

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

LEONARDO ARAÚJO MARCOLIN

PROPOSIÇÃO DE CLASSES DE RESISTÊNCIA PARA PEÇAS ROLIÇAS  
PERFILADAS ESTRUTURAIS DE *EUCALYPTUS UROGRANDIS*

São Carlos

2017



LEONARDO ARAÚJO MARCOLIN

**PROPOSIÇÃO DE CLASSES DE RESISTÊNCIA PARA PEÇAS  
ROLIÇAS PERFILADAS ESTRUTURAIS DE *EUCALYPTUS*  
*UROGRANDIS***

**VERSÃO CORRIGIDA**

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Engenharia Civil (Estruturas).

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Tit. Carlito Calil Junior

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M321p Marcolin, Leonardo Araújo  
Proposição de classes de resistência para peças  
roliças perfiladas estruturais de *Eucalyptus urograndis*  
/ Leonardo Araújo Marcolin; orientador Carlito Calil  
Junior. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de  
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Propriedades mecânicas. 2. Normas internacionais  
de madeira. 3. Ensaio com peças estruturais. 4.  
Madeira de reflorestamento. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LEONARDO ARAÚJO MARCOLIN**.

Título da dissertação: "Proposição de classes de resistência para peças roliças perfiladas estruturais de *Eucalyptus urograndis*".

Data da defesa: 11/04/2017.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Titular **Carlito Calil Junior (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Everaldo Pletz**  
(Universidade Estadual de Londrina/UEL)

APROVADO

Prof. Dr. **Adriano Wagner Ballarin**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Botucatu)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(Engenharia de Estruturas):  
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**



Aos meus pais e irmãos que sempre se dispuseram a me ajudar e aconselhar em todos os momentos da minha vida.





## AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço aos meus pais, Neusa e Antonio, mesmo não sabendo se eu estaria seguindo uma trajetória fácil, foram eles quem me apoiaram e incentivaram a seguir o caminho que escolhi. Ao meu irmão Guilherme, sempre que precisei, oferecendo o seu tempo e sua casa para me acolher. A minha irmã Paula, por ser como uma segunda mãe a minha vida inteira, sempre tentando me proteger e ajudar.

Ao professor Calil, por estes anos de trabalho, tendo paciência e sempre disposto a me aconselhar e orientar. Ao professor Dias, por também dispor de seu tempo a me ajudar a sanar dúvidas com muita calma. Ao professor Rocco, pelos momentos de descontração e aconselhamento. Aos professores, Edson e Paccola, por sempre também disponibilizarem do seu tempo e serem tão dispostos a ajudar.

Ao Samuel por me aguentar por um bom tempo, sempre com muito humor e disposição, em muitas horas de laboratório.

Ao Robson por estar sempre me escutando e me aconselhando. A Gisa, por ser tão solidária e presente. A Tati, pela amizade e sua bondade, sempre me ajudando quando precisava. A Laura por ser a amiga tão boa que é. A Ellenzinha, que mesmo pelo pouco tempo, a tenho como outra irmã. Ao Igor, por me ajudar muito em descontrair e o companheirismo, mesmo estando longe. Ao Marcão, pelos momentos de conversa. A também aos colegas do departamento e laboratório, e também amigos que fiz em São Carlos.

Ao pessoal do departamento, Nadir, Dani, Marcela e Rosi, sempre muito dispostas a ajudar, e também por muito momentos de conversa. Ao Jaime, Silvio e o Arnaldo, que também me ajudaram na execução de ensaios.

Aos meus amigos, Mari Affonço, Carina, Tita, Bidim, German, Karol, Jéssica, que mesmo não estando presente no meu dia a dia, sempre que possível me dão suporte.

À PLANTAR pelo apoio da pesquisa por meio do material disponibilizado.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Ao departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (USP) e ao LaMeM, pela estrutura e oportunidade de estudo providenciadas.



## RESUMO

MARCOLIN, L. A. **Proposição de classes de resistência para peças roliças perfiladas estruturais de *Eucalyptus urograndis***. 2017. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estrutura, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A madeira é um material utilizado na construção civil que passou por algumas mudanças nos últimos anos. Por um período, as espécies tropicais eram a fonte principal deste material, mas devido ao uso não racional, ela foi restringida. O espaço deixado por estas espécies na indústria foi ocupado por espécies de reflorestamento. A Norma Brasileira para projeto de estruturas de madeira vem sendo atualizada, porém alguns de seus itens ainda precisam ser discutidos. Este estudo tem por objetivo propor classes de resistência de peças estruturais por meio da determinação das propriedades físicas e mecânicas de uma espécie híbrida de *Eucalyptus urograndis*, a qual vem sendo utilizada no mercado brasileiro na construção civil. Foram estudadas algumas normas internacionais atuais para caracterização de madeira de espécies folhosas em termos dos ensaios para determinação de propriedades de peças estruturais. Uma análise comparativa dos valores das propriedades do código normativo europeu (prEN 338, 2014) e os obtidos neste trabalho foi realizada, revelando diferenças significativas entre os dois. As propriedades obtidas foram: densidade aparente, densidade básica, estabilidade dimensional (radial, tangencial, longitudinal e volumétrica), módulo de elasticidade à flexão, módulo de resistência à flexão, módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. A amostra consistiu de 1142 peças estruturais disponibilizadas por uma indústria brasileira de florestas plantadas. As peças são provenientes de árvores com diferentes diâmetros, idade de corte e região de crescimento. Esses fatores foram analisados estatisticamente para avaliar suas influências nas propriedades.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas. Normas internacionais de madeira. Ensaio com peças estruturais. Madeira de reflorestamento.



## ABSTRACT

MARCOLIN, L. A. **Proposition for strength classes for lathed round timber of *Eucalyptus urograndis***. 2017. 94 p. Dissertation (Civil Engineering (Structures) Master Degree) –Department of Structural Engineering, São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

Timber is a product used on civil construction, which went through some changes in the last few years. For a long period, the tropical species were the main source, but due to a non-managed use, it was restricted. The space left by those products in the industry was replaced by the reforestation species. The Brazilian code for timber structures design has been readjusting along with these changes, although some of its items still need to be discussed. Having in mind these gaps, this study aims to determine a strength class table through the determination of the physical and mechanical properties of a hybrid species of *Eucalyptus urograndis*, which is widely diffused for civil construction use in the Brazilian commerce. The properties determined were apparent density, basic density, dimensional instability (radial, tangential, longitudinal and volumetric), bending modulus of elasticity, bending strength, compression modulus of elasticity (parallel to fibers), compression strength (parallel to fibers) and shear strength (parallel to fibers). The sample consists of 1142 specimens provided from a Brazilian forest industry. Each specimen went through the whole process, which is the determination of all the properties mentioned. Within the sample, the trees used had variation of the diameter, cut age and planted area, which were statistically analyzed. A strength class table for round timber was defined. The current international codes concerning hardwood grading was thoroughly analyzed, regarding its structural property tests. A comparative analysis was carried out on the values obtained with the strength values of the European code (prEN 338, 2014), which showed a significative difference.

Keywords: Mechanical properties. International timber code. Full size test. Reforested timber.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de utilização de perfis roliços na construção civil (AMARU).....	21
Figura 2 - Ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade e Módulo de resistência à flexão .....	24
Figura 3 - Ensaio para determinação da Resistência à Compressão Paralela às Fibras .....	25
Figura 4 - Ensaio para determinação da Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras .....	26
Figura 5 - Peças roliças perfiladas de <i>Eucalyptus urograndis</i> (AMARU).....	35
Figura 6 - (a) Peças antes de ser realizada a uniformização da seção e (b) peças após ter sido realizada a uniformização .....	36
Figura 7 - Pátio para secagem e alocação das peças.....	36
Figura 8 - Esquema de retirada dos corpos de prova para caracterização .....	37
Figura 9 - Ensaio de flexão à três pontos.....	38
Figura 10 - (a) Ensaio de compressão paralela às fibras e (b) corpos de prova de compressão para ensaio de compressão paralela às fibras .....	40
Figura 11 - (a) Corpos de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras e (b) aplicação do carregamento no aparato para ensaio de cisalhamento.....	41
Figura 12 - corpos de prova para determinação da estabilidade dimensional da madeira .....	41
Figura 13 - Esquema para cálculo dos valores característicos .....	44
Figura 14 - Elementos de um boxplot .....	47
Figura 15 - Análise da distribuição das propriedades em torno da média.....	51
Figura 16 - Histograma das principais propriedades estudadas .....	52
Figura 17 - Análise da distribuição do módulo de resistência à flexão em torno da média .....	53
Figura 18 - Análise da distribuição do módulo de elasticidade à flexão em torno da média ...	53
Figura 19 - Análise da distribuição da resistência à compressão paralela às fibras em torno da média.....	54
Figura 20 - Análise da distribuição do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras em torno da média .....	55

Figura 21 - Análise da distribuição da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em torno da média .....	56
Figura 22 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para módulo de resistência à flexão para Tabela de Classe de Resistência.....	59
Figura 23 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Módulo de Elasticidade à Flexão para Tabela de Classe de Resistência.....	60
Figura 24 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Resistência à Compressão Paralela às Fibras para Tabela de Classe de Resistência.....	61
Figura 25 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras para Tabela de Classe de Resistência.....	61
Figura 26 - Coeficiente de Variação (%) das amostras para Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras para Tabela de Classe de Resistência .....	62
Figura 27 - Valores médios para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Flexão em função da Módulo de resistência à flexão .....	64
Figura 28 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Flexão em função da Módulo de resistência à flexão .....	64
Figura 29 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para Densidade Aparente em função da Módulo de resistência à flexão .....	66
Figura 30 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para a Resistência à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão .....	66
Figura 31 - Valores médios para cada amostra separada grupos para Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão .....	67
Figura 32 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão .....	68
Figura 33 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para a Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão...	69
Figura 34 - Gráfico função de densidade para as amostras parciais da amostra total.....	70
Figura 35 - Comparativo dos valores do módulo de elasticidade à flexão da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia para: (a) valor característico e (b) valor médio.....	72



Figura 36 - Comparativo dos valores da resistência à compressão paralela às fibras da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia .....	72
Figura 37 - Comparativo dos valores da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia.....	73
Figura 38 - Comparativo dos valores da densidade aparente da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia para: (a) valor característico e (b) valor médio. ....	73
Figura 39 - Dispersão dos valores da propriedade de módulo de resistência à flexão em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	83
Figura 40 - Dispersão dos valores da propriedade do módulo de elasticidade à flexão em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	84
Figura 41 - Dispersão dos valores da propriedade de resistência à compressão paralela às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	85
Figura 42 - Dispersão dos valores da propriedade de módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	86
Figura 43 - Dispersão dos valores da propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	87
Figura 44 - Dispersão dos valores da propriedade de densidade aparente em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças .....	88
Figura 45 - Exemplo para determinação do valor da inclinação da reta segundo a ISO 13910 (2005).....	91
Figura 46 - Valores de ks para diferentes esquemas de amostragem .....	93



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> .....	27
Tabela 2 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas .....	27
Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	28
Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas de <i>Eucalyptus dunii</i> , <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> .....	29
Tabela 5 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do produto AMARU .....	30
Tabela 6 - Tabela de classe de resistência para folhosas da norma européia .....	31
Tabela 7 - Valores de correlação para a propriedade de módulo de resistência à flexão .....	32
Tabela 8 - Valores de correlação para a propriedade de resistência ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras .....	33
Tabela 9 - Correlação entre propriedades de rigidez e resistência em diferentes serrarias .....	33
Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova por variabilidade .....	46
Tabela 11 - Resultados dos ensaios realizados .....	49
Tabela 12 - Resultados dos ensaios realizados .....	49
Tabela 13 - Valores obtidos com teste de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling para normalidade .....	52
Tabela 14 - Teste de análise de variância em relação a região de plantio e diâmetro das peças .....	56
Tabela 15 - Valores do coeficiente de correlação (R) para as propriedades obtidas experimentalmente.....	57
Tabela 16 - Tamanho das amostras para Tabela de Classe de Resistência .....	58
Tabela 17 - Tabela de Classe de Resistência definida para a amostra total .....	70
Tabela 18 – Percentual abaixo do valor de referência ( $f_k$ ou $f_m$ ) associado a tabela de classe definida .....	71
Tabela 19 - Amostragem definida para comparativo do valor característico entre diferentes normas.....	89

Tabela 20 - Exemplo de montagem das planilhas para cálculo do valor característico segundo a ISO 13910 (2005).....	90
Tabela 21 - Determinação dos valores para cálculo do valor característico segundo a ASTM D2915 (2010) .....	92
Tabela 22 - Valores característicos calculados .....	94

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
<b>2.1</b>	<b>Ensaio de caracterização estrutural em normas estrangeiras .....</b>	<b>24</b>
2.1.1	<i>Flexão</i> .....	24
2.1.2	<i>Compressão Paralela às Fibras</i> .....	25
2.1.3	<i>Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras</i> .....	26
<b>2.2</b>	<b>Valores de propriedades mecânicas e físicas de algumas espécies de Eucalipto ...</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Tabela de Classes de Resistência.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4</b>	<b>Valores de Correlação entre propriedades Mecânicas e Físicas .....</b>	<b>31</b>
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
<b>3.1</b>	<b>Caracterização Física e Mecânica .....</b>	<b>36</b>
3.1.1	<i>Flexão à Três Pontos</i> .....	37
3.1.2	<i>Compressão Paralela Às Fibras,</i> .....	39
3.1.3	<i>Cisalhamento Paralelo Às Fibras</i> .....	40
3.1.4	<i>Propriedades Físicas</i> .....	41
<b>3.2</b>	<b>Correção dos Valores para as Condições de Referência.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>Verificação quanto a Qualidade das Amostras.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Cálculo do Valor Característico.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>Determinação da Tabela de Classe .....</b>	<b>44</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise Estatística de Influência entre as Propriedades .....</b>	<b>47</b>

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	<b>Histogramas e Teste de Normalidade das Propriedades.....</b>	<b>51</b>
4.2	<b>Determinação da Tabela de Classe de Resistência.....</b>	<b>53</b>
4.2.1	<i>Amostragem .....</i>	<i>53</i>
4.2.2	<i>Análise da Variabilidade dos Valores das Amostras.....</i>	<i>59</i>
4.2.3	<i>Cálculo dos Valores Médios e Característicos.....</i>	<i>63</i>
4.2.4	<i>Tabela de Classe de Resistência .....</i>	<i>70</i>
4.2.5	<i>Comparativo dos Resultados com a Norma EN338.....</i>	<i>71</i>
5	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – <i>Boxplots</i> .....	83
	APÊNDICE B – Comparativo de metodologias para determinação do valor característico.....	89

# 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material com grande versatilidade de usos. Na construção civil, podendo ter função estrutural (pilares, vigas) ou complementar como fechamento, por exemplo. Pode-se dividir em quatro sistemas estruturais principais que utilizam a madeira como elemento estrutural, que são os seguintes: *Light-Frame*, *Heavy Timber*, *Post-Frame* e *Pole*, e *Log*. No sistema construtivo *Log* (Figura 1), em que são utilizadas peças roliças perfiladas sobrepostas na horizontal, que se encaixam em toda periferia da obra. Outros exemplos podem ser encontrados em Dussarat (2010), que estudou a aplicação de peças roliças estruturais de madeira em diversas aplicações na construção civil, estudando e detalhando sistemas construtivos e ligações para este tipo de elemento.

Figura 1 - Exemplos de utilização de perfis roliços na construção civil (AMARU)



Fonte: Disponível em <<http://www.plantar.com.br>>, acessado em 10 de janeiro de 2017.

A madeira possui vantagens em relação a outros materiais, em termos de consumo energético e sustentabilidade. A energia para a sua produção é a disponibilizada pelo sol, adicionada apenas ao nível de industrialização que se queira, dependendo do produto final a ser utilizado. No caso de elementos roliços, consumo energético seria então referente ao plantio, corte, transporte e finalização, apenas da regularização das superfícies.

As propriedades da madeira dependem de um grande número de fatores, tal como a espécie utilizada, idade, solo, quantidade de água disponível durante o crescimento, dentre muitos outros. Mesmo conseguindo manter o controle de algumas variáveis, as propriedades deste material ainda assim irão possuir uma grande variabilidade.

Visando a utilização estruturalmente segura destes elementos aliado a segurança, este trabalho tem por objetivo determinar classes de resistência para a espécie *Eucalyptus urograndis* (AMARU).

O objetivo deste trabalho foi propor classes de resistência para a espécie *Eucalyptus urograndis* (AMARU). Para tal, foi determinado experimentalmente as propriedades de resistência e elasticidade de 1142 peças estruturais por meio de ensaios de classificação e caracterização para peças estruturais roliços perfilados da espécie AMARU, disponibilizada pela empresa PLANTAR.

Como objetivos secundários, determinar a influência do diâmetro, idade de corte e da região de crescimento nas propriedades determinadas, e também entre elas, tal como citadas em documentos normativos.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A atual norma brasileira para projeto de estruturas de madeira (ABNT NBR7190, 1997) possui um anexo que especifica ensaios a realizar para a estimativa das propriedades de resistência e elasticidade, além de outras. Porém, estes foram baseados utilizando corpos de prova isentos de defeitos. Para o momento de sua criação, estes testes estavam bem definidos, pois o produto disponível no mercado era proveniente de madeiras tropicais, as quais possuem poucos defeitos. Com o passar dos anos, este material foi restringido devido ao uso não racional, dificultando a comercialização. Com isso, o Brasil sofreu uma mudança, passando a cultivar madeiras de florestas plantadas, como espécies de pinus e eucalipto. Estas árvores possuem uma quantidade relativamente grande de defeitos, os quais influenciam nos valores das suas propriedades físicas e mecânicas.

Um bom exemplo de defeitos encontrados em elementos estruturais que possuem grande influência nos valores da resistência e nos valores das propriedades de rigidez, dependendo da sollicitação, são os nós. No caso de ensaios de flexão e tração, a ruptura dos elementos geralmente ocorre em regiões onde há a presença destes, pois além de alterarem a direção das fibras, atuam como uma diminuição da seção transversal resistente. Já para as propriedades de rigidez, somente o desvio da fibra influencia (Thelandersson e Larsen, 2003).

Os testes que antes retratavam bem o comportamento da madeira perante as sollicitações das construções, hoje já não o fazem. Motivo o qual incentivou a alteração do documento normativo referido, de maneira a adicionar o uso de peças estruturais, os quais melhor representam uma real situação de utilização em uma obra.

Jamil et al (2013), visando estas diferenças entre as propriedades mecânicas nas diferentes abordagens de caracterização, realizou um estudo com o intuito de definir a existência ou não da relação entre a mesma propriedade para os dois tipos corpos de prova. O autor utilizou 75 tábuas de espécies de folhosas, não especificadas, de madeira provenientes de espécies tropicais da Malásia. Foi concluído em seu trabalho que os valores para a propriedade de módulo de resistência à flexão estática, estruturais, foram inferiores aos isentos de defeitos, porém não foi possível definir um modelo de regressão eficaz.

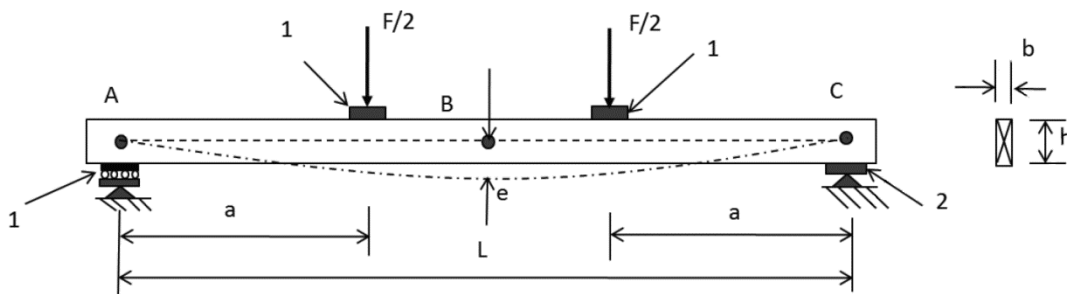
## 2.1 Ensaios de caracterização estrutural em normas estrangeiras

Para viabilizar a definição de uma metodologia para a pesquisa, foi feita uma revisão das normas internacionais de países que possuem maior disseminação do uso de estruturas de madeira. Foram verificados os seguintes códigos normativos quanto à determinação das propriedades de elementos estruturais dos seguintes países: ASTM D198 (2014, Estados Unidos da América), EN 408 (2010, Europa) e ISO 13910 (2014, internacional).

### 2.1.1 Flexão

As três normas analisadas citam que o ensaio para determinação da rigidez (módulo de elasticidade) e módulo de resistência à flexão de uma peça estrutural deve ser realizado em um sistema biapoiado, isostático, com aplicação do carregamento em dois pontos, utilizando chapas metálicas (1 e 2) para a distribuição dos esforços de maneira a não gerar deformação (Figura 2).

Figura 2 - Ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade e Módulo de resistência à flexão



Fonte: ISO 13910 (2014)

As diferenças entre esses documentos são na especificação da relação vão-altura ( $l/h$ ) e a distância nos pontos de apoio e aplicação do carregamento ( $a$ ). A norma americana considera a realização do teste em peças com relação  $l/h$  com valor de 11 a 15, enquanto que a europeia define como sendo o valor de 18. Já a norma da Organização Internacional para Padronização (ISO) <sup>1</sup> não fixa um valor para esta relação, mas o intervalo  $15 < l/h < 20$ . A distância  $a$  pode ser 4,5 a 7 vezes a altura da peça (ISO 13910, 2014, 1/3 ou 1/4 do vão (ASTM D198, 2014) ou 6 vezes a altura (EN 408, 2010).

<sup>1</sup> Do inglês: International Organization for Standardization

Quanto à seção transversal, a norma ISO citada, especifica em seu escopo que os ensaios definidos são aplicáveis à elementos com seção transversal retangulares, enquanto que a europeia não restringe quanto ao assunto e a norte-americana define que o ensaio é direcionado para retangular, porém podem ser aplicadas em peças com seções circulares e irregulares, dentre outras.

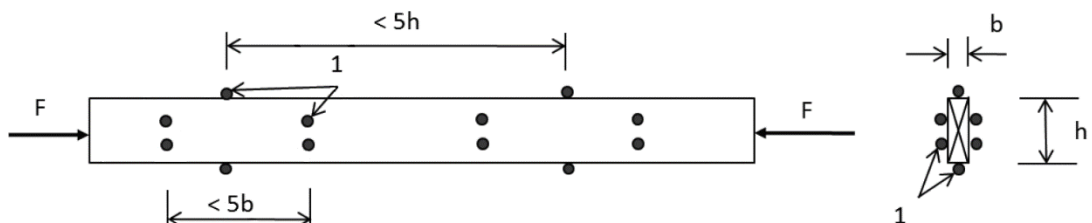
A Sociedade Americana para Teste e Materiais (ASTM)<sup>2</sup> D198 (2014) ainda cita que em edições anteriores, a aplicação de carga centralizada não era recomendada em peças com altura superior a 4 polegadas e relação vão/altura menor do que 15. A versão atual indica equações para o cálculo para três situações em seu apêndice: carregamento em dois pontos, carregamento em três pontos e aplicação do carregamento centrado (1 ponto).

### 2.1.2 Compressão Paralela às Fibras

Tanto a norma (EN 408, 2010) quanto a norte-americana (ASTM D198, 2014) especificam que o corpo de prova do ensaio de compressão paralela às fibras deve ter a seção transversal do elemento de interesse. O que diferem entre si são as relações para a determinação do comprimento. A EN 408 (2010) define uma relação de seis vezes o valor da menor dimensão da seção transversal, enquanto que a outra define um mínimo de três vezes a maior dimensão da seção transversal ou dez vezes o raio de giração.

Para os ensaios de resistência, a norma internacional (ISO 13910, 2014) especifica o uso de peças nas suas dimensões comerciais, com um sistema de contraventamento mostrado na Figura 3. Porém, não define um ensaio para a determinação do módulo de elasticidade. Este mesmo sistema também é indicado pela norma norte-americana como um método para ensaios de peças estruturais.

Figura 3 - Ensaio para determinação da Resistência à Compressão Paralela às Fibras



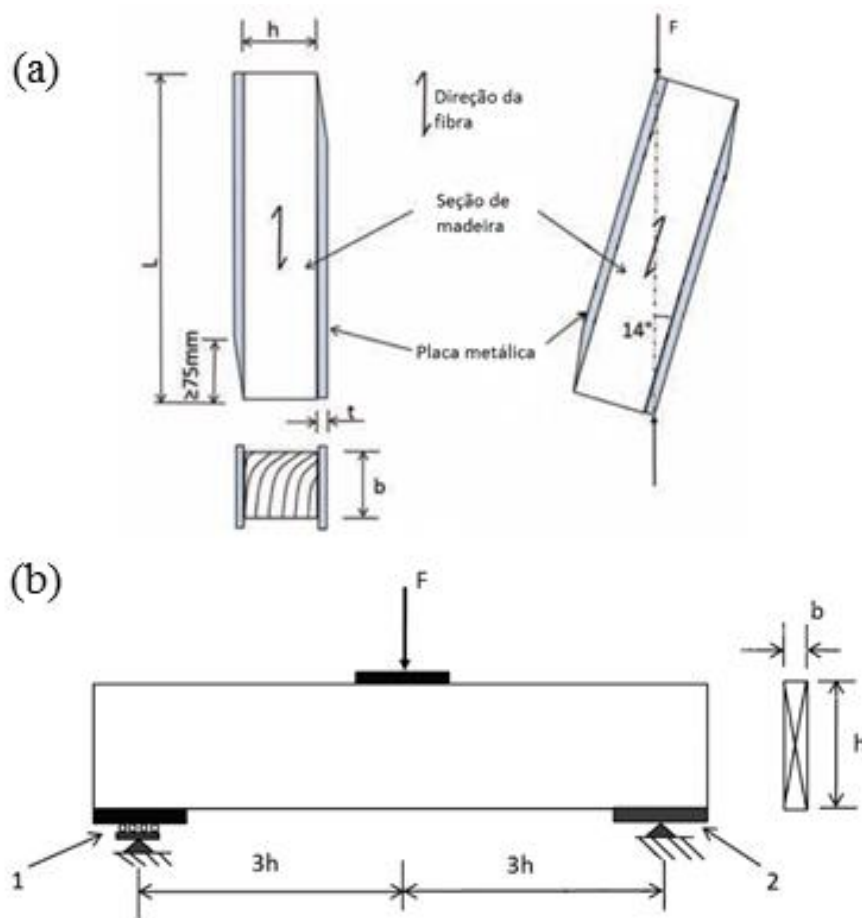
Fonte: ISO 13910 (2014)

<sup>2</sup> Do inglês: American Society of Testing and Materials

### 2.1.3 Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras

A norma EN 408 (2010), da *European Standards* (EN), prescreve o ensaio com esquema estático e de carregamento ilustrado na Figura 4 (a). A norma ISO 13910 (2014) define, além deste ensaio, outro método, em que o elemento é ensaiado à flexão Figura 4 (b). Esta cita que os valores obtidos para a resistência são diferentes, devido à situação de aplicação de carregamento e os campos de tensões gerados.

Figura 4 - Ensaio para determinação da Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras



Fonte: Adaptado de EN 408 (2010) e ISO 13910 (2014).

## 2.2 Valores de propriedades mecânicas e físicas de algumas espécies de Eucalipto

De maneira a realizar a comparação com os valores deste estudo, foi realizada uma coleta de pesquisas com valores de propriedades físicas e mecânicas para espécies de eucalipto, dando ênfase as espécies de *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e o híbrido entre estas duas espécies.

A norma brasileira ABNT NBR7190 (1997), possui em seu anexo E tabelas com valores de espécies já caracterizadas utilizando os ensaios propostos pela mesma, ou seja, corpos de prova isento de defeitos. A Tabela 1 mostra os valores médios das propriedades para as espécies de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*.

Tabela 1 - Valores médios de propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*

	$\rho_{ap}$ (12%) <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0}$ <sup>2</sup> (MPa)	$f_{v0}$ <sup>3</sup> (MPa)	$E_{c0}$ <sup>4</sup> (MPa)	$N_{CP}$ <sup>5</sup>
<i>E. grandis</i>	640	40,3	7,0	12813	103
<i>E. urophylla</i>	739	46,0	8,3	13166	86

1:  $\rho_{ap}$  (12%): densidade aparente com 12% de umidade;

2:  $f_{c0}$ : resistência à compressão paralela às fibras;

3:  $f_{v}$ : resistência ao cisalhamento paralelo às fibras;

4:  $E_{c0}$ : módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras;

5:  $N_{CP}$ : número de corpos de prova utilizados para caracterização de cada espécie.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR7190(1997).

Rodrigues (2002) realizou um estudo da caracterização de 156 peças de algumas espécies de Eucalipto, das quais foram retirados corpos de provas isentos de defeitos. Os valores na Tabela 2 são referentes às médias obtidas para cada lote. O coeficiente de variação (CV) das propriedades dentro de cada lote teve grande variabilidade, com diferenças entre os CV de 7 % a 19 %. O menor valor obtido foi de 1,8 % para a propriedade densidade básica e o máximo de 25,2 %, para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, ambos para o lote 8V.

Tabela 2 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas

Lote	Espécie	$\rho_{bas}$ <sup>1</sup> (g/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (12%) (g/m <sup>3</sup> )	MOR <sup>2</sup> (MPa)	MOE <sup>3</sup> (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{v0}$ (MPa)
1G	<i>E. grandis</i>	0,540	0,671	106,9	18642	59,7	20591	10,2
2H	<i>E. saligna</i> x <i>E. alba</i>	0,653	0,842	148,3	25088	80,4	25598	13,4
3G	<i>E. grandis</i>	0,531	0,702	116,2	20371	66,7	20060	12,6
3S	<i>E. saligna</i>	0,545	0,684	107,9	18127	62,0	18250	11,3
4G	<i>E. grandis</i>	0,596	0,763	141,9	20529	74,1	28219	10,0
4S	<i>E. saligna</i>	0,700	0,763	138,1	20471	73,8	27688	13,5
4C	<i>E. citriodora</i>	0,736	0,897	154,8	22830	67,9	23741	15,3
5B	<i>Eucalyptus</i> sp.	0,805	0,883	150,7	21988	81,8	22860	15,0
5V	<i>Eucalyptus</i> sp.	0,659	0,764	118,5	15658	68,6	20027	15,6
6V	<i>Eucalyptus</i> sp.	0,721	0,905	107,0	13796	63,7	18589	14,4
7C	<i>E. citriodora</i>	0,757	0,849	143,5	20870	70,9	21150	15,1
8V	<i>Eucalyptus</i> sp.	0,801	1,030	98,6	12328	54,1	11685	17,5

1:  $\rho_{bas}$ : densidade básica;

2: MOR: módulo de resistência à flexão.

3: *MOE*: módulo de elasticidade à flexão;  
 Fonte: Adaptado de Rodrigues (2002).

Scanavaca e Garcia (2004), estudaram algumas propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova isentos de defeito da madeira de *Eucalyptus urophylla*. Foram utilizadas 120 árvores, dos quais foram retirados 4 corpos de prova de cada, em que eram constituídos apenas por porções do cerne. A Tabela 3 resume os valores médios, mínimos e máximos obtidos na pesquisa em questão.

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus urophylla*

	Valor Médio	Amplitude	
		Mín.	Máx.
RL <sup>1</sup> (%)	0,11	0,03	0,24
RR <sup>2</sup> (%)	7,18	4,78	9,76
RT <sup>3</sup> (%)	12,49	9,77	15,48
RV <sup>4</sup> (%)	19,77	14,59	23,36
RT/RR <sup>5</sup>	1,8	1,3	2,5
$f_{vo}$ (MPa)	18,6	14,8	22,4
$f_{co}$ (MPa)	64,4	42,1	84,1
<i>MOR</i> (MPa)	126,7	69,1	170,1
<i>MOE</i> (MPa)	17738	9493	25340

1: RL: retratibilidade longitudinal;

2: RR: retratibilidade radial;

3: RT: retratibilidade tangencial;

4: RV: retratibilidade volumétrica;

Fonte: Adaptado de Scanavaca e Garcia (2004).

Miná (2005) realizou um estudo teórico e experimental quanto a utilização de estacas de madeira roliça para estruturas de fundação. O mesmo determinou as propriedades de flexão e compressão em peças em tamanho estrutural e corpos de provas isentos de defeitos. Foram utilizados em seu estudo 25 postes de *Eucalyptus citriodora* com diâmetro médio de 26 cm. Os valores médios obtidos para as peças estruturais (25 peças) neste estudo foram os seguintes: para o módulo de resistência à flexão de 133 MPa, módulo de elasticidade à flexão de 22,2 GPa, resistência à compressão paralela às fibras de 56 MPa e 46 MPa e para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras de 19,6 GPa e 19,1 GPa.

Christoforo (2007) estudou a influência de irregularidades na geometria das peças quanto à determinação dos valores de propriedades de rigidez e resistência para elementos roliços estruturais de *Pinus* e *Eucalyptus*. O mesmo conclui que para peças roliças de madeira do gênero *Pinus*, a posição da peça no ensaio de flexão estática em três pontos utilizando o diâmetro médio, não afetou a determinação do módulo de elasticidade, porém, quanto as peças de *Eucalyptus citriodora*, o mesmo não foi verificado, sendo indicado pelo autor, a

necessidade de realizar o ensaio em duas posições distintas, rotacionando 90° as peças, tomando o menor valor obtido como o valor da propriedade.

Zangiaco (2007), utilizando peças estruturais (24 peças) e corpos de prova isento de defeito (24), estudou as propriedades de flexão (MOE e MOR), compressão paralela às fibras ( $f_{co}$  e  $E_{co}$ ) e módulo de elasticidade transversal (G) de peças roliças de *Pinus eliotti*, *Pinus caribaea var caribaea* e *Eucalyptus citriodora*. O autor afirma que as propriedades de módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras, e MOE tiveram diferenças significativas nos valores entre os dois tipos de ensaio, estrutural e corpos de prova isentos de defeito.

Lopes (2007) também realizou uma caracterização, no caso, variando o local de coleta do corpo de prova isentos de defeitos, sendo referente à seção transversal da peça na direção radial e na altura da árvore. A Tabela 4 resume os valores coletados, mostrando os valores médios dos resultados obtidos neste estudo para as espécies de *Eucalyptus dunii*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus dunii*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*

<b>Propriedade</b>	<b><i>E. dunii</i></b>	<b><i>E. urophylla</i></b>	<b><i>E. grandis</i></b>
RT (%)	14,1	11,8	8,4
RR (%)	5,9	7,6	4,8
RL (%)	0,6	0,5	0,6
RV (%)	21,3	20,7	14,2
RT/RR	2,5	1,6	1,8
$\rho_{ap}$ (g/m <sup>3</sup> )	0,780	0,880	0,750
$\rho_{bas}$ (g/m <sup>3</sup> )	0,610	0,690	0,580
MOE (MPa)	24336	27867	24209
MOR (MPa)	123,4	150,7	117,7

Fonte: Adaptado de Lopes (2007).

Santos (2013) realizou uma caracterização de 78 peças de um híbrido entre duas espécies de Eucalipto (AMARU), não especificado, roliças e torneadas, fornecidos pela empresa Plantar Empreendimentos e Produtos Florestais Ltda. Havia variações nas seções transversais, sendo elas, côncavas (64 peças), retas (6 peças) e roliças (8 peças), com variação de 2,2m até 2,5m de comprimento, com 13 cm de diâmetro. O valor médio da densidade encontrado foi de 689 kg/m<sup>3</sup>, com umidade de 22,1%, e posteriormente à correção utilizando o método gráfico para 12%, com 640 kg/m<sup>3</sup>. A amostra foi dividida em 2 lotes: em um foram realizados ensaios de tração e flexão, em peças estruturais, ou seja, peça com a dimensão

comercial. A norma utilizada foi a NBR 7190 (1997), com adaptações para ensaios das peças em tamanho comercial. A Tabela 5 resume os valores médios das propriedades estudadas pelo autor, em que, com exceção dos casos dos ensaios de flexão e da tração, foram extraídos mais de um corpo de prova de cada peça.

Tabela 5 - Valores médios das propriedades físicas e mecânicas do produto AMARU

	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_{t0}^1$ (MPa)	$f_{v0}$ (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<b>Umidade: 22,1%</b>	38,9	13060	46,6	6,3	13163	78,0
<b>N<sub>CP</sub></b>	120	120	39	156	39	39

1:  $f_{t0}$ : resistência à tração paralela às fibras;  
 Fonte: Adaptado de Santos (2013).

### 2.3 Tabela de Classes de Resistência

Como já citado, e amplamente estudado pela comunidade científica, a madeira é um material que possui grande variabilidade em termos das propriedades mecânicas e físicas (KRETSCHMANN, 2010 e NBR 7190, 1997). É crucial no momento do dimensionamento dos elementos do projeto estrutural a consideração da segurança dos usuários da obra, o que traz à necessidade dos estudos das propriedades do material.

De maneira a simplificar o cálculo de projetos estruturais foram definidas classes de resistência, as quais podem estar associados a grupos de espécies ou mesmo a uma única espécie (ISO 16598, 2014, *DRAFT*). Estes grupos podem ser formados por semelhança entre o comportamento, valores das propriedades, ou mesmo pela estrutura celular da árvore (coníferas e folhosas), como é mais comum ser encontrado em normas (EN 338, 2009; NBR 7190, 1997), tal como exemplificado pela Tabela 6.

De maneira que haja uma compatibilidade entre dados coletados em diferentes grupos de ensaios, ou populações, a norma ISO 13910 (2014) indica que cada ensaio deve seguir uma série de requisitos, ou condições, em que a peça está sujeita. Isto se deve principalmente pelo fato de a madeira ser um material fortemente influenciado por fatores externos, tal como a umidade.

Cada amostra deve ser representativa da população, representando a origem, tamanho e qualidade que irá ser classificado no processo, em que apenas um corpo de prova deve ser retirado de cada origem (árvore) (EN384, 2010). Para isto, as normas tendem a definir um número mínimo para cada amostra, dependendo da variabilidade dos valores que a



propriedade em estudo possui, pois deve-se garantir um grau de confiabilidade à estimativa dos valores.

Tabela 6 - Tabela de classe de resistência para folhosas da norma europeia

	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Propriedades de Resistência em N/mm <sup>2</sup>											
$MOR_{,k}^1$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$f_{t,0,k}^{2,3}$	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
$f_{t,90,k}^4$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	23	25	26	28	29	30	32	33	34	35	36
$f_{c,90,k}$	5,3	5,4	5,5	5,8	6,2	6,6	7,0	8,0	9,0	9,0	9,0
$f_{v,k}$	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0
Propriedades de Rigidez em KN/mm <sup>2</sup>											
$MOE_{médio}^5$	11,0	12,0	14,0	15,5	16,5	18,0	19,0	20,5	21,5	23,0	24,0
$MOE_k$	9,2	10,1	11,8	13,0	13,9	15,1	16,0	17,2	18,1	19,3	20,2
$MOE_{90,médio}$	0,74	0,80	0,94	1,04	1,10	1,20	1,27	1,37	1,44	1,54	1,61
$G_{médio}^6$	0,69	0,75	0,88	0,97	1,03	1,13	1,19	1,28	1,34	1,44	1,50
Densidade em kg/m <sup>3</sup>											
$\rho_k$	530	540	550	580	620	660	700	750	800	850	900
$\rho_{médio}$	640	650	660	700	740	790	840	900	960	1020	1080

1: o subscrito  $k$  indica o valor característico da propriedade;

2:  $f_t$ : resistência à tração;

3: o subscrito  $0$  indica paralelo às fibras;

4: o subscrito  $90$  indica perpendicular às fibras;

5: o subscrito *médio* indica o valor médio da propriedade;

6:  $G$ : módulo de elasticidade transversal;

Fonte: Adaptado de prEN338 CEN/TC124/WG2/N857 (2014).

Para se alocar uma dada população de estudo em uma classe de resistência, esta deve possuir valores característicos (5° percentil) para as propriedades primárias iguais ou superiores aos valores da classe em questão. Quando forem avaliadas propriedades derivadas, a população poderá ser considerada qualificada para ser alocada nesta classe apenas se os valores característicos de tais propriedades forem iguais ou superiores aos valores estabelecidos para as classes (ISO/DIS 16598, 2014, DRAFT).

## 2.4 Valores de Correlação entre propriedades Mecânicas e Físicas

Segundo Thelandersson e Larsen (2003), a capacidade de um sistema de classes de resistência depende de quão eficiente uma propriedade obtida é em estimar valores reais de resistência do material. Os mesmos ainda citam que um bom estimador para definir a relação entre as propriedades é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e para a mensuração do erro, o coeficiente de variação (CV).

A situação de solicitação à flexão em uma peça é “conhecida” por ter esforços de tração e compressão atuando em sua seção transversal. É esperado que entre as propriedades de resistência e rigidez axiais e flexão, tenham boa e alta correlação (BARY-LENGER et al, 1988, apud MUÑOZ e GETE, 2011). Segundo Johnson e Galligan (1983, apud MUÑOZ e GETE, 2011), em ensaio com peças estruturais, a relação entre a módulo de resistência à flexão e a resistência à tração é maior, porém, os modelos para previsão dos valores entre estas duas propriedades geram estimativas imprecisas. A Tabela 7 resume valores de coeficiente de correlação (R) e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de algumas espécies de árvores.

Tabela 7 - Valores de correlação para a propriedade de módulo de resistência à flexão

Fonte	Espécie	N <sub>a</sub>	Tipo	MOR x MOE	MOR x $\rho_{ap}$	MOR x $\rho_{baS}$	MOR x $f_{c0}$	MOR x $f_{v0}$
MUÑOZ e GETE (2011)	<i>Quercus robur L.</i>	42	I <sup>1</sup>	0.90 (0.81)	-	-	0.75 (0.56)	-
SCANAVACA e GARCIA (2004)	<i>Eucalyptus urophylla</i>	20	I	0.80 (0.64)	-	0.67 (0.45)	0.68 (0.46)	0.56 (0.31)
RALL (2006)	<i>Pinus taeda L.</i>	6	I	0.89 (0.79)	0.68 (0.46)	-	-	-
BUTLER et al. (2016)	<i>Pinus taeda</i>	93	E <sup>2</sup>	0.75 (0.56)	-	-	-	-
STEIGER e ARNOLD (2009)	<i>Picea abies</i>	NI <sup>3</sup>	E	0.66 (0.43)	-	-	-	-
CARRILLO et al. (2011)	14 espécies diferentes	42	I	0.87 (0.75)	-	0.64 (0.41)	-	-
MACHADO et al. (2014)	<i>Acacia melanoxylon R. Br.</i>	20	I	-	0.80 (0.64)	-	-	-

1: I: Corpos de prova isentos de defeito;

2: E: Corpos de prova estruturais.

3: NI: Não indicado o número de árvore, o número total de corpos de prova foi de 1644.

\*Os valores do coeficiente de correlação (R) são indicados pelos valores sem parênteses, enquanto que o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) está indicado entre parênteses.

Thelandersson e Larsen (2003) citam que o módulo de elasticidade à flexão é uma propriedade amplamente influenciada pelo módulo de resistência à flexão de corpos de provas isentos de defeitos, dos nós e da inclinação da fibra. Outras características que podem influenciar nos valores desta propriedade é a presença significativa de madeira de reação e grã espirais.

Machado et al. (2014) cita trabalhos em seu estudo que indicam que para a resistência à compressão, um dos fatores que possuem influência é a grande quantidade de extrativos na madeira, além do módulo de resistência à flexão. Para reforçar esta afirmação, Santos et al. (2012, apud MACHADO et al., 2014) é citado por estudar que o teor de extrativos derivados de etanol no cerne é quantificado em mais que o dobro do encontrado no alburno, o que poderia explicar em parte a redução dos valores das propriedades de MOR e  $f_{c0}$ . A Tabela 8

resume valores de correlação entre propriedades de resistência à compressão e cisalhamento paralelo às fibras encontrados em alguns trabalhos, em que  $N_a$  é referente ao número de árvores utilizadas no estudo.

Tabela 8 - Valores de correlação para a propriedade de resistência ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras

Fonte	Espécie	$N_a$	Tipo	$f_{c0} \times MOE$	$f_{c0} \times \rho_{ap}$	$f_{c0} \times \rho_{bas}$	$f_{c0} \times f_{v0}$
MUÑOZ e GETE (2011)	<i>Quercus robur L.</i>	42	I	0.75 (0.56)	-	-	-
SCANAVACA e GARCIA (2004)	<i>Eucalyptus urophylla</i>	20	I	0.67 (0.45)	-	0.57 (0.32)	0.53 (0.28)
MACHADO et al. (2014)	<i>Acacia melanoxylon R. Br.</i>	20	I	-	0.60 (0.45)	-	-
Fonte	Espécie	N	Tipo	$f_{v0} \times MOE$	$f_{v0} \times \rho_{bas}$		
SCANAVACA e GARCIA (2004)	<i>Eucalyptus urophylla</i>	20	I	0.51 (0.26)	0.52 (0.27)		

Para a madeira estrutural, a densidade e a espessura de anéis apresentam baixa correlação com os valores das propriedades de resistência de peças estruturais. Estes estariam nos intervalos de 0,16 até 0,40 e 0,20 até 0,44, respectivamente (THELANDERSSON e LARSEN, 2003). Os mesmos autores afirmam que o melhor estimador dos valores de resistência é o valor do módulo de elasticidade à flexão (MOE) com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando de 0,51 até 0,73 (Tabela 9) para os estudos citados por eles, em que o maior valor foi obtido para um ensaio de uma peça com dimensões retangulares, na direção de menor inércia, com um vão relativamente pequeno. Outro fato citado, é que apesar da correlação de propriedades de resistência com o valor do módulo de resistência à flexão ser independente da origem da madeira, a correlação linear varia significativamente de uma serraria para outra. Ainda, a densidade é a propriedade obtida por métodos não destrutivos que melhor se correlaciona com o MOE, com valor variando de 0,25-0,50.

Tabela 9 - Correlação entre propriedades de rigidez e resistência em diferentes serrarias

Serraria	Tração		Flexão	
	NCP	$R^2$	NCP	$R^2$
E	149	0,65	50	0,73
G	150	0,70		
H	150	0,62		
I	149	0,51		
K	152	0,69	50	0,6
L	153	0,68	50	0,54
M	139	0,66		
S	154	0,63	56	0,63

Fonte: Adaptado deThelandersson e Larsen (2003).

Diante da bibliografia exposta fica evidente a necessidade de estudos visando a caracterização de peças estruturais de espécies de reflorestamento no Brasil, com amostragens compatíveis com a variabilidade das propriedades de interesse. Este fato é evidenciado tanto para madeira serrada quanto para roliça, em que a última apresenta ainda menos estudos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consistiu na classificação mecânica (não destrutiva) e na caracterização, física e mecânica (destrutiva), de amostras de clones da espécie híbrida de *Eucalyptus urograndis*. A amostra consistiu de 1142 elementos roliços perfilados, sem tratamento, do produto denominado AMARU da empresa PLANTAR (Figura 5), com comprimento de 2,2 metros e 7 diâmetros diferentes (valores nominais de: 4 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, 13 cm, 15 cm e 16 cm), 9 idades de cortes (4-7 anos e 9-13 anos) e 8 regiões distintas de plantio das árvores. A utilização prevista para esses produtos roliços perfilados será estrutural.

Figura 5 - Peças roliças perfiladas de *Eucalyptus urograndis* (AMARU)



Fonte: Autoria própria

Os elementos estudados passaram por um processo de secagem, realizado em etapas, iniciadas já no momento do corte. As árvores foram cortadas e armazenadas no mesmo local, de modo que o produto não sofresse uma diferença de umidade e temperatura do ambiente muito drástica. Depois deste período, as toras foram realocadas para um pátio, onde foi realizada a uniformização do diâmetro ao longo do comprimento das peças, com a utilização de um torno (Figura 6 e Figura 7). Após isto, as peças eram alocadas por mais um período no pátio nas proximidades dos equipamentos de torno.

Destas peças já secas, foram separadas aquelas com menor presença de defeitos e melhores características visuais para definição da amostragem, para um local coberto com ventilação lateral. As peças foram numeradas, com controle do Região de plantio, diâmetro e idade de corte para futura análise dos dados.

Figura 6 - (a) Peças antes de ser realizada a uniformização da seção e (b) peças após ter sido realizada a uniformização



Fonte: Autoria própria

Figura 7 - Pátio para secagem e alocação das peças



Fonte: Autoria própria

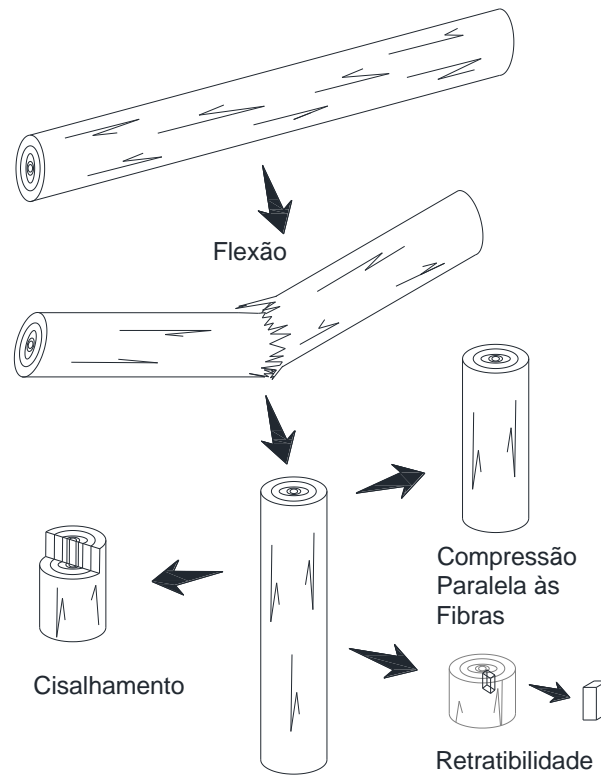
Não existe uma norma brasileira de classificação visual de peças roliças para o uso na construção civil. Existe uma norma brasileira que apresenta recomendações de classificação visual para postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica (NBR 8456, 1984). Na falta de uma norma específica, esta pode ser utilizada para a classificação visual de peças roliças.

Preliminarmente foi realizado uma classificação visual das peças com base nessa norma, e observou-se que os defeitos visuais não influenciaram nos resultados das propriedades de resistência e rigidez nas peças, nos ensaios de flexão.

### 3.1 Caracterização Física e Mecânica

Os ensaios realizados foram os seguintes: flexão à três pontos, compressão paralela às fibras, cisalhamento e estabilidade dimensional. As propriedades físicas e mecânicas determinadas com esses ensaios são apresentadas na Quadro 1, e o processo de retirada dos corpos de prova na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de retirada dos corpos de prova para caracterização



Fonte: Autoria própria

Quadro 1 Definição dos métodos para determinação das propriedades físicas e mecânicas

Ensaio	Método	Propriedade Determinada
Flexão à Três Pontos	NBR 7190/1997 (adaptado)	Módulo de elasticidade à flexão (MOE) Módulo de resistência à flexão (MOR)
Compressão Paralela às Fibras	NBR 7190/1997 (adaptado)	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{co}$ ) Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{co}$ )
Cisalhamento Paralelo às Fibras	NBR 7190/1997 (adaptado)	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{vo}$ )
Estabilidade Dimensional	NBR 7190/1997	Umidade (U), Densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) Retratibilidade (radial, tangencial, longitudinal e volumétrica)

Fonte: Autoria própria

### 3.1.1 Flexão à Três Pontos

Como este trabalho tem por objetivo a avaliação estrutural das peças, estas definições para a amostragem foram adaptadas para o objeto de estudo. As peças deverão ser testadas

nas suas dimensões comerciais, ou seja, serão mantidas as dimensões do elemento. Este procedimento foi julgado pertinente, mesmo não estando de acordo com as normas internacionais, pois as peças possuíam nós com pequenas dimensões.

O valor para o vão entre os apoios sugeridos pela NBR 7190 (1997) é um que a relação altura pelo vão seja superior a 21, para não haver influência dos esforços cisalhantes. Como na amostragem em questão as peças possuem um valor limitante de 2,2 metros, alguns diâmetros a serem testados não obedecem esta relação. Será posteriormente adotada uma verificação da influência deste fato para as amostras em questão, definindo a necessidade de realizar a correção dos valores.

Todas as peças, precedendo o ensaio de flexão, foram pesadas e medidas, de maneira a ser obtido o valor da densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) do material. Para a mensuração da massa, foi utilizada uma balança com precisão de 0,01 quilograma e as dimensões da peça com uma trena com precisão de 1 cm.

A aplicação do carregamento foi realizada por meio da ativação de bomba hidráulica acoplada a um atuador, que por sua vez está conectado a um anel dinamométrico (ELE) (Figura 9). Foram realizadas 6 leituras dos valores de deslocamento das peças, com a utilização de um relógio comparador (Mitutoyo), com 0,01mm de precisão, situado no mesmo ponto de aplicação da carga, abaixo da peça.

Figura 9 - Ensaio de flexão à três pontos



Fonte: Autoria própria

Para o cálculo dos valores de módulos de elasticidade à flexão (*MOE*) e módulo de resistência à flexão (*MOR*) foram utilizados as Equações 01 e 02, propostas pela NBR 7190 (1997), porém aplicadas para o caso de seção transversal circular.



$$MOE = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 48 \cdot I} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) \cdot L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \cdot 12 \cdot \pi \cdot r^4} \quad (01)$$

$$MOR = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} = \frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{32}{\pi \cdot D^3} = \frac{8 \cdot P \cdot L}{\pi \cdot D^3} \quad (02)$$

em que  $F_{M,50\%}$  equivale ao valor de 50% da carga de ruptura da peça,  $F_{M,10\%}$  equivale ao valor de 10% da carga de ruptura da peça,  $L$  é o vão entre os apoios,  $V_{50\%}$  equivale ao valor do deslocamento na aplicação de 50% da carga de ruptura da peça,  $V_{10\%}$  equivale ao valor do deslocamento na aplicação de 10% da carga de ruptura da peça,  $I$  é o valor da inércia da peça na direção ensaiada,  $r$  é o raio da seção transversal do corpo de prova,  $D$  é o diâmetro da seção transversal das peças,  $M_{m\acute{a}x}$  é o momento máximo que o elemento resistiu na sua ruptura e  $W_e$  é o módulo de resistência elástico da seção transversal.

### 3.1.2 Compressão Paralela Às Fibras,

Para os ensaios para determinação do módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras, o corpo de prova constituiu da seção transversal do elemento utilizado no ensaio de flexão, com comprimento de três vezes o diâmetro da peça. Nos casos dos diâmetros de 15 e 16 cm, foi utilizado dez vezes o raio de giração, resultando em uma altura de 37,5 cm, calculado com a Equação 03, sugestão encontrada na norma ASTM D198 (2014), item 17.5. Esta medida foi tomada devido a limitação da máquina universal para a altura do corpo de prova.

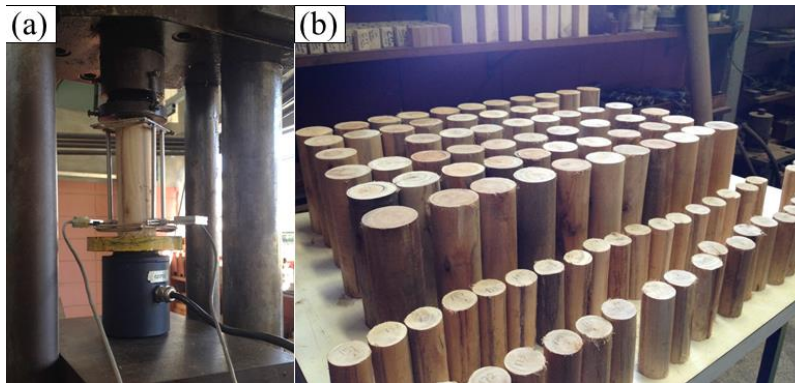
$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^4}{64} \cdot \frac{4 \cdot \pi}{D^2}} = \frac{D}{4} \rightarrow 10 \cdot \frac{15}{4} = 37,5 \text{ cm} \quad (03)$$

O ensaio consistiu na aplicação de carregamento utilizando uma máquina universal (AMSLER), utilizando uma célula de carga (MSI), dois *clip gages* (MSI) (Figura 10 (a)) e um sistema de aquisição de dados (*Vishay Measurement group Ltda.*). Por meio da célula de carga e os transdutores foi possível obter o binário força e deformação, do qual é possível determinar os valores de tensão ( $\sigma$ ) e deformação específica ( $\varepsilon$ ), podendo assim ser calculado o valor do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras pela inclinação do trecho linear do gráfico gerado por estas duas variáveis. Para o valor da  $f_{co}$ , foi calculada a área da seção transversal medindo o diâmetro e a carga de ruptura pela máquina universal pelo uso da Equação 04.

$$f_{c0} = \frac{F_{rup}}{A} = \frac{F_{rup}}{\pi \cdot r^2} \quad (04)$$

onde  $F_{rup}$  é o valor de ruptura da peça à compressão paralela às fibras,  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova e  $r$  o raio da seção transversal do corpo de prova.

Figura 10 - (a) Ensaio de compressão paralela às fibras e (b) corpos de prova de compressão para ensaio de compressão paralela às fibras



Fonte: Autoria própria

### 3.1.3 Cisalhamento Paralelo Às Fibras

Para a determinação da resistência ao cisalhamento ( $f_{v0}$ ) foram utilizadas as recomendações da norma brasileira NBR 7190 (1997), com adaptações nas dimensões do corpo de prova. De maneira análoga aos outros ensaios, foi retirado um corpo de prova formado pela seção transversal da peça utilizada no ensaio de flexão, uniformizada a seção lateral para melhor inserção dentro do aparato e a incisão de um dente, tal como mostra a Figura 11. Foi então aplicado carregamento com a utilização da máquina universal no entalhe, induzindo uma ruptura no plano paralelo à direção longitudinal. O valor da resistência é então calculado utilizando a Equação 05, com a carga de ruptura ( $F_{rup}$ ) e a área do plano que ocorreu a ruptura ( $A$ ), em que está é a altura efetiva ( $h$ ) multiplicada pela espessura do plano do dente ( $e$ ).

$$f_{v0} = \frac{F_{rup}}{A} = \frac{F_{rup}}{h \cdot e} \quad (05)$$

Figura 11 - (a) Corpos de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras e (b) aplicação do carregamento no aparato para ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autoria própria

### 3.1.4 Propriedades Físicas

Para a determinação dos valores da retratibilidade longitudinal ( $RL$ ), tangencial ( $RT$ ), radial ( $RR$ ) e volumétrica ( $RV$ ), densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) e umidade ( $U$ ) foi utilizado o método da norma brasileira NBR 7190 (1997). Foram retirados corpos de prova com dimensões de 2 cm X 3 cm X 5 cm das peças rompidas nos ensaios de flexão (Figura 12).

Figura 12 - corpos de prova para determinação da estabilidade dimensional da madeira



Fonte: Autoria própria

As propriedades são calculadas a partir das Equações 06, 07, 08 e 09:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (06)$$

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{v_{sat}} \quad (07)$$

$$\varepsilon_i = \frac{L_{i,sat} - L_{i,seco}}{L_{i,seco}} \cdot 100 \quad (08)$$

$$RV = \frac{V_{sat} - V_{seco}}{V_{seco}} \cdot 100 \quad (09)$$

Onde  $m_i$  equivale ao valor da massa saturada,  $m_s$  equivale ao valor da massa seca em estufa,  $\rho_{bas}$  é o valor da densidade básica da amostra,  $v_{sat}$  é o valor relativo ao valor saturado,  $\varepsilon_i$  equivale ao valor percentual da retratibilidade da madeira,  $L_i$  é a dimensão a ser avaliada para a retratibilidade em questão,  $RV$  é a retratibilidade volumétrica em valor percentual,  $V_{sat}$  é o valor do volume na condição saturada e  $V_{seco}$  é o volume na condição seca em estufa.

### 3.2 Correção dos Valores para as Condições de Referência

Segundo o código normativo internacional ISO 13910 (2014), as correções devem ser realizadas em amostras que tenham valor de teor de umidade diferente de 12%. Para o caso em que o teor de umidade seja superior a 19%, este deverá ser adotado como 19 %.

A mesma cita que, para os valores de resistência à tração e módulo de resistência à flexão, estes não necessitam ser corrigidos, em função do teor de umidade. Para a resistência à compressão paralela às fibras, para cada 1 % de diferença com o valor de referência, devem ser corrigidos 3 % do valor da propriedade. Para os valores dos módulos de elasticidade, para cada 1 % de diferença, devem ser corrigidos 2 % do valor da propriedade. Para o caso do cisalhamento, os ajustes devem ser baseados em ensaios realizados em corpos de provas isentos de defeitos. As correções devem ocorrer de maneira que a propriedade melhore com o ajuste, considerando que ela vá ser ajustada a partir de um valor superior ao de referência.

A NBR 7190 (1997) estipula correções com valores iguais aos da norma ISO 13910 (2014), porém, não estabelece restrição quanto a não necessidade de correção da resistência à tração e módulo de resistência à flexão. Além disto, o limite do teor de umidade definido na norma brasileira é de 20%.

### 3.3 Verificação quanto a Qualidade das Amostras

No código normativo europeu EN 384 (2010), um dos tópicos trata da verificação da eficiência de cada amostragem quanto a capacidade de representar a população de estudo. Isto é feito por meio da análise dos valores de Coeficiente de Variação (CV) de cada propriedade,

para cada amostra. Para isto, é assumido um risco para o produtor de  $\alpha=5\%$  e risco para o consumidor de  $\beta=10\%$ , sendo o risco do produtor a probabilidade em que um lote com qualidade superior ao necessário não passe na verificação, e o risco do consumidor a probabilidade de um lote com qualidade inferior ao necessário passe na verificação.

### 3.4 Cálculo do Valor Característico

Para a determinação do valor característico ( $f_k$ ) - quinto percentil relativo à uma amostra - será utilizada a norma ISO 13910 (2005). O uso deste documento normativo foi escolhido por meio de uma análise comparativa de diferentes métodos, vide Anexo B. Esta define uma amostragem mínima de 40 corpos de prova, em que os valores das propriedades de resistência (Figura 13(a)) a serem definidas serão ordenados em forma crescente (Figura 13(b)). Dos seus valores será calculado o valor do percentil experimental utilizando a Equação 10, o logaritmo neperiano do valor da resistência de cada corpo de prova e o  $\ln[-\ln(1-p_i)]$  relativo ao percentil do  $i$ -ésimo corpo de prova ( $p_{i,ISO}$ ).

$$p_{i,ISO} = \frac{i - 0,5}{N} \quad (10)$$

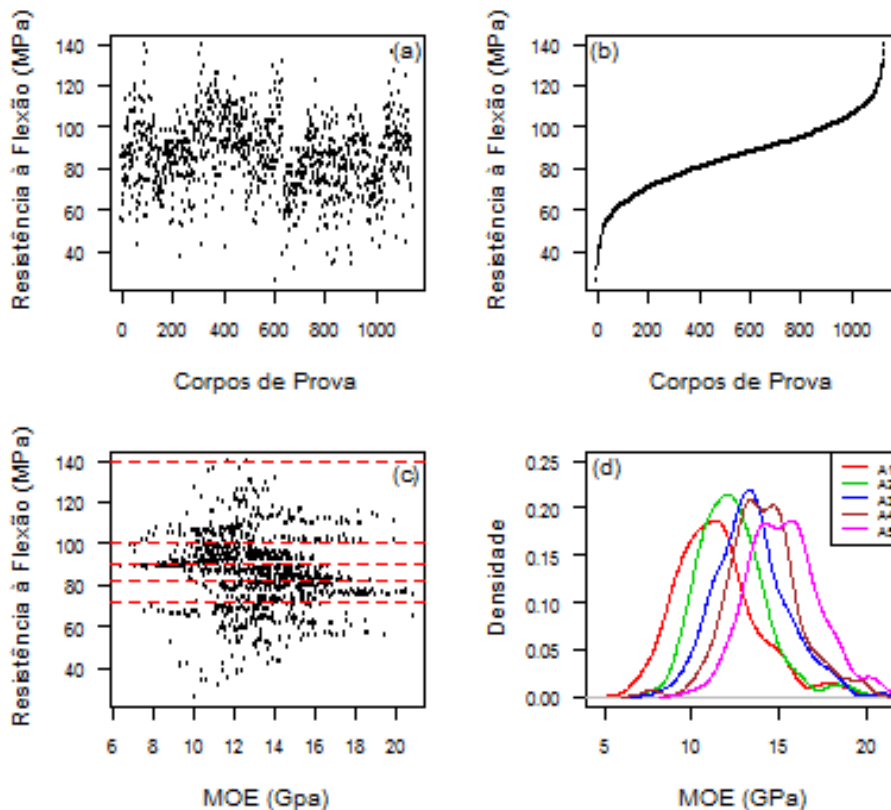
Com o valor do percentil experimental calculado, define-se então o quinto percentil experimental ( $f_{0,05,data}$ ) das amostras formadas (Figura 13(c) e (d)), como sendo o caso com valor de 5%, ou, caso necessário, o valor resultante de interpolação linear entre os dois valores imediatamente superior e inferior a este.

Por meio do gráfico do  $\ln(f_i)$  pelo  $\ln[-\ln(1-p_i)]$  calculado, utilizando os 15 menores valores, ou os 15% menores, no caso o que possuir maior quantidade, deve ser definida uma linha de tendência e obtido o valor da inclinação pela equação da reta obtida ( $s$ ). Com este valor é calculado o coeficiente de variação ajustado para a cauda de uma distribuição Weibull ( $CV_{tail}$ ) (Equação 11). Com este valor é determinado o valor do  $f_k$  como sendo o valor relativo ao  $f_{data,0.05,1}$  dado pela Equação 12.

$$CV_{tail} = s^{-0,92} \quad (11)$$

$$f_k = f_{data,0.05,l} = f_{0.05,data} \left( \frac{1 - 2,7 \cdot CV_{tail}}{\sqrt{N}} \right) \quad (12)$$

Figura 13 - Esquema para cálculo dos valores característicos



Fonte: Autoria própria

Segundo a norma ISO 16598 (2014, *DRAFT*), devido a norma ASTM 198 (2014) alocar aleatoriamente os defeitos redutores de resistência no vão do ensaio de flexão, isto resulta em uma estimacão da resistência superior quando comparada a norma EN 408 (2010), a qual posiciona os defeitos na região central entre os dois pontos de aplicao do carregamento. A diferença na resistência a flexão é estimada em varia de 5 % para madeiras de alta resistência até 15 % para madeiras de baixa resistência. Em contrapartida, o método estatístico de cálculo da norma EN 384 (2010) resulta em valores superiores das propriedades de resistência, sendo também citado que estudos sugerem que estas diferenças se contrabalançam (ROUGER, 2004, apud ISO 16598, 2014, *DRAFT*).

### 3.5 Determinao da Tabela de Classe

Para a determinao dos valores de cada propriedade e a definio das classes de resistência, utilizou-se o projeto de norma ISO 16598 (2014), a qual disponibiliza um modelo

para a criação de um sistema de classes de resistência de madeira serrada. Nos casos em que não foram julgadas adequadas estas especificações, foi realizada uma adequação para a madeira roliça com a prévia explicação dos procedimentos.

Para ser construída uma tabela, primeiramente devem ser definidas as propriedades primárias, ou seja, as propriedades que são imprescindíveis de ser realizados ensaios para a alocação em uma das classes. A norma ISO 16598 (2014) sugere as seguintes propriedades: módulo de resistência à flexão, rigidez à flexão e densidade. Os valores destas três propriedades deverão ser analisados pelo 5º percentil (valor característico), e para o caso da rigidez, também o valor médio.

Como a população em questão possui variação no diâmetro (D), região de plantio (Local) das árvores e idades de corte (IC), serão avaliadas quais as variáveis que possuem influência nos valores das propriedades para determinação mínima do número de corpos de prova. O fator idade será estudado de maneira a verificar se a interferência dele nos valores das propriedades é significativa, ou não, para este caso. Se negativo, ele também será desconsiderado. Esta abordagem foi definida de maneira a possibilitar uma amostragem conforme as especificações das normas ISO 16598 (2014, *DRAFT*) e EN 338 (2009).

A Quadro 2 mostra a correspondência adotada para as regiões de plantio, por questão de simplificação das análises, e a Tabela 10 a quantidade de corpos de prova (N) levando em conta as variações de Região de plantio (Região), ano de corte (IC) e diâmetro das peças (D).

É possível notar que as amostras com maior quantidade de corpos de prova são as com peças com 4 e 9 anos, para idade de corte, nas regiões A, B e C.

Quadro 2 - Correspondência para as regiões de plantio

<b>Região de Plantio</b>	<b>Correspondência</b>
Lagoa do Capim	A
Jacaré	B
Meleiro	C
Riachão	D
Buritis	E
Mutuca	F
Buriti Grande	G
Água Branca	H

Fonte: Autoria própria

Em torno de 2% (1 amostra de 52 amostras) da amostragem total são formadas por amostras de 99 peças, 2% (1) de amostras com 90 peças, 2% (1) de amostras com 75 peças, 2% (1) de amostras com 52 peças, 2% (1) de amostras com 45 peças, 2% (1) de amostras com

44 peças, 6% (3) de amostras com 30 peças, 67% (35) de amostras de 15 peças, 13% (7) de amostras com 14 peças e 2% (1) com 8.

Conforme o proposto nas normas ASTM 194 (2014), ISO 13910 (2014) e EN 338 (2009), caracterização de amostras com quantidade inferior à 40 corpos de prova podem não ser representativas à população, sendo necessário então diminuir a quantidade de variáveis para a definição das amostras posteriormente.

Tabela 10 - Quantidade de corpos de prova por variabilidade

<b>N<sub>CP</sub></b>	<b>D (cm)</b>	<b>IC (anos)</b>	<b>Região</b>	<b>N<sub>CP</sub></b>	<b>D (cm)</b>	<b>IC (anos)</b>	<b>Região</b>
99	4	9	C	15	11	10	G
90	7	9	C	15	7	9	F
75	11	9	C	15	9	9	F
52	15	9	B	15	13	9	F
45	11	4	A	15	15	9	F
44	15	9	C	15	16	9	F
30	7	9	B	15	4	7	D
30	11	9	B	15	7	7	D
30	7	4	A	15	9	7	D
15	7	13	E	15	11	7	D
15	9	13	E	15	13	7	D
15	11	13	E	15	4	6	E
15	13	13	E	15	7	6	D
15	15	13	E	15	9	6	E
15	16	13	E	15	4	5	D
15	9	12	D	15	7	5	D
15	11	12	D	15	7	4	H
15	13	12	D	14	7	12	D
15	15	12	D	14	16	11	B
15	16	12	D	14	13	10	G
15	7	11	B	14	15	10	G
15	9	11	B	14	4	9	F
15	11	11	B	14	11	9	F
15	13	11	B	14	4	4	H
15	15	11	B	11	7	10	G
15	4	10	G	8	15	4	A
15	9	10	G				

Fonte: Autoria própria

A definição dos intervalos entre as Classes de Resistência será realizada considerando-se a dispersão dos dados, não sendo adotados intervalos inferiores à 2 MPa tal como definido na norma ISO 16598 (2014, *DRAFT*).



Após esta definição de intervalos, os dados serão agrupados conforme estas divisões, de maneira a calcular os valores característicos e médios de cada uma das propriedades. Estes valores serão utilizados para a montagem da tabela de Classes de Resistência.

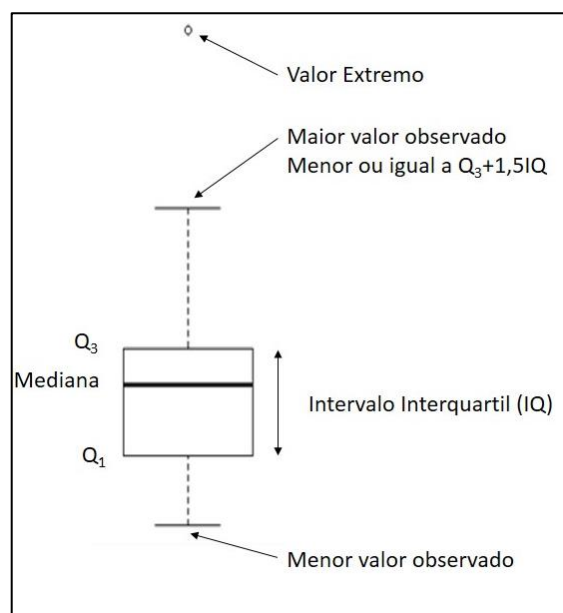
### 3.6 Análise Estatística de Influência entre as Propriedades

Para esta seção do trabalho foi definido como adequado a utilização do pacote computacional livre R para análises estatísticas dos dados, pois este é amplamente difundido para este uso. Este se identifica por uma plataforma programável com um grande número de pacotes desenvolvidos por pesquisadores de inúmeras instituições, que serão de grande serventia para possíveis análises paramétricas e não paramétricas, tal como geração de diagramas.

Para a análise inicial dos dados serão determinados valores de medidas de posição e dispersão, como a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Com intuito de verificar a integridade e o comportamento dos dados, serão gerados diagramas de *boxplot*, ilustrado na Figura 14. Estes definem uma delimitação denominada Intervalo Interquartil, definidos pelo Q1 (quantil de 25 %) e Q3 (quantil de 75 %), os quais evidenciam a concentração dos valores obtidos para a amostra de interesse. Este elemento gráfico também pode ressaltar possíveis valores atípicos tal como definido por Magalhães e Lima (2013), chamados de valores extremos, valores aberrantes ou *outliers*.

Figura 14 - Elementos de um boxplot



Fonte: Magalhães e Lima (2013)

Serão calculados por meio do pacote computacional R para a análise de influência, os valores de correlação linear e o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os resultados dos ensaios realizados, estes foram corrigidos primeiramente para as condições referência de umidade, conforme já especificado. Logo após, foi realizada uma análise quanto à variação dos valores em questão do diâmetro, idade de corte e região de plantio. Isto foi possível utilizando os gráficos *boxplots* presentes no Apêndice A, Figura 39 até a Figura 44.

Os resultados referentes às propriedades estudadas estão resumidos na Tabela 11 e Fonte: Autoria própria

Tabela 12, sendo apresentada a quantidade de corpos de provas já ensaiadas para cada propriedade ( $N_{cp}$ ), o valor médio ( $\mu$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ), valores mínimo e máximo e coeficiente de variação (CV).

Tabela 11 - Resultados dos ensaios realizados

	$\rho_{ap}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	MOR (MPa)	MOE (MPa)	$f_{c0}$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)
$N_{cp}$	1142	1139	1138	1116	1104	915
$\mu$	645,7	85,9	13309	51,1	15182	9,0
Mínimo	474,5	26,5	6561	28,6	4448	2,3
Máximo	825,5	140,0	20907	81,4	44034	16,2
$\sigma$	57,4	17,1	2468,8	7,3	5148,3	2,3
CV (%)	8,9	20,0	18,5	14,4	33,9	25,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 - Resultados dos ensaios realizados

	Umidade (%)	$\rho_{bas}$ (kg/m <sup>3</sup> )	RR (%)	RT (%)	RL (%)	RV (%)
$N_{cp}$	975	977	977	977	977	977
$\mu$	12,0	496,0	7,5	7,0	0,2	15,2
Mínimo	6,7	374,2	2,7	2,7	-0,6	9,5
Máximo	18,3	651,4	13,6	12,7	1,2	26,7
$\sigma$	2,4	44,4	1,5	1,5	0,2	2,3
CV (%)	20,1	8,9	20,7	20,8	93,8	15,5

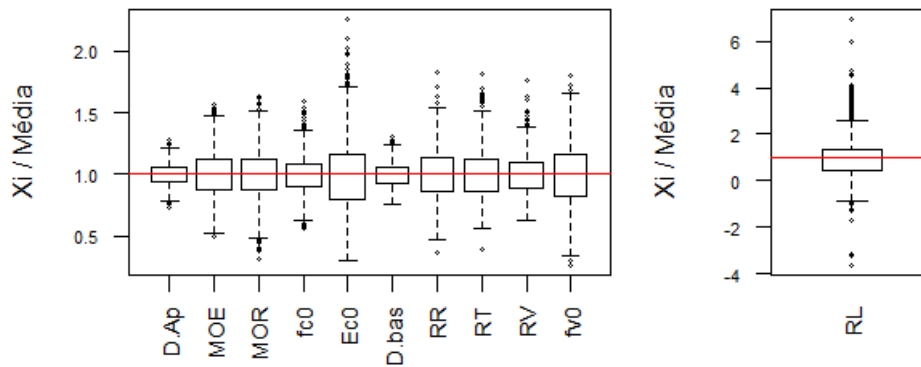
Fonte: Autoria própria

A maior quantidade de testes realizados foi para a propriedade da densidade aparente (1142), MOE (1138) e módulo de resistência à flexão (1139). Isto se deve ao fato de estas serem as propriedades que são obtidas inicialmente, ou seja, não influenciadas por ruptura, aliado ao fato de que o diâmetro não interfere na execução, tal como evidenciado nos gráficos *boxplot* no Apêndice A, Figura 39 até a Figura 44. As propriedades que apresentaram a menor quantidade de corpos de prova ensaiados foram para a umidade (975) e cisalhamento paralelo às fibras (915), o qual é justificado pela dificuldade da produção dos corpos de provas para elementos de diâmetros pequenos.

Em relação aos valores médios encontrados neste trabalho com os obtidos por SANTOS (2013), para as propriedades de flexão, houve uma proximidade com os valores não corrigidos de 9,2% para MOR e 1,10% para o MOE. Já para as propriedades de compressão e cisalhamento paralelo às fibras, os valores foram mais próximos para os corrigidos (0,78% para o  $f_{c0}$ , -3,4% para o  $E_{c0}$  e 8,9% para o  $f_v$ ). Realizando uma análise dos valores das propriedades das espécies caracterizadas citadas na revisão bibliográfica, não foi possível identificar uma similaridade ou padrão com alguma das espécies citadas, o mais próximo obtido foi com as espécies *Eucalyptus Alba* (-9,2% para a  $\rho_{ap}$ , 7,4% para a  $f_{c0}$ , 11,7% para o  $E_{c0}$  e -5,6% para a  $f_v$ ) e *Eucalyptus saligna* ((-13,2% para a  $\rho_{ap}$ , 8,4% para a  $f_{c0}$ , 1,6% para o  $E_{c0}$  e -8,9% para a  $f_v$ ) conforme os valores do Anexo E da NBR 7190 (1997).

Para realizar uma análise comparativa da variabilidade, cada valor determinado experimentalmente foi dividido pelo valor médio relativo à cada propriedade, resultando em um valor adimensional. A Figura 15 ilustra estes valores obtidos para cada propriedade estudada por meio de *boxplots*, em que a linha vermelha representa o valor médio. É possível visualizar que as propriedades com maior flutuação dos valores, ou seja, maior coeficiente de variação, são a retratibilidade longitudinal (93,8%) e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (33,9%). A primeira se dá pela ordem de grandeza dos valores referentes à esta propriedade, aliado com a precisão dos equipamentos. Já o  $E_{c0}$  se deve pela própria variabilidade e sensibilidade desta propriedade. Os menores valores de variabilidade foram para a densidade aparente (8,9%) e básica (8,9%), seguida pela resistência à compressão paralela às fibras (14,4%). Tem-se que quanto menor a variabilidade dos valores, menor o tamanho amostral necessário para estimar os valores populacionais.

Figura 15 - Análise da distribuição das propriedades em torno da média



Fonte: Autoria própria

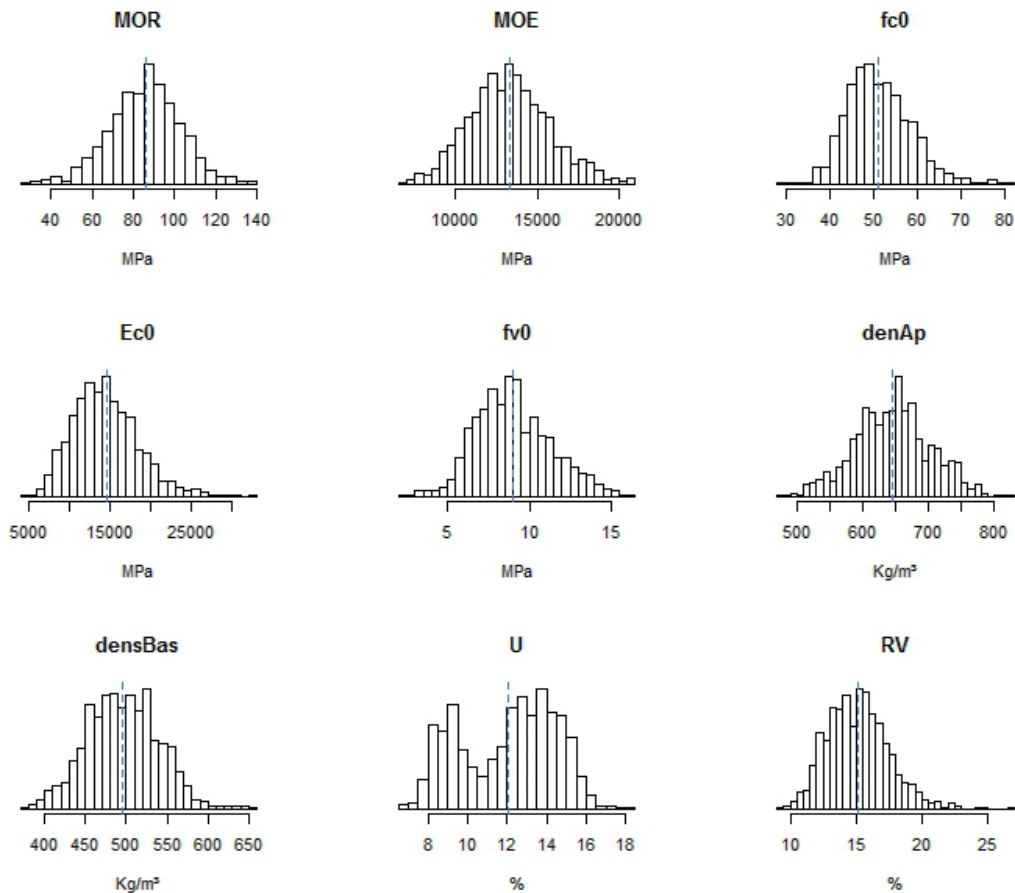
em que  $X_i$  é o valor de cada peça ou corpo de prova ensaiado, para cada propriedade.

#### 4.1 Histogramas e Teste de Normalidade das Propriedades

A Figura 16 ilustra os histogramas e a média, com exceção das retratibilidades tangencial, radial e longitudinal. É possível visualizar que nem todas as propriedades possuem um aspecto de uma distribuição normal, tal como a resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, umidade e retratibilidade volumétrica. Estas características ressaltam a importância das definições de modelos de distribuição apropriados para a estimação dos valores de percentis.

A Tabela 13 resume os valores que foram obtidos utilizando dois testes estatísticos para normalidade, no caso o Shapiro-Wilk (SW) e Anderson-Darling (AD). Os maiores valores de p-valor obtidos foram para densidade aparente (SW: 0,061; AD:0,047), módulo de resistência à flexão (SW: 0,049; AD: 0,046) e densidade básica (SW: 0,021; AD: 0,018). Foi adotado um valor de 5% para o nível de significância do teste, ou seja, para um valor abaixo deste, rejeita-se a hipótese nula do teste, que é a de que a amostra em estudo é proveniente de uma amostra com distribuição normal. Logo, como citado, apenas a propriedade de densidade aparente pelo teste de Shapiro-Wilk, que possui evidências de que a amostra pertence a uma população com distribuição normal.

Figura 16 - Histograma das principais propriedades estudadas



Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Valores obtidos com teste de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling para normalidade

Propriedade	Shapiro-Wilk		Anderson-Darling	
	W	p-valor	A	p-valor
<b>MOE</b>	0,9952	0,0011	1,0842	0,0076
<b>MOR</b>	0,9973	0,0489	0,7658	0,0464
<i>fc0</i>	0,9837	7,30E-10	3,4829	1,04E-08
<i>Ec0</i>	0,9714	6,12E-14	5,1582	9,53E-13
<i>fv0</i>	0,9896	4,26E-06	3,2828	3,18E-08
<i>ρ<sub>ap</sub></i>	0,9974	0,0615	0,7643	0,0468
<i>ρ<sub>bas</sub></i>	0,9963	0,0213	0,5229	0,1827
<b>RV</b>	0,9827	1,46E-09	2,3103	7,46E-06
<b>Umidade</b>	0,9531	<2,2e-16	17,054	<2,2e-16

Fonte: Autoria própria

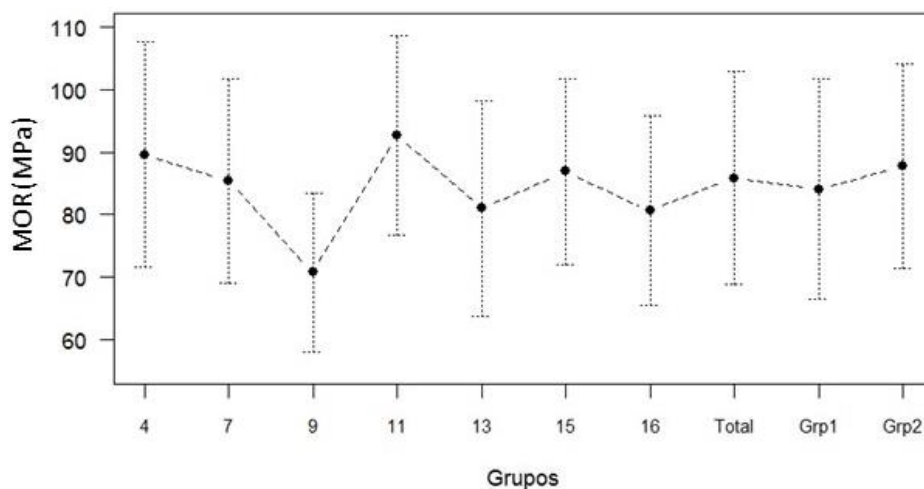
## 4.2 Determinação da Tabela de Classe de Resistência

### 4.2.1 Amostragem

Para a proposta da Tabela de Classe de Resistência, foi utilizado a amostragem completa sem a aplicação de fatores de correção nas propriedades, com exceção da umidade.

Devido a variabilidade quanto a origem e características do material, foi julgado necessário realizar o estudo por grupos de dados: (a) toda amostra (Total), (b) por diâmetro individualmente e (c) dois grupos de dados formados por diâmetros (Grupo 1: diâmetros de 4 cm, 7 cm e 9 cm, e Grupo 2: diâmetros de 11 cm, 13 cm, 15 cm e 16 cm). Para isto, foram gerados diagramas com os valores médios de cada grupo, e seus respectivos desvios padrões, para ilustrar a variabilidade e distribuição dos dados. A Figura 17 mostra os valores para o caso do módulo de resistência à flexão. É possível evidenciar que para o diâmetro de 9 cm existe uma redução significativa do valor da média (70,7 MPa). O coeficiente de variação foi de 17,1% a 21,3%, sendo o menor para o diâmetro de 15 cm e o maior para 13 cm.

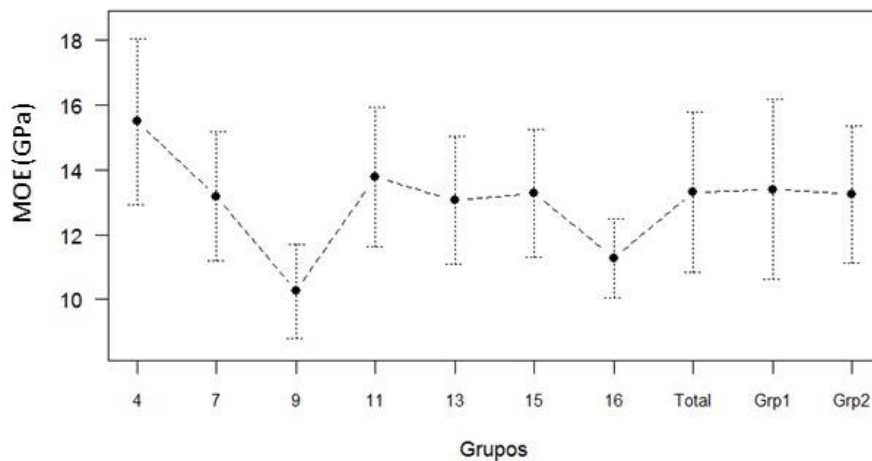
Figura 17 - Análise da distribuição do módulo de resistência à flexão em torno da média



Fonte: Autoria própria

Para o caso do módulo de elasticidade à flexão, a Figura 18 resume os valores calculados. É possível evidenciar que para os diâmetros de 9 cm (com coeficiente de variação de 14,2%), 15 cm (14,9 %) e 16 cm (10,8 %), estes apresentaram pequena variabilidade dos valores em torno da média. O valor máximo foi para o Grupo 1 (20,7 %). Para os diâmetros de 9 cm e 16 cm, observa-se uma redução dos valores de média e mesmo de variação, enquanto que para o diâmetro de 4 cm (15848 MPa), estes apresentam-se superiores.

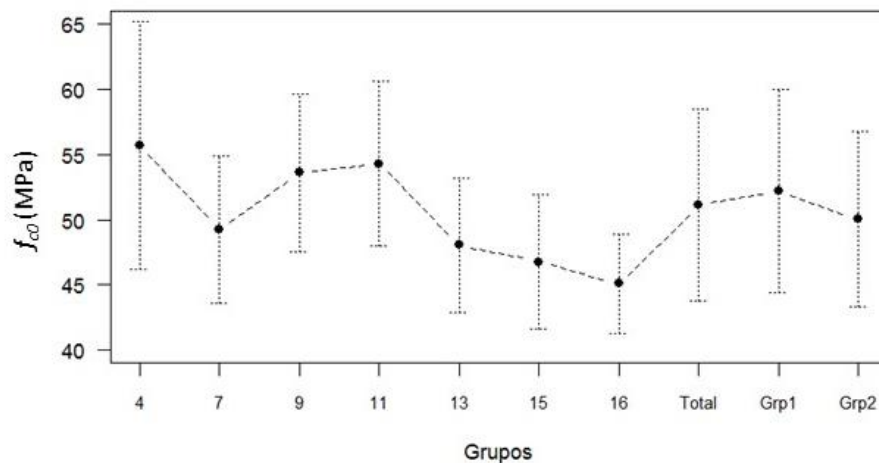
Figura 18 - Análise da distribuição do módulo de elasticidade à flexão em torno da média



Fonte: Autoria própria

Para o caso da resistência à compressão paralela às fibras, a Figura 19 resume os valores calculados. Visualmente, é possível verificar uma influência do diâmetro nos valores da média e na dispersão nos dados dessa propriedade. Os menores valores da média foram para os diâmetros de 13cm (48 MPa), 15cm (46,8 MPa) e 16 cm (45,1 MPa). Já o de 4 cm é o que apresenta o maior valor médio (55,7 MPa), e também a maior dispersão dos dados (17 %).

Figura 19 - Análise da distribuição da resistência à compressão paralela às fibras em torno da média

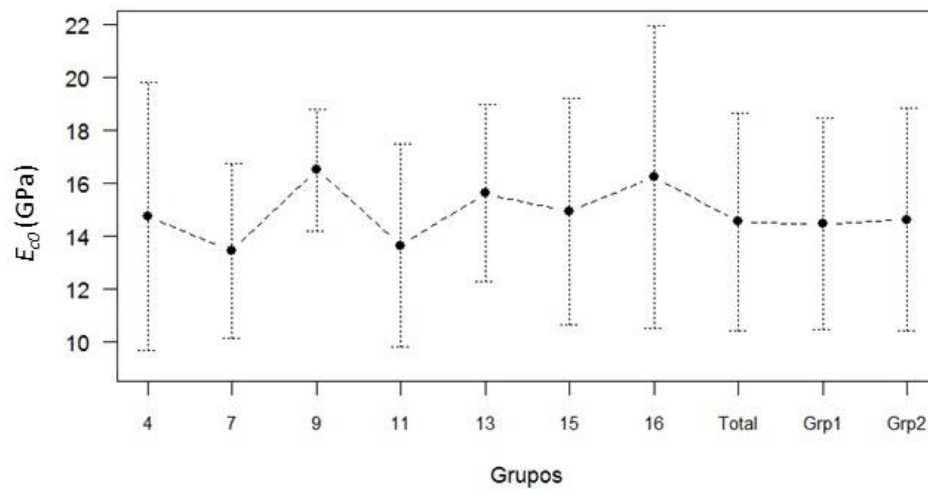


Fonte: Autoria própria

Para o caso do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, a Figura 20 resume os valores calculados. Visualmente, apenas para o diâmetro de 9 cm (16506 MPa) que existe aumento significativo do valor da média em relação aos outros grupos. Quanto à variabilidade, é possível verificar um menor valor para o caso do diâmetro de 9 cm (14 %), e um valor mais pronunciado para os diâmetros de 4 cm (34,4 %) e 16 cm (35,2 %).



Figura 20 - Análise da distribuição do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras em torno da média

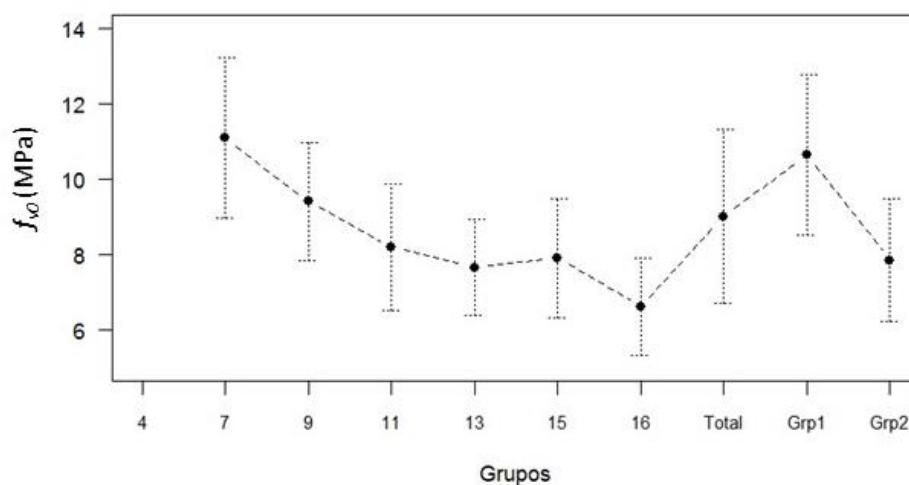


Fonte: Autoria própria

Para o caso da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, a Figura 21 resume os valores calculados. Visualmente, é possível verificar uma influência do diâmetro nos valores da média e na dispersão nos dados dessa propriedade. Em que para os diâmetros de 13 cm (7,7 MPa) e 16 cm (6,6 MPa), apresentam os menores valores de média. Já o de 7 cm (11,1 MPa) que apresenta o maior valor médio. Quanto à variabilidade, é possível verificar os menores valores para os diâmetros de 16 cm (16,6 %) e 9 cm (16,7 %), e um valor mais pronunciado para o grupo formado por todos os corpos de provas ensaiados (25,5 %).

Devido ao entalhe mínimo necessário para o ensaio de determinação dessa propriedade ser de 3 cm, as peças com diâmetro de 4 cm eram impossibilitadas da execução, pois a área residual da seção transversal era pouca, causando instabilidade, sendo assim o único diâmetro sem essa propriedade definida.

Figura 21 - Análise da distribuição da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em torno da média



Fonte: Autoria própria

Em termos gerais, dos diagramas analisados quanto à variabilidade em torno da média, tem-se que os valores superiores para a média foram evidenciados nas amostras dos grupos de diâmetro inferiores à 10 cm, com exceção do módulo de resistência à flexão. Consequentemente, os menores valores foram evidenciados para os grupos com diâmetros superiores à 10 cm, com exceção do MOR e MOE.

Já quanto ao coeficiente de variação, foram os diâmetros de 15 cm e 16 cm que tiveram os menores valores, com exceção do MOE e do cisalhamento, em que o diâmetro de 9 cm também foi relativamente baixo. Quanto aos maiores valores do CV, estes não apresentaram uma tendência.

De maneira a confirmar a diferença entre as médias para cada amostra formada pelos diferentes diâmetros e regiões de plantio das árvores, foi aplicado o teste de análise da variância (ANOVA) e também calculado o valor da correlação linear.

Tabela 14 - Teste de análise de variância em relação a região de plantio e diâmetro das peças

	Medidas	MOR	MOE	$f_{co}$	$E_{co}$	$f_{v0}$	$\rho_{ap}$
Região	F-valor	10.87	29.1	31.39	40.68	3.169	11.11
	P-valor	2.25E-13	<2e-16	<2e-16	<2e-16	0.00257	1.19E-13
Diâmetro	F-valor	26.91	85.67	56.57	11.23	133.4	47.42
	P-valor	<2e-16	<2e-16	<2e-16	3.42E-12	<2e-16	<2e-16

Fonte: Autoria própria

Para o ANOVA, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14 para cada propriedade testada, com os valores do p-valor e o F-valor. A única propriedade que demonstrou uma tendência a apresentar igualdade dos valores das médias dos grupos foi a

resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (aproximadamente 0,3%), para o caso de região de crescimento das árvores. Ou seja, as propriedades definidas possuem influência das regiões de crescimento e do diâmetro, pois os valores de média não podem ser considerados iguais entre os diferentes casos.

Os valores da correlação linear entre os valores das propriedades obtidas neste estudo estão apresentados na Tabela 15. Os pares de propriedades que apresentaram maiores valores para o coeficiente de correlação foram: diâmetro X resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (-0,61; p-valor<0,001), módulo de elasticidade à flexão X densidade aparente (0,60; p-valor<0,001), módulo de elasticidade à flexão X módulo de resistência à flexão (0,56; p-valor<0,001) e módulo de resistência à flexão X densidade aparente (0,51; p-valor<0,001). Tal como a literatura citada, foram obtidos valores de correlação superiores para as propriedades de flexão, apesar dos valores serem significativamente menores que os reportados na literatura. Os outros valores apresentaram R inferior a 0,5.

Tabela 15 - Valores do coeficiente de correlação (R) para as propriedades obtidas experimentalmente

	IC	D	$\rho_{ap}$	MOE	MOR	$f_{co}$	$E_{co}$	$f_{vo}$
IC	1	0,31 <sup>(3)</sup>	0,12 <sup>(3)</sup>	0,02	0,01	0,08 <sup>(2)</sup>	0,23 <sup>(3)</sup>	-0,14 <sup>(3)</sup>
D		1	-0,10 <sup>(3)</sup>	-0,25 <sup>(3)</sup>	-0,04	-0,31 <sup>(3)</sup>	0,08 <sup>(2)</sup>	-0,61 <sup>(3)</sup>
$\rho_{ap}$			1	0,60 <sup>(3)</sup>	0,51 <sup>(3)</sup>	0,40 <sup>(3)</sup>	0,15 <sup>(3)</sup>	0,25 <sup>(3)</sup>
MOE				1	0,56 <sup>(3)</sup>	0,46 <sup>(3)</sup>	0,08 <sup>(1)</sup>	0,14 <sup>(3)</sup>
MOR					1	0,30 <sup>(3)</sup>	0,05	0,16 <sup>(3)</sup>
$f_{co}$						1	0,35 <sup>(3)</sup>	0,23 <sup>(3)</sup>
$E_{co}$							1	0,00
$f_{vo}$								1

<sup>(3)</sup> : p-valor  $\leq$  0,001;

<sup>(2)</sup> : p-valor  $\leq$  0,01;

<sup>(1)</sup> : p-valor  $<$  0,05.

Fonte: Autoria própria

Com os valores calculados e gráficos gerados, é possível confirmar que em diferentes graus, existe a influência do diâmetro nos valores de resistência e propriedades de rigidez da amostra, sendo mais pronunciado no caso da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com o diâmetro.

Mesmo que visualmente ter sido evidenciado a possibilidade da pouca ou não existência, influência da idade de corte, região de plantio e do diâmetro nos valores das propriedades, foi julgado apropriado definir a amostragem conforme a análise dos grupos definidos por diâmetros, devido o teste ANOVA e os valores de correlação tenderem a algo

diferente. A Tabela 16 mostra a separação destes grupos, com as relativas quantidade de corpos de provas para cada propriedade.

Tabela 16 - Tamanho das amostras para Tabela de Classe de Resistência

Grupo	Amostra	MOR	MOE	$f_{co}$	$E_{co}$	$f_{vo}$	$\rho_{ap}$	$\rho_{bas}$
<b>D4</b>	A1	62	61	61	61	-	62	26
	A2	62	62	60	60	-	62	27
	A3	61	60	61	61	-	61	38
<b>D7</b>	A1	93	93	88	87	90	93	85
	A2	93	93	91	91	89	93	85
	A3	94	94	89	89	94	94	88
<b>D9</b>	A1	52	52	52	52	52	52	46
	A2	53	53	52	53	53	53	48
<b>D11</b>	A1	80	80	80	76	80	80	75
	A2	80	80	80	76	79	80	76
	A3	79	79	79	78	77	79	72
<b>D13</b>	A1	45	45	44	44	45	45	44
	A2	44	44	43	43	43	44	40
<b>D15</b>	A1	89	89	85	86	67	89	85
	A2	89	89	85	83	81	89	83
<b>D16</b>	A1	59	59	58	56	60	60	54
<b>Total</b>	A1	228	227	220	218	192	228	193
	A2	228	228	224	222	192	228	201
	A3	228	228	223	218	176	228	192
	A4	228	228	218	216	174	228	196
	A5	227	226	225	224	177	227	191
<b>Grupo 1</b>	A1	115	115	110	109	88	115	95
	A2	114	113	113	113	84	114	86
	A3	114	114	111	112	85	114	92
	A4	114	114	107	107	61	114	79
	A5	115	114	115	115	61	115	92
<b>Grupo 2</b>	A1	141	141	138	136	136	141	134
	A2	141	141	137	133	122	141	133
	A3	141	141	137	132	133	141	132
	A4	143	143	141	140	141	143	129

Fonte: Autoria própria

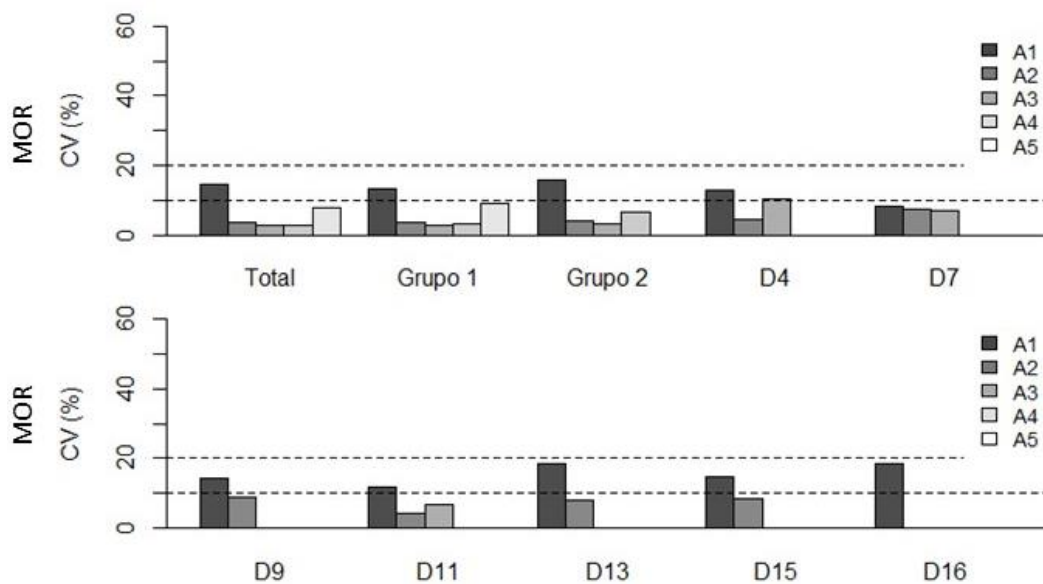
Atentou-se para a definição de amostras com tamanhos similares dentro de cada propriedade, visando uma melhor estimativa do valor característico. Com exceção da densidade básica para o diâmetro de 4 cm (26 corpos de prova), o qual existe a problemática citada anteriormente da dificuldade de produção dos corpos de prova, foi obedecida a sugestão das normas internacionais quanto à quantidade mínima de 40 corpos de prova. A

quantidade de classes dentro de cada grupo foi montada de maneira a não gerar um número excessivo, limitando estas a cinco.

#### 4.2.2 Análise da Variabilidade dos Valores das Amostras

Para realizar uma análise prévia das amostragens definidas para o cálculo dos valores característicos, foram montadas tabelas com os valores do coeficiente de variação (CV) para cada propriedade, considerando cada amostra dentro dos grupos. A Figura 22 mostra os valores para a módulo de resistência à flexão. Os maiores valores obtidos foram para: a amostra única do diâmetro de 16 cm (18,6 %), amostra A1 para o diâmetro de 13 cm (18,5 %) e para a amostra A1 do Grupo 2 (15,6%). Os menores valores obtidos foram para: a amostra A3 para o grupo formado por todos os corpos de provas ensaiados (2,6 %), para a amostra A3 do Grupo 1 (2,8 %) e para a amostra A4 para o grupo formado por todos os corpos de provas ensaiados (2,9 %).

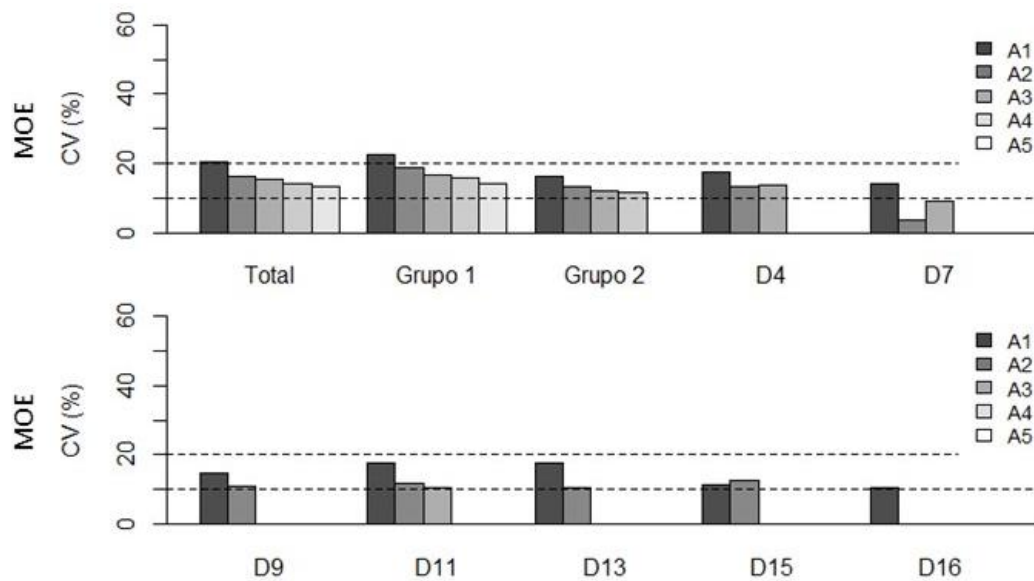
Figura 22 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para módulo de resistência à flexão para Tabela de Classe de Resistência



Fonte: Autoria própria

A Figura 23, mostra os valores para módulo de elasticidade à flexão. Os maiores valores obtidos foram para a amostra A1 do Grupo 1 (22,7 %), amostra A1 para o grupo formado por todos os corpos de provas ensaiados (20,2 %) e para a amostra A1 do Grupo 2 (16,2%). Os menores valores obtidos foram para a amostra A2 para o diâmetro de 7 cm (3,7 %) e amostra A3 para o diâmetro de 7 cm (8,9 %).

Figura 23 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Módulo de Elasticidade à Flexão para Tabela de Classe de Resistência

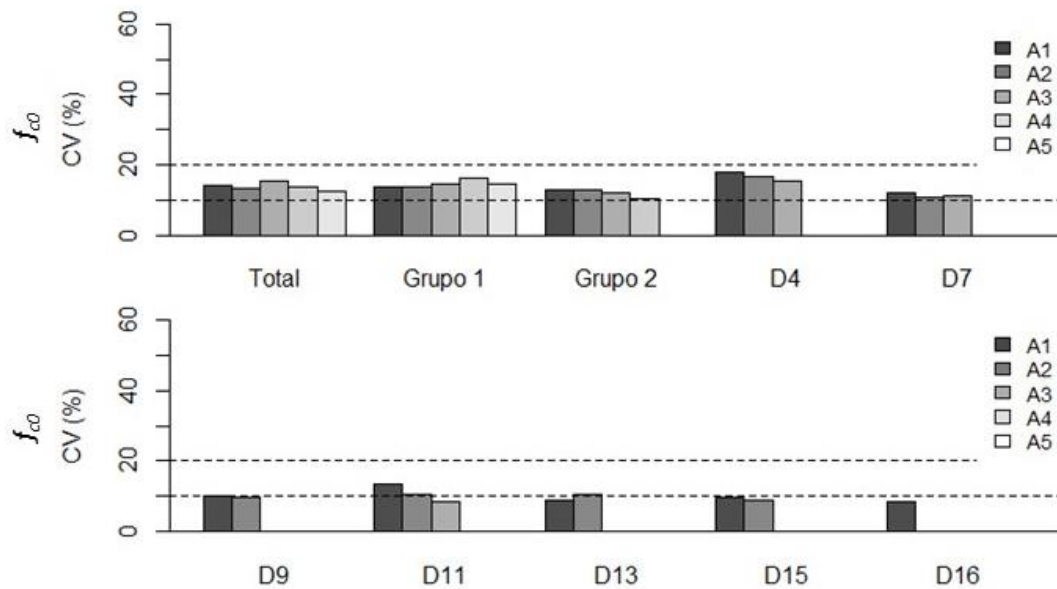


Fonte: Autoria própria

A Figura 24, mostra os valores para a resistência à compressão paralela às fibras. Os maiores valores obtidos foram para a amostra A1 do diâmetro de 4 cm (17,8 %), amostra A2 do diâmetro de 4 cm (16,7 %) e para a amostra A4 do Grupo 1 (16,4 %). Os menores valores obtidos foram para a amostra A3 para o diâmetro de 11 cm (8,3 %) e para a amostra única do diâmetro de 16 cm (8,4 %).

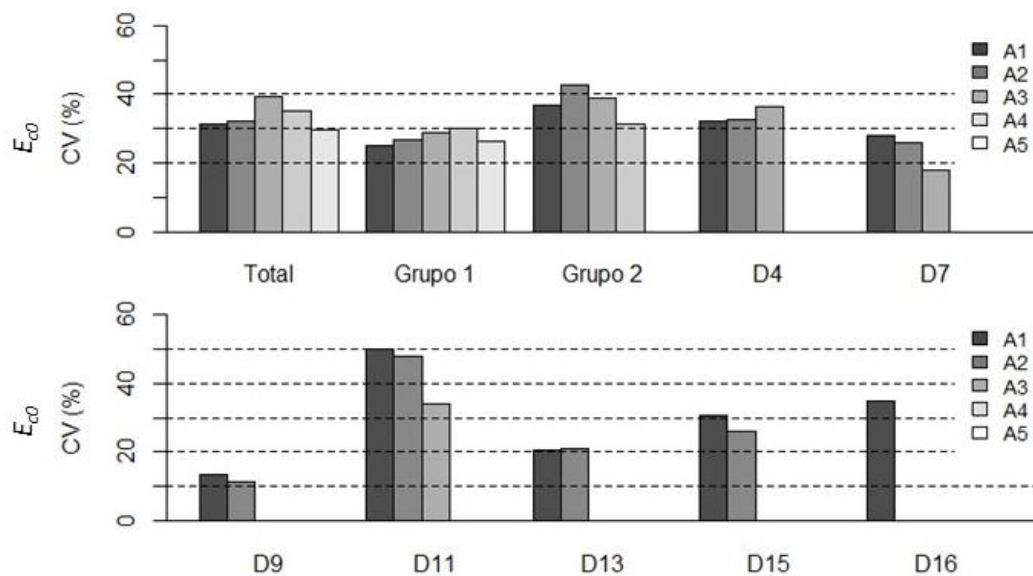
A Figura 25, mostra os valores para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras. Os maiores valores obtidos foram para a amostra A1 do diâmetro de 11 cm (50,0 %), amostra A2 do diâmetro de 11 cm (48,0 %) e para a amostra A2 do Grupo 2 (42,6 %). Os menores valores obtidos foram para a amostra A2 para o diâmetro de 9 cm (11,2 %), para a amostra A1 do diâmetro de 9 cm (13,4 %) e para a amostra A3 do diâmetro de 7 cm (17,9 %).

Figura 24 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Resistência à Compressão Paralela às Fibras para Tabela de Classe de Resistência



Fonte: Autoria própria

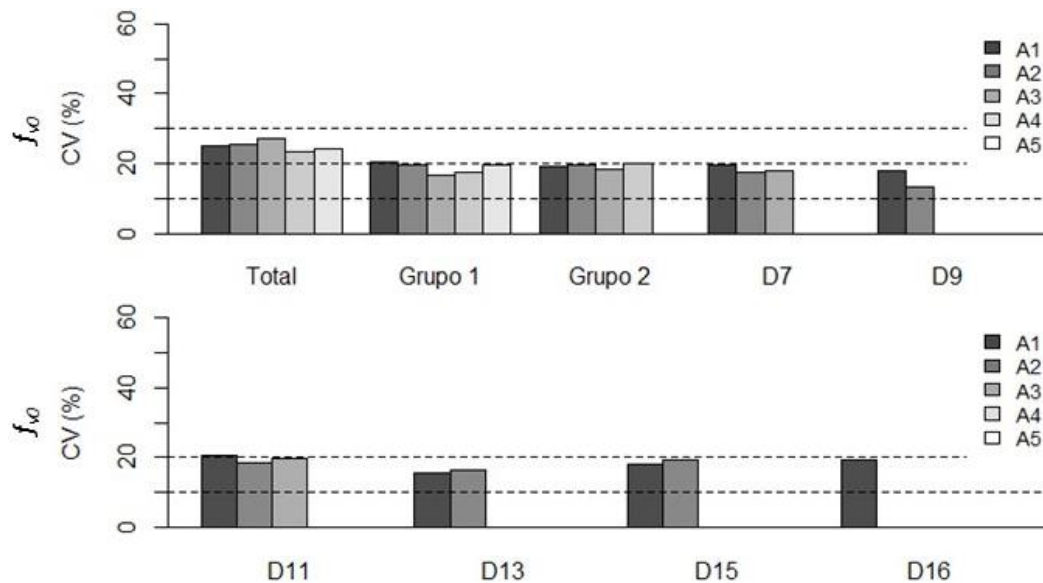
Figura 25 - Coeficiente de Variação (CV) das amostras para Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras para Tabela de Classe de Resistência



Fonte: Autoria própria

A Figura 26, mostra os valores para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Os maiores valores obtidos foram para a amostra A3 para o grupo formado por todas amostras ensaiadas (27,3 %), amostra A2 (25,6 %) e A1 (25,0 %) do mesmo grupo. Os menores valores obtidos foram para a amostra A2 para o diâmetro de 9 cm (13,1 %), para a amostra A1 do diâmetro de 13 cm (15,6 %) e para a amostra A3 do Grupo 1 (16,5 %).

Figura 26 - Coeficiente de Variação (%) das amostras para Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras para Tabela de Classe de Resistência



Fonte: Autoria própria

Em termos gerais, a variação dos valores do CV, entre as amostras de cada grupo, não foi significativa, com exceção do módulo de resistência e elasticidade na flexão. Nos dois casos é possível notar uma maior dispersão dos dados para as amostras que agrupam os maiores (A5) e menores (A1) valores das propriedades. Do primeiro já era esperado tal comportamento, pois os valores foram ordenados a partir desta propriedade, realocando os outliers para as duas amostras que possuem os valores superiores e inferiores dentro do grupo, influenciando assim no valor do coeficiente de variação. Para o MOE, isto indica que existe a possibilidade destas duas propriedades possuírem um valor de correlação superior, fato confirmado anteriormente. O maior valor obtido de CV foi para a o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (50,0%) e o menor para a resistência a flexão (2,6%).

Quanto a verificação das amostras conforme a norma EN 384 (2010), esta define que para um coeficiente de variação superior a 35%, para a determinação do valor médio, deve ser determinado um tamanho mínimo de 140 corpos de prova. As amostras que tiveram valor superior ao citado foram as seguintes, para o caso do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras:

- Total: A3 (218) e A4 (216);
- D4: A3 (60);
- D11: A1 (76) e A2 (76);
- Grupo 2: A1 (136), A2 (133) e A3 (132).



Com exceção do grupo formado por todas as peças, as amostras possuem número inferior ao sugerido pela norma citada, o que aumentaria a probabilidade de erros, necessitando de correções adicionais (EN 384, 2010). Mesmo realizando a penalização o risco do consumidor é aumentado de 10 % para 20 %.

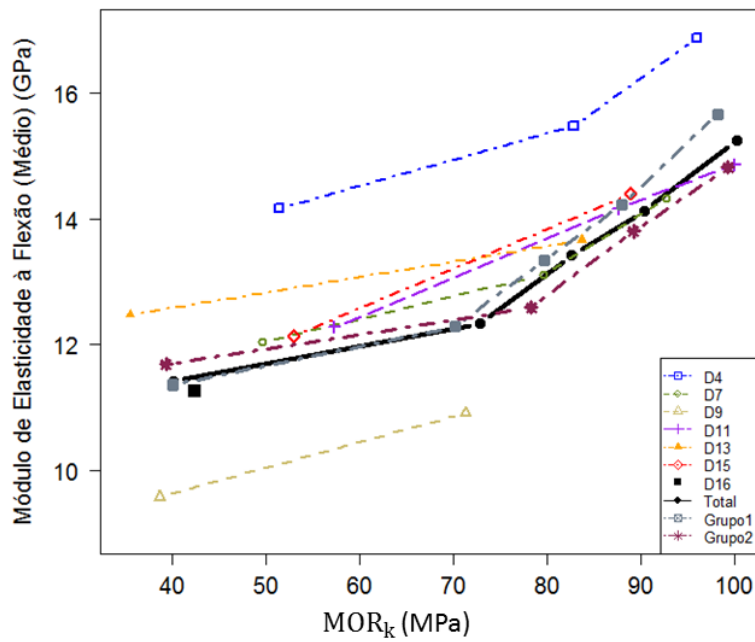
#### *4.2.3 Cálculo dos Valores Médios e Característicos*

Tal como especificado, os valores característicos foram calculados utilizando a norma ISO 13910 (2005). O processo foi aplicado para cada amostra formada, de maneira que pudesse ser verificado o comportamento para cada conjunto de dados.

Para tornar o processo de análise mais simples, os dados resultantes dos cálculos foram apresentados em diagramas. A propriedade de módulo de resistência à flexão foi definida como a variável independente, e como variável dependente variou-se a propriedade.

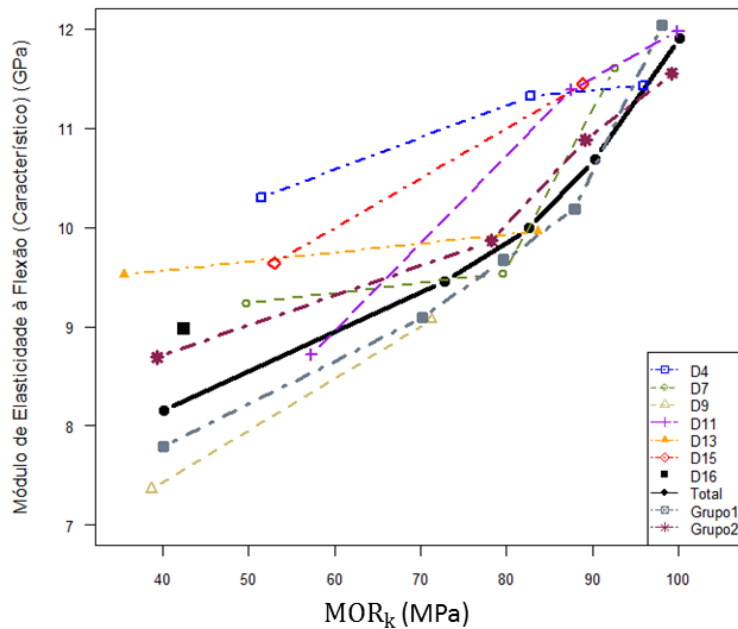
A Figura 27 ilustra os valores médios calculados para cada grupo definido, para cada amostra, para a propriedade de módulo de elasticidade à flexão. É possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 4 cm foram superiores, para as três amostras estudadas, seguido pelo diâmetro de 13cm, porém, este já tendendo para a curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova. Os menores valores foram obtidos para o diâmetro de 9 cm. As outras tabelas apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior. Todas as curvas referentes a estas duas propriedades se apresentaram crescentes.

Figura 27 - Valores médios para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Flexão em função da Módulo de resistência à flexão



Fonte: Autoria própria

Figura 28 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Flexão em função da Módulo de resistência à flexão



Fonte: Autoria própria

O comportamento dos valores apresentados pode ser justificado pela variação da densidade com a altura da região de corte da árvore para a extração da peça, pois o módulo de elasticidade à flexão apresentou um valor relativamente alto de correlação com essa outra propriedade. Machado et al. (2014) verificou em seu estudo que em seus dados houve uma

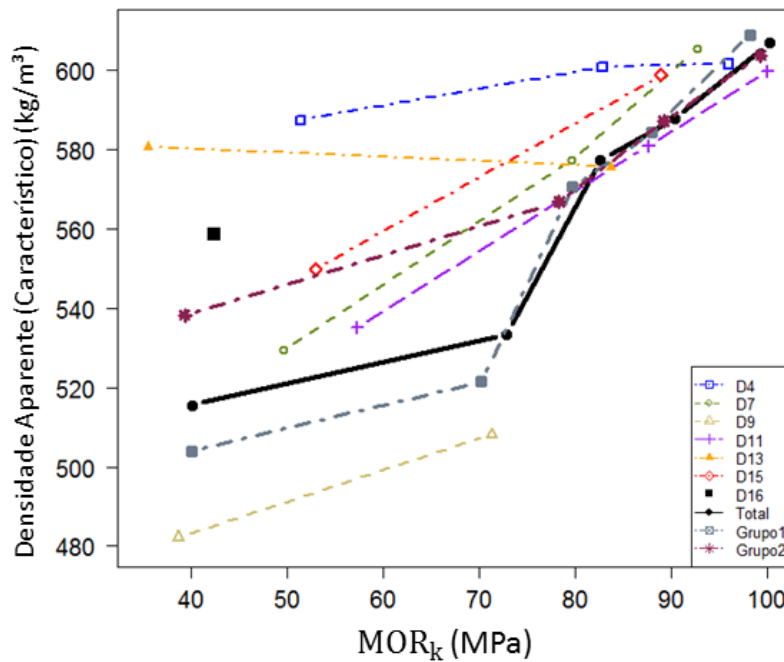
diferença significativa, da médio e desvio padrão, da densidade aparente entre corpos de prova retirados em 35% e 65% da altura total da árvore. Já quando comparados os resultados para as alturas de 5% e 35% o mesmo não foi evidenciado, tendo pouca variação dos valores. Arango Alzate (2004), estudou a variação da densidade básica conforme a posição radial e longitudinal para árvore de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. urograndis*, e em sua maioria, observou um comportamento similar, ou seja, um aumento da densidade com a altura das peças.

Para o caso dos valores característicos do módulo de elasticidade à flexão (Figura 28), é possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 4 cm foram superiores, para as propriedades amostras estudadas, e para valores de resistência a flexão superiores à 90 MPa, a amostra A5 (98,1 MPa;12 GPa) do Grupo 1 foi o qual apresentou valor superior. Os menores valores foram obtidos para o diâmetro de 9 cm. As outras tabelas apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior.

Para o caso dos valores característicos da densidade aparente (Figura 29), é possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 4 cm foram superiores. Para valores de resistência a flexão superiores à 90 MPa, a amostra A5 (98,1 MPa;609 kg/m<sup>3</sup>) do Grupo 1 foi a que apresentou valor superior. Os menores valores foram obtidos para o diâmetro de 9 cm. Os outros valores apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior. Com exceção da amostra formado pelo diâmetro de 13 cm, as curvas referentes a estas duas propriedades se apresentaram crescentes.

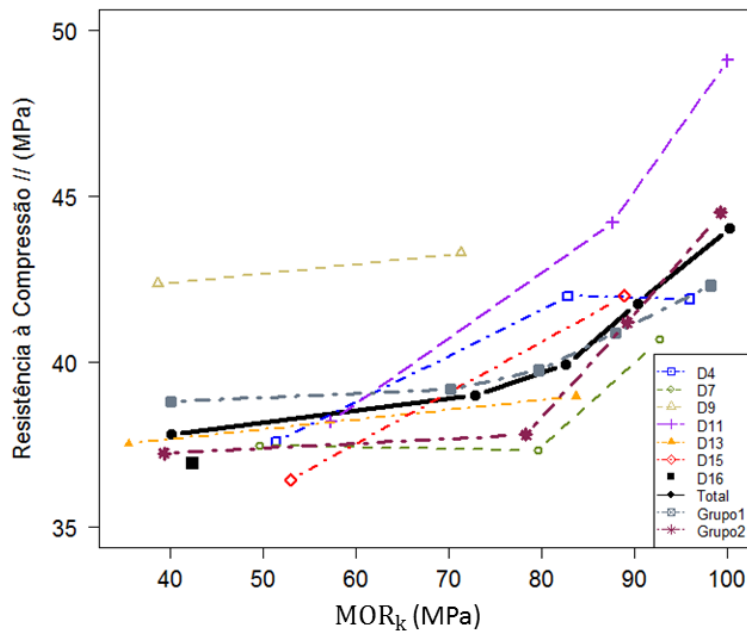
O comportamento dos valores apresentados pode ser justificado pela variação da densidade com a altura da região de corte da árvore para a extração da peça. Machado et al. (2014) verificou em seu estudo que em seus dados houve uma diferença significativa, da médio e desvio padrão, da densidade aparente entre corpos de prova retirados em 35% e 65% da altura total da árvore. Já quando comparados os resultados para as alturas de 5% e 35% o mesmo não foi evidenciado, tendo pouca variação dos valores. Arango Alzate (2004), estudou a variação da densidade básica conforme a posição radial e longitudinal para árvore de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. urograndis*, e em sua maioria, observou um comportamento similar, ou seja, um aumento da densidade com a altura das peças.

Figura 29 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para Densidade Aparente em função da Módulo de resistência à flexão



Fonte: Autoria própria

Figura 30 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para a Resistência à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão



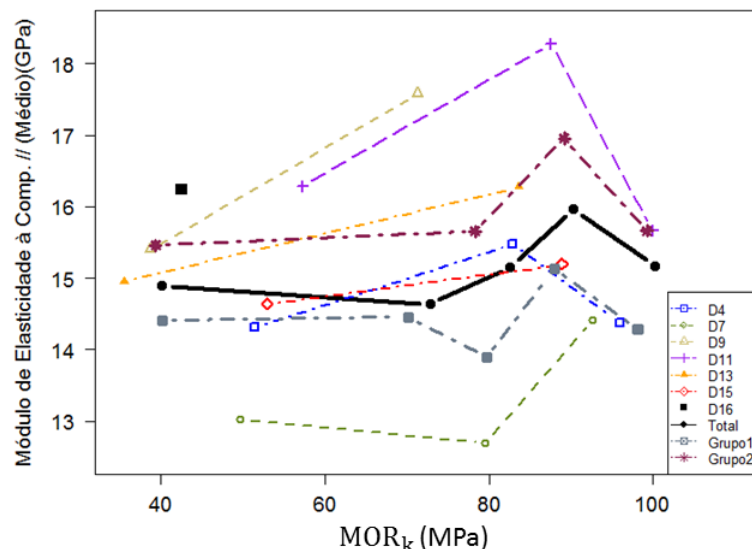
Fonte: Autoria própria

Para o caso da resistência à compressão paralela às fibras (Figura 30), é possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 9 cm foram superiores. Para valores de resistência a flexão superiores à 80 MPa, a amostra A2 (87,6 MPa; 44,2 MPa) e A3 (100 MPa; 49,1 MPa) do diâmetro de 11 cm foram as que apresentaram valores superiores. Os

menores valores foram obtidos para as duas primeiras amostras, A1 (49,7 MPa; 37,5 MPa) e A2 (79,6 MPa; 37,3 MPa), para o diâmetro de 7 cm e para a amostra A1 (53 MPa; 36,4 MPa) do diâmetro de 15 cm. Os outros valores apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior. Com exceção do trecho entre A2 e A3 do diâmetro de 4 cm, as curvas referentes a estas duas propriedades se apresentaram crescentes.

Para o caso dos valores médios do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (Figura 31), é possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 9 cm e 11 cm foram superiores. Para valores de resistência a flexão superiores à 80 MPa, a amostra A2 (87,6 MPa; 18,3 GPa) e a amostra A3 (100 MPa; 15,7 GPa) do diâmetro de 11 cm foram as que apresentaram valores superiores. Os menores valores foram obtidos para as duas primeiras amostras, A1 (49,7 MPa; 13,0 GPa) e A2 (79,6 MPa; 12,7 GPa), do diâmetro de 7 cm, para a amostra A3 (95,9 MPa; 14,4 GPa) do diâmetro de 4 cm e para a amostra A5 (98,1 MPa; 14,3 GPa) do Grupo 1. Os outros valores apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior. Em geral, as curvas não mostraram uma tendência de comportamento, mas sim uma flutuação em torno do valor de 15 GPa.

Figura 31 - Valores médios para cada amostra separada grupos para Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão

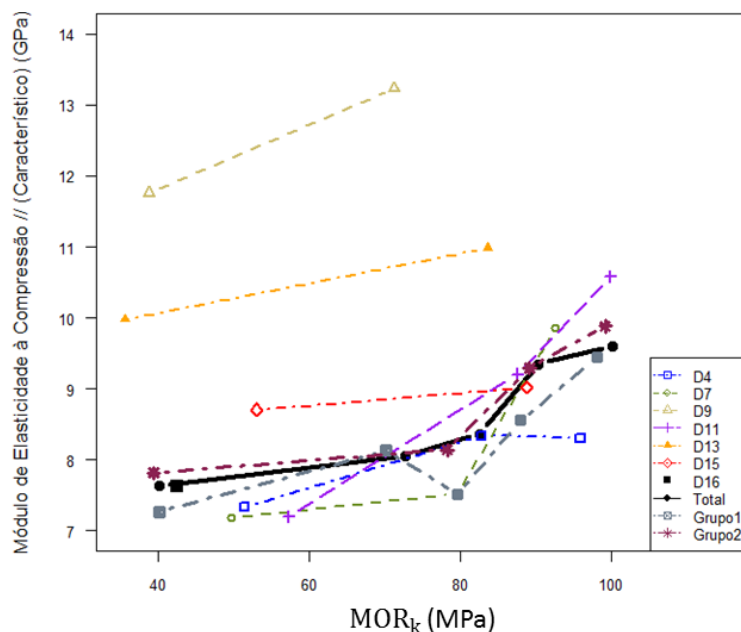


Fonte: Autoria própria

Para o caso dos valores característicos do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (Figura 32), é possível evidenciar que os valores obtidos para o diâmetro de 9 cm foram superiores. Para valores de resistência a flexão superiores à 80 MPa, a amostra A2

(83,6 MPa; 10,99 GPa) do diâmetro de 13 cm e a amostra A3 (100 MPa; 10,6 GPa) do diâmetro de 11 cm foram as que apresentaram valores superiores. Os menores valores foram obtidos para as duas primeiras amostras, A1 (49,7 MPa; 7,2 GPa) e A2 (79,6 MPa; 7,5 GPa), do diâmetro de 7 cm, para a amostra A1 (57,3 MPa; 7,2 GPa) do diâmetro de 11 cm e para a amostra A3 (85,9 MPa; 8,3 GPa) do diâmetro de 4 cm. Os outros valores apresentaram uma certa proximidade à curva definida pelos pontos do grupo formado por todas os corpos de prova, definida pelo traço preto com espessura maior. Com exceção do trecho entre A2 e A3 do Grupo 1, e para o trecho entre A2 e A3 do diâmetro de 4 cm, as curvas referentes a estas duas propriedades se apresentaram crescentes.

Figura 32 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão

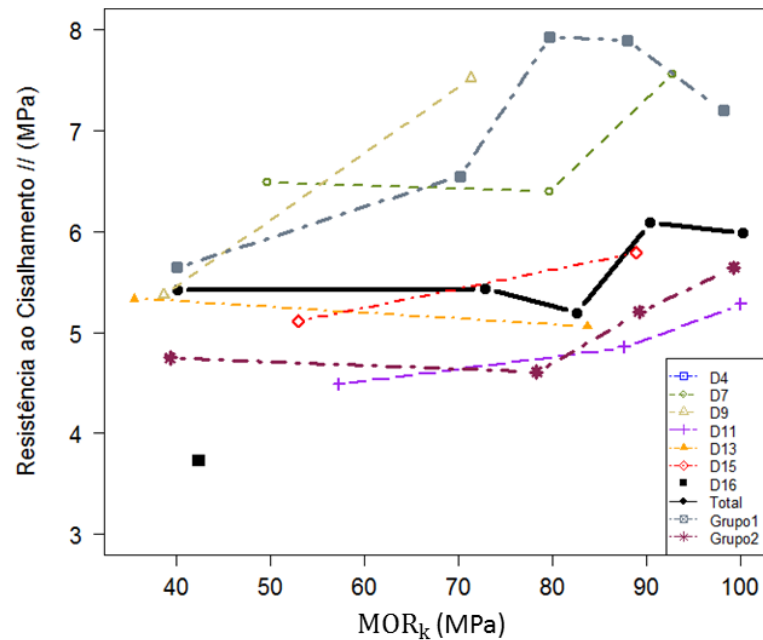


Fonte: Autoria própria

Para o caso da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (Figura 33), é possível evidenciar que os valores obtidos para a amostra A1 (49,7 MPa; 6,5 MPa) do diâmetro de 7 cm, amostra A2 (71,3 MPa; 7,5 MPa) do diâmetro de 9 cm e amostras A3 (79,7 MPa; 7,9 MPa), A4 (87,9 MPa; 7,9 MPa) e A5 (98,1 MPa; 7,2 MPa) do Grupo 1, foram superiores. Os menores valores foram obtidos para as amostras do Grupo 2, para a amostra única (42,5 MPa; 3,7 MPa) do diâmetro de 16 cm e para as amostras do diâmetro de 11 cm. É possível notar que os valores de diâmetro superiores à 10 cm, ficaram abaixo da curva definida pelo grupo definido por todos os corpos de prova ensaiados, e os diâmetro menores ficaram acima da

curva. Essa propriedade não apresentou uma tendência conforme o aumento dos valores característicos do módulo de resistência à flexão.

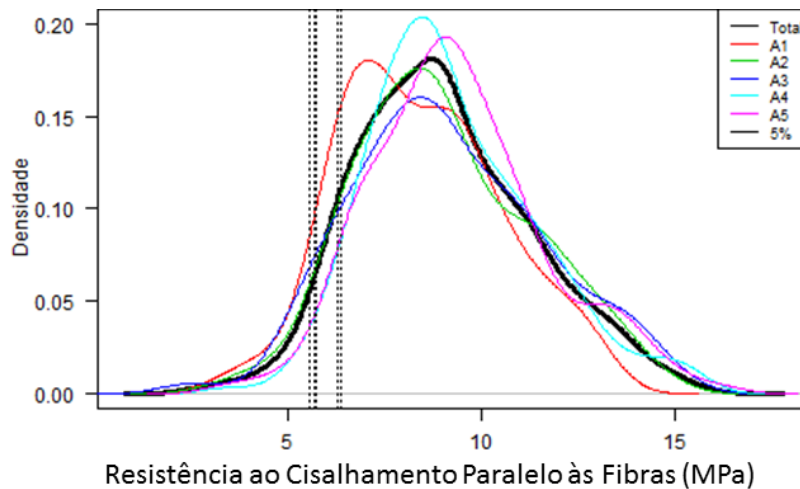
Figura 33 - Valores característicos para cada amostra separada grupos para a Resistência ao Cisalhamento Paralelo às Fibras em função da Módulo de resistência à flexão



Fonte: Autoria própria

De maneira a melhor visualizar o fato do quinto percentil, para a propriedade de cisalhamento paralelo às fibras, possuir pouca variabilidade para o caso das amostras formadas com todos os corpos de prova, foi gerado um gráfico de função de densidade para cada amostra, e para a amostra com todos valores, tal como é possível visualizar na Figura 34. As funções de densidade com linhas coloridas representam as amostras parciais e a preta a amostra total. As linhas pontilhadas verticais pretas representam o quinto percentil de cada uma das amostras, que não possuem uma diferença significativa, reafirmando o comportamento dos valores.

Figura 34 - Gráfico função de densidade para as amostras parciais da amostra total



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.4 Tabela de Classe de Resistência

A partir dos valores característicos calculados, foi definido uma tabela de classe de resistência para a amostra contendo todos os corpos de prova (Tabela 17). Com o intuito de facilitar comparações com a norma europeia (EN338, 2009), foi determinado um intervalo de 10 MPa para a propriedade de módulo de resistência à flexão, iniciando em 50 MPa, até o valor de 100 MPa.

Tabela 17 - Tabela de Classe de Resistência definida para a amostra total

	<b>D50</b>	<b>D60</b>	<b>D70</b>	<b>D80</b>	<b>D90</b>	<b>D100</b>
Propriedades de Resistência em N/mm <sup>2</sup>						
<b>MOR<sub>k</sub></b>	50	60	70	80	90	100
<b>f<sub>c0,k</sub></b>	37	38	39	40	42	44
<b>f<sub>v0,k</sub></b>	5	5	5	5	6	6
Propriedades de Rigidez em KN/mm <sup>2</sup>						
<b>MOE<sub>m</sub></b>	10	11	12	13	14	15
<b>MOE<sub>k</sub></b>	8,5	9	9,5	10	11	12
<b>Ec0<sub>m</sub></b>	14	14	14	14	14	14
<b>Ec0<sub>k</sub></b>	7,5	7,5	8	8,5	9	9,5
Densidade em kg/m <sup>3</sup>						
<b>ρ<sub>ap,k</sub></b>	520	525	535	575	585	607
<b>ρ<sub>ap,m</sub></b>	610	620	625	650	670	680

Fonte: Autoria própria

De maneira a determinar a eficiência do processo que foi realizado para a tabela de classe de resistência, foi calculado para cada propriedade um percentual abaixo do valor de referência, mostrado na Tabela 18. Este foi calculado pelo percentual relativo ao total de



valores das propriedades na amostra que eram menores que o definido para a tabela. Em termos dos valores médios dos percentuais obtidos, estes foram inferiores ao limitantes dos mesmos, 5% para o 5º percentil e 50% para a média, sendo isto um resultado satisfatório. Porém, analisando as classes, tem-se 12 valores superiores ao limite, os quais foram assumidos de maneira a definir um comportamento crescente.

Tabela 18 – Percentual abaixo do valor de referência ( $f_k$  ou  $f_m$ ) associado a tabela de classe definida

	$N_{cp}$	$MOE_k$	$MOE_m$	$f_{c0,k}$	$E_{c0,k}$	$E_{c0,m}$	$f_{v,k}$	$\rho_{ap,k}$	$\rho_{ap,m}$
<b>Rejeitados</b>	22								
<b>D50</b>	54	3,70	50,00	5,66	1,92	36,54	0,00	5,56	50,00
<b>D60</b>	120	6,67	50,83	2,63	4,46	45,54	4,85	4,17	51,67
<b>D70</b>	206	1,95	49,76	5,91	3,92	51,96	3,66	3,88	47,57
<b>D80</b>	269	4,09	51,67	4,20	5,43	50,78	2,79	2,23	49,44
<b>D90</b>	242	4,96	49,17	4,74	4,82	47,37	3,72	3,72	51,24
<b>D100</b>	227	3,98	48,23	4,89	3,57	47,32	4,52	4,41	50,66
<b>Média</b>		4,23	49,94	4,67	4,02	46,58	3,26	3,99	50,10

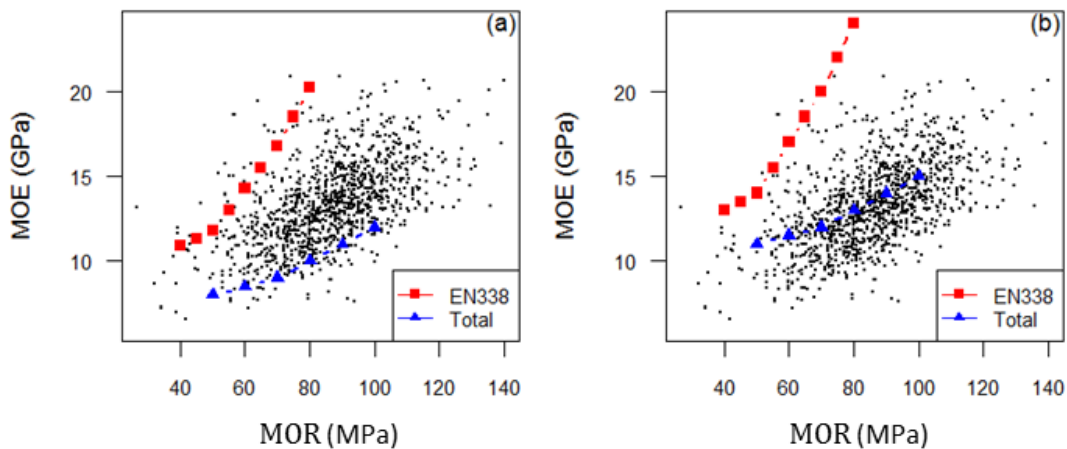
Fonte: Autoria própria

O maior valor para o erro obtido para o 5º percentil foram na classe D60, para  $MOE_k$  (6,67%), na classe D70, para  $f_{c0,k}$  (5,91%) e na classe D50, para  $f_{c0,k}$  (5,66%). Para o caso dos valores médios, para a classe D70, o  $E_{c0,m}$  (51,96%), para a classe D60, a  $\rho_{ap,m}$  (51,67%), para a classe D80, o  $MOE_m$  (51,67%), para a classe D90, a  $\rho_{ap,m}$  (51,24%), para a classe D60, o  $MOE_m$  (50,83%) e para a classe D80, o  $E_{c0,m}$  (50,78%).

#### 4.2.5 Comparativo dos Resultados com a Norma EN338

Os valores determinados para as classes de resistência, apresentaram diferenças significativas quando comparados o projeto de norma europeia prEN338 (2014) para a espécie folhosa estudada. A Figura 35 ilustra a dispersão de todos os valores do módulo de resistência à flexão das peças pelos valores de módulo de elasticidade à flexão. Foram sobrepostos a estes, os valores representativos das classes definidas, em retângulos azuis para o caso determinado neste trabalho, e em quadrados vermelhos para o projeto de norma prEN338 (2014). É possível notar a diferença tanto nas primeiras classes, com pequena inclinação da linearização, quanto depois, sendo esta mais pronunciada para acima da classe D45 da norma.

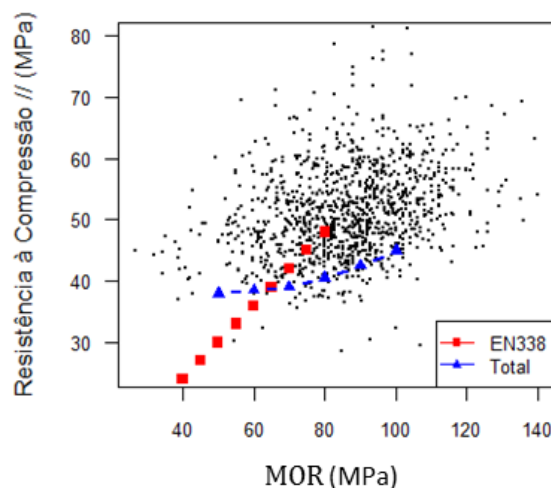
Figura 35 - Comparativo dos valores do módulo de elasticidade à flexão da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia para: (a) valor característico e (b) valor médio.



Fonte: Autoria própria

A Figura 36, mostra a comparação para os valores da resistência à compressão paralela às fibras. O comportamento dos valores tabelados da norma europeia apresenta uma tendência linear, enquanto que os determinados nesta pesquisa não, além do intervalo significamente menor (37 MPa – 44 MPa). É possível evidenciar que os valores da tabela de classe de resistência calculada se localizam na porção superior da definida pela norma comparada.

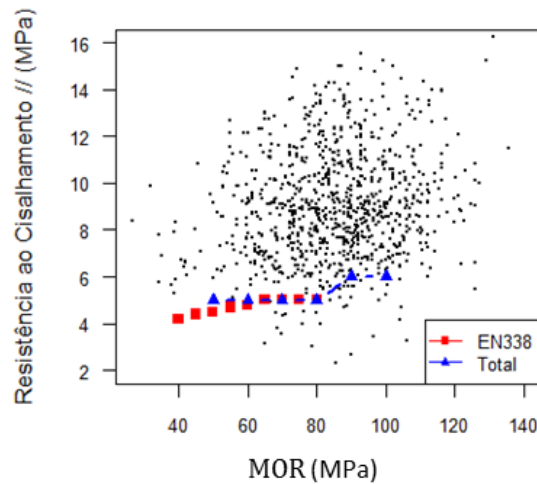
Figura 36 - Comparativo dos valores da resistência à compressão paralela às fibras da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia



Fonte: Autoria própria

A Figura 37, mostra a comparação para os valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Tal como os valores tabelados no código normativo europeu, os valores característicos para esta propriedade têm pouca variação, quando não nula.

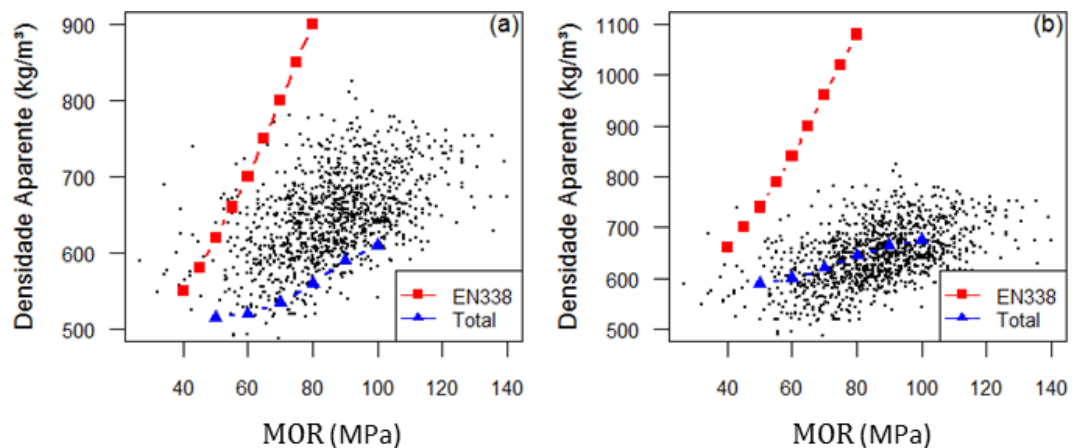
Figura 37 - Comparativo dos valores da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia



Fonte: Autoria própria

A Figura 38, mostra a comparação para os valores da densidade aparente. A densidade aparente, tal como o MOE, não apresentou um comportamento linear, e ainda, com uma variação significativamente menor do que as da prEN338 (2014). Fato que entra em concordância com o valor de correlação obtida entre as propriedades de módulo de elasticidade à flexão e densidade aparente ( $R:0,60$ ), relativamente alto para este trabalho.

Figura 38 - Comparativo dos valores da densidade aparente da tabela de classe de resistência determinada com a da norma europeia para: (a) valor característico e (b) valor médio.



Fonte: Autoria própria

Uma possível explicação para a diferença entre o comportamento dos dados com os valores da tabela de classe da norma europeia utilizada, pode ser dada pela diferença no crescimento das árvores, devido as diferenças climatológicas, aliado a fato de a espécie estudada neste trabalho ser de reflorestamento, a qual possui crescimento relativamente rápido.

Além disto, o código normativo citado utiliza de uma tabela obtida por meio do estudo de um conjunto de dados de várias espécies de folhosas, diferente do caso deste trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo principal determinar valores os quais pudessem representar as propriedades utilizadas para o cálculo de projetos estruturais de maneira segura para a espécie *Eucalyptus urograndis*. Isto foi realizado utilizando sugestões estabelecidas em documentos normativos nacionais e internacionais, tais como a NBR 7190/97, EN 338 (2009), ISO 13910 (2014), dentre outras.

A amostragem total utilizada na pesquisa foi de 1142 peças de elementos roliços com seção transversal uniformizada. Estas possuíam 9 variações na idade de corte (4-13 anos), 7 de diâmetro (4-16 cm) e 8 de regiões de plantio. Com os valores calculados e gráficos gerados, foi possível confirmar que existe a influência do diâmetro, região de crescimento e idade de corte nos valores de resistência e propriedades de rigidez da amostra, sendo mais pronunciado no caso da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com o diâmetro. Porém, nas análises visuais não foi encontrado um comportamento padrão para nenhuma propriedade em termos das variáveis quantitativas (idade de corte e diâmetro).

Quanto a esta influência, foram calculados os valores de correlação linear entre pares das propriedades, e foi possível evidenciar visualmente nos gráficos *boxplots* gerados, o par que apresentou o maior valor foi o da propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras com o diâmetro, com valor de -0,61, ou seja, à medida que se aumentou o diâmetro, os valores desta propriedade tiveram a tendência de diminuir. Os três próximos pares que possuíram valor acima de 0,5 para o coeficiente de correlação foram os seguintes: módulo de elasticidade à flexão X densidade aparente (0,60), módulo de elasticidade à flexão X módulo de resistência à flexão (0,56) e módulo de resistência à flexão X densidade aparente (0,51).

Apesar disto, foram definidos 10 grupos para o cálculo dos valores característicos, os quais levaram em conta o diâmetro. Inicialmente foi realizada a média, com exceção do módulo de resistência à flexão, os maiores foram evidenciados para os grupos de diâmetros inferiores a 10 cm. Consequentemente, os menores valores foram evidenciados para os grupos com diâmetros superiores a 10 cm, com exceção do MOR e MOE. Já em relação ao coeficiente de variação, foram os diâmetros de 15 cm e 16 cm que apresentaram os menores valores, com exceção do MOE e do  $f_{v0}$ , em que o diâmetro de 9 cm também foi relativamente baixo.

Devido à quantidade de corpos de prova ser relativamente grande, mesmo realizando a segmentação por grupos de dados, foram definidas mais de uma amostra para cada conjunto, visando a montagem da Tabela de Classe de Resistência. Neste caso, foram analisados apenas os valores dos coeficientes de variação. Este indicou que houve pouca flutuação entre os valores encontrados nas amostras de cada grupo, com exceção das propriedades de flexão estudadas. Em termos de valores, o maior encontrado foi para a o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (50,0%) e o menor para a resistência a flexão (2,6%).

Apesar das análises realizadas indicarem pouca ou nenhuma influência do diâmetro nas propriedades, foi possível verificar que para o valor do quinto percentil, o mesmo não foi verificado em alguns casos. Em geral, não foi encontrada uma relação linear, mas sim diferenças pontuais.

A partir dos valores característicos calculados, foi definida uma Tabela de Classe de Resistência com 6 classes (para a condição de referência de umidade à 12 %), para o grupo formado com todos os corpos de prova mostrado na Tabela 17<sup>3</sup>.

	<b>D50</b>	<b>D60</b>	<b>D70</b>	<b>D80</b>	<b>D90</b>	<b>D100</b>
<b>Propriedades de Resistência em N/mm<sup>2</sup></b>						
<b>MOR<sub>k</sub></b>	50	60	70	80	90	100
<b>f<sub>c0,k</sub></b>	37	38	39	40	42	44
<b>f<sub>v0,k</sub></b>	5	5	5	5	6	6
<b>Propriedades de Rigidez em KN/mm<sup>2</sup></b>						
<b>MOE<sub>m</sub></b>	10	11	12	13	14	15
<b>MOE<sub>k</sub></b>	8,5	9	9,5	10	11	12
<b>E<sub>c0m</sub></b>	14	14	14	14	14	14
<b>E<sub>c0k</sub></b>	7,5	7,5	8	8,5	9	9,5
<b>Densidade em kg/m<sup>3</sup></b>						
<b>ρ<sub>ap,k</sub></b>	520	525	535	575	585	607
<b>ρ<sub>ap,m</sub></b>	610	620	625	650	670	680

Fonte: Autoria própria

A média dos erros relativos aos valores da Tabela de Classe de Resistência encontrados foi satisfatório, ou seja, inferiores à 5% para o 5º percentil e 50% para a média. Já analisando cada classe, foram definidos 10 valores que foram superiores, sendo que os três maiores foram os seguintes: 5º percentil na classe D60, para MOE<sub>k</sub> (6,67%), na classe D60, a ρ<sub>ap,m</sub> (51,67%) e para a classe D80, o MOE<sub>m</sub> (51,67). Este erro de 1,67% superior ao limite equivalem a 2 corpos de prova em uma amostra de 120, para os dois primeiros casos, e 5 corpos de prova em uma amostra de 269 para o último.

<sup>3</sup> A Tabela 17 foi primeiramente citada na página 70, porém tendo em vista o objetivo do trabalho, foi julgado coerente cita-la novamente.

Estes valores, quando comparados ao código normativo europeu EN 338 (2005), apresentaram diferenças significativas, com exceção da resistência à cisalhamento, o qual mostrou um comportamento similar, além dos valores. Esta diferença se deu devido a regiões com climas diferentes, resultando assim em um material distinto. Porém, deve-se ressaltar que neste estudo foi tratado apenas uma espécie de folhosas, enquanto que o código normativo retrata um conjunto de espécies comercializadas.

Para futuras pesquisas, sugere-se: um estudo mais aprofundado dos valores das propriedades, em relação principalmente ao diâmetro de 4 cm, os quais se mostraram superiores aos outros diâmetros, e a realização do mesmo procedimento para outras espécies comercializadas no Brasil, de maneira que seja possível atualizar e desenvolver Tabelas de Classes de Resistência que retrate as espécies nacionais de reflorestamento, com segurança.





## REFERÊNCIAS

ARANGO ALZATE, S. B. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (NBR). **NBR 7190**: Projeto de estruturas em madeira: procedimento. Rio de Janeiro: 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 8456**: Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica. Rio de Janeiro: 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) INTERNATIONAL **D198**: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken, 2014.

\_\_\_\_\_. **D2915**: Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-base products. West Conshohocken, 2010.

BRITO, L. D. **Recomendações para o Projeto e Construção de Estruturas com Peças Roliças de Madeira de Reflorestamento**. 2010. 338 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010

BUTLER, M.A., DAHLEN, J., DANIELS, R.F., EBERHARDT, T.L. e ANTONY, F.. Bending strength and stiffness of loblolly pine lumber from intensively managed stands located on the Georgia Lower Coastal Plain. **European Journal of Wood and Wood Products**, Heidelberg, vol. 74, p. 91-100, 2016

CARRILLO, A., GARZA, M., NAÑEZ, M.J., GARZA, F., FOROUGHBAKHCH, R. e SANDOVAL, S. Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico. **Annals of Forest Science**, Dordrecht, vol. 68, p. 675-679, 2011.

CHISTOFORO, A. L. **Influência das irregularidades existentes na geometria de peças roliças estruturais de madeira na determinação do módulo de elasticidade longitudinal**. 2007. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

EUROPEAN STANDARD **EN408**: Structural timber and glued laminated timber: Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2010

\_\_\_\_\_. **EN338**: Structural timber – Strength classes. Brussels, 2009.

\_\_\_\_\_ **EN384**: Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Brussels, 2010.

GREEN, D.W., GORMAN, T.M., EVANS, J.W., MURPHY, J.F. e HATFIELD, C.A. Grading and properties of small-diameter Douglas-fir and ponderosa pine tapered logs. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, vol. 58, no. 11, p. 00-09, nov. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 13910**: Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation. Switzerland, 2005.

\_\_\_\_\_ **ISO 13910**: Structural timber – Characteristic values of strength-graded timber – Sampling, full-size testing and evaluation. Switzerland, 2014

\_\_\_\_\_ **ISO 16598**: Timber structure – Structural classification for sawn timber (DRAFT). Switzerland, 2014.

JAMIL, A.W.M, ZAMIN, J.M. e OMAR, M.K.M. Relationship between mechanical properties of structural size and small clear specimens of timber. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v.25, n.1, p. 12-21, jan. 2013

KRETSCHMANN, D. E., Mechanical Properties of Wood. In: FOREST PRODUCT LABORATORY (2010). **Wood Handbook** - Wood as an engineering material. Centennial Edition. Madison: Forest Products Laboratory. april 2010. 508 p.

LOPES, C.S.D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, São Paulo, 2007.

MACHADO, J. S., LOUZADA, J.L., SANTOS, A.J.A., NUNES, L., ANJOS, O., RODRIGUES, J., SIMÕES, R.M.S e PEREIRA, H. Variation of wood density and mechanical properties of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials and Design**, Oxford, v. 56, p. 975-980. 2014.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. **Noções de probabilidade e estatística**. 7ª edição, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2013. 480p.

MINÁ, A. J. S. **Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira**. 2005. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

MUÑOZ, G. R.; GETE, A. R. Relationships between mechanical properties of oak timber (*Quercus robur* L.). **Holforschung**, Berlim, v. 65, pg. 749-755. 2011.

pr**EN338** CEN/TC124/WG2/ N 857: Proposal for a revised version of the values assigned by class strength for optimal integration of tropical hardwoods in EN 338.. France, 2014

RALL, R. **Influência das características dos anéis de crescimento na densidade, resistência e rigidez da madeira de *Pinus taeda* L.** 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em

Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Brasil, junho, 2006.

RODRIGUES, R. A. D. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil**. 2002. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz ” - USP, Piracicaba, São Paulo, 2002.

SANTOS, C.V.F. **Caracterização físico-mecânica de elementos estruturais roliços perfilados de AMARU**. 2013. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Engenharia Industrial Madeireira, Itapeva, São Paulo, Brasil, 2013.

SCANAVACA, L.Jr. e GARCIA, J.N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 120-129, jun. 2004.

STEIGER, R. e ARNOLD, M. Strength grading of Norway spruce structural timber: revisiting property relationships used in EN 338 classification system. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, vol. 43, p. 259-278, 2009.

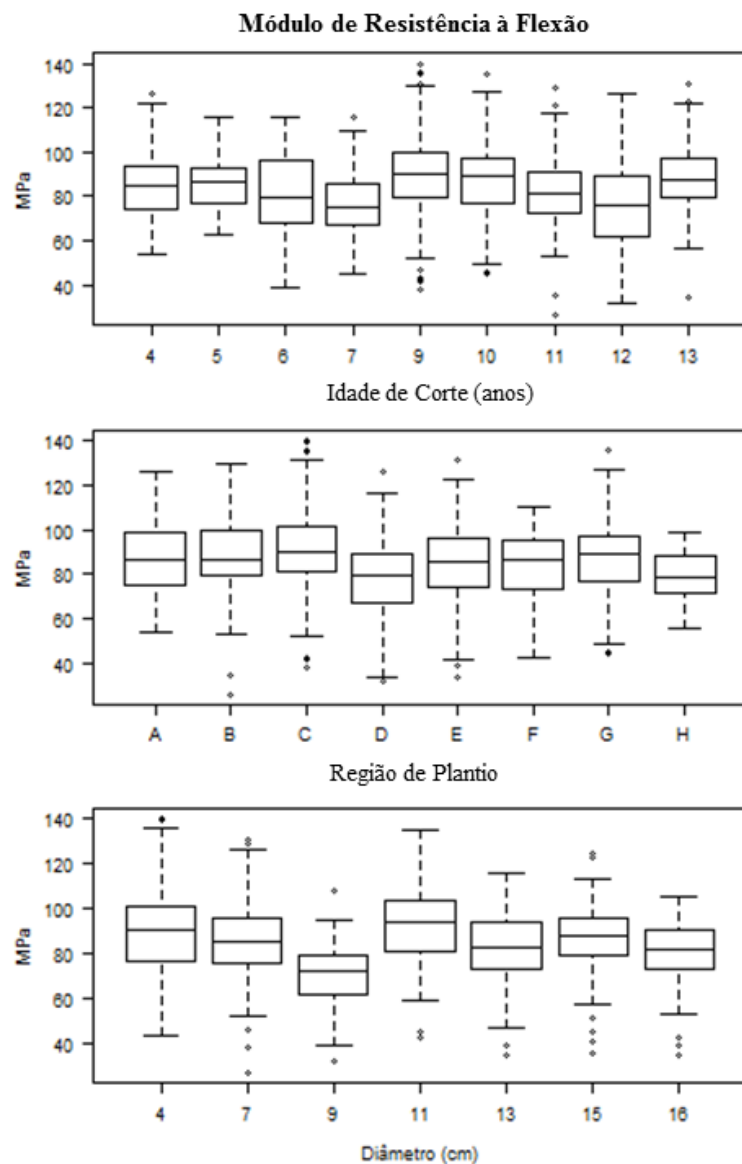
THELANDERSSON, S.; LARSEN, H.J. **Timber engineering**. 1ª Edição. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003. 446 p. ISBN: 0-470-84469-8.



## APÊNDICE A – *Boxplots*

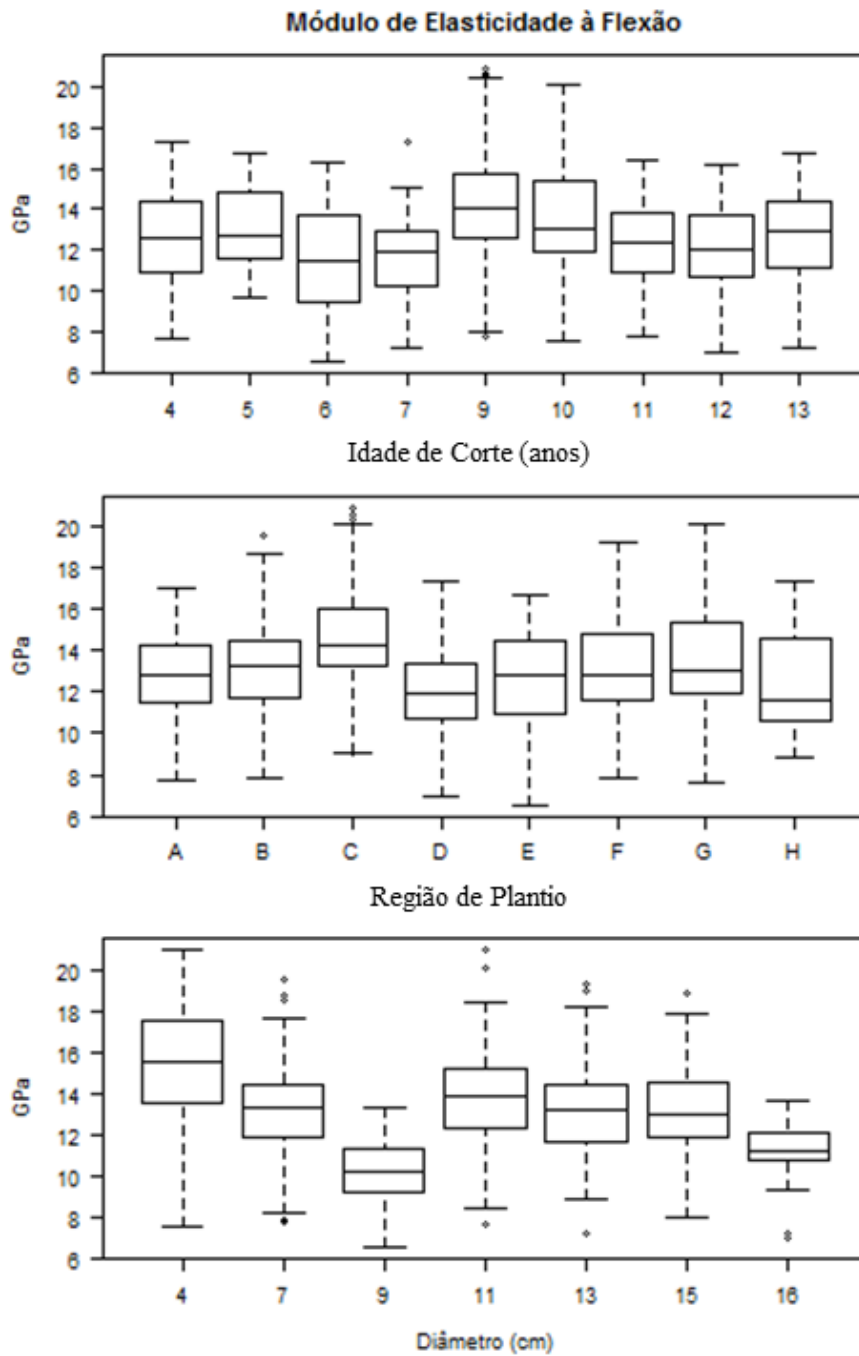
De maneira a evidenciar a dispersão dos dados obtidos experimentalmente quanto à variação dos valores em função do diâmetro, idade de corte e região de plantio, foram gerados gráficos *boxplots*, Figura 39 até a Figura 44.

Figura 39 - Dispersão dos valores da propriedade de módulo de resistência à flexão em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



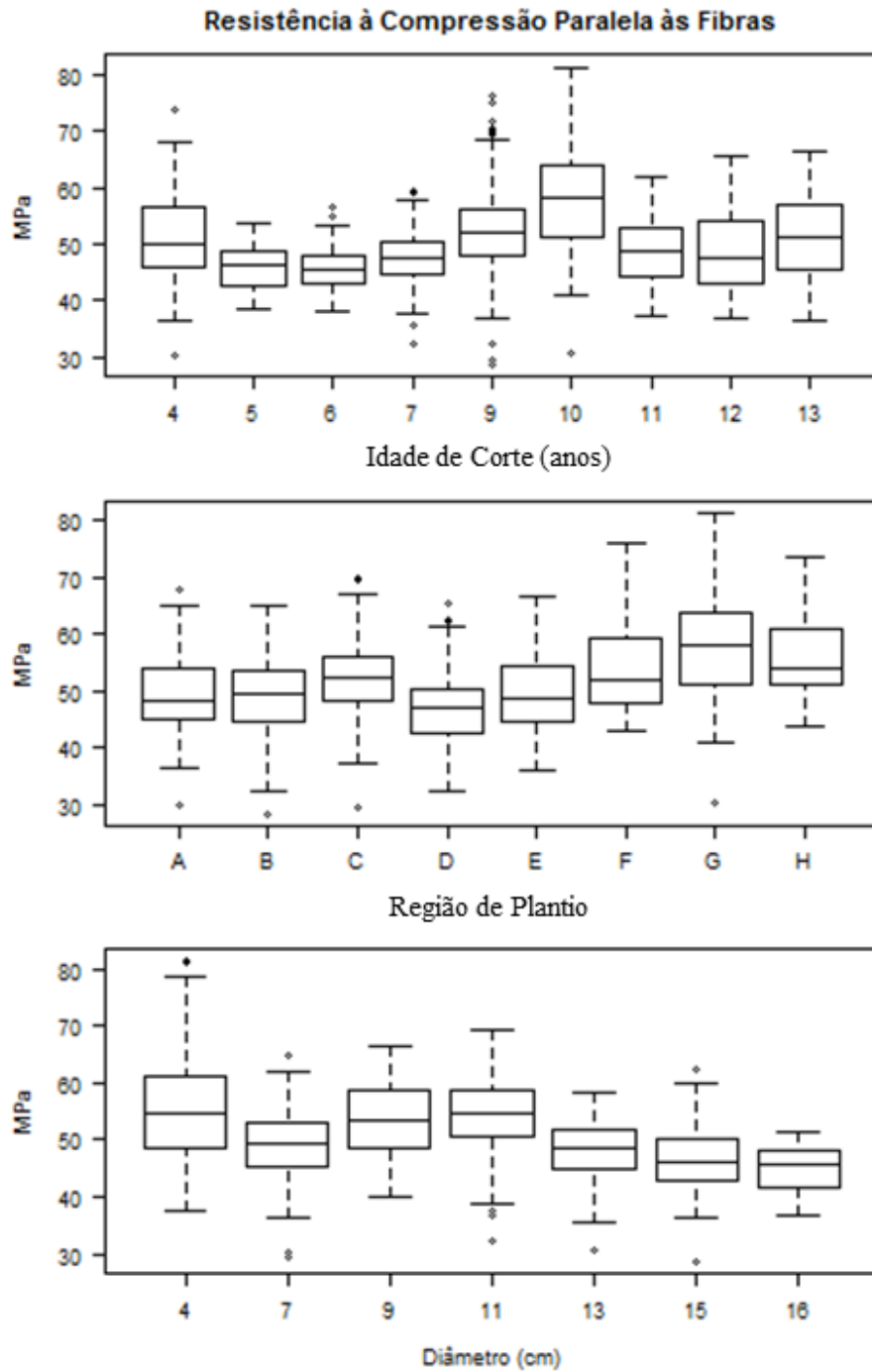
Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Dispersão dos valores da propriedade do módulo de elasticidade à flexão em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



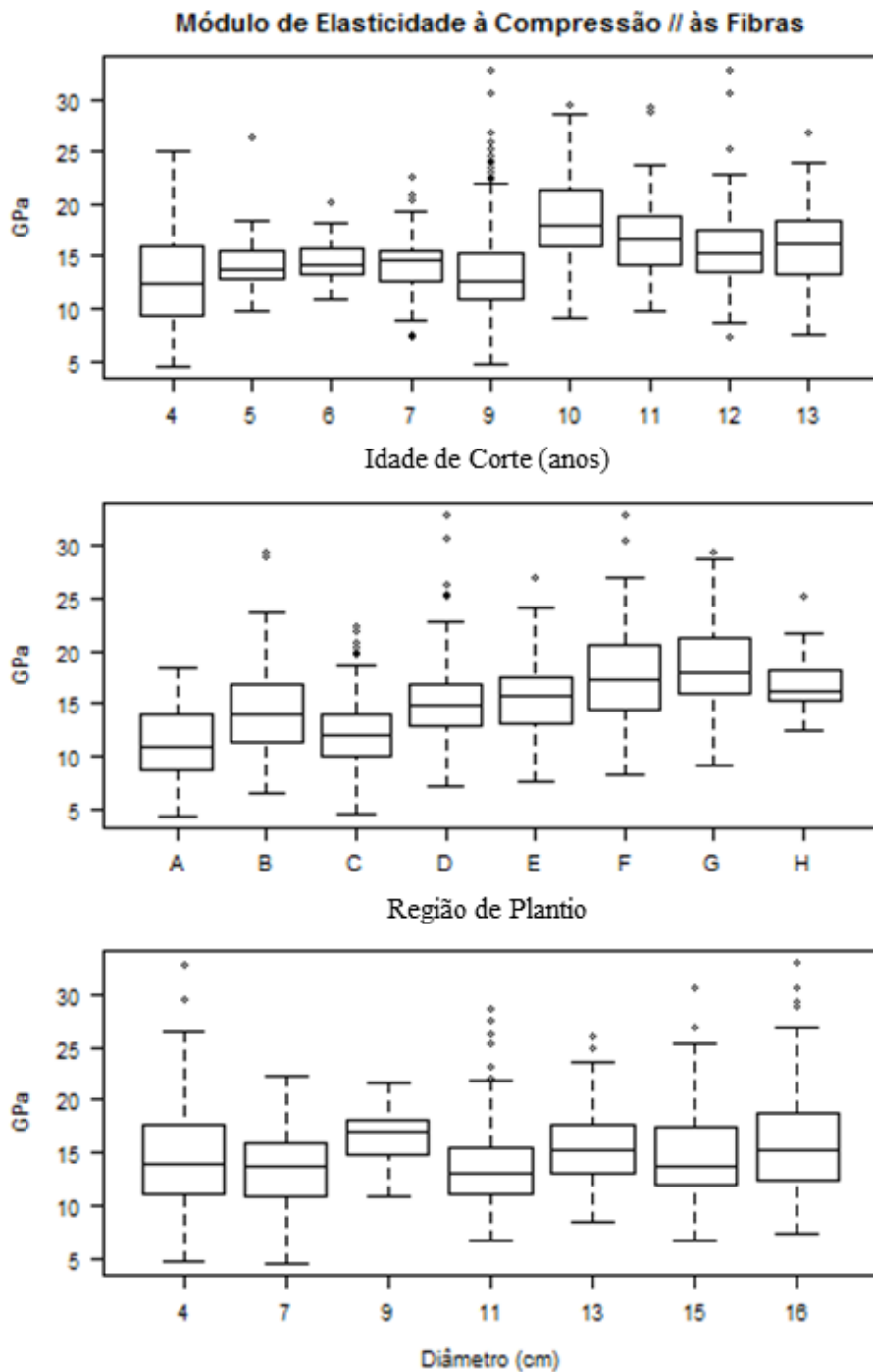
Fonte: Autoria própria

Figura 41 - Dispersão dos valores da propriedade de resistência à compressão paralela às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



Fonte: Autoria própria

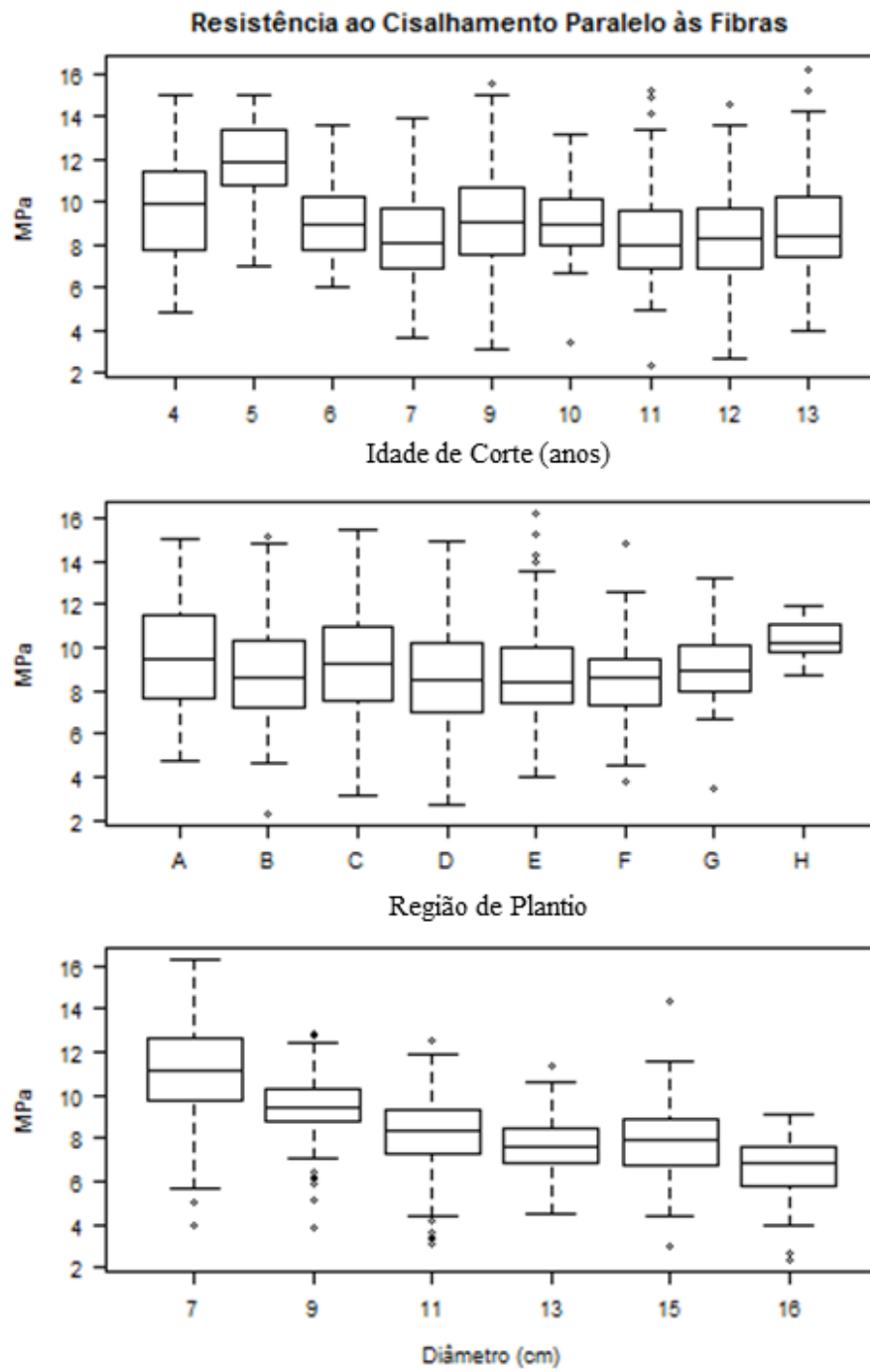
Figura 42 - Dispersão dos valores da propriedade de módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



Fonte: Autoria própria

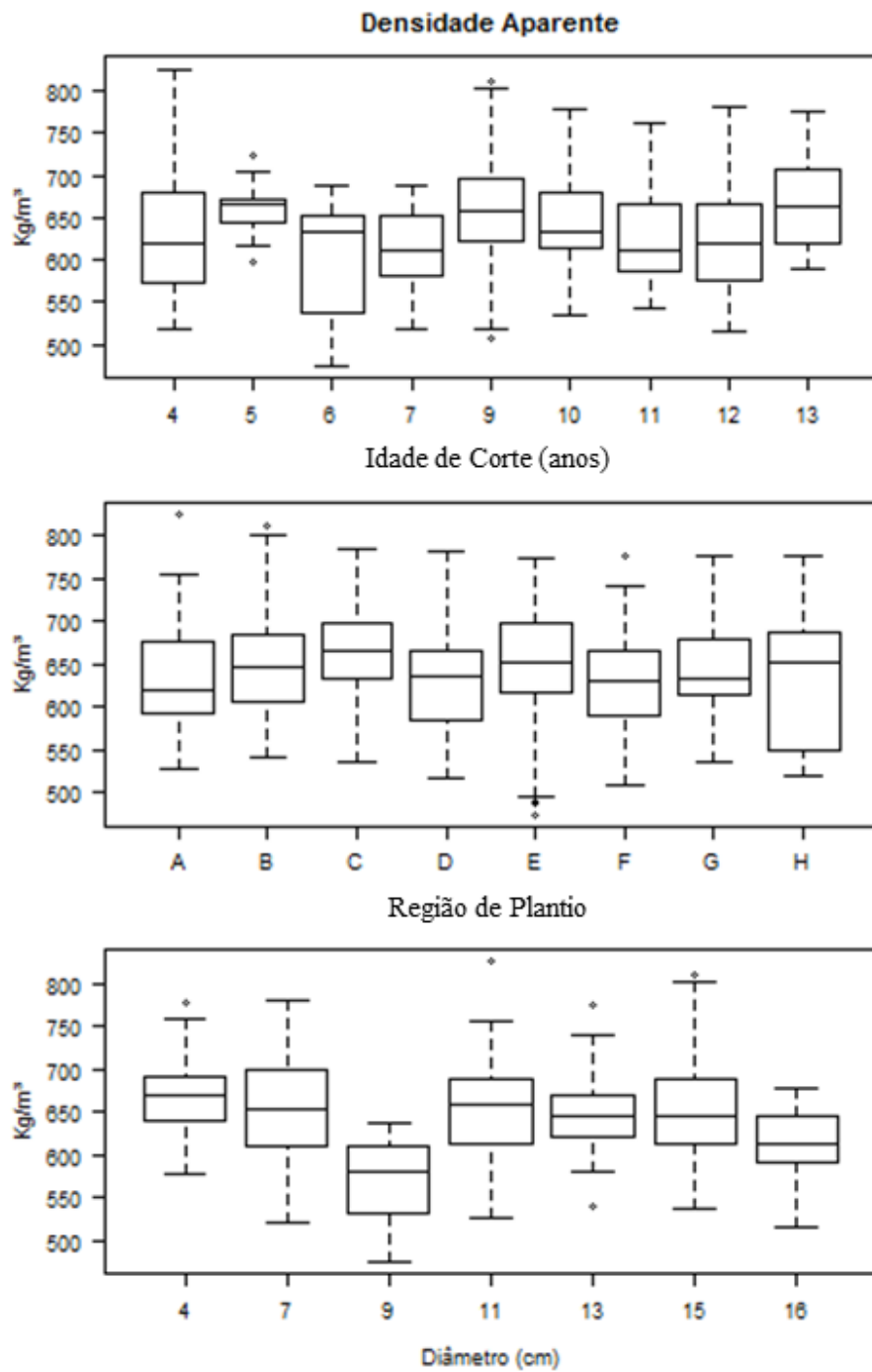


Figura 43 - Dispersão dos valores da propriedade de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



Fonte: Autoria própria

Figura 44 - Dispersão dos valores da propriedade de densidade aparente em relação a idade de corte, região de plantio e diâmetro das peças



Fonte: Autoria própria

## APÊNDICE B – Comparativo de metodologias para determinação do valor característico

De maneira a definir qual o método mais apropriado para determinação do valor característico (quinto percentil,  $f_k$ ) para este estudo, foi feito uma análise utilizando alguns documentos normativos. Foram utilizadas as seguintes normas: NBR 7190 (1997), ASTM D2915 (2010), EN 384 (2010) e ISO 13910 (2005).

A amostragem para análise foi definida como sendo todos os valores obtidos, separados pela propriedade, tal como mostrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Amostragem definida para comparativo do valor característico entre diferentes normas

Propriedade	MOR	MOE	$f_{c0}$	$E_{c0}$	$f_v$	$\rho_{ap}$
NCP	1139	1138	1116	1104	915	1142

Fonte: Autoria própria

### *Cálculo do valor característico segundo a NBR 7190 (1997)*

Esta norma define uma amostragem mínima de 6 corpos de prova para uma caracterização simplificada ou de 12 corpos de prova para a caracterização de espécie pouco conhecida, requisito o qual é obedecido tal como definida as amostras. O cálculo do valor característico é dado pela Equação B1, em que no caso, esta exemplificado a aplicação para o caso do módulo de elasticidade à flexão (MOE).

$$f_k = \left( 2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 = \left( 2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{568}}{568} - f_{569} \right) 1,1 \quad (B1)$$

Os resultados devem ser ordenados, do menor para o maior, em que não se deve tomar um valor para menor do que o  $f_1$ , ou inferior à 0,7 vezes o valor médio da amostra.

### *Cálculo do valor característico segundo a ISO 13910 (2005)*

A norma internacional ISO 13910 (2005) define uma amostragem mínima de 40 corpos de prova, em que o valor da propriedade de resistência a ser definida será ordenado em forma crescente. Dos seus valores são calculados o valor do percentil experimental utilizando

a Equação 10, o logaritmo neperiano do valor da resistência de cada corpo de prova e o  $\ln[-\ln(1-p_i)]$  relativo ao percentil do  $i$ -ésimo corpo de prova ( $p_{i,ISO}$ ).

$$p_{i,ISO} = \frac{i - 0,5}{N}$$

Por meio do gráfico do  $\ln(f_i)$  pelo  $\ln[-\ln(1-p_i)]$  calculado, utilizando os 15 menores valores, ou os 15% menores, no caso o que possuir maior quantidade, deve ser definida uma linha de tendência e obtido o valor da inclinação pela equação da reta obtida ( $s$ ). Com este valor é calculado o coeficiente de variação ajustado para a cauda de uma distribuição Weibull ( $CV_{tail}$ ), Equação 11. Utilizando estes valores é determinado o valor do  $f_k$  como sendo o valor relativo ao  $f_{data,0.05,i}$  dado pela Equação B4.

$$CV_{tail} = s^{-0,92}$$

$$f_k = f_{data,0.05,i} = f_{0.05,data} \left( \frac{1 - 2,7 \cdot CV_{tail}}{\sqrt{N}} \right)$$

A Tabela 20 apresenta o método de montagem das planilhas para o cálculo do valor característico segundo a norma ISO 13910 (2005). Com os valores das duas últimas colunas é gerado o gráfico com os 15% valores inferiores.

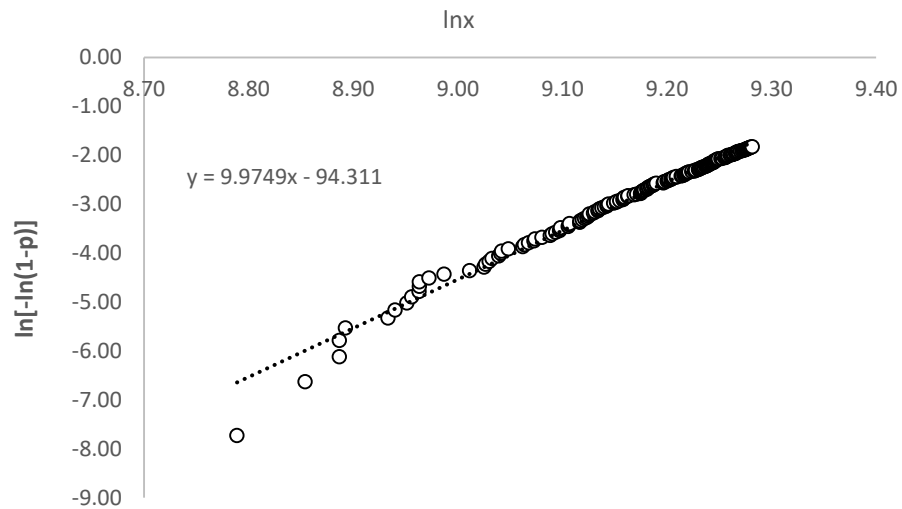
Tabela 20 - Exemplo de montagem das planilhas para cálculo do valor característico segundo a ISO 13910 (2005)

<b>i</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>Percentil</b>	<b>ln(x)</b>	<b>ln[-ln(1-p)]</b>
1	6561	0.000439	8.79	-7.73
2	7003	0.001318	8.85	-6.63
3	7234	0.002197	8.89	-6.12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1136	20606	0.997803	9.93	1.81
1137	20903	0.998682	9.95	1.89
1138	20907	0.999561	9.95	2.05

Fonte: Autoria própria

Com o valor da inclinação da reta gerada por regressão linear, exemplificado para o caso do MOE na Figura 45,  $y = sx + b$ , calcula-se o valor do limite inferior com o uso da Equação 12.

Figura 45 - Exemplo para determinação do valor da inclinação da reta segundo a ISO 13910 (2005)



Fonte: Autoria própria

#### *Cálculo do valor característico segundo a ASTM D2915 (2010)*

Esta norma define a amostragem levando em consideração fatores como o coeficiente de variação ( $CV$ ), valor médio ( $\bar{X}$ ), desvio padrão ( $s$ ) e valor  $t$  de *student* para a amostragem. Estes valores, podem ser estimados pelos dados de outros estudos da mesma espécie. Esta dedução é calculada pelo uso da Equação B2. Esta assume que os dados possuem uma distribuição normal com o valor da média a ser estimada dentro de 5% do intervalo de confiança especificado.

$$n = \left( \frac{ts}{\alpha \bar{X}} \right)^2 = \left( \frac{t}{\alpha} \cdot CV \right)^2 = \left( \frac{2}{5} \cdot 50 \right)^2 = 400 \quad (B2)$$

Onde  $n$  é o tamanho da amostra e  $\alpha$  alpha é a estimativa da precisão. Adotando um valor para  $t$  de 2,0 e estimativa para a precisão de 5 %, tal como exemplo proposto na norma, e um valor de 50 % de coeficiente de variação, para uma situação extrema, tem-se a necessidade de amostragens com 400 peças, ou seja, mesma nesta situação, a amostragem definida satisfaz esta condição.

Os dados da amostragem em questão devem ser organizados em ordem crescente, para cada objeto de estudo. Deve ser calculado o valor do percentil relativo de cada corpo de prova utilizando a Equação B3, com  $i$  correspondente ao  $i$ ésimo valor da amostragem,  $n$  o número

total de corpos de prova da amostra e  $p_{i,ASTM}$  o valor do percentil relativo ao  $i$ ésimo corpo de prova segundo a norma ASTM D2915 (2010).

Com estes valores, utiliza-se a Equação B4 que corresponde ao cálculo da estimativa do ponto percentual não-paramétrico ( $NPE$ ), que adotando o valor do percentil de interesse ( $k$ ), no caso deste estudo 5% para o 5º percentil, o  $j$ -ésimo valor, correspondente à numeração  $i$  do corpo de prova com valor percentil superior ou igual a 5%,  $x_j$  ao valor relativo da propriedade no  $j$ -ésimo valor e  $x_{j-1}$  ao valor diretamente inferior.

$$p_{i,ASTM} = \frac{i}{(n + 1)} \quad (B3)$$

$$NPE = \left[ \frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{j-1}] + x_{j-1} \quad (B4)$$

O método proposto pela norma norte-americana é similar ao da ISO 13910(2005), sendo alterado o equacionamento quanto a determinação do percentil relativo de cada amostra, tal como mostrado na Tabela 21

Tabela 21 - Determinação dos valores para cálculo do valor característico segundo a ASTM D2915 (2010)

<b>i</b>	<b>MOE (MPa)</b>	<b>Percentil (%)</b>
1	6561	0.09
2	7003	0.18
3	7234	0.26
4	7235	0.35
5	7276	0.44
6	7579	0.53
7	7632	0.62
8	7717	0.70
9	7753	0.79
11	7808	0.88
⋮	⋮	⋮

Fonte: Autoria própria

#### *Cálculo do valor característico segundo a EN 384 (2010)*

Esta norma define que cada material de estudo deve ser representativo da população, representando a origem, tamanho e qualidade que irá ser classificado no processo. Caso haja suspeita de existência de diferença nos valores das propriedades mecânicas da distribuição da população devido a regiões de plantio, serrarias, tamanho da árvore ou método de corte da madeira, isto deverá ser representado no número de amostras determinado por uma proporção

similar à frequência que ocorre na população. Fato que deve ser considerado com maior relevância para determinação do número e tamanho das amostras.

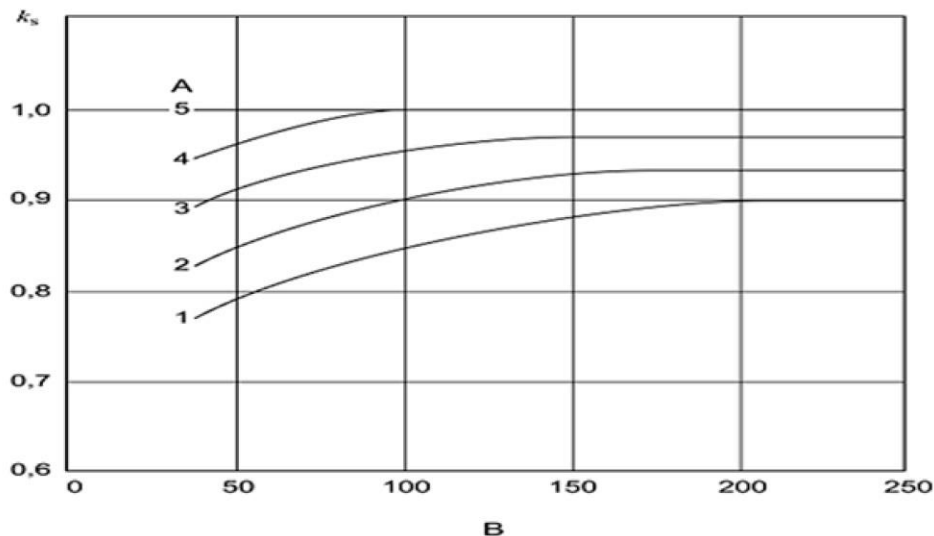
O número de corpos de prova para cada amostra não deve ser inferior à 40, em que apenas um corpo de prova, ou peça, deve ser retirada de cada origem. Caso este valor não possa ser obedecido, os valores característicos para as propriedades estudadas devem ser penalizadas. O valor característico, segundo esta norma é dado pela Equação B5.

$$f_k = f_{0,05} \cdot k_s \cdot k_v \quad (\text{B5})$$

em que  $k_s$  é um fator de correção para o número e tamanho das amostras, o qual deverá ser obtido pelo uso do ábaco da norma (Figura 46),  $k_v$  é um fator que leva em conta a baixa variabilidade dos valores obtidos de  $f_{0,05}$  entre as amostras determinados pelo uso de máquinas (Ex: *Machine Stress Rated*).

Para valores de resistência à tração e compressão paralelo às fibras,  $k_v$  é 1,0, para o módulo de resistência à flexão realizados em máquinas de classificação mecânica com  $f_{mk}$  maior que 30 N/mm<sup>2</sup>, para todas classes visuais,  $k_v$  é 1,0 e para o caso resistência ao cisalhamento, tração e compressão perpendicular às fibras,  $k_s = k_v = 1,0$ .

Figura 46 - Valores de  $k_s$  para diferentes esquemas de amostragem



Fonte: EN384 (2010).

em que A é relativo ao número de amostras, e B é o número de peças na menor amostra.

### Análise comparativa entre as normas

Com os valores finais para o 5º percentis, experimental ( $p_{i,exp}$ ) e teóricos ( $f_k$ ), de cada amostra calculado pelas normas citadas foi gerada a Tabela 22. Os valores determinados pela metodologia proposta pela norma norte-americana são superiores (aproximadamente 0,5%) ao da norma internacional, o que torna o método mais conservador. Os valores obtidos pela norma europeia (EN 384, 2010) por sua vez, demonstram um rigor acima do desejado, para a metodologia adotada. Já a norma brasileira estima um valor superior para todas as propriedades calculadas, ou seja, caso utilizado o valor para o dimensionamento, em termos prático, haverá uma probabilidade maior do que de 5% de existir uma peça com uma resistência inferior a estimada, sendo então não adequado à aplicação deste trabalho.

Tabela 22 - Valores característicos calculados

Método		MOR	MOE	$f_{c0}$	$E_{c0}$	$f_v$	$\rho_{ap}$
NBR7190 (1997)	$f_k$	63.9	10458	44.4	10176	6.1	609.2
	$p_{i,exp}$ *(%)	10.3	12.13	15.3	13,86	6.7	26.8
ASTM2915 (2014)	$f_k$	56.9	9403	40.6	8535	5.9	546.0
	$p_{i,exp}$ (%)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
EN384 (2010)	$f_k$	51,2	8463	36,5	7682	5,3	491,4
	$p_{i,exp}$ (%)	2.1	1.9	0.6	2.3	3.2	0.3
ISO13910 (2005)	$f_k$	56.0	9313	40.3	8396	5.6	543.9
	$p_{i,exp}$ (%)	4.5	4.6	4.4	4.7	4.2	4.6

\* $p_{i,exp}$  foi calculado como o percentil real experimental, obtido pelo percentil acumulativo das amostras, ordenados do menor para o maior valor.

Fonte: Autoria própria

Tendo em vista a análise realizada, o procedimento de cálculo sugerido pela norma ISO 13910 (2005), pressupõe que a o valor do quinto percentil da amostragem não tem a capacidade de prever os reais valores do 5º percentis da população. Prevendo este fato, este documento normativo aplica uma correção levando em conta este fato, o que a torna a mais indicada para aplicação nesta pesquisa.

Deve-se salientar que este estudo comparativo realizado foi apenas uma análise preliminar para determinação do quinto percentil. Para real avaliação da estimativa do valor característico, ou metodologia mais apropriada, deve-se aprofundar estudos com amostragens randômicas e aplicação de métodos de inferência estatística em diferentes grupos de espécies de madeira.