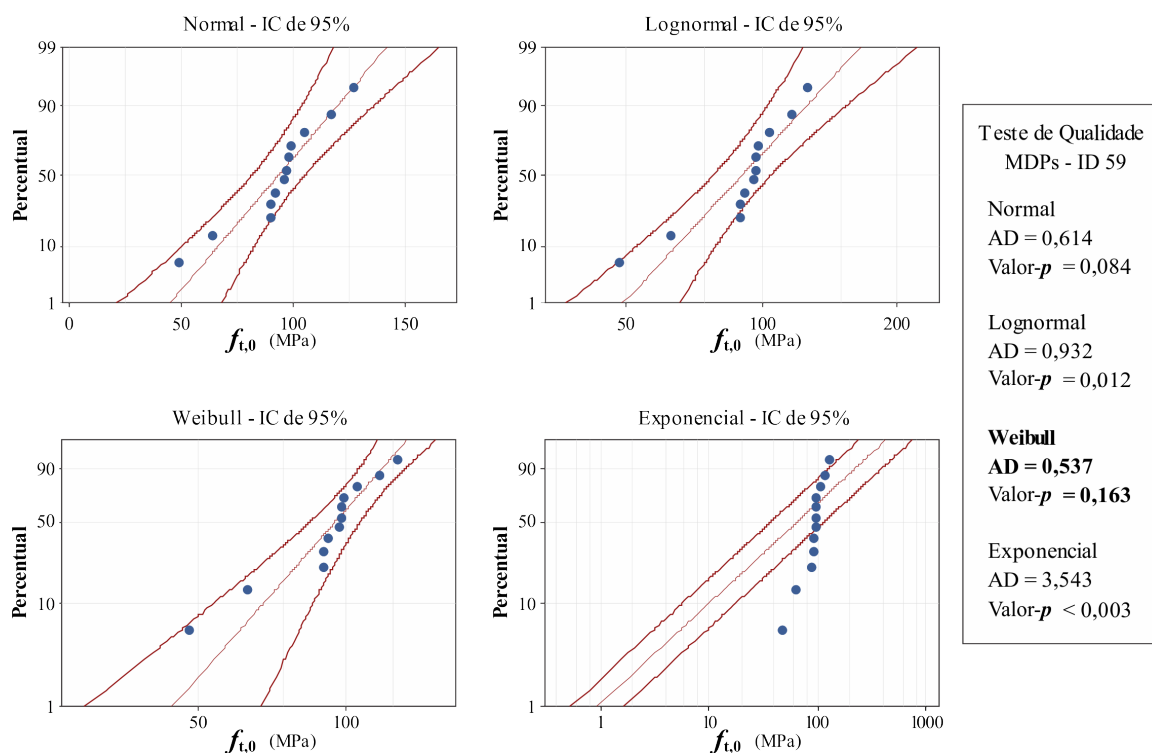


Figura 4.13: Exemplo do teste de qualidade para escolha do MDP de melhor aderência para a espécie 59-Tatajuba na tração.

Das 60 espécies avaliadas 23% (14/60) obtiveram melhores ajustes pelo modelo de distribuição Normal, 64% (38/60) ajustadas pelo modelo LogNormal e 13% (8/60) via *Weibull*, o que permite concluir que o modelo probabilístico para tração possui, em sua maioria, melhor aderência a distribuição LogNormal.

Em adição, ao avaliarmos cada conjunto, verifica-se que dos 60 estudados, 10 espécies não atingiram um valor- p significativo, diferente do que ocorreu para a resistência à compressão. Tal questão pode ser explicada, em partes, ao retornarmos ao fato de muitas espécies terem atingido um $CV\%$ muito elevado, já que a madeira, quando tracionada, apresenta um modo de ruptura frágil e, muitas vezes, tende a romper fora da região preferencial de falha do corpo de prova.

Tal questão contribui, portanto, para entender a relevância do presente estudo, ao pressupor uma busca por dados amostrais assimétricos e aderentes aos distintos modelos probabilísticos, a fim de permitir a obtenção de valores para $f_{t0,k}$, pautados em modelos confiáveis do ponto de vista estatístico e modelados de forma distinta quando comparado

ao modelo na compressão.

4.3.2.2 Proposta do Modelo Probabilístico para $f_{t_0,k}^{Prob}$

Eleitos os modelos de densidade para as 60 espécies, os valores médios (f_{t_0} em MPa), o coeficiente de variação ($CV\%$) e os menores (min) e maiores (max) valores da resistência f_{t_0} , apresentados anteriormente nas Tabelas 4.7 (Parte I) e 4.8 (Parte II), foram adotados na construção da equação para estimar a resistência $f_{t_0,k}^{Prob}$, a partir da função de regressão multivariável apresentado na equação 3.25. Assim, a estimativa do valor característico $f_{t_0,k}^{Prob}$ é dada pela equação 4.3, com os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 4.23.

$$f_{t_0,k}^{Prob} = 16,12 + 0,443 f_{t_0} - 0,762 CV + 0,378 min - 0,006 max [R^2 = 95,62\%] \quad (4.3)$$

Fonte	GL	SQ_{aj}	QM_{aj}	Valor- F	Valor- p
$f_{t_0,k}^{Prob}$	1	521,7	521,728	38,06	0,000
CV	1	551,7	551,710	40,24	0,000
min	1	464,9	464,923	33,91	0,000
max	1	0,2	0,216	0,02	0,901
Error	55	754,0	13,709		
Total	59	22155,7			

GL : Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.23: Resultados da ANOVA para $f_{t_0,k}^{Prob}$ via função probabilística 4.3.

Da análise de variância, Tabela 4.23, o equacionamento mostra-se significativo, dado um coeficiente $R^2 = 95,62\%$, o que resulta em um erro próximo de 4%. Constata-se que 03 (três) termos são significativos (f_{t_0} , $CV\%$, min), com o termo do máximo valor da resistência (max) não significativo, o que possibilita excluí-lo do conjunto de coeficientes, por não influenciar na estimativa do modelo probabilístico. A equação 4.4 e a Tabela 4.24 resume tais resultados.

$$f_{t_0,k}^{Prob} = 16,31 + 0,436 f_{t_0} - 0,772 CV + 0,376 min [R^2 = 95,93\%] \quad (4.4)$$

Fonte	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{t0,k}^{Prob}$	1	1388,3	1388,27	103,08	0,000
CV	1	967,5	967,50	71,84	0,000
min	1	467,6	467,59	34,72	0,000
Error	56	754,2	13,47		
Total	59	22155,7			

GL : Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.24: Resultados da ANOVA para $f_{t0,k}^{Prob}$ via função probabilística 4.4.

Nota-se, novamente, que a exclusão do termo não significativo (max), não influenciou na obtenção do elevado valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 95,93\%$), assim como ocorreu para a resistência característica à compressão, $f_{c0,k}$, uma vez que ambos os modelos foram construídos com o 5–percentil inferior da curva de distribuição dos dados.

4.3.2.3 Síntese dos Resultados

A Tabela 4.25 mostra os valores característicos estimados para $f_{t0,k}^{NBR}$, obtida via norma; $f_{t0,k}^{MDP}$ resultante do modelo de densidade de probabilidade de melhor aderência; e $f_{t0,k}^{Prob}$, resultado do modelo probabilístico aqui proposto (Eq. 4.4).

ID	Valores Probabilísticos			ID	Valores Probabilísticos		
	$f_{t0,k}^{NBR}$	$f_{t0,k}^{MDP}$	$f_{t0,k}^{Prob}$		$f_{t0,k}^{NBR}$	$f_{t0,k}^{MDP}$	$f_{t0,k}^{Prob}$
1	83,13	74,26	75,26	31	58,96	49,95	50,97
2	52,56	46,06	45,31	32	109,25	116,30	105,41
3	48,63	42,13	39,85	33	81,62	68,21	69,07
4	87,25	63,98	70,32	34	83,54	69,03	70,05
5	55,53	45,11	40,15	35	80,59	78,54	77,90
6	67,12	64,38	63,95	36	83,43	74,21	74,76
7	77,02	62,45	58,67	37	61,16	52,85	58,46
8	53,94	48,97	51,90	38	63,98	56,65	56,63
9	76,65	55,88	60,19	39	67,89	57,10	55,10
10	67,20	61,08	63,04	40	73,29	64,61	64,28
11	79,69	69,50	57,74	41	125,29	111,87	112,83
12	56,30	46,29	45,36	42	55,22	50,39	48,99
13	45,85	41,28	42,60	43	69,87	66,88	67,30
14	42,71	33,33	27,90	44	110,57	101,84	101,07
15	31,79	26,60	24,14	45	65,13	43,31	47,06
16	59,44	52,74	48,78	46	36,97	33,16	39,48
17	73,29	60,05	58,79	47	74,23	64,55	62,20
18	58,59	37,63	39,76	48	85,29	73,96	76,93
19	88,27	87,05	85,65	49	79,35	54,37	61,51
20	61,95	54,80	56,20	50	50,30	45,50	46,02
21	86,42	80,66	80,31	51	51,14	39,09	38,03
22	48,79	38,15	34,36	52	79,80	75,29	77,48
23	47,20	40,81	39,35	53	40,64	36,49	36,46
24	64,40	56,13	61,02	54	81,65	77,23	78,06
125	48,55	45,18	44,69	55	51,39	45,36	44,60
26	50,07	33,31	39,90	56	73,28	45,89	49,19
27	99,77	90,82	85,90	57	98,00	94,17	97,00
28	52,67	48,12	48,43	58	74,73	66,28	66,08
29	50,04	41,77	39,67	59	65,05	59,31	57,47
30	75,22	59,63	62,70	60	39,99	37,61	36,12

Tabela 4.25: Valores característicos para $f_{t0,k}^{NBR}$ (ABNT NBR 7190, 1997), $f_{t0,k}^{MDP}$ (modelo mais aderente) e $f_{t0,k}^{Prob}$ proposto nesta tese segundo equação 4.4.

Finalmente, a equivalência estatística, entre a Equação 3.9 da norma ($f_{t0,k}^{NBR}$) e o modelo proposto ($f_{t0,k}^{Prob}$) nesta tese (Eq. 4.4), é avaliada via ANOVA, para um nível de 95% de confiança, com resultados apresentados na Tabela 4.26.

Fonte	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{t0,k}^{NBR} \times f_{t0,k}^{Prob}$	1	2432	2431,6	6,65	0,011
Error	118	43139	365,6		
Total	119	45571			

GL: Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.26: Resultados da ANOVA para $f_{t0,k}^{NBR}$ e $f_{t0,k}^{Prob}$.

Destaca-se que a hipótese nula (igualdade dos grupos testados) pode ser rejeitada para o valores confrontados, $f_{t0,k}^{NBR}$ versus $f_{t0,k}^{Prob}$, dado um valor- $p < 0,05$ (Tabela 4.26). Este fato reforça a importância do modelo probabilístico aqui proposto como uma alternativa a norma brasileira.

Por fim, para validar tais resultados, os grupos avaliados ($f_{t0,k}^{NBR}$ e $f_{t0,k}^{Prob}$) são verificados quanto a normalidade dos dados e resíduos e igualdade de variâncias. Na Figura 4.14 verifica-se a normalidade da distribuição com uso da *Transformação de Johnson*, que resultou em um valor- $p = 0,836$, ou seja, maior que o nível de significância de 5%, de modo a assumir que os dados transformados (b), a partir dos dados originais (a), seguem uma distribuição normal.

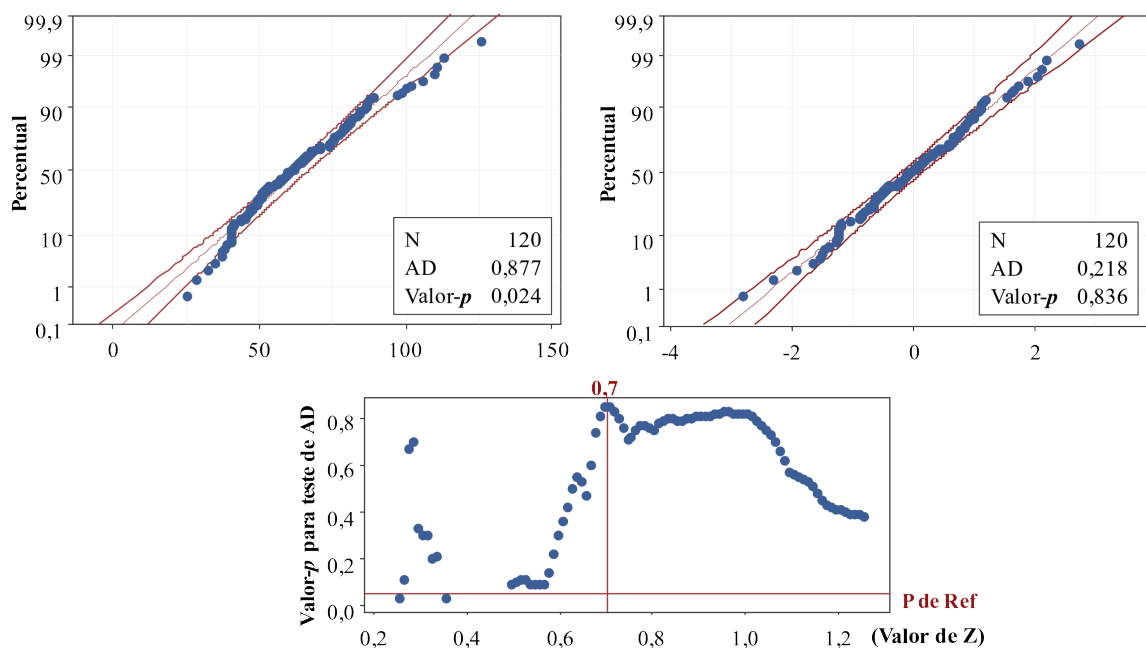


Figura 4.14: Verificação da normalidade da distribuição dos dados após a *Transformação de Johnson*.

A verificação da igualdade de variâncias foi verificada analisando os intervalos de confiança para os desvios padrão ao nível de 95%, tendo como hipótese nula a igualdade de variâncias. Na Figura 4.15 tem-se os resultados para comparações múltiplas, com um valor- $p=0,958$, e para o teste de *Levene* com um valor- $p=0,769$, com ambos os testes resultando no aceite da hipótese nula.

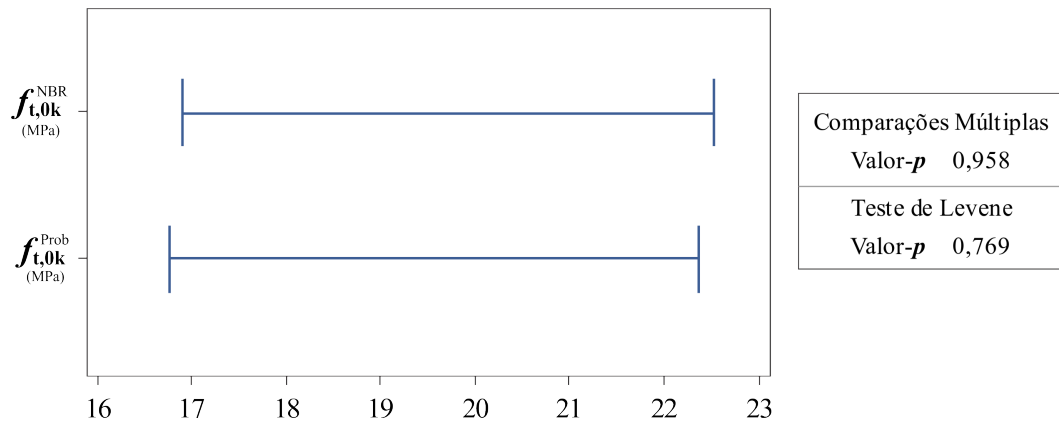


Figura 4.15: Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias dos grupos avaliados.

Com relação à normalidade dos resíduos, foi realizada a ANOVA sem a premissa de igualdade de variâncias, com comparações emparelhadas de *Games-Howell* e armazenamento dos resíduos via *Transformação de Johnson* para avaliar sua normalidade. A Figura 4.16 mostra uma estatística de *Anderson-Darling* igual a 0,218 e valor- $p=0,836$. Como a hipótese nula é de normalidade da distribuição dos resíduos, não há motivos estatísticos para que fosse desconsiderado tal hipótese.

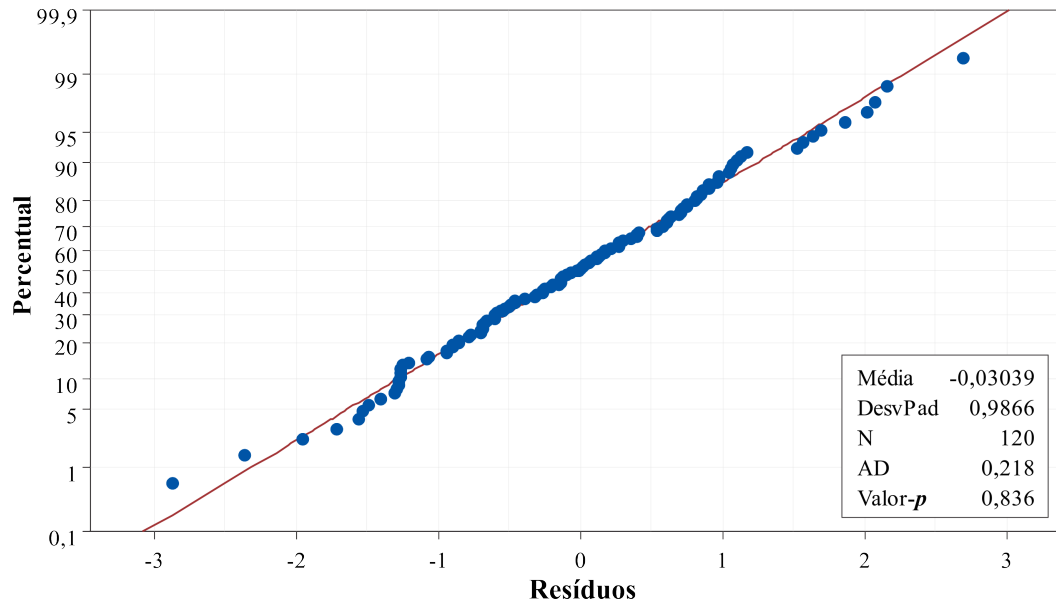


Figura 4.16: Verificação da premissa de normalidade dos resíduos para ANOVA.

Uma vez validadas as análises estatísticas, pode-se verificar os valores médios característicos, a partir dos dados das 60 espécies, usando o equacionamento da norma brasileira (Eq. 3.9) para $f_{t0,k}^{NBR}$, e a equação do modelo probabilístico proposta nesta tese (Eq. 4.4) para $f_{t0,k}^{Prob}$, conforme ilustra a Figura 4.17.

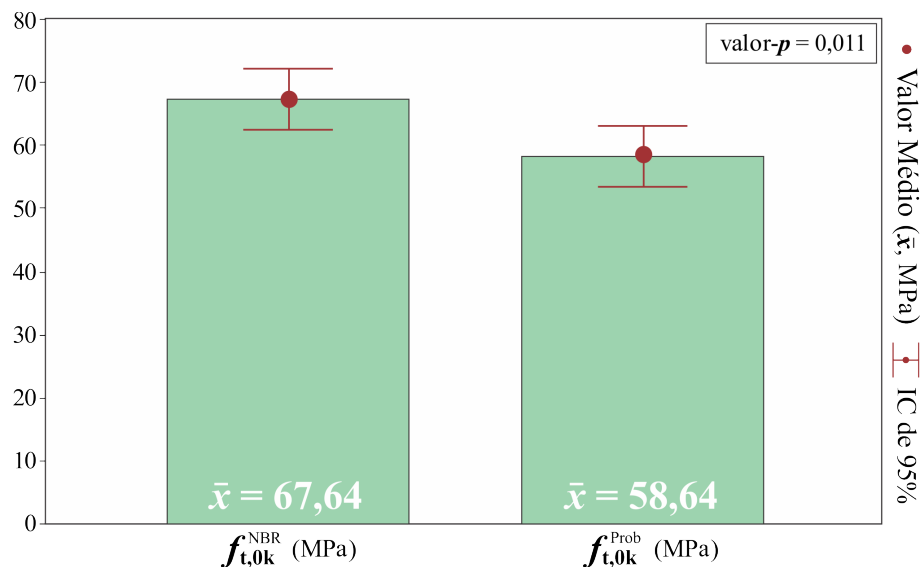


Figura 4.17: Resultados para $f_{t0,k}$ a partir do valor médio das 60 espécies estudadas: norma brasileira ($f_{t0,k}^{NBR}$) e modelo probabilístico proposto ($f_{t0,k}^{Prob}$).

Destaca-se que o modelo proposto nesta tese alcançou um valor médio inferior de $\approx 13\%$ quando comparado ao obtido via equação da norma brasileira. Tal questão

quando somada ao fato do equacionamento aqui proposto estar estruturado em modelos probabilísticos de melhor aderência para cada conjunto de dados entre espécies, faz com que este modelo apresente grande confiabilidade estatística e, portanto, segurança para projetos de estruturas de madeira.

4.3.3 Estudo sobre o Tamanho Amostral

Estudar a variabilidade amostral é fundamental para ratificar as análises anteriores, de modo a descobrir qual o real impacto sobre o tamanho amostral na obtenção de resultados estatisticamente confiáveis.

Para tanto, dentre as 60 espécies de madeiras nativas avaliadas com $n = 12$ corpos de prova por espécie, conforme recomenda a norma brasileira, um grupo de 10 espécies foram escolhidas para ensaios com $n = 30$ corpos de prova (destacados em negrito). O estudo entre os grupos, com número amostral pequeno ($n = 12$) e estatisticamente grande ($n = 30$), portanto, é o que norteia os resultados deste capítulo que busca validar os modelos probabilísticos objetivo central desta pesquisa de tese.

4.3.3.1 Análise para o Modelo Probabilístico na Compressão

Dois modelos probabilísticos foram construídos, de forma análoga aos passos apresentados no capítulo 4.3.1.2, a partir das resistências médias na compressão e com dois conjuntos amostrais, com $n = 30$ e $n = 12$ amostras. A síntese, dos dados adotados na construção destes modelos, é detalhada na Tabela 4.27, onde $f_{c0,k}^{MDP}$ é o modelo de melhor aderência estatística, ao admitir o maior valor- p .

ID	Espécies	$f_{c0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs	$f_{c0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs
		$(n = 30 \text{ amostras})$			$(n = 12 \text{ amostras})$		
4	Argelim-ferro	62,32	0,763	Lognormal	63,84	0,564	Lognormal
5	Argelim-pedra	41,93	0,590	Lognormal	43,20	0,840	Lognormal
14	Cambará	28,47	0,845	Normal	23,60	0,317	Normal
19	Casca-grossa	42,64	0,473	Lognormal	40,15	0,519	Lognormal
23	Cedro-amargo	28,57	0,259	Normal	27,11	0,659	Normal
29	Cupiúba	40,60	0,224	Lognormal	41,41	0,837	Lognormal
39	Ipê	54,75	0,293	Normal	53,07	0,892	Normal
40	Itaúba	58,27	0,557	Normal	59,09	0,447	Normal
42	Louro-preto	43,36	0,521	Normal	41,77	0,793	Lognormal
44	Maçaranduba	69,92	0,814	Normal	64,76	0,995	Normal

Tabela 4.27: Valores característicos de $f_{c0,k}^{MDP}$ (em MPa) com uso de um conjunto amostral de 30 e 12 amostras, respectivamente.

Uma vez elegidos os MDPs de melhor aderência, os modelos $f_{c0,k}^{Prob30}$ e $f_{c0,k}^{Prob12}$ foram obtidos para conjuntos amostrais distintos ($n = 30$ e $n = 12$), sendo expressos, respectivamente, pelas Equações 4.5 e 4.6.

$$f_{c0,k}^{Prob30} = 8,34 + 0,585 f_{c0} - 0,658 CV + 0,297 \text{ min} ; \quad (4.5)$$

$$f_{c0,k}^{Prob12} = 10,39 + 0,517 f_{c0} - 0,643 CV + 0,310 \text{ min} . \quad (4.6)$$

A partir destas equações, os valores característicos foram calculados (Tabela 4.28), para avaliar se há equivalência estatística entre os dois grupos.

ID	Espécies	$f_{c0,k}^{Prop30}$ (Equação 4.5)	$f_{c0,k}^{Prop12}$ (Equação 4.6)
4	Argelim-ferro	61,43	63,59
5	Argelim-pedra	41,16	42,68
14	Cambará	28,02	23,59
19	Casca-grossa	42,77	39,97
23	Cedro-amargo	28,81	27,65
29	Cupiúba	40,60	41,25
39	Ipê	56,11	54,47
40	Itaúba	58,12	59,02
42	Louro-preto	43,97	41,16
44	Maçaranduba	69,70	64,57

Tabela 4.28: Valores característicos $f_{c0,k}^{Prop30}$ e $f_{c0,k}^{Prop12}$ (em MPa) com uso dos modelos das Equações 4.5 e 4.6.

Portanto, ao confrontarmos estes dois grupos, via ANOVA, verifica-se a equivalência estatística, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.29.

Fonte	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{c0,k}^{Prop30}$ x $f_{c0,k}^{Prop12}$	1	8,09	8,092	0,04	0,842
Error	18	3551,26	197,292		
Total	19	3559,35			

GL : Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.29: Resultados da ANOVA para os dois grupos de valores característicos informados na Tabela 4.28.

Tais resultados reforçam que o uso de 12 amostras leva a resultados estatisticamente equivalentes a um conjunto suficientemente grande de 30 amostras, de modo a demonstrar que um número pequeno de amostras pode levar a resultados confiáveis do ponto de vista estatístico, para a resistência $f_{c0,k}^{Prop}$.

4.3.3.2 Análise para o Modelo Probabilístico na Tração

Do mesmo modo em que a resistência característica na compressão foi avaliada, dois modelos probabilísticos foram construídos a partir das resistências médias na tração, com os conjuntos de $n = 30$ e $n = 12$ amostras. Os dados são sintetizados na Tabela 4.30,

com $f_{t_0,k}^{MDP}$ escolhido a partir do maior valor- \mathbf{p} .

ID	Espécies	$f_{t_0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs	$f_{t_0,k}^{MDP}$	Valor- \mathbf{p}	MDPs
		$(n = 30 \text{ amostras})$			$(n = 12 \text{ amostras})$		
4	Argelim-ferro	63,98	0,658	Normal	77,27	0,718	Lognormal
5	Argelim-pedra	45,11	0,144	Lognormal	54,63	0,427	Lognormal
14	Cambará	33,33	0,896	Lognormal	36,41	0,316	Lognormal
19	Casca-grossa	87,05	0,901	Lognormal	95,28	0,933	Normal
23	Cedro-amargo	40,81	0,145	Lognormal	41,15	0,632	Lognormal
29	Cupiúba	41,77	0,054	Lognormal	46,70	0,512	Lognormal
39	Ipê	57,10	0,885	Lognormal	54,59	0,940	Lognormal
40	Itaúba	64,61	0,457	Normal	77,38	0,740	Normal
42	Louro-preto	50,39	0,467	Normal	40,13	0,305	Normal
44	Maçaranduba	97,92	0,157	Lognormal	92,59	0,033	Lognormal

Tabela 4.30: Valores característicos de $f_{t_0,k}^{MDP}$ (em MPa) com uso de um conjunto amostral de 30 e 12 amostras, respectivamente.

Novamente eleitos os MDPs de melhor aderência, os modelos $f_{t_0,k}^{Prob30}$ e $f_{t_0,k}^{Prob12}$ foram construídos para conjuntos amostrais distintos ($n = 30$ e $n = 12$), sendo expressos, respectivamente, pelas Equações 4.7 e 4.8. A partir delas, portanto, os valores característicos na tração foram calculados (Tabela 4.31), para avaliar se há equivalência estatística entre os dois grupos.

$$f_{t_0,k}^{Prob30} = 22,22 + 0,268 f_{t_0} - 0,608 CV + 0,494 \text{ min} ; \quad (4.7)$$

$$f_{t_0,k}^{Prob12} = 19,78 + 0,552 f_{t_0} - 0,869 CV + 0,176 \text{ min} . \quad (4.8)$$

ID	Espécies	$f_{t0,k}^{Prop30}$ (Equação 4.5)	$f_{t0,k}^{Prop12}$ (Equação 4.6)
4	Argelim-ferro	67,33	78,85
5	Argelim-pedra	42,73	55,09
14	Cambará	32,06	33,74
19	Casca-grossa	83,77	94,66
23	Cedro-amargo	43,39	41,07
29	Cupiúba	43,67	47,07
39	Ipê	55,97	54,19
40	Itaúba	63,63	76,36
42	Louro-preto	50,49	42,79
44	Maçaranduba	99,23	92,19

Tabela 4.31: Valores característicos $f_{t0,k}^{Prop30}$ e $f_{t0,k}^{Prop12}$ (em *MPa*) com uso dos modelos das Equações 4.5 e 4.6.

Por fim, a partir da ANOVA, verifica-se novamente a equivalência estatística para estes dois grupos, conforme dados da Tabela 4.32.

Fonte	<i>GL</i>	SQ_{adj}	QM_{adj}	Valor- F	Valor- p
$f_{t0,k}^{Prop30}$ x $f_{t0,k}^{Prop12}$	1	56,95	56,95	0,12	0,729
Error	18	8271,59	459,53		
Total	19	8328,55			

GL: Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.32: Resultados da ANOVA para os dois grupos de valores característicos informados na Tabela 4.31.

Analogamente ao que ocorreu para a resistência mecânica à compressão, na tração o uso de 12 amostras também levou a resultados estatisticamente equivalentes a um conjunto suficientemente grande de 30 amostras.

4.4 Proposta de Novas Classes de Resistência

Visando a elaboração de projetos de estruturas de madeira, a normativa brasileira ABNT NBR 7190 (1997) possibilita o uso de propriedades físico-mecânicas de acordo com a alocação por classes de resistência (CR) do material. Tal procedimento suprime a necessidade da identificação botânica da espécie, por meio de uma classificação simplificada,

o que contribui para elevar o uso de uma ampla variedade de madeiras com potencial estrutural, incluindo as 60 espécies aqui pesquisadas.

Uma vez que o correto enquadramento destas classes resulta no melhor aproveitamento do potencial mecânico das espécies, buscou-se avaliar a eficácia estatística na alocação da resistência $f_{c0,k}$ pela classificação da norma, diante de um enquadramento de valores característicos via modelo probabilístico aqui proposto.

Como exemplo de pesquisas com o mesmo objetivo de Jesus et al. (2015); Lima et al. (2018) e Cruz et al. (2021) estudaram a inclusão da classe C50 ($50 \leq f_{c0,k} \leq 59 MPa$) na categorização de espécies das folhosas.

Na sequência apresenta-se um estudo acerca de uma nova inclusão de classes, quando estimadas via novo modelo probabilístico, com o objetivo de melhor caracterizar a alocação por classes das espécies tropicais para fins estruturais no Brasil.

4.4.1 Valores Característicos segundo NBR 7190 (1997)

O conjunto amostral para a análise estatística das CR foram formados pelos resultados experimentais das 60 espécies estudadas. Os valores característicos de $f_{c0,k}$, apresentados na sessão 4.1.1 (Tabelas 4.5 e 4.6 – Partes I e II), foram calculados e alocados conforme classes e equação (Eq. 3.11) da ABNT NBR 7190 (1997).

A Tabela 4.33 apresenta 06 (seis) representantes para a classe de resistência C20, 07 (sete) para C30, 30 para C40 e 17 para C60.

CR	$f_{c0,k}$ (MPa)									
20	27,20	27,30	29,06	29,15	29,64	29,99				
30	30,11	35,30	35,60	36,37	37,71	38,50	38,93			
40	40,50	41,87	43,10	43,74	44,00	44,13	44,79	45,06	45,58	
	46,26	46,51	46,64	47,22	47,52	47,69	48,84	49,14	49,94	
	50,91	51,06	51,28	53,02	54,54	55,22				
	55,28	55,55	56,34	56,81	58,92	59,84				
60	60,21	61,53	61,60	62,41	63,38	65,36	67,44			
	72,34	72,37	72,73	75,46	78,40	79,57				
	80,51	89,96	93,02	96,16						

Tabela 4.33: Valores de $f_{c0,k}$ calculados e alocados conforme equações e as CRs da ABNT NBR 7190 (1997).

A fim de verificar o enquadramento destes valores característicos, realizou-se uma análise discriminante de observações como forma de prever a alocação de valores futuros a partir dos valores alocados conhecidos. Na Tabela 4.34 têm-se os resultados obtidos para o grupo de alocação (C20, C30, C40 e C60), frente ao grupo de alocação verdadeiro. É possível verificar que apenas os valores da classe C20 teve todos seus dados corretamente alocados. Em contrapartida, os dados alcançaram um percentual de alocações corretas iguais a 85,7%, 93,3% e 94,1%, respectivamente, para as classes C30, C40 e C60.

Alocado no Grupo	Grupo Verdadeiro			
	20	30	40	60
20	6	1	0	0
30	0	6	2	0
40	0	0	28	1
60	0	0	0	16
Total de N	6	7	30	17
N correto	6	6	28	16
Proporção	1,000	0,857	0,933	0,941

Tabela 4.34: Análise discriminante da classificação da ABNT NBR 7190 (1997).

Do total das 60 espécies estudadas, 56 tiveram uma alocação correta, ou seja 93,3% de alocação correta e 6,7% de valores incorretamente alocados, o que demonstra um indicativo acerca das deficiências no sistema de classificação atual proposto pela norma,

decorrentes da existência de valores característicos que apresentaram valores incompatíveis com a atual classificação.

Na Figura 4.18a observa-se a dispersão dos resultados contemplados em cada classe, segundo a norma brasileira. A classe C20, com valores inferiores a 30 *MPa*, apresentou proximidade de ocorrência e baixa dispersão de resultados, com pouca observância de valores próximos de 20 *MPa*.

Em contrapartida observa-se para a classe C40 uma amplitude de 40 a 59 *MPa* e distribuição simétrica de ocorrências com mediana de 48 *MPa* (Figura 4.18b). Para a classe C60 verifica-se uma amplitude amostral da ordem 60 a 96 *MPa* e distribuição assimétrica de tendência central de 72 *MPa*, valores estes que denotam que a classificação da norma resultam em valores medianos dos intervalos situados em limites elevados em todas as classes, sendo ≈ 29 *MPa* para C20, ≈ 37 *MPa* para C30, ≈ 48 *MPa* para C40 e ≈ 72 *MPa* para C60 (Figura 4.18b).

Por fim, na Figura 4.18c observa-se ainda uma amplitude de valores alocados na classe C30 de 35 a 39 *MPa*, com mediana de ≈ 37 *MPa* e um *outlier* interferindo na correta alocação da espécie 14-Cambará.

Tal questão reforça a necessidade da atualização das CRs, uma vez que um percentual expressivo de ocorrências está situada em regiões superiores às limitantes inferiores das classes atuais. Desta forma, valores do intervalo de 50 a 60 *MPa* e 70 a 100 *MPa* são frequentes e limitados por 40 e 60 *MPa*, respectivamente.

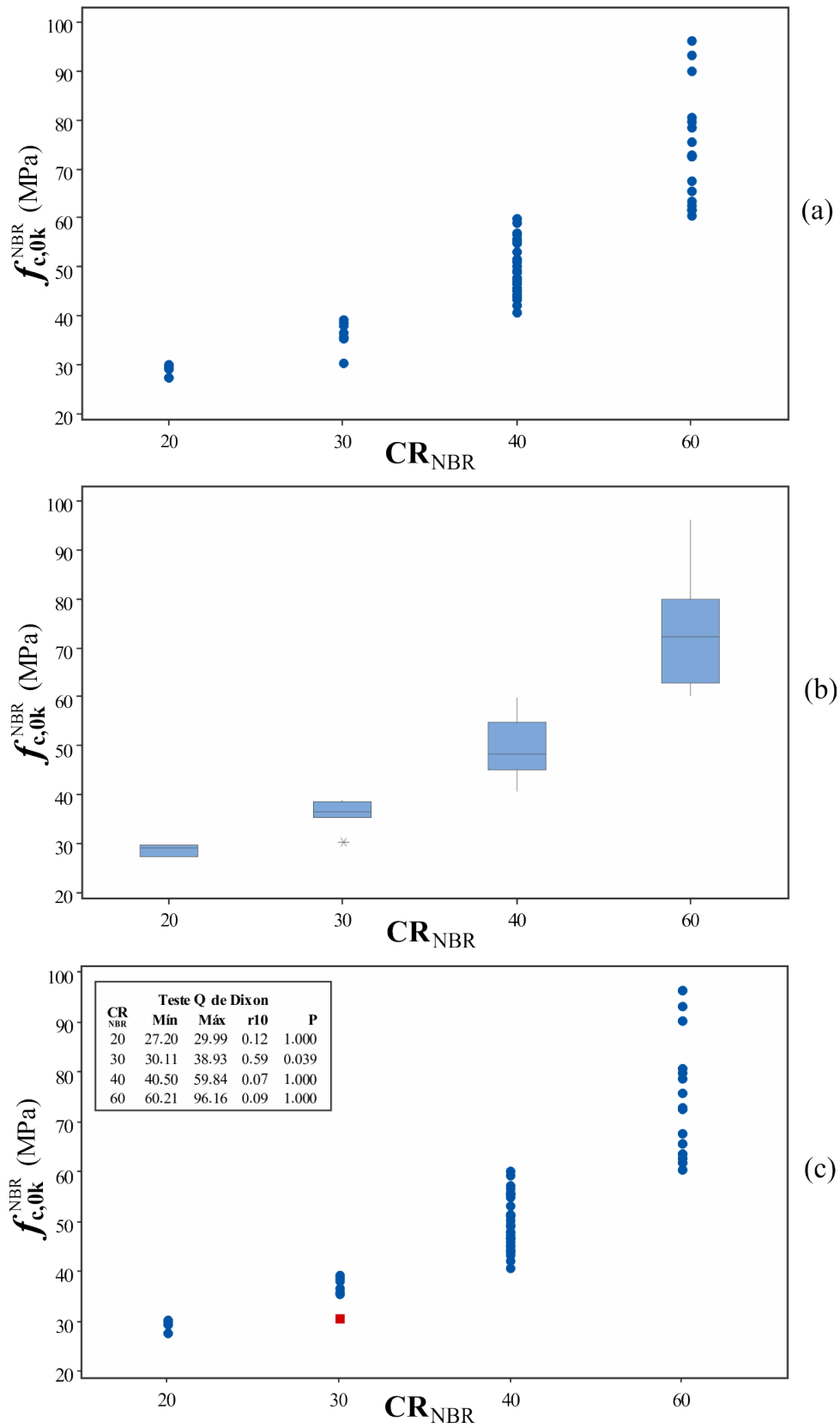


Figura 4.18: Comportamento da atual classificação da norma: gráfico de valores individuais (a); boxplot de $f_{c,0,k}$ (b) e Teste Q de Dixon (c).

Considerando que os valores característicos são representativos das propriedades

de interesse da madeira, com baixa probabilidade de não serem atingidos (5%) decorrente do processo de análise, a classificação pelo processo atual da norma tem subestimado o potencial mecânico de diversas espécies de madeira, o que reforça a relevância para a proposição de novas classes adicionais (C50 e C70) para mitigar esta subestimação e potencializar o uso racional deste material para fins estruturais.

Neste sentido, ao repetirmos a análise discriminante, com inclusão das novas classes C50 e C70, observam-se 12 valores de $f_{c0,k}$ entre 50 a 60 *MPa* e 10 valores superiores a 70 *MPa*, conforme dados da Tabela 4.35. Estas 22 observações não seriam adequadamente representadas pelo atual sistema da norma brasileira, que limitaria tais resistências a 40 e 60 *MPa*, respectivamente, de modo a acarretar em 37% de alocações subestimadas, dentre as 60 espécies aqui estudadas.

Alocado no Grupo	Grupo Verdadeiro					
	20	30	40	50	60	70
20	6	1	0	0	0	0
30	0	6	1	0	0	0
40	0	0	17	0	0	0
50	0	0	0	11	0	0
60	0	0	0	1	7	0
70	0	0	0	0	0	10
Total de N	6	7	18	12	7	10
N correto	6	6	17	11	7	10
Proporção	1,000	0,857	0,944	0,917	1,000	1,000

Tabela 4.35: Análise discriminante para uma nova classificação entre classes.

É relevante destacar uma melhora na estimativa estatística de classificação, ou seja, do total das 60 espécies, 57 tiveram uma alocação correta, com 95,0% de alocação correta, frente a 93,3% de alocação correta da primeira análise (Tabela 4.34). Contudo, a simples inclusão de duas novas CRs não evitou a obtenção de 85,7%, 94,4% e 91,7%, respectivamente, para as classes C30, C40 e C50, com uma alocação 100% correta apenas para as classes C20 e C70.

Portanto, como forma de buscar alocações corretas e de reforçar a assertividade

na obtenção das resistências estimadas via modelo probabilístico, na sequência tem-se a associação do estudo para novas CRs, em conjunto com as estimativas de $f_{c0,k}$ obtidas via modelo proposto neste trabalho.

4.4.2 Classes de Resistência via Modelo Probabilístico

Buscou-se, como objetivo final desta tese, avaliar a verossimilhança na distribuição das CR via ANOVA, a fim de propor uma nova distribuição para melhor alocar os valores de $f_{c0,k}$, parâmetro central para o dimensionamento de estruturas de madeira. Tais alocações foram construídas a partir do conjunto de valores característicos obtidos pelo modelo probabilístico aqui proposto.

O conjunto amostral para a análise estatística das CRs foram formados pelos resultados experimentais das 60 espécies presentes nesta tese, com $f_{c0,k}$ obtidos pelo modelo probabilístico elucidado pela equação 4.2 (3ª coluna da Tabela 4.20) e alocados para um novo conjunto de classificação de resistência.

A Tabela 4.36 traz 07 (sete) representantes para a classe C20, 08 (oito) para C30, 20 para C40, 12 para C50, 07 (sete) para C60 e 06 (seis) para C70, com agrupamentos em ordem crescente para uma melhor visualização.

CR	$f_{c0,k}$ (MPa)										
20	21,90	22,45	25,64	26,17	26,41	27,73	28,21				
30	32,12	33,69	34,91	36,32	37,75	37,91	38,20	39,69			
40	40,17	40,77	40,90	41,06	41,26	41,77	42,05	42,39	42,79	42,91	
	43,26	43,79	44,49	44,56	44,63	45,61	46,85	48,09	49,03	49,26	
50	50,30	51,05	53,35	53,45	53,46	54,61					
	55,24	55,56	56,26	56,84	58,11	59,01					
60	60,74	61,17	64,03	64,40	65,44	66,91	68,52				
70	72,77	72,80	78,49	79,90	82,19	82,60					

Tabela 4.36: Valores de $f_{c0,k}$ obtidos via modelo probabilístico proposto (Eq. 4.2) e alocados segundo novas CRs propostas.

Adotando a mesma estratégia para enquadramento destes valores característicos, realizou-se uma análise discriminante de observações como forma de prever a alocação

de valores futuros a partir dos valores alocados conhecidos. Na Tabela 4.37 têm-se os resultados obtidos para os possíveis grupo de alocação (C20, C30, C40, C50, C60 e C70), frente ao grupo verdadeiro de alocação.

Alocado no Grupo	Grupo Verdadeiro					
	20	30	40	50	60	70
20	7	0	0	0	0	0
30	0	8	0	0	0	0
40	0	0	20	0	0	0
50	0	0	0	12	0	0
60	0	0	0	0	7	0
70	0	0	0	0	0	6
Total de N	7	8	20	12	7	6
N correto	7	8	20	12	7	6
Proporção	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 4.37: Análise discriminante para novas CRs e valores característicos obtidos via modelo probabilístico.

Verificou-se que todas as CRs tiveram seus dados corretamente alocados. Do total das 60 espécies estudadas todas tiveram a alocação correta, o que demonstra ótima eficiência do novo sistema de classificação, quando usado em conjunto com os valores característicos via modelo probabilístico proposto nesta tese.

A título comparativo, a Figura 4.19 confronta o sistema de classificação atual, com 4 (quatro) CRs e $f_{c0,k}^{NBR}$ via norma brasileira, frente a proposta com 6 (seis) CRs e valores característicos advindos do modelo probabilístico, $f_{c0,k}^{Prob}$.

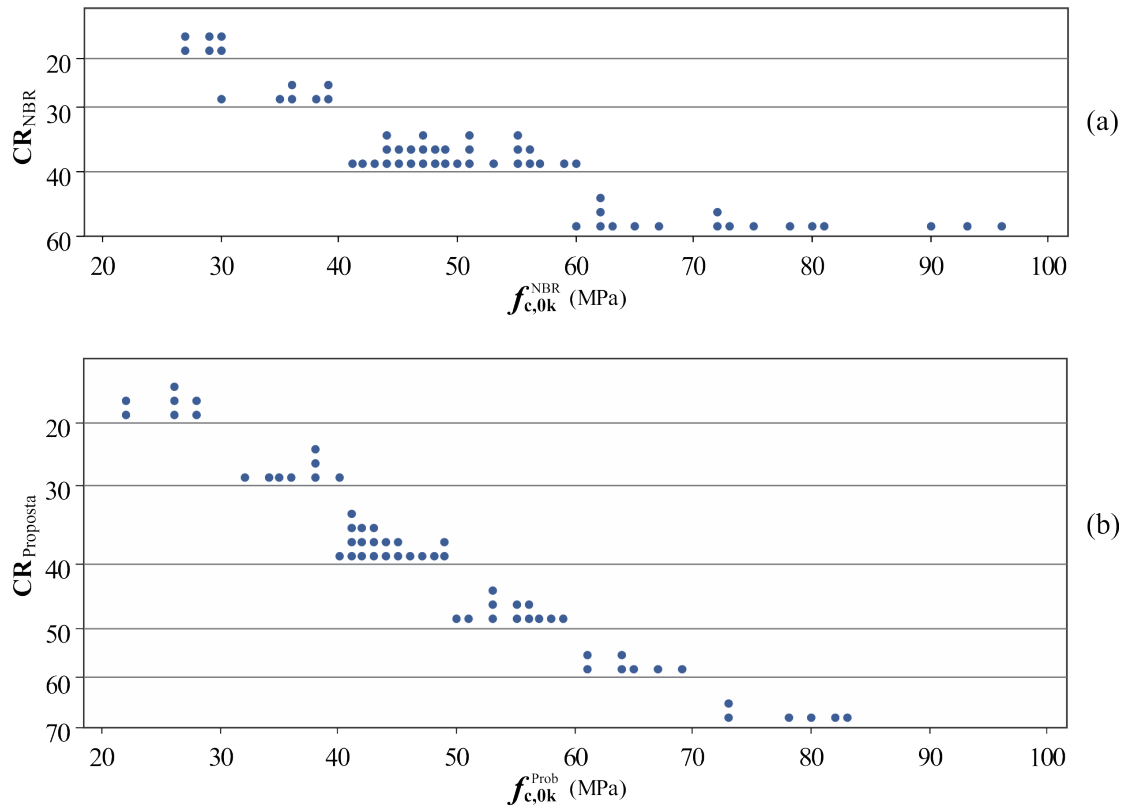


Figura 4.19: Diagrama de pontos alocados em classes de resistência: (a) classificação atual da norma ($f_{c0,k}^{NBR}$) e (b) classificação proposta nesta tese ($f_{c0,k}^{Prob}$).

Ao comparar tais diagramas é relevante destacar uma distribuição mais homogênea dos valores característicos entre classes, antes alocados numa tendência assimétrica superior, com medianas situadas em limites elevados em todas as classes. Assim, espécies de baixa resistência passaram a ser melhor alocadas (C20), assim como espécies de elevada resistência (superiores a 90 MPa) passaram a compor um intervalo próximo a 80 MPa e, portanto, a favor da segurança estrutural.

A Figura 4.20 retrata, por sua vez, o comportamento dos dados obtidos após a classificação proposta, em conjunto com os valores característicos advindos do modelo probabilístico ($f_{c0,k}^{Prob}$). Notam-se que todas as classes apresentam proximidade de ocorrência e baixa dispersão de resultados amostrais (Figura 4.19a).

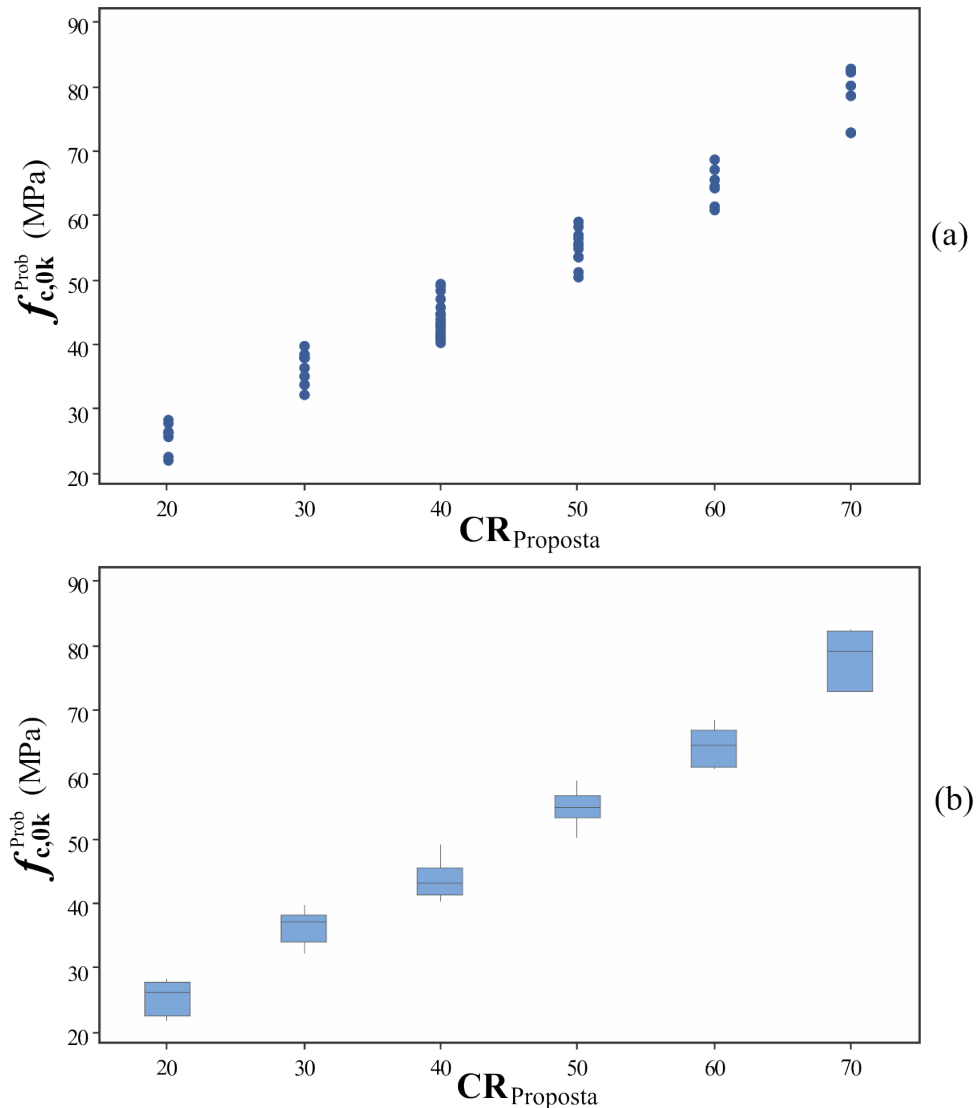


Figura 4.20: Comportamento da nova classificação proposta: gráfico de valores individuais (a) e boxplot de $f_{c0,k}^{Prob}$ (b).

Destacam-se distribuições simétricas de ocorrências em todo o intervalo, com tendência central da ordem de $\approx 43 MPa$, $\approx 55 MPa$ e $\approx 64 MPa$, respectivamente, para C40, C50 e C60. Para as classes C20, C30 e C70 observa-se leve tendência assimétrica superior, com medianas iguais a $\approx 26 MPa$, $\approx 37 MPa$ e $\approx 79 MPa$, respectivamente (Figura 4.19b). Tais observações são diferentes daquelas destacadas na análise do sistema da norma, cujos valores médios e medianos situaram-se em limites elevados em todas as classes. Destaca-se, por fim, a inexistência de *outliers*, observados na análise de $f_{c0,k}^{NBR}$ advindos do equacionamento da norma brasileira.

Para validar a proposta de classificação, faz-se necessário avaliar o efeito signifi-

tivo para os dados analisados. Para tanto, procedeu-se uma análise de variância (ANOVA) usando o fator $\mathbf{CR}_{Proposta}$ (Tabela 4.38), em conjunto com as comparações emparelhadas de *Tukey* (Tabela 4.39).

Fator	GL	SQ_{adj}	QM_{adj}	valor- F	Valor- p
$CR_{Proposta}$	5	12851,6	2570,33	309,36	0,000
Error	54	448,7	8,31		
Total	59	13300,3			

DF : Graus de Liberdade; SQ_{adj} : soma de quadrados; QM_{adj} : quadrados médios.

Tabela 4.38: Resultados da ANOVA para o fator $\mathbf{CR}_{Proposta}$.

$\mathbf{CR}_{Proposta}$	N	Média	DP	95% IC	Grupos
70	6	78,13	4,40	(75,77; 80,49)	A
60	7	64,46	2,84	(62,27; 66,64)	B
50	12	54,77	2,63	(53,10; 56,44)	C
40	20	43,78	2,77	(42,49; 45,07)	D
30	8	36,32	2,57	(34,28; 38,37)	E
20	7	25,50	2,45	(23,32; 27,69)	F

Tabela 4.39: Comparação de *Tukey* para $\mathbf{CR}_{Proposta}$.

Os resultados da ANOVA resultaram em um valor- p inferior ao nível de significância de 5%, mostrando que a hipótese nula (igualdade de classes) pode ser rejeitada. Em adição, o uso do emparelhamento de *Tukey* possibilitou identificar as classes de resistência distintas, cujo efeito de classificação se mostrou significativo. Observando os resultados obtidos, se verifica que a proposta de classificação mostrou bons resultados e aplicabilidade para todas as classes, de forma a melhor representar o comportamento estatístico dos dados analisados.

Por fim, para confirmar as premissas de análise e tratamento dos dados para a ANOVA, devem ser verificadas a normalidade dos dados, equivalência de variâncias, independência e normalidade dos resíduos.

Na Figura 4.21 pode-se verificar a normalidade da distribuição, que resultou em um valor- $p=0,168$ (maior que o nível de significância de 5%), além da estatística de

Anderson-Darling de 0,531. Como a hipótese nula é de normalidade da distribuição dos resíduos, não há motivos estatísticos para que fosse desconsiderado tal hipótese e, por isso, não há necessidade de transformação dos dados.

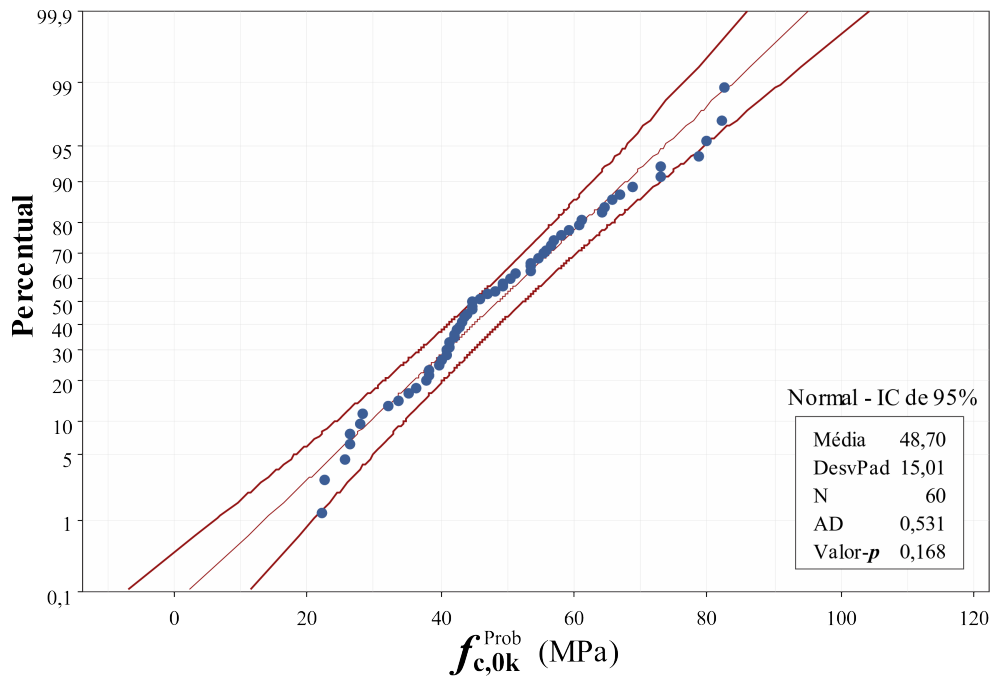


Figura 4.21: Verificação da normalidade da distribuição dos dados.

Já a igualdade de variâncias foi verificada analisando os intervalos de confiança para os desvios padrão ao nível de 95%, tendo como hipótese nula a igualdade de variâncias e alternativa a diferença de ao menos uma variância (Figura 4.22). Com um valor-*p* = 0,663, obtido para as comparações múltiplas, e um valor-*p* = 0,625, para o método de *Levene*, pode-se aceitar a hipótese nula.

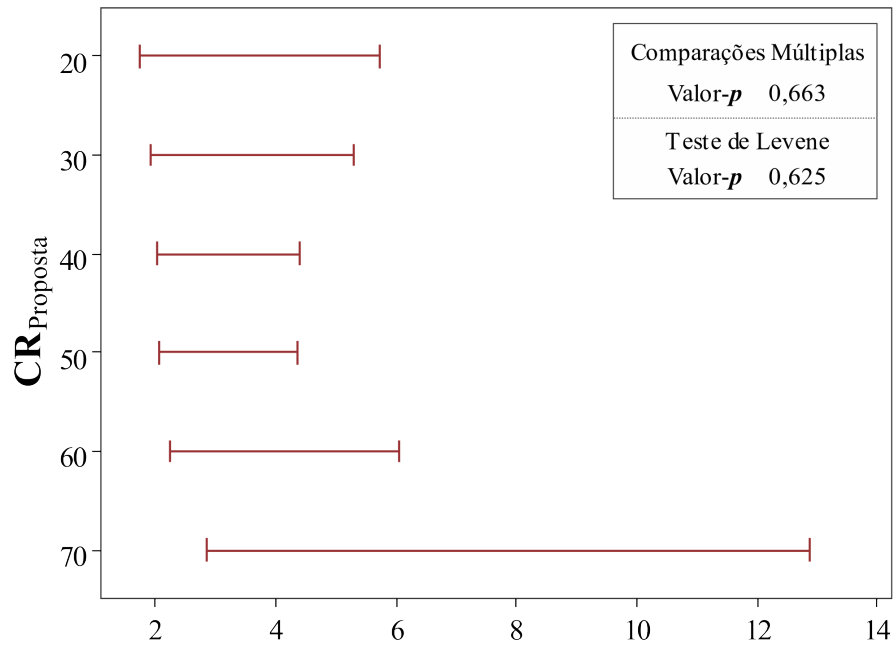


Figura 4.22: Verificação da homogeneidade ou equivalência das variâncias das CRs utilizadas na ANOVA.

Verificou-se a independência dos resíduos via gráfico resíduos *versus* ordem resultante da ANOVA, conforme a Figura 4.23. Não é possível observar nenhuma tendência dos resíduos e os valores foram alocados de modo aleatório sobre o gráfico, o que configura independência dos resíduos.

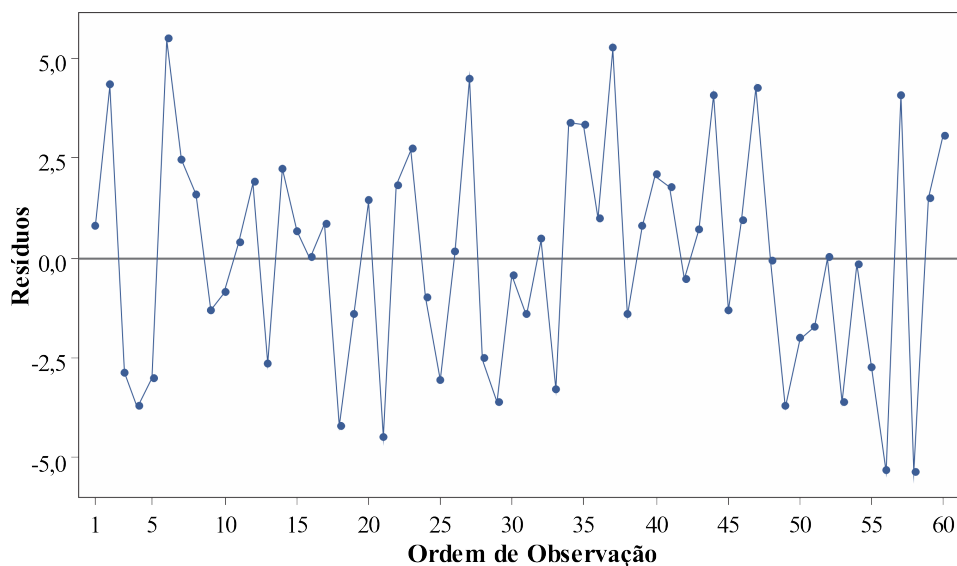


Figura 4.23: Verificação da premissa de independência dos resíduos da ANOVA.

Uma vez validadas as análises, tem-se nas Tabelas 4.40 e 4.41 (Partes I e II), a nova alocação entre classes de resistência, sendo C20 ($f_{c0,k} \leq 29 \text{ MPa}$), C30 ($30 \text{ MPa} \leq$

$f_{c0,k} \leq 39 \text{ MPa}$), C40 ($40 \text{ MPa} \leq f_{c0,k} \leq 49 \text{ MPa}$), C50 ($50 \text{ MPa} \leq f_{c0,k} \leq 59 \text{ MPa}$), C60 ($60 \text{ MPa} \leq f_{c0,k} \leq 69 \text{ MPa}$) e C70 ($f_{c0,k} \geq 70 \text{ MPa}$), cujos valores característicos são oriundos do modelo probabilístico proposto nesta tese.

ID	Espécies	$f_{c0,1}$ (Mínimo)	f_{c0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{c0,k}$ (Característico) ¹	CR
1	Abiú	41,00	56,00	44,40	48,84	C40
2	Argelim-amargoso	47,00	60,17	43,20	47,52	C40
3	Argelim-araroba	40,40	50,17	40,00	44,00	C40
4	Argelim-ferro	53,00	79,71	61,31	67,44	C60
5	Argelim-pedra	39,00	57,18	42,06	46,26	C40
6	Argelim-saia	47,30	63,11	46,42	51,06	C40
7	Argelim-vermelho	66,30	77,53	66,12	72,73	C60
8	Angico-branco	35,23	44,35	38,06	41,87	C40
9	Angico-preto	54,30	72,52	50,50	55,55	C40
10	Branquilha	43,00	48,47	41,44	45,58	C40
11	Breu-vermelho	60,43	87,42	72,33	79,57	C60
12	Cafearana	34,10	57,58	36,82	40,50	C40
13	Caixeta	31,52	34,25	32,37	35,60	C30
14	Cambará	26,88	41,68	27,37	30,11	C30
15	Cambará-rosa	27,30	34,48	23,84	27,30	C20
16	Canafístula	34,90	51,96	28,94	36,37	C30
17	Canelão	44,32	52,50	42,28	46,51	C40
18	Cajueiro	28,87	39,71	32,09	35,30	C30
19	Casca-grossa	42,80	59,14	43,36	47,69	C40
20	Castanheira	37,75	48,17	35,39	38,93	C30
21	Castelo	50,30	54,80	49,58	54,54	C40
22	Catanudo	45,60	50,58	46,28	50,91	C40
23	Cedro-amargo*	28,00	38,75	26,95	29,64	C20
24	Cedro-amazonense	42,00	46,33	46,33	46,64	C40
25	Cedro-doce	27,00	31,48	27,26	29,99	C20
26	Cedrorana	27,10	41,52	22,58	29,06	C20
27	Champagne	84,90	92,33	87,42	96,16	C60
28	Copaíba	41,70	50,21	40,12	44,13	C40
29	Cupiúba	30,80	52,83	34,29	37,71	C30
30	Cutiúba	50,50	78,97	49,88	55,28	C40

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{c0,1}), (0,70 \cdot f_{c0}) \text{ e } (z_b \cdot 1,10)\}$

Tabela 4.40: Nova classificação para os valores característicos de $f_{c0,k}^{Prob}$ (MPa), a partir do modelo probabilístico desta tese - Parte I.

ID	Espécies	$f_{c0,1}$ (Mínimo)	f_{c0} (Médio)	z_b (Eq. 3.10)	$f_{c0,k}$ (Característico) ¹	CR
31	Embireira	35,00	38,50	35,00	38,50	C30
32	Envira	54,20	66,60	54,74	60,21	C60
33	Garapa	61,40	74,03	59,42	65,36	C60
34	Goiabão	40,90	48,46	39,18	43,10	C40
35	Guaçara	58,10	71,41	53,56	58,92	C40
36	Guajará	72,37	74,94	65,79	72,37	C60
37	Guanandi	47,00	59,19	45,40	49,94	C40
38	Guarucaia	53,30	62,38	51,22	56,34	C40
39	Ipê	49,90	74,42	51,64	56,81	C40
40	Itaúba	53,00	67,78	57,61	63,38	C60
41	Jatobá	79,60	93,27	81,78	89,96	C60
42	Louro-preto	40,00	56,76	42,93	47,22	C40
43	Louro-verde	45,07	52,95	44,67	49,14	C40
44	Maçaranduba	64,00	83,64	71,27	78,40	C60
45	Mandioqueira	53,70	69,17	55,94	61,53	C60
46	Marupá	23,00	30,35	26,50	29,15	C20
47	Oiticica-amar.	58,00	70,33	56,74	62,41	C60
48	Oiuchu	65,00	77,35	65,76	72,34	C60
49	Parinari	47,30	60,56	50,20	55,22	C40
50	Pau-óleo	43,70	53,34	40,96	45,06	C40
51	Piolho	39,80	61,88	39,76	43,74	C40
52	Quaruba-rosinha	45,00	58,25	48,20	53,02	C40
53	Quarubarana	27,20	37,83	23,58	27,20	C20
54	Quina-rosa	55,00	59,17	56,00	61,60	C60
55	Rabo-de-arraia	43,80	57,58	40,72	44,79	C40
56	Roxinho	75,75	82,83	73,19	80,51	C60
57	Sucupira	85,00	94,53	84,56	93,02	C60
58	Tachi	72,90	87,75	68,60	75,46	C60
59	Tatajuba	45,20	80,16	54,40	59,84	C40
60	Umirana	46,60	53,27	46,62	51,28	C40

¹ Máximo valor entre: $\{(f_{c0,1}), (0,70 \cdot f_{c0}) \text{ e } (z_b \cdot 1,10)\}$

Tabela 4.41: Nova classificação para os valores característicos de $f_{c0,k}^{Prob}$ (MPa), a partir do modelo probabilístico desta tese - Parte II.

Por fim, a Figura 4.24 apresenta a relação entre o coeficiente de variação obtido em cada amostra com os valores de $f_{c0,k}^{Prob}$, com destaque aos pontos conforme as classes de resistência aqui propostas.

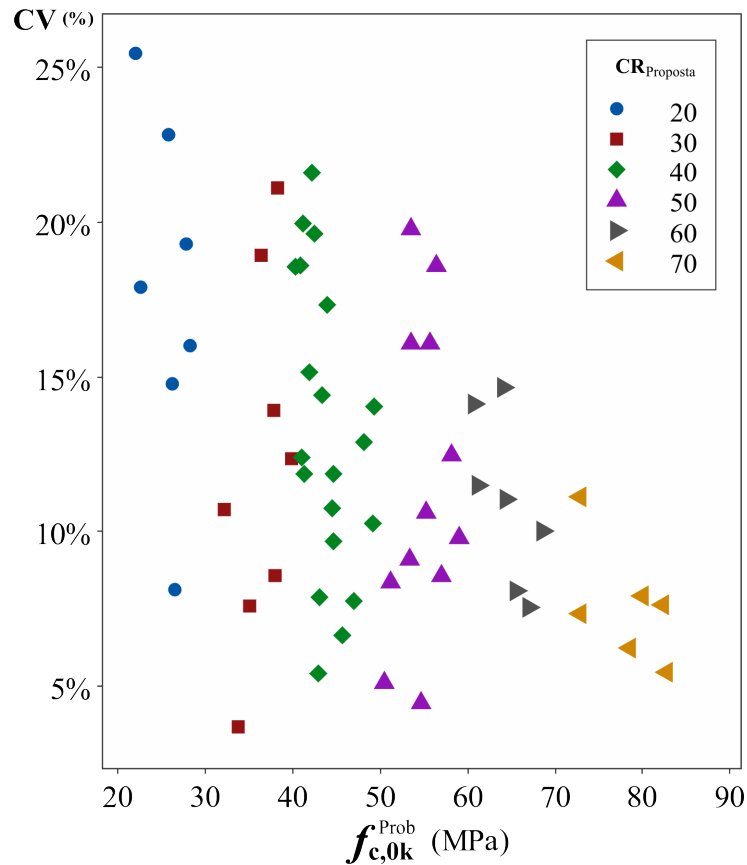


Figura 4.24: Dispersão dos coeficientes de variação em função da resistência $f_{c,0k}^{Prob}$.

Observa-se que os valores de $CV\%$ ficaram predominantemente situados no intervalo de 5% a 18%, indicando uma adequabilidade das determinações experimentais realizadas. Além disto, conforme o aumento da resistência característica se observa uma menor dispersão dos resultados. Este fato possivelmente está associado a densificação das fibras, o que causa uma tendência de uniformização dos resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Desta forma, os valores obtidos para o coeficiente de variação validam a representatividade das determinações de $f_{c,0k}^{Prob}$, reforçando a existência de um melhor enquadramento, entre classes, via valores característicos advindos do modelo probabilístico aqui proposto, em conjunto com a proposta de inserção das novas classes de resistência, C50 e C70.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

A norma brasileira ABNT NBR 7190 (1997) foi avaliada frente a distintos modelos de regressão, a fim de validar seus equacionamentos simplificados quanto a seu seguro emprego no dimensionamento de estruturas de madeira. Tais modelos foram propostos de modo alternativo a obtenção dos parâmetros mecânicos de resistência e rigidez para compressão e tração, relacionando-os entre si com equações de confiabilidade estatística superiores a 60%, demonstrado pelos coeficientes de determinação obtidos.

Com o uso de funções densidade de distribuição de probabilidades, foi possível estimar os valores característicos para os esforços normais, de compressão e tração paralelos às fibras, para um conjunto de 60 espécies de madeiras tropicais, elegendo o modelo probabilístico de melhor aderência estatística. O conjunto formado pelos valores característicos de cada espécie foi relacionado com um modelo de regressão linear multivariável, fundamentado na ANOVA, resultando em equacionamentos estatisticamente significativos no que condiz a estimativa e a confiabilidade destas propriedades mecânicas.

Cabe destacar que os equacionamentos visando a obtenção dos valores característicos – compressão e tração na direção paralela às fibras – foram obtidos para um amplo conjunto de espécies tropicais, cujos valores possibilitaram a determinação dos modelos probabilísticos com significativa confiabilidade estatística, dados os coeficientes de determinação superiores a 99% de significância.

Em adição, o modelo para compressão característica mostrou-se eficaz na avaliação

de uma nova categorização de classes de resistência, com resultados importantes para inclusão das classes C50 e C70, a fim de obter uma melhor alocação entre classes e, por consequência, não incorrer no subemprego das 60 espécies avaliadas, muitas vezes alocadas em faixa inferiores de resistência. A norma ABNT NBR 7190 (1997) não considerava tais classes e, após sua versão recentemente revisada (ABNT NBR 7190-1, 2022), passou a considerar a classe C50, sem, contudo, considerar a classe C70, o que pode resultar numa alocação incorreta de espécies de elevada resistência mecânica, assim como discutido ao longo dos resultados desta tese.

Os modelos probabilísticos propostos e a nova classificação de classes de resistência, portanto, são estudos a serem considerados em uma futura revisão das normas ABNT NBR 7190-1 (2022), ABNT NBR 7190-2 (2022), ABNT NBR 7190-3 (2022) e ABNT NBR 7190-4 (2022), uma vez que tais conclusões possuem um elevado potencial de aplicação para fins de dimensionamento de estruturas de madeira, tendo em vista o grande número de espécies tropicais aqui pesquisadas, pautados em resultados estatisticamente confiáveis.

Referências Bibliográficas

ABNT NBR 10520, (2002), NBR 10520 – Informação e documentação – Apresentação de citações em documentos, Rio de Janeiro, p. 7. Citado na página 24.

ABNT NBR 14724, (2011), NBR 14724 – Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação, Rio de Janeiro, p. 11. Citado na página 24.

ABNT NBR 6023, (2002), NBR 6023 – Informação e documentação – Referências – Elaboração, Rio de Janeiro, p. 24. Citado na página 24.

ABNT NBR 7190, (1997), NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, p. 107. Citado 29 vezes nas páginas 8, 10, 12, 13, 16, 21, 22, 23, 26, 29, 33, 34, 36, 39, 41, 46, 47, 66, 72, 75, 84, 87, 96, 104, 105, 106, 120, 121 e 131.

ABNT NBR 7190-1, (2022), NBR 7190-1 – Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento, Rio de Janeiro, p. 81. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 121.

ABNT NBR 7190-2, (2022), NBR 7190-2 – Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira, Rio de Janeiro, p. 15. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 121.

ABNT NBR 7190-3, (2022), NBR 7190-3 – Projeto de estruturas de madeira - Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas, Rio de Janeiro, p. 36. Citado 4 vezes nas páginas 21, 39, 75 e 121.

- ABNT NBR 7190-4, (2022), NBR 7190-4 – Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais, Rio de Janeiro, p. 19. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 121.
- ABNT NBR 7190-5, (2022), NBR 7190-5 – Parte 5: Métodos de ensaio para determinação da resistência e da rigidez de ligações com conectores mecânicos, Rio de Janeiro, p. 7. Citado na página 21.
- ABNT NBR 7190-6, (2022), NBR 7190-6 – Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural, Rio de Janeiro, p. 18. Citado na página 21.
- ABNT NBR 7190-7, (2022), NBR 7190-7 – Parte 7: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural, Rio de Janeiro, p. 27. Citado na página 21.
- Almeida, D. H., Scaliante, R. M., Christoforo, A. L., Varanda, L. D., Rocco, F. A. L., Dias, A. A. e Calil Jr., C., 2014. ‘Tenacidade da madeira como função da densidade aparente’. *Revista Árvore*, vol. 38, pp. 203–207. Citado na página 32.
- Almeida, T. H., Almeida, D. H., Christoforo, A. L., Chahud, E., Branco, L. A. M. N. e Lahr, F. A. R., 2016. ‘Density as estimator of strength in compression parallel to the grain in wood’. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 6, pp. 67–71. Citado na página 32.
- Almeida, T. H., Almeida, D. H., de Araujo, V. A., da Silva, S. A. M., Christoforo, A. L. e Lahr, F. A. R., 2017. ‘Density as estimator of dimensional stability quantities of brazilian tropical woods’. *BioResources*, vol. 12(3), pp. 6579–6590. Citado na página 31.
- Andrade Jr., J. R., Almeida, D. H., Almeida, T. H., Christoforo, A. L., Stamato, G. C. e Lahr, F. A. R., 2014. ‘Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoque de produtos químicos’. *Ambiente Construído*, vol. 14(3), pp. 75–85.
- URL:** <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000300006> Citado na página 21.

Aquino, V. B. M., Almeida, J. P. B., Almeida, D. H., Almeida, T. H., Panzera, T. H., Christoforo, A. L. e Lahr, F. A. R., 2018. ‘Physical and mechanical characterization of copaifera sp. wood specie’. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 8(3), pp. 55–58.

URL: <http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20180803.03> Citado na página 66.

Araujo, V., Cortez-Barbosa, J., Gava, M., Garcia, J., Souza, A., Savi, A., Morales, E., Molina, E., Vasconcelos, J., Christoforo, A. e Lahr, F., 2016. ‘Classification of wooden housing building systems’. *BioResources*, vol. 11(3), pp. 7889–7901.

URL: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.3> Citado na página 20.

Araujo, V., Vasconcelos, J., Morales, E., Savi, A., Hindman, D., OBrien, M., Negrão, J., Christoforo, A., Lahr, F., Cortez-Barbosa, J., Gava, M. e Garcia, J., 2018. ‘Difficulties of wooden housing production sector in brazil’. *Wood Material Science and Engineering*, pp. 1–10.

URL: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2018.1484513> Citado na página 20.

Aria, M. e Cuccurullo, C., 2017. ‘Bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis’. *Journal of Informetrics*, vol. 11(4). Citado na página 25.

Backes, P. e Irgang, B., 2009. *Árvores do Sul: Guia de Identificação e Interesse Ecológico*. 2ª edn, Paisagens do Sul Editora. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

Baldam, R., 2020. ‘Science mapping (bibliometria) with r studio bibliometrix and international indexes’. *UFES: Vitória*, pp. 959–975.

URL: <http://cope.ufes.br> Citado na página 25.

Barbetta, P. A., Reis, M. M. e Bornia, A. C., eds, 2010. *Estatística para cursos de engenharia e informática*. 3ª edn, Atlas. Citado 4 vezes nas páginas 39, 53, 56 e 57.

Beech, E., Rivers, M., Oldfield, S. e Smith, P., 2017. ‘Globaltreesearch - the first complete global database of tree species and country distributions’. *Journal of Sustainable*

Forestry, vol. 36, pp. 454–489.

URL: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0856> Citado na página 20.

Boff, A., Wolenski, A., Peixoto, R., Christoforo, A. e Lahr, F., 2020. ‘Relações entre propriedades de rigidez para distintas solicitações mecânicas visando projetos de estruturas de madeira’. *Revista Ambiente Construído*, vol. 20(2), pp. 25–35.

URL: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200385> Citado na página 73.

Brancheriau, L., Bailleres, H. e Guitard, D., 2002. ‘Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples’. *Wood Science and Technology*, vol. 36, pp. 367–383.

URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-002-0147-3> Citado na página 32.

CAPEs, 2018, *Portal de Buscas por Periódicos da CAPEs - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*.

URL: <http://www.periodicos.capes.gov.br/> Citado na página 25.

Carreira, M., Segundinho, P., Lahr, F., Dias, A. e Calil Jr., C., 2012. ‘Bending stiffness evaluation of teca and guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration’. *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 34(1), pp. 27–32. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.

Cavalheiro, R. S., Almeida, D. H., Almeida, T. H., Christoforo, A. L. e Lahr, F. A. R., 2016. ‘Density as estimator of shrinkage for some brazilian wood species’. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 6, pp. 107–112. Citado na página 31.

Chowdhury, Q., Khan, R. e Mehedi, A. H., 2013. ‘Wood density variation in four plantation species growing in bangladesh’. *Journal Indian Academic Wood Science*, vol. 10, pp. 32–38.

URL: <https://doi.org/10.1007/s13196-013-0090-y> Citado na página 32.

- Christoforo, A., Filho, S., Wolenski, A., Monteiro, A., Lahr, F. e Demarzo, M., 2012. 'Determinação do módulo de elasticidade em vigas estruturais de madeira pelo método dos mínimos quadrados'. *Revista Vértices*, vol. 14(2). Citado na página 55.
- Christoforo, A. L., Almeida, T. H., Almeida, D. H., Santos, J., Panzera, T. H. e Lahr, F. A. R., 2016. 'Shrinkage for some wood species estimated by density'. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 6, pp. 23–27. Citado na página 31.
- Christoforo, A. L., Arroyo, F. N., Silva, D. A. L., Panzera, T. H. e Lahr, F. A. R., 2017. 'Full characterization of calycophyllum multiflorum wood specie'. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, vol. 37(4), pp. 637–643.
URL: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p637-643/2017> Citado na página 66.
- Christoforo, A. L., Silva, S. A. M., Panzera, T. H. e Rocco, F. A. L., 2014. 'Estimative of wooden toughness by the apparent density and bending strength'. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 4, pp. 49–55. Citado na página 29.
- Christoforo, A., Wolenski, A., Panzera, T., Filho, P. L. e Batista, F., 2011. 'Verificação da validade sobre a hipótese de pequenos deslocamentos em vigas de madeira do gênero eucalyptus'. *Revista Biometria*, vol. 29(1). Citado na página 55.
- Cruz, R., Santos, L., Mascia, N. e Silva, M., 2021. 'Análise de parâmetro normalizado para projeto de estruturas de madeira considerando a confiabilidade estrutural'. *Ambiente Construído*, vol. 21(2), pp. 277–294.
URL: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200526> Citado na página 105.
- da Silva, F., Higuchi, N., Nascimento, C. C., Matos, J. L. M., de Paula, E. V. C. M. e dos Santos, J., 2014. 'Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood'. *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 26(1), pp. 69–74. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

- de Andrade, C. M. S., Salman, A. K. D. e de Oliveira, T. K., eds, 2012. *Guia Arbopasto: Manual de Identificação e Seleção de Espécies Arbóreas para Sistemas Silvopastoris*. 1^a edn, Embrapa. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- de Freitas, A. R., 1978. *Probabilistic Approach in the Design of Wood Structures in Brasil based on the Variability de 23 species*. Instituto de Pesquisa Tecnológica, São Paulo, Brasil. Citado na página 47.
- de Jesus, J., Logsdon, N. e Finger, Z., 2015. ‘Classes de resistência de algumas madeiras de mato grosso’. *Engineering and Science*, vol. 1(3), pp. 35–42. Citado na página 105.
- Dias, F. M., 2000. A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 37.
- Dias, F. M. e Lahr, F. A. R., 2004. ‘Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente’. *Scientia Forestalis*, vol. 65, pp. 102–113. Citado na página 22.
- dos Reis, P. C. M., de Souza, A. L., Reis, L. P., Carvalho, A. M. M. L., Mazzei, L., Rêgo, L. J. S. e Leite, H. G., 2018. ‘Artificial neural networks to estimate the physical-mechanical properties of Amazon second cutting cycle wood’. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 20(3), pp. 343–352.
URL: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003501> Citado 2 vezes nas páginas 21 e 31.
- Ellis, S. e Steiner, P., 2002. ‘The behaviour of five wood species in compression’. *IAWA Journal*, vol. 23(2), pp. 201–211.
URL: <http://booksandjournals.brillonline.com/content/journals/10.1163/22941932-90000298> Citado na página 32.

- Faria, O. B., Lahr, F. A. R., Barros Jr., O. e Chahud, E., 2008. 'Influência da umidade no módulo de elasticidade longitudinal da madeira'. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 9(22), pp. 57–69. Citado na página 29.
- Fernandes, C., Gaspar, M. J., Pires, J., Silva, M. E., Carvalho, A., Brito, J. L. e Lousada, J. L., 2017. 'Within and between-tree variation of wood density components in pinus sylvestris at five sites in portugal'. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 75, pp. 511–526.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-016-1130-2> Citado na página 28.
- Fávero, L., Belfiore, P., Silva, F. L. e Chan, B., 2009. *Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões*. Elsevier. Citado na página 58.
- Guller, B., 2007. 'The effects of thinning treatments on density, moe, mor and maximum crushing strength of pinus brutia ten. wood'. *Annals of Forest Science*, vol. 64, pp. 467–475. Citado na página 31.
- Han, Y., Park, Y., Park, J., Yang, S., Eom, C. e Yeo, H., 2016. 'The shrinkage properties of red pine wood assessed by image analysis and near-infrared spectroscopy'. *Drying Technology*, vol. 34(13), pp. 1613–1620.
URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1138964> Citado na página 28.
- Hein, P. R. G. e Brancheriau, L., 2018. 'Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of eucalyptus specimens'. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 20(3), pp. 333–342.
URL: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003401> Citado na página 29.
- Igartúa, D., Moreno, K., Piter, J. e Monteoliva, S., 2015. 'Densidad y propiedades mecánicas de la madera de acacia melanoxylon implantada en Argentina'. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, vol. 17(4), pp. 809–820.
URL: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000070> Citado na página 32.

- ISO, (2005), ISO 13910: Structural timber – characteristic values of strength-graded timber – sampling, full-size testing and evaluation, Suíça, p. 30. Citado na página 34.
- Iwakiri, S., Vianez, B. F., Weber, C., Trianoski, R. e Almeida, V. C., 2012. ‘Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da amazônia’. *Acta Amazonica*, vol. 42, pp. 59–64. Citado na página 29.
- Kim, N. T., Matsumura, J. e Oda, K., 2011. ‘Effect of growing site on the fundamental wood properties of natural hybrid clones of acacia in vietnam’. *Journal of Wood Science*, vol. 57, pp. 87–93.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-010-1153-y> Citado na página 32.
- Kloiber, M., Tippner, J. e Hrivnák, J., 2014. ‘Mechanical properties of wood examined by semi-destructive devices’. *Materials and Structures*, vol. 47, pp. 199–212.
URL: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0055-z> Citado na página 28.
- Lahr, F. A. R., Arroyo, F. N., de Almeida, T. H., de Almeida Filho, F. M., Mendes, I. S. e Christoforo, A. L., 2016a. ‘Full characterization of erisma uncinatum warm wood specie’. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 6(5), pp. 147–150.
URL: <http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20160605.01> Citado na página 66.
- Lahr, F. A. R., Christoforo, A. L., da Silva, C. E. G., de Andrade Junior, J. R. e Pinheiro, R. V., 2016b. ‘Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de madeiras de jatobá (*hymenaea stilbocarpa hayne*) com diferentes teores de umidade e extraídas de regiões distintas’. *Revista Árvore*, vol. 40(1), pp. 147–154.
URL: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000100016> Citado 2 vezes nas páginas 66 e 72.
- Lahr, F., Aquino, V., Arroyo, F., Santos, H., Silva, S., Wolenski, A., Carvalho, C., Almeida, J. e Christoforo, A., 2021a. ‘Influence of stiffness related to the c40 strength class

- of the hardwood group established by the brazilian standard in the design of timber structures'. *Wood Research*, vol. 66(4). Citado na página 32.
- Lahr, F., Arroyo, F., Rodrigues, E., Almeida, J., Aquino, V., Wolenski, A., Santos, H., Ferraz, A., Chahud, E., Molina, J., Pinheiro, R. e Christoforo, A., 2021b. 'Models to estimate longitudinal compressive strength of brazilian hardwoods based on apparent density'. *BioResources*, vol. 16, pp. 1373–1381. Citado na página 32.
- Lestander, T. A., Lindeberg, J., Eriksson, D. e Bergsten, U., 2008. 'Prediction of pinus sylvestris clear-wood properties using nir spectroscopy and biorthogonal partial least squares regression'. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, pp. 2052–2062. Citado na página 28.
- Lima Jr, M., Biazzon, J., Araujo, V., Munis, R., Martins, J., Cortez-Barbosa, J., Gava, M., Valarelli, I. e Morales, E., 2018. 'Mechanical properties evaluation of eucalyptus grandis wood at three different heights by impulse excitation technique (iet)'. *BioResources*, vol. 13(2), pp. 3377–3385.
URL: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.13.2.3377-3385> Citado na página 20.
- Lima, T., Almeida, T., Almeida, D., Christoforo, A. e Lahr, F., 2018. 'Propriedades físicas e mecânicas da madeira tatajuba wood specie (bagassa guianensis) proveniente de duas diferentes regiões brasileiras'. *Revista Matéria*, vol. 23(3).
URL: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0519> Citado na página 105.
- Logsdon, N. B., 2004. 'Estabilidade dimensional: estimativas a partir da densidade básica'. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 10. Citado na página 28.
- Logsdon, N. B., de Jesus, J. M. H. e Penna, J. E., 2010. 'Avaliação dos estimadores da resistência característica à compressão paralela às fibras'. *Scientia Forestalis*, vol. 38, pp. 579–587. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 33.

- Logsdon, N. B., Finger, Z. e de Jesus, J. M. H., 2014. 'Influência do ângulo entre o esforço aplicado e a direção das fibras da madeira sobre a resistência ao cisalhamento'. *Ciêncial Florestal*, vol. 24(4), pp. 969–978. Citado na página 27.
- López, G., Basterra, L. A. e Acuña, L., 2013. 'Estimation of wood density using infrared thermography'. *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 29–32.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.001> Citado na página 28.
- Martínez-Espinosa, M. e Calil Jr., C., 2000. 'Determinação do valor característico da resistência da madeira: Distribuições de probabilidade simétricas e assimétricas'. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, (2), pp. 25–30. Citado na página 33.
- Martínez-Espinosa, M., Calil Jr., C. e Lahr, F. A. R., 2004. 'Métodos paramétricos e não-paramétricos para determinar o valor característico em resultados de ensaio de madeira'. *Scientia Forestalis*, (66), pp. 76–83. Citado 3 vezes nas páginas 22, 33 e 34.
- Matos, G. e Molina, J., 2016. 'Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas abnt ABNT NBR 7190 (1997) e iso 13910:2005'. *Revista Matéria*, vol. 21(4), pp. 1069–1079. Citado na página 33.
- Minitab, 2018, *Minitab statistical software*.
URL: <http://www.minitab.com> Citado 2 vezes nas páginas 53 e 56.
- Miyoshi, Y., Kojiro, K. e Furuta, Y., 2018. 'Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension'. *Journal of Wood Science*, vol. 64(5), pp. 509–514. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 36.
- Nicolas, E. A., Mascia, N. T. e Todeschini, R., 2008. 'Comparação entre o critério de resistência de tsai-wu e a fórmula de hankinson na tração da madeira'. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 9(23), pp. 13–29. Citado na página 27.
- Nugroho, W. D., Marsoem, S. N., Yasue, K., Fujiwara, T., Nakajima, T., Hayakawa, M., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Jin, H.-O., Kubo, T. e Funada, R., 2012. 'Radial variations

in the anatomical characteristics and density of the wood of acacia mangium of five different provenances in indonesia’. *Journal of Wood Science*, vol. 58, pp. 185–194.

URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-011-1236-4> Citado na página 32.

Oliveira, F. G. R. e Sales, M., 2002. ‘Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultrassom’. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 3, pp. 1–25. Citado na página 28.

Pinto, E. M., Martínez-Espinosa, M. e Calil Jr., C., 2004. ‘Métodos para determinação do valor característico da resistência à compressão paralela às fibras da madeira’. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, vol. 4, pp. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 22, 33, 34 e 39.

Ramage, M., Burridge, H., Wicher-Busse, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D., Wu, L., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. e Scherman, O., 2017. ‘The wood from the tress - the use of timber in construction’. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 333–359.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107> Citado na página 20.

REFLORA, 2018, *Flora do Brasil 2020 em construção, Jardim Botânico do Rio de Janeiro*.

URL: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

Rigg-Aguilar, P. e Moya, R., 2018. ‘Properties of wood from 7-year-old cedrela odorata trees of two different populations growing in agroforestry systems with theobroma cacao’. *Madera y Bosques*, vol. 24(1), pp. 1–30.

URL: <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2018.2411485> Citado na página 27.

RStudio, 2022, *Software RStudio*.

URL: <https://www.rstudio.com/> Citado 5 vezes nas páginas 10, 25, 26, 27 e 30.

Scholar, G., 2018, *Portal de Buscas do Google Acadêmico*.

URL: <https://scholar.google.com.br/> Citado na página 25.

Scopus, 2022, *Base de Dados Scopus*.

URL: <https://www.scopus.com/> Citado na página 25.

Shida, S. e Hiziroglu, S., 2010. 'Evaluation of shear strength of japanese wood species as a function of surface roughness'. *Forest Products Journal*, vol. 60(4), pp. 400–404.

Citado na página 31.

Silveira, L. H. C., Rezende, A. V. e do Vale, A. T., 2012. 'Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas'. *Acta Amazonica*, vol. 43, pp.

179–184. Citado na página 29.

Soriano, J., da Veiga, N. S. e Martins, I. Z., 2015. 'Wood density estimation using the sclerometric method'. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 73, pp. 753–758.

URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0948-3> Citado na página 28.

Steege, H. T., Vaessen, R. W., Cárdenas-López, D., Sabatier, D., Antonelli, A., de Oliveira, S. M., Pitman, N. C. A., Jorgensen, P. M. e ao, R. P. S., 2016. 'The discovery of the amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa'. *Scientific Reports*, (6), pp. 1–15.

URL: <http://dx.doi.org/10.1038/srep29549> Citado na página 20.

Stolf, D. O., Bertolini, M. S., Almeida, D. H., Silva, D. A. L., Panzera, T. H., Christóforo, A. L. e Lahr, F. A. R., 2015. 'Influence of growth ring orientation of some wood species to obtain toughness'. *Revista Escola de Minas*, vol. 68(3), pp. 265–271.

URL: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014680018> Citado na página 29.

Teixeira, J., Wolenski, A., Aquino, V., Panzera, T., Silva, D., Campos, C., Silva, S., Lahr, F. e Christoforo, A., 2021. 'Influence of provenance on physical and mechanical properties of angelim-pedra (*hymenolobium petraeum* ducke.) wood species'. *European*

Journal of Wood and Wood Products, vol. 79.

URL: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01692-4> Citado na página 32.

Teixeira, J.N. and Wolenski, A., Aquino, V., Christoforo, A., Lahr, F. e Panzera, T., 2020a. 'Influence of provenance on physical and mechanical properties of angelim-pedra (*hymenolobium petraeum ducke.*) wood species'. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 79, pp. 1241–1251. Citado 3 vezes nas páginas 66, 72 e 73.

Tenorio, C. e Moya, R., 2018. 'Evaluation of wood properties of four ages of cedrela odorata trees growing in agroforestry systems with theobroma cacao in costa rica'. *Agroforestry Systems*, pp. 1–16.

URL: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0194-x> Citado 2 vezes nas páginas 32 e 72.

Thiersch, C. R., Scolforo, J. R., de Oliveira, A. D., Rezende, G. D. S. P. e Maestri, R., 2006. 'O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de eucalyptus sp.'. *Cerne*, vol. 12(3), pp. 264–278. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 31.

Tippner, J., Hrivnák, J. e Kloiber, M., 2016. 'Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods'. *BioResources*, vol. 11(1), pp. 503–518. Citado na página 28.

Trevisan, R., Zanella, A., da Silva, F. M., Rosaa, M., Fioresi, T. e de Oliveira Fortes, F., 2016. 'Axial variation of basic density of araucaria angustifolia wood in different diameter classes'. *Ciência Rural*, vol. 46(11), pp. 1969–1972.

URL: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20141312> Citado na página 32.

Tukey, J. W., 1949. 'Comparing individual means in the analysis of variance'. *Biometrics*, vol. 5(2), pp. 99–114. Citado na página 53.

Varella, C. A. A., 2004. *Análise multivariada aplicada as ciências agrárias*. Notas de Aula: UFRRJ. Citado na página 58.

- Vidal, J., Evangelista, W., Silva, J. e Jankowsky, I., 2015. 'Preservação de madeiras no brasil - histórico, cenário atual e tendências'. *Ciência Florestal*, vol. 25, pp. 257–271. Citado na página 20.
- Wang, L., Toppinen, A. e Juslin, H., 2014. 'Use of wood in green building - a study of expert perspectives from the uk'. *Journal of Cleaner Production*, vol. 65, pp. 350–361. **URL:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.023> Citado na página 20.
- Web of Science, 2022, *Base de Dados Web of Science*. **URL:** <https://www.webofscience.com/> Citado na página 25.
- Weerahandi, S., 1995. 'Anova under unequal error variances'. *International Biometric Society*, vol. 51, pp. 589–599. Citado na página 53.
- Wieruszewski, M. e Mazela, B., 2017. 'Cross laminated timber (clt) as an alternative form of construction wood'. *Drvna Industrija*, vol. 68, pp. 259–367. **URL:** <http://dx.doi.org/10.5552/drind.2017.1728> Citado na página 20.
- Wolenski, A., Almeida, J., Christoforo, A., Lahr, F. e Peixoto, R., 2020d. 'Estimation model of mechanical properties from the compressive strength values'. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, vol. 1(1), pp. 1–12. No Prelo. Citado na página 34.
- Wolenski, A., Dias, F., Peixoto, R., Christoforo, A. e Lahr, F., 2020c. 'Modelos para estimativa das propriedades mecânicas de compressão e tração na direção paralela às fibras'. *Revista Ambiente Construído*, vol. 20(1), pp. 263–276. **URL:** <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000100373> Citado na página 34.
- Wolenski, A., Peixoto, R., Aquino, V., Christoforo, A., Lahr, F. e Panzera, T., 2020a. 'Evaluation of mechanical strengths to tropical hardwoods: proposal of probabilistic models'. *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 78, pp. 757–766. **URL:** <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01521-0> Citado na página 34.

Wolenski, A., Peixoto, R., Christoforo, A., Lahr, F. e Dias, A., 2019. ‘Estimativa da resistência característica à tração da madeira na direção paralela às fibras por meio de modelos probabilísticos’. *Revista Matéria*, vol. 24(4).

URL: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0856> Citado na página 34.

Wolenski, A., Peixoto, R., Fedotova, V., Christoforo, A. e Lahr, F., 2020b. ‘Shear strength estimation model for tropical wood species’. *Wood Research*, vol. 65(1), pp. 175–182.

URL: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.175182> Citado na página 34.

Wu, S. J., Xu, J. M., Li, G. Y., Risto, V., Lu, Z. H., Li, B. Q. e Wang, W., 2011. ‘Estimation of basic density and modulus of elasticity of eucalypt clones in southern china using non-destructive methods’. *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 23(1), pp. 51–56. Citado na página 28.

Zmijewki, T. e Wojtowicz-Jankowska, D., 2017. ‘Timber - material of the future - examples of small wooden architectural structures’. *IOP Conference Series - Materials Science and Engineering*, vol. 245, pp. 1–9.

URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082019> Citado na página 20.