

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

**ANDRÉ LUIZ ZANGIÁCOMO**

**Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**

São Carlos  
2007



**ANDRÉ LUIZ ZANGIÁCOMO**

**ESTUDO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS  
ROLIÇOS DE MADEIRA**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas

Orientador: Prof. Tit. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2007

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

*À Ana Paula,  
querida companheira,  
com carinho.*

## **A** GRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos:

À querida Ana Paula, companheira amorosa, sempre disponível com seu carinho nos momentos mais difíceis;

Aos meus pais, Odécio e Dinivanda, primeiros professores da minha vida;

Aos meus irmãos, Daniel (Mi) e Kelly (Bilili), pelo companheirismo;

Ao Professor Titular Francisco Antonio Rocco Lahr, pela valiosíssima amizade e orientação nesta pesquisa;

A todos os meus parentes que me apoiaram;

Aos funcionários do LaMEM pela enorme ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Aos amigos e companheiros que me acompanharam nestes anos (LaMEM, CAASO, e o pessoal de Americana);

Aos membros integrantes da banca examinadora;

À Postes IRPA, pelo empréstimo dos postes de eucalipto;

À Estação Ecológica de Itirapina, da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, pela doação das árvores de pinus;

E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro.

Muito obrigado!

## **R**ESUMO

ZANGIÁCOMO, A. L. **Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**. 2007. 70 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Este trabalho estuda as propriedades de resistência e rigidez de elementos estruturais roliços de madeira. Para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinal (MOE), transversal (G) e de resistência das peças (MOR), são realizados ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras das espécies *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* var. *caribaea* e *Eucalyptus citriodora*, em elementos estruturais e em corpos-de-prova de dimensões reduzidas. Os resultados apontam que a partir da relação vão/diâmetro = 18, na flexão estática, é possível desconsiderar as deformações decorrentes do cisalhamento no cálculo de MOE. Indicam também que há diferenças entre MOE na flexão para peças estruturais e para corpos-de-prova de dimensões reduzidas, o mesmo acontecendo para os valores obtidos nos ensaios de compressão paralela para MOE e MOR. Conclui-se que, para as peças estudadas, a relação  $E/20$  não é um bom estimador para G, e que é recomendável o estabelecimento de metodologia de ensaio específica para peças estruturais roliças, sendo sugerido um método ao final deste trabalho.

Palavras-chave: madeira, elementos estruturais roliços, flexão estática, compressão paralela

## **A**BSTRACT

ZANGIÁCOMO, A. L. Study of structural round timber. 2007. 70 f. Thesis (Doctoral) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

The aim of this work is the determination of stiffness and strength properties of structural round timber. Static bending and compression parallel to grain tests were carried out to obtain modulus of elasticity (MOE), shear modulus (G) and modulus of rupture (MOR). The results suggest that, in bending test, there is no influence in MOE determination due to shear deflection at span/diameter ratio=18 or more. There is difference in MOE results for structural round timber and for small clear specimen in bending tests, and the same occurs for MOE and MOR in compression parallel to grain tests. Finally, to this structural round timber, the MOE/20 ratio is not recommended to estimate G, and is commendable the establishment of specific structural round timber test methodology, as suggested in this study.

Key-words: wood, structural round timber, bending tests, compression parallel to grain tests

# L ISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interior de habitação: pilares e vigas roliças de madeira .....	22
Figura 2 – Exemplo de estrutura empregando elemento roliço: primeira passarela estaiada do Brasil.....	23
Figura 3 – Peça de seção circular e respectiva seção retangular que pode ser obtida .....	24
Figura 4 – Normas e especificações para madeiras roliças nos EUA .....	31
Figura 6 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> selecionado para corte .....	47
Figura 7 – Esquema de ensaio de flexão estática .....	49
Figura 8 – Esquema de ensaio de flexão estática com variações de vãos .....	49
Figura 9 – Ensaio de flexão estática em viga de Pinus.....	50
Figura 10 – Esquema para retirada dos corpos-de-prova (dimensões em centímetros – sem escala).....	53
Figura 11 – Ensaio de compressão paralela às fibras em elemento estrutural de Pinus.....	54
Figura 12 – Peça de eucalipto submetida à compressão.....	55
Figura 13 – Região da seção transversal para obtenção das barras prismáticas.....	56
Figura 14 – Ensaio de flexão estática em corpo-de-prova de dimensões reduzidas.....	56
Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras .....	57
Figura 16 – Detalhe de suporte de elemento estrutural em ensaio de flexão .....	60
Figura 17 – Diagrama força x deslocamento – peça PC13.....	65
Figura 18 – Diagrama força x deslocamento – peça PE2.....	69
Figura 19 – Diagrama força x deslocamento – peça EC6 .....	73
Figura 20 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico dos valores médios de $MOE_{ap}$ versus relação $l/d$ .....	78
Figura 21 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico dos valores médios de $MOE_{ap}$ versus relação $l/d$ .....	82
Figura 22 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico dos valores médios de $MOE_{ap}$ x relação $l/d$ .....	86
Figura 23 – Resultados das análises .....	90
Figura 24 – Vista do talhão .....	112
Figura 25 – Árvore marcada para corte .....	112
Figura 26 – Corte de árvore.....	112

Figura 27 – Árvore cortada .....	112
Figuras 28 a 31 – Carregamento das peças .....	113
Figuras 32 a 35 – Descarregamento das peças no LaMEM.....	114
Figuras 36 a 38 – Descarregamento e armazenamento das peças no LaMEM.....	115
Figuras 39 a 42 – Manejo das peças no LaMEM.....	116
Figuras 43 a 46 – Transporte, pesagem e posicionamento das peças .....	117
Figuras 47 a 50 – Poste posicionado, preparo, medição e ensaio da peça.....	118
Figuras 51 a 54 – Obtenção dos segmentos das peças para desdobro .....	119
Figuras 55 a 59 – Desdobro das toras para obtenção de corpos-de-prova.....	120
Figuras 60 a 63 – Obtenção de corpos-de-prova.....	121
Figuras 64 a 67 – Ensaio em corpos-de-prova de dimensões reduzidas e em elementos estruturais.....	122
Figura 68 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações $l/d$ MOE na flexão estática .....	124
Figura 69 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações $l/d$ – MOE na flexão estática .....	124
Figura 70 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática.....	125
Figura 71 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática.....	125
Figura 72 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela .....	126
Figura 73 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela .....	126
Figura 74 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela .....	127
Figura 75 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela .....	127
Figura 76 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações $l/d$ – MOE na flexão estática.....	128
Figura 77 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações $l/d$ – MOE na flexão estática.....	128

Figura 78 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática .....	129
Figura 79 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática .....	129
Figura 80 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela.....	130
Figura 81 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela.....	130
Figura 82 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela.....	131
Figura 83 – <i>Pinus elliottii</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela.....	131
Figura 84 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações $l/d$ – MOE na flexão estática .....	132
Figura 85 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações $l/d$ – MOE na flexão estática .....	132
Figura 86 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática .....	133
Figura 87 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática .....	133
Figura 88 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela.....	134
Figura 89 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela.....	134
Figura 90 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela.....	135
Figura 91 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela.....	135
Figura 92 – Valores de $k_b$ e $k_s$ para diferentes carregamentos .....	138

# L ISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área plantada com Pinus e Eucaliptos no Brasil em 2000 (em hectares).....	39
Tabela 2 – Consumo de madeira em toras no Brasil em 2000 (1000 m <sup>3</sup> ).....	39
Tabela 3 – Espécies cultivadas dos gêneros <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> no Estado de São Paulo, em hectares.....	40
Tabela 4 – <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> plantados na Região Administrativa de Campinas (em hectares).....	41
Tabela 5 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> : MOE <sub>ap</sub> (MPa) – estruturais – flexão estática.....	64
Tabela 6 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> : G (MPa) – estruturais – flexão estática.....	65
Tabela 7 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> : MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela às fibras.....	66
Tabela 8 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> : MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – flexão estática e compressão paralela às fibras.....	67
Tabela 9 – <i>Pinus elliottii</i> : MOE <sub>ap</sub> (MPa) – estruturais – flexão estática.....	68
Tabela 10 – <i>Pinus elliottii</i> : G (MPa) – estruturais – flexão estática.....	69
Tabela 11 – <i>Pinus elliottii</i> : MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela às fibras.....	70
Tabela 12 – <i>Pinus elliottii</i> : MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – ensaios de flexão e compressão.....	71
Tabela 13 – <i>Eucalyptus citriodora</i> : MOE <sub>ap</sub> (MPa) – estruturais – flexão estática – madeira 12%.....	72
Tabela 14 – <i>Eucalyptus citriodora</i> : G (MPa) – estruturais – flexão estática – madeira 12%..	73
Tabela 15 – <i>Eucalyptus citriodora</i> : MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela – madeira 12%.....	74
Tabela 16 – <i>Eucalyptus citriodora</i> : MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras – madeira a 12% de teor de umidade.....	75
Tabela 17 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> – Resultados da análise de variância para as relações $l/d$ .....	79
Tabela 18 – <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaeae</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática.....	80

Tabela 19 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	81
Tabela 20 – <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	81
Tabela 21 – <i>Pinus elliottii</i> – Resultados da análise de variância para as relações $U/d$ .....	83
Tabela 22 – <i>Pinus elliottii</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática .....	84
Tabela 23 – <i>Pinus elliottii</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	85
Tabela 24 – <i>Pinus elliottii</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	85
Tabela 25 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Resultados da análise de variância para as relações $U/d$ .....	87
Tabela 26 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática .....	88
Tabela 27 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	89
Tabela 28 – <i>Eucalyptus citriodora</i> – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras .....	89
Tabela 29– <i>Pinus caribaeae</i> var. <i>caribaea</i> : peso, comprimentos e diâmetros dos postes .....	108
Tabela 30– <i>Pinus elliottii</i> : peso, comprimentos e diâmetros dos postes .....	109
Tabela 31 – <i>Eucalyptus citriodora</i> : peso, comprimentos e diâmetros dos postes .....	110
Tabela 32– Tabela de distribuição de Fischer-Snedecor .....	140

# **L**ISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MOE – Módulo de elasticidade longitudinal

G – Módulo de elasticidade transversal

MOR – Resistência à ruptura

Cp – Corpo-de-prova

LaMEM – Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira

SET – Departamento de Engenharia de Estruturas

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

USP – Universidade de São Paulo

# L ISTA DE SÍMBOLOS

$\ell/d$  – relação vão-diâmetro

kN – quiloNewton

$F_{\text{calc}}$  – F calculado

$F_{\text{tab}}$  – F tabelado

p-valor – probabilidade de significância

kg – quilograma

daN – decaNewton

$\text{g/cm}^3$  – gramas por centímetro cúbico

MPa – megaPascal

cm – centímetro

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1.....</b>	<b>17</b>
Introdução .....	17
1.1 Objetivo.....	18
1.2 Justificativa .....	19
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>21</b>
Revisão bibliográfica .....	21
2.1 Peças roliças de madeira .....	21
2.2 Elementos submetidos a solicitações .....	25
2.2.1 Flexão.....	25
2.2.2 Compressão paralela às fibras.....	28
2.3 Documentos normativos .....	30
2.4 Algumas pesquisas relevantes.....	34
2.5 Madeiras de reflorestamento .....	38
2.6 Conclusões da revisão bibliográfica .....	41
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>43</b>
Materiais e métodos .....	43
3.1 As espécies de madeira estudadas.....	43
3.2 Metodologia .....	46
3.2.1 Obtenção das árvores .....	46
3.2.2 Ensaio em elementos estruturais .....	47
3.2.2.1 Flexão estática em elementos estruturais.....	47
3.2.2.2 Compressão paralela às fibras em elementos estruturais .....	52
3.2.3 Ensaio em corpos-de-prova de dimensões reduzidas .....	55
3.2.4 Análise estatística.....	57
3.3 Equipamentos utilizados .....	59
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>63</b>
Apresentação dos resultados .....	63
4.1 <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> .....	63
4.1.1 Ensaio em elementos estruturais .....	63
4.1.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas .....	66
4.2 <i>Pinus elliottii</i> .....	68

4.2.1 Ensaio em elementos estruturais .....	68
4.2.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas.....	70
4.3 <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	71
4.3.1 Ensaio em elementos estruturais .....	72
4.3.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas.....	74
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>77</b>
Análise dos resultados .....	77
5.1 <i>Pinus caribaea</i> var. <i>caribaea</i> .....	77
5.1.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ ) .....	77
5.1.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova .....	79
5.1.2.1 Ensaio de flexão estática .....	79
5.1.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras .....	80
5.2 <i>Pinus elliottii</i> .....	82
5.2.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ ) .....	82
5.2.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova .....	84
5.2.2.1 Ensaio de flexão estática .....	84
5.2.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras .....	84
5.3 <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	86
5.3.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ ) .....	86
5.3.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova .....	88
5.3.2.1 Ensaio de flexão estática .....	88
5.3.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras .....	88
5.4 Resumo das análises .....	90
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>93</b>
Conclusões.....	93
Sugestões para futuras pesquisas .....	96
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>99</b>
<b>Apêndice A .....</b>	<b>105</b>
<b>Apêndice B .....</b>	<b>107</b>
<b>Apêndice C .....</b>	<b>111</b>
<b>Apêndice D .....</b>	<b>123</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>137</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>139</b>

Estudo de elementos estruturais roliços de madeira

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O uso da madeira como elemento estrutural tem se disseminado no Brasil. A disponibilidade desse material associada às novas tecnologias contribuem para o aumento de sua utilização em estruturas, na construção civil. Neste setor, a madeira pode ser empregada serrada ou em sua forma roliça natural.

As peças roliças representam um dos usos mais eficientes de nossos recursos florestais, pois requerem um mínimo de processamento entre o corte da árvore e a comercialização da peça. Os elementos são descascados, secados e, muitas vezes é feito um tratamento com preservativos antes da aplicação estrutural. Existem diversas possibilidades do uso desse material, destacando-se entre elas as estruturas para pontes, as estruturas aplicadas às redes elétricas aéreas de distribuição (postes e torres), pilares, estacas de fundações, habitações, coberturas e estruturas de contenção.

A Norma Brasileira para o Projeto de Estruturas de Madeira, NBR 7190:1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) especifica os elementos roliços a partir dos diâmetros de base e de topo, independentemente da espécie utilizada. O mesmo documento determina que as propriedades de resistência e rigidez sejam obtidas em ensaios em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos. Tal procedimento não

permite que sejam efetivamente conhecidos os parâmetros necessários ao desenvolvimento dos projetos estruturais envolvendo os mencionados elementos. Conseqüentemente, podem ocorrer problemas com as estruturas construídas. Paralelamente, existem algumas restrições na utilização de espécies diferentes daquelas de uso consagrado, principalmente as provenientes de florestas plantadas, justamente as que apresentam maior disponibilidade, em particular nas regiões sul e sudeste do Brasil, onde o consumo das peças roliças é mais disseminado. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa para que sejam determinadas, de modo confiável, as propriedades de resistência e rigidez de elementos estruturais roliços como subsídios fundamentais para produtores e engenheiros.

## 1.1 Objetivo

Como objetivo geral, espera-se com este trabalho contribuir para um incremento do conhecimento acerca do comportamento, sob determinados carregamentos, de elementos estruturais roliços de madeiras provenientes de florestas plantadas, para uso na construção civil. Especificamente, destacam-se os seguintes objetivos:

- a verificação e a obtenção de uma relação vão livre entre apoios/diâmetro da peça ( $\ell/d$ ) nos ensaios de flexão estática, com carga concentrada aplicada no meio do vão, a partir da qual os valores dos Módulos de Elasticidade Aparente ( $MOE_{\text{aparente}}$ ) não sejam afetados pela deformação oriunda de esforços cisalhantes;
- a verificação de possíveis diferenças entre os resultados dos módulos de elasticidade e de resistência obtidos nos ensaios das peças de tamanho estrutural e nos ensaios em corpos-de-prova de tamanhos reduzidos;

- a determinação da relação entre os valores de MOE obtidos em ensaios estruturais de flexão estática e de compressão paralela às fibras; e da relação entre o MOE e o Módulo de Elasticidade Transversal (G).

Com a conclusão dos objetivos citados, almeja-se a geração de informações que contribuam com uma futura revisão do documento normativo brasileiro NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, no que diz respeito à utilização de elementos roliços de madeira, incentivando assim o emprego desses na construção civil brasileira.

## **1.2 Justificativa**

No Brasil, os elementos roliços são usados principalmente como postes em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. Entretanto, esses mesmos elementos podem ser usados de diferentes formas, como já citadas anteriormente. Para que isso ocorra, é necessário que se conheçam as propriedades de resistência e rigidez das peças roliças de madeira quando submetidas a diferentes condições de carregamento. Assim, buscando uma utilização dos mencionados elementos roliços não só como postes em redes de distribuição de energia, mas também como vigas e pilares, por exemplo, é que se justificam os ensaios a serem realizados neste trabalho. É conveniente lembrar que em alguns países, como nos Estados Unidos da América, dentre outros, o emprego de peças roliças na construção civil é consagrado, com numerosas obras construídas com sucesso, mostrando o potencial do material com seção de geometria circular, objeto de estudo deste trabalho.

A norma brasileira que trata do projeto de estruturas de madeira, como já foi dito, prevê ensaios para determinação de parâmetros de resistência e rigidez a partir de ensaios em corpos-de-prova de dimensões reduzidas. O fato de tais elementos serem isentos de defeitos (que podem influenciar no comportamento da peça) somado à existência de documentos

normativos internacionais que incluem ensaios em elementos estruturais são um bom indício de que existem diferenças consideráveis nas respostas procuradas para o material, em diferentes espécies, dimensões e geometrias. Tais diferenças poderão ser quantificadas a partir dos subsídios gerados com a realização deste trabalho.

Importante ressaltar que os dados obtidos neste estudo podem contribuir, no futuro, para o estabelecimento de classes normativas para os elementos estruturais roliços. Variáveis como diâmetros de base e de topo, comprimentos das peças e módulos de rigidez, podem ser critérios para a classificação dos elementos objetivando o emprego em estruturas.

No que diz respeito às espécies, as que foram escolhidas para compor esse estudo apresentam potencial para serem utilizadas em estruturas. Soma-se a isso o fato de serem oriundas de florestas plantadas, cultivadas em grande escala em nosso país para abastecer o mercado de papel e celulose e/ou para abastecer a indústria do carvão vegetal. Assim, com o emprego dessas madeiras, pode-se diminuir a pressão existente sobre a exploração de espécies tropicais.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica busca mostrar, de maneira sucinta, tópicos importantes que compõem esta pesquisa. São apresentadas menções a respeito de: peças de madeira roliça; solicitações de compressão paralela às fibras e flexão estática; documentos normativos relevantes, nacionais e internacionais; pesquisas já realizadas e que se constituíram em referências para este trabalho; madeiras de reflorestamento. No final desta revisão, uma conclusão com base nas informações apresentadas é feita, reforçando as justificativas já apresentadas no capítulo anterior.

#### 2.1 Peças roliças de madeira

A madeira é utilizada como material estrutural há séculos. Devido à sua versatilidade e disponibilidade, diversas formas de sua utilização foram empregadas pelo homem através dos séculos para resolver os mais variados problemas estruturais, como a habitação, por exemplo. Com o passar dos anos, a necessidade de novas tecnologias motivou o desenvolvimento de estudos sobre o material, tanto em sua forma original como processada, proporcionando o aumento do conhecimento sobre o mesmo e suas possibilidades de uso.

São comuns hoje em dia, em países que têm tradição no emprego da madeira em estruturas, sistemas mistos utilizando tanto madeira maciça como seus derivados. Entretanto, a demanda causada pelo consumo do material aliado aos custos de seu processamento, como o energético, por exemplo, motivam pesquisas que buscam soluções para questões que aliem alta eficiência da madeira como componente estrutural a um baixo custo de produção. Uma possível resposta para esse problema é a utilização desse material em sua forma roliça original, decorrente do crescimento natural da árvore, como demonstra Partel (1999), num estudo que consistiu em um levantamento dos principais sistemas estruturais de habitações, edificações, torres de eletrificação e pontes utilizando madeira roliça no Brasil e no exterior.

A Figura 1 ilustra um exemplo de habitação cuja estrutura é constituída por elementos roliços de madeira. Na foto, observa-se o interior de uma casa onde merecem citação os pilares e vigas roliças de eucalipto.



Figura 1 – Interior de habitação: pilares e vigas roliças de madeira

Fonte: Revista Arquitetura & Construção (Novembro/2004)

As árvores apresentam usualmente um formato cônico decorrente de seu crescimento natural, que por sua vez depende de fatores como alimento, luz solar e outros. Apresentam características de resistência e rigidez que variam de espécie para espécie, e pode ser cortada em diversas dimensões, conforme o interesse de consumo. Assim, obtêm-se elementos tronco-cônicos com seções que podem variar ao longo do comprimento, e ser utilizados como peças estruturais, tratadas ou não.

A Figura 2 mostra a primeira passarela estaiada em madeira do Brasil, construída no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), com destaque para a torre constituída por uma peça roliça de eucalipto (PLETZ, 2003).



Figura 2 – Exemplo de estrutura empregando elemento roliço: primeira passarela estaiada do Brasil.

Como vantagem da utilização de peças roliças, pode ser citado um menor custo de produção se comparado com as peças serradas, uma vez que a etapa de processamento é

reduzida. Como desvantagem pondera-se o fato das peças circulares poderem necessitar, dependendo do projeto, de ligações cuja execução é mais complexa.

Wolfe e Murphy (2005) apresentam algumas vantagens de peças de seção circular comparadas com peças de seção retangular, assumindo que a máxima dimensão de uma peça retangular que se pode obter de uma peça circular é o diâmetro  $d$ , conforme mostram a Figura 3 e a Equação 1:

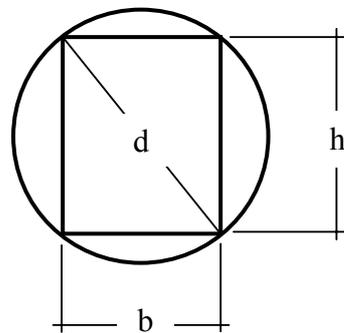


Figura 3 – Peça de seção circular e respectiva seção retangular que pode ser obtida

$$d = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (1)$$

Assumem também que o MOR não é afetado com o processamento da madeira, lidando apenas com a geometria das seções.

Para peças de seção circular, tem-se:

$$I_c = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2)$$

Onde  $I_c$  é o momento de inércia da seção circular, e para peças de seção retangular o momento de inércia  $I_r$  corresponde a:

$$I_r = \frac{b h^3}{12} \quad (3)$$

Assim, mostram que a razão entre momentos de inércia,  $RI = I_c/I_r$ , varia de 1,8 a 4,2 para algumas peças com dimensões padronizadas (para as peças de dimensões comerciais do American Lumber Standard Committee (1999), apontam que o valor de  $RI$  varia de 2,3 a 4,2). Calculando  $RI$ , tem-se o valor de quantas vezes a seção circular suporta mais força do que a seção retangular, para um mesmo deslocamento. No Apêndice A é apresentado um exemplo de cálculo com base no trabalho citado para uma viga de seção nominal de 6 centímetros por 16 centímetros, onde chega-se a  $RI = 2$ .

## 2.2 Elementos submetidos a solicitações

Os ensaios conduzidos neste estudo têm a finalidade de obter parâmetros de resistência e rigidez da madeira e, para isso, são utilizados fundamentos da Resistência dos Materiais. Sendo assim, algumas descrições das solicitações de flexão e compressão são feitas a seguir. Antes, porém, vale ressaltar que informações mais detalhadas sobre as propriedades de elasticidade da madeira podem ser encontradas em trabalhos de diferentes autores, em particular no desenvolvido por Bodig e Jayne (1982).

### 2.2.1 Flexão

De maneira geral na flexão, forças atuando sobre uma viga provocam tensões normais e de cisalhamento (GERE, 2003, entre outros).

O deslocamento em vigas de seções retangulares ou circulares, carregadas sob regime elástico, pode ser obtido através da Equação 4 (WOOD HANDBOOK: WOOD AS AN ENGINEERING MATERIAL, 1999):

$$\delta = \frac{k_b W \ell^3}{E I} + \frac{k_s W \ell}{G A'} \quad (4)$$

Onde:

$\delta$  é o deslocamento;

$W$  é a parcela da força atuando perpendicularmente ao eixo longitudinal da viga;

$k_b$  e  $k_s$  são constantes que dependem do carregamento e dos apoios;

$\ell$  é o vão da viga;

$E$  é o módulo de elasticidade longitudinal da peça;

$I$  é o momento de inércia da seção;

$A'$  é a área modificada da seção;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal.

Na Figura 92 apresentada no Anexo A constam os valores de  $k_b$  e  $k_s$  para diferentes carregamentos e apoios, bem como o ponto da viga onde o deslocamento ocorre. Para vigas simplesmente apoiadas e com carregamento concentrado no meio do vão,  $k_b$  e  $k_s$  valem, respectivamente,  $\frac{1}{48}$  e  $\frac{1}{4}$ . O valor de  $A'$  para peças de seção circular é calculado pela Equação 5:

$$A' = \frac{9}{40} \pi d^2 \quad (5)$$

Assim, considerando que a força aplicada ( $F$ ) é perpendicular ao eixo longitudinal da viga e substituindo os valores das constantes e o valor calculado da área modificada na Equação 4, tem-se para as vigas circulares:

$$\delta = \frac{F \ell^3}{48 E I} + \frac{0,28 F \ell}{A G} \quad (6)$$

Onde  $A$  é a área da seção circular.

O primeiro termo da Equação 6 corresponde ao deslocamento devido ao momento fletor na peça, e o segundo membro da equação calcula a parcela do deslocamento devida aos esforços cisalhantes. Tem-se, então, que o deslocamento total é a soma das parcelas devidas aos esforços fletores e aos esforços cisalhantes.

O documento NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, estabelece que, na impossibilidade da realização do ensaio de compressão paralela às fibras, é permitida a avaliação do módulo de elasticidade,  $E_{c0,m}$  (aqui chamado de MOE), por meio de ensaio de flexão, de acordo com método especificado em seu Anexo B. Neste ensaio, determina-se o módulo de elasticidade aparente  $E_m$ , com as seguintes relações sendo admitidas:

Para coníferas:

$$E_m = 0,85 \cdot E_{c0} \quad (7)$$

Para dicotiledôneas:

$$E_m = 0,90 \cdot E_{c0} \quad (8)$$

E o módulo de elasticidade transversal com o valor efetivo:

$$G_{ef} = \frac{E_{c0,ef}}{20} \quad (9)$$

No Anexo B do mesmo documento encontra-se o método para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal em ensaio de flexão estática com força concentrada. Nesse, a recomendação é que o corpo-de-prova de seção retangular deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre apoios igual a vinte e uma vezes a altura da seção do elemento. Utilizando-se esse espaçamento entre apoios, permite-se simplificar a Equação 4, desprezando-se o segundo termo dessa, pois para vãos com dimensões maiores que o produto de vinte e uma vezes a altura ( $\ell \geq 21 h$ ), o efeito do cisalhamento torna-se desprezível no deslocamento total de elementos com seções retangulares, conforme verificou Lahr (1983).

Entretanto, na norma brasileira, nenhuma referência com relação à distância entre apoios é citada quando se trata de elementos com seções circulares, quer sejam com dimensões estruturais, quer sejam corpos-de-prova com seções reduzidas.

Nenhuma referência é feita também quanto a uma metodologia para a determinação do módulo de elasticidade transversal ( $G$ ). Para isto, em seu trabalho, o autor acima citado propõe três procedimentos experimentais, sendo um deles adotado nesta pesquisa e apresentado no próximo capítulo.

Para simplificação de cálculos, neste estudo, assume-se que as seções dos elementos são perfeitamente circulares, que os diâmetros variam linearmente no comprimento, e que o deslocamento máximo da peça ocorre no ponto de aplicação da carga (essa hipótese considera que a peça apresenta pequena conicidade).

### **2.2.2 Compressão paralela às fibras**

Elementos roliços de madeira quando utilizados como pilares e estacas, por exemplo, estão submetidos a esforços de compressão paralela às fibras. As espécies, de acordo com as

recomendações da NBR 7190:1997, são classificadas por classes de resistência à compressão paralela. Através de ensaios realizados em corpos-de-prova, determina-se o módulo de elasticidade por meio da Equação 10, que deve ser utilizada no trecho linear do diagrama tensão deformação.

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

Onde:

$\sigma_{50\%}$  = tensão de compressão correspondente a 50% da resistência à compressão paralela às fibras;

$\sigma_{10\%}$  = tensão de compressão correspondente a 10% da resistência à compressão paralela às fibras;

$\varepsilon_{50\%}$  = deformação específica medida no corpo-de-prova, correspondente à tensão de  $\sigma_{50\%}$

$\varepsilon_{10\%}$  = deformação específica medida no corpo-de-prova, correspondente à tensão de  $\sigma_{10\%}$

Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ), a Equação 11 é empregada:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (11)$$

Onde:

$F_{c0,máx}$  = máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio,  
em newtons;

$A$  = área inicial da seção transversal comprimida, em metros quadrados.

## 2.3 Documentos normativos

Países que têm tradição no uso da madeira para os mais variados fins apresentam um leque maior de documentos normativos do que países que ainda caminham para se firmarem nesse cenário. Pode-se dizer que a experiência adquirida durante anos de utilização do material somada ao número elevado de trabalhos extensamente desenvolvidos por laboratórios de pesquisas corroboram para a grande quantia de informações encontradas em normas técnicas.

Como referência de associações e órgãos responsáveis por documentos normativos internacionais, podemos citar nos Estados Unidos da América (EUA) a American Society for Testing and Materials (ASTM), o American National Standards Institute (ANSI), a American Society of Agricultural Engineers (ASAE), a American Forest and Paper Association (AFPA), e a American Wood-Preservers' Association (AWPA). Na Europa destaca-se o Comité Européen de Normalisation (CEN), responsável pelas normas européias (European Standards), e na Austrália, a Standards Australia, que publica as normas australianas (Australian Standards - AS).

Nos EUA, os elementos estruturais roliços são especificados de acordo com a sua utilização. Wood Handbook: Wood As An Engineering Material (1999), do Forest Products Laboratory (FPL), traz um quadro onde são encontradas as normas técnicas norte-americanas referentes ao emprego das peças roliças, como é mostrado na Figura 4.

1	2	3	4	5
Postes de rede aérea	ANSI O5.1	TT-W-571 AWPA C1, C4, C35	---	ANSI O5.1
Postes de construção	ANSI O5.1	TT-W-571 AWPA C23	ASTM D3200	ASAE EP388
Estacas	ASTM D25	TT-W-571 AWPA C1, C3	ASTM D2899	NDS
Toras de construção	Fornecedor do material	---	ASTM D3957	Fornecedor do material

Figura 4 – Normas e especificações para madeiras roliças nos EUA

Fonte: Wood Handbook: Wood As An Engineering Material

- 1- Produto
- 2- Características mínimas do material
- 3- Tratamento preservativo
- 4- Procedimentos
- 5- Valores de projeto

Uma apresentação similar também é feita por Green e Hernandez (2000), num trabalho onde descrevem as normas para produtos estruturais de madeira e suas utilizações.

Na presente pesquisa, alguns documentos normativos internacionais que tratam de elementos estruturais foram consultados e merecem uma breve explanação. Tais documentos são apresentados a seguir.

*a. ANSI O5.1(2002) – Specifications and dimensions for wood poles*

Com aproximadamente 40 páginas, esta norma americana apresenta vários critérios que devem ser atendidos para a utilização de um poste. Parâmetros como espécie a ser empregada, tipo de secagem, presença de defeitos, dimensões,

preparo da peça, armazenamento, e outros, são nela especificados, com destaque para as 15 classes de resistência obtidas a partir de ensaios de flexão estática com uma das extremidades do poste engastada.

*b. ASTM D198 (1976) – Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes*

Esta norma especifica os ensaios estruturais em peças de madeira sólida, laminada, e derivados de madeira para fins estruturais. Na flexão estática, as forças concentradas são aplicadas nas vigas em dois pontos, cada ponto distante  $a$  do ponto de apoio mais próximo. Para uma altura  $h$  e deslocamentos devidos somente aos momentos fletores, o comprimento da viga deve ser maior que a relação  $a/h=12$ . Em ensaios de compressão, o comprimento do elemento estrutural deve ser menor que 17 vezes o raio de giração e maior que 3 vezes a largura da peça. Também são especificados os ensaios de tração paralela às fibras e torção.

*c. ASTM D1036 (1997) – Standard Test Methods of Static Tests of Wood Poles*

Postes para distribuição aérea de energia elétrica são os objetos de estudo deste documento. Dois ensaios de flexão são descritos: no primeiro, uma das extremidades do elemento é engastada e a força é aplicada na outra livre; no segundo, a peça é disposta em uma máquina, com as duas extremidades apoiadas e a força é então aplicada na seção correspondente à distância de embutimento.

*d. DIN EN 14251 (2004) – Structural Round Timber – Test Methods (english version)*

Esta norma especifica os ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras em elementos estruturais roliços. Na flexão, as peças são submetidas a carregamento simétrico, com duas forças aplicadas em dois pontos distantes entre si igual a 6 vezes o diâmetro nominal, medido no meio da peça. A distância entre

os apoios recomendada é igual a 18 vezes o diâmetro nominal, com os deslocamentos sendo medidos no meio do vão. Para o ensaio de compressão paralela às fibras, a peça a ser testada deve ter um comprimento igual a 6 vezes o seu diâmetro nominal, com os deslocamentos sendo medidos em transdutores colocados em posições diametralmente opostas, com distâncias de referência iguais a 4 vezes o diâmetro nominal.

*e. AS 2209 (1994) – Timber – Poles for Overhead Lines*

Este documento trata de peças a serem usadas primariamente em redes aéreas de distribuição de energia elétrica e de telefonia, com ou sem tratamento preservativo. Apresenta as especificações mínimas necessárias que uma peça deve apresentar para o determinado uso, com destaque para uma classificação mostrada através de fotos para as fendas de topo e para as fendas laterais da peça.

No Brasil, os documentos que tratam de elementos estruturais roliços existentes são direcionados principalmente para atender ao mercado de postes que serão usados em linhas aéreas de distribuição de energia elétrica:

*f. NBR 6231:1980 – Postes de Madeira: Resistência à Flexão*

Este documento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) prescreve o modo pelo qual deve ser feito o ensaio de resistência à flexão de postes de madeira. Uma das extremidades do elemento é engastada e na outra extremidade é aplicada uma força concentrada, gerando um deslocamento. Através de uma equação onde são considerados fatores como a força aplicada, características geométricas e o deslocamento medido, determina-se o módulo de elasticidade da peça.

*g. NBR 8456:1984 – Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica*

Também da ABNT, esta norma estabelece as condições para a preparação e o recebimento de postes de eucalipto preservados sob pressão, para serem empregados em redes aéreas de distribuição de energia elétrica.

*h. NBR 8457:1984 – Postes de Eucalipto Preservado par Redes de Distribuição de Energia Elétrica: Dimensões*

Já este documento padroniza os postes de eucalipto preservado, também para serem empregados em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. São especificados: comprimento do poste, tipo, resistência nominal, flecha máxima, comprimento e diâmetro de engastamento, diâmetros a 20 centímetros do topo (mínimos e máximos), e perímetros de topo e de base.

Para o emprego dos elementos roliços com outras finalidades estruturais, como vigas de pontes, por exemplo, o documento normativo *NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira* especifica os postes a partir dos diâmetros de base e de topo. Considera também que peças de seção circular, sob ação de solicitações normais ou tangenciais, podem ser consideradas como se fossem de seção quadrada, de área equivalente. Para a determinação de parâmetros de resistência e rigidez e conseqüente dimensionamento de peças estruturais, esse documento recomenda ensaios em corpos-de-prova com dimensões reduzidas, isentos de defeitos que podem influenciar nos resultados obtidos.

## **2.4 Algumas pesquisas relevantes**

Trabalhos de pesquisa com elementos roliços têm sido desenvolvidos em alguns países, com destaque para os estudos em peças de pequenos diâmetros. Para atender a demanda de material para diversos fins, dentre os quais os estruturais, o corte de árvores tem sido cada vez mais precoce, o que acarreta na diminuição dos diâmetros das peças

disponíveis. A seguir são descritas algumas pesquisas que serviram como referência para este trabalho.

Pesquisadores como Wolfe e Moseley (2000) avaliam o emprego de peças de pequenos diâmetros de espécies de madeira para fins estruturais. Ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras são realizados para as espécies Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), Ponderosa Pine (*Pinus ponderosa*) e White fir (*Abies concolor*). Como conclusão, dentre outras, os autores afirmam que o módulo de elasticidade estimado através do ensaio de flexão estática é um importante parâmetro de avaliação para classificação das peças.

Já Ross et al. (2001) estudam ensaios não-destrutivos para a estimativa do módulo de resistência e módulo de elasticidade para elementos estruturais de pequeno diâmetro. Toras de duas espécies de madeira, Red Pine (*Pinus banksiana* Lamb.) e Jack Pine (*Pinus resinosa* Ait.), com diâmetros à altura do peito variando de 12 a 31 centímetros, foram ensaiadas na flexão estática e empregando-se vibração transversal e ondas de tensão na direção longitudinal (stress wave). Os autores concluem nesse trabalho que tais peças podem ser avaliadas com sucesso pelas técnicas não destrutivas.

Larson, Mirth e Wolfe (2004) realizam ensaios de flexão estática em elementos roliços em sua forma original, cônica, e em elementos de seção circular constante. Os resultados desse trabalho apontaram que modificar a forma cônica original de uma peça roliça em uma peça com diâmetro constante reduz os valores de resistência e rigidez na flexão, quando ocorre um acréscimo da porcentagem de madeira juvenil na seção transversal. Apontam também que peças oriundas da base da árvore apresentam maiores resistência e rigidez do que peças provenientes do topo da árvore.

Ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras em elementos de seções circulares são feitos também por Ranta-Maunus (2000). Nesse estudo, com base nos resultados obtidos nos ensaios citados, o autor sugere um método de classificação visual para

classes de resistência, onde estabelece como variáveis importantes nesse procedimento a presença de nós na peça e a largura dos anéis de crescimento.

No Brasil, estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos, incrementando o nível de conhecimento sobre o assunto.

Na determinação das características físicas da madeira pode-se citar Hellmeister (1973), que fez um estudo pioneiro apresentado como tese à EESC/USP. O autor discorre sobre tópicos que vão desde a amostragem das árvores para o estudo de uma espécie de madeira, até o desdobro dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência e elasticidade.

Também realizado por Hellmeister (1978), destaca-se a pesquisa que tem como assunto as pontes de eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*). O trabalho explora um histórico sobre as pontes de madeira, as madeiras brasileiras, nativas e de reflorestamento, os postes de eucalipto citriodora, os tipos de vigas, os esquemas estruturais de pontes, as ligações e outros. Dá ênfase, assim, ao emprego estrutural da madeira, salientando tal fato ser uma realidade.

Já Cunha (2004) apresenta um cenário da utilização da madeira roliça de eucalipto na arquitetura brasileira, através do levantamento de alguns sistemas construtivos, suas vantagens e desvantagens, e de obras executadas em diversas regiões do país. A autora destaca os detalhes arquitetônicos e considerações de projeto como durabilidade, flexibilidade, e harmonia com o ambiente natural, mostrando razões para a adoção do eucalipto roliço na construção.

Colaborando para o emprego estrutural da madeira de reflorestamento nos transportes terrestres, Abdalla (2002) fez um estudo teórico e experimental de uma ponte constituída de madeira roliça de *Eucalyptus citriodora*.

Santos e Ballarin (2002) estudaram árvores com cerca de 30 anos das espécies *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*, comparando os resultados de

módulos de elasticidade obtidos em ensaios de corpos-de-prova em ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras. Os autores concluem nesse trabalho que o módulo de elasticidade à flexão foi inferior ao módulo de elasticidade à compressão paralela, apresentando relações entre ambos variando de 0,75 a 0,78.

Uma pesquisa experimental comparando valores de módulo de elasticidade obtidos em corpos-de-prova isentos de defeitos e em peças serradas de dimensões estruturais foi realizada por Batista *et al.* (2000). De três espécies estudadas, duas (Eucalipto e Cambará) apresentaram resultados obtidos nos ensaios de corpos-de-prova considerados fiéis aos resultados obtidos para as peças de dimensões estruturais. Entretanto, o mesmo não pôde ser afirmado para a espécie Cupiúba, que apresentou valores para os modelos reduzidos cerca de 30% inferiores aos modelos estruturais.

Classificações visual e mecânica de corpos-de-prova isentos de defeitos e de peças estruturais da espécie *Eucalyptus citriodora* foram feitas por Corsini, Fonte e Calil Júnior (2004). As peças de madeira foram classificadas visualmente com base no texto da revisão da NBR 7190:1997, e ensaiadas à compressão, tração, cisalhamento e flexão. Como parte final da conclusão do trabalho, os autores chamam a atenção para a necessidade da normalização de ensaios de peças estruturais de madeira.

Pesquisadores como Pigozzo, Pletz e Lahr (2000) estudaram aspectos como o melhor vão livre para ensaios de flexão em peças estruturais, o número de pontos a serem ensaiados em cada peça, a precisão dos valores obtidos e a estimativa do custo desses ensaios para pequenas empresas. Citam que “ O processo de classificação não consiste em separar as peças livres de defeitos, mas ao contrário, permitir o maior número de defeitos em cada grupo de modo que não desclassifiquem as peças para o uso que se queira.”.

Propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto foram estimadas por Sales *et al.* (2004) com o emprego da técnica de ensaio não destrutiva por meio de ultra-som. Os

resultados obtidos indicam que essa técnica pode ser usada para avaliar o módulo de flexão estática de postes de madeira.

Pinto Neto, Calil Júnior e Espinoza (2004) determinaram as propriedades de resistência e rigidez de peças estruturais roliças de pequenos diâmetros da espécie *Eucalyptus alba*, com comprimentos variando entre 250 e 260 centímetros e diâmetros pertencendo a uma faixa de 6 a 10 centímetros. Os autores realizaram ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras nos elementos e concluíram que este segundo é o melhor indicador das propriedades de resistência do material.

Merece destaque também o estudo realizado por Miná, Dias e Calil Júnior (2004), que avaliaram a resistência e a rigidez de postes de madeira da espécie *Eucalyptus citriodora*, comparando os resultados com os obtidos em corpos-de-prova isentos de defeitos. Aqui foram obtidos valores de módulo de elasticidade superiores para elementos estruturais nos ensaios de flexão e inferiores nos ensaios de compressão paralela; já os números obtidos para a resistência foram superiores para as peças estruturais em ambos os ensaios.

## **2.5 Madeiras de reflorestamento**

A área de reflorestamento no Brasil compreendeu, segundo dados da Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas, ABRAF, cerca de 5.743.936 hectares no ano de 2006. Dentre as espécies cultivadas, destacam-se as dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, cujas áreas plantadas nos estados brasileiros somam 5.373.417 hectares, distribuídos de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Área plantada com pinus e eucalipto no Brasil em 2006 (em hectares)

Estado	Pinus	Eucalipto	Total
Amapá	20.490	58.473	78.963
Bahia	54.820	540.172	594.992
Espírito Santo	4.408	207.800	212.208
Mato Grosso do Sul	28.500	119.319	147.819
Minas Gerais	152.000	1.083.744	1.235.744
Pará	149	115.806	115.955
Paraná	686.453	121.908	808.361
Rio Grande do Sul	181.378	184.245	365.623
Santa Catarina	530.992	70.341	601.333
São Paulo	146.474	816.880	963.354
Outros	18605	230.460	249.065
<b>Total</b>	<b>1.824.269</b>	<b>3.549.148</b>	<b>5.373.417</b>

Fonte: ABRAF

Através da análise da tabela anterior, observa-se que o maior produtor de eucalipto no Brasil é o Estado de Minas Gerais, com 1.083.744 hectares plantados, seguido por São Paulo com 816.880 hectares. Já no caso dos pinus, o maior produtor brasileiro é o Estado do Paraná, com 686.453 hectares, seguido por Santa Catarina, com 530.992 hectares. Na Tabela 2 são apresentadas as contribuições das florestas plantadas no consumo de madeira em toras para diferentes produtos.

Tabela 2 – Consumo de madeira de reflorestamento em toras, no Brasil, em 2006 (1000 m<sup>3</sup>)

Produto	Pinus	Eucalipto	Total
Celulose e papel	7.185	39.576	46.761
Carvão vegetal	0	34.537	34.537
Serrados	26.545	3.336	29.881
Compensados	7.228	178	7.406
Painéis reconstituídos*	5.509	1.718	7.226
Outros	6.470	23.988	30.458
<b>Total</b>	<b>52.937</b>	<b>103.332</b>	<b>156.269</b>

Fonte: ABRAF

Observando-se os números da tabela anterior, nota-se uma distribuição no consumo da madeira em toras de aproximadamente 66% para o eucalipto (103,3 milhões de metros cúbicos) e de 34% para o pinus (52,9 milhões de metros cúbicos), sendo o principal segmento consumidor a indústria de papel e celulose (30%), seguida pela siderurgia (22%) e pela indústria de madeira serrada (19%). O gráfico da Figura 5 apresenta as parcelas das finalidades da madeira proveniente das florestas plantadas no Brasil.

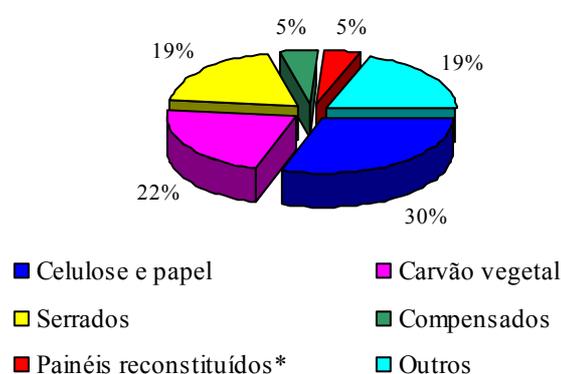


Figura 5 – Finalidade da madeira oriunda de florestas plantadas – Fonte: ABRAF

De acordo com KRONKA (2002), no Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas no Estado de São Paulo, do Instituto Florestal, da Secretaria do Meio Ambiente, do Governo do Estado de São Paulo, as espécies cultivadas no Estado são as apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Espécies cultivadas dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* no Estado de São Paulo, em hectares

Espécie	Área	Espécie	Área
<i>Eucalyptus citriodora</i>	10.060	<i>Pinus caribaea bahamensis</i>	1.913
<i>E. grandis</i>	159.249	<i>P. c. caribaea</i>	5.759
<i>E. saligna</i>	92.217	<i>P. c. hondurensis</i>	9.637
<i>E. urophylla</i>	18.654	<i>P. ellioti</i>	68.590
<i>E.spp</i>	317.200	<i>P. oocarpa</i>	12.209
Outras	14.136	<i>P. spp</i>	51.555
		Outras	8.830
<b>Total</b>	<b>611.516</b>	<b>Total</b>	<b>158.494</b>

Fonte: Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas no Estado de São Paulo

Destacam-se como espécies mais cultivadas, de acordo com a tabela anterior, o *Eucalyptus grandis*, com 159.249 hectares, e o *Pinus elliottii*, com 68.590 hectares, em seus respectivos gêneros. As espécies não identificadas foram classificadas como *Eucalyptus spp* e *Pinus spp*. Na Região Administrativa de Campinas, onde estão localizadas as cidades de Itirapina e Rio Claro, de onde são provenientes as madeiras deste trabalho, encontram-se plantados 110.006 hectares, dos quais 100.907 hectares de *Eucalyptus* e 9.099 hectares de *Pinus*. Na Tabela 4 são mostradas as espécies mais cultivadas nessa região e suas respectivas áreas de plantio, informações essas relevantes na determinação das espécies que são estudadas neste trabalho.

Tabela 4 – *Eucalyptus* e *Pinus* plantados na Região Administrativa de Campinas (em hectares)

<u>Espécie</u>	<u>Área</u>	<u>Espécie</u>	<u>Área</u>
<i>Eucalyptus citriodora</i>	2.334	<i>Pinus caribaea bahamensis</i>	17
<i>E. grandis</i>	6.324	<i>P. c. caribaea</i>	379
<i>E. saligna</i>	5.561	<i>P. c. hondurensis</i>	500
<i>E. urophylla</i>	1.656	<i>P. elliotti</i>	2.811
<i>E.spp</i>	84.200	<i>P. oocarpa</i>	232
Outras	832	<i>P. spp</i>	4.603
		Outras	556
<b>Total</b>	<b>100.907</b>	<b>Total</b>	<b>9.099</b>

Fonte: Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas no Estado de São Paulo

## 2.6 Conclusões da revisão bibliográfica

A partir do que foi exposto anteriormente, algumas conclusões podem ser feitas:

- A madeira roliça pode ser uma alternativa viável para atender a demanda de estruturas de madeira;

- A madeira oriunda de reflorestamentos é uma grande alternativa para emprego na construção civil, devido à sua disponibilidade e resultados obtidos em pesquisas já realizadas;
- Países com tradição no uso da madeira apresentam um grande leque de documentos normativos, para corpos-de-prova com dimensões reduzidas e também para peças de tamanho estrutural;
- Existe uma lacuna no documento normativo brasileiro NBR 7190: 1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, no que diz respeito a metodologias para determinações de propriedades mecânicas de peças estruturais, roliças ou não, sob ação de determinados carregamentos;
- Pesquisas significantes, nacionais e internacionais, foram realizadas para o acréscimo do conhecimento sobre o material, contribuindo para sua maior utilização na construção civil;
- O Brasil é um grande produtor de madeira de reflorestamento, entretanto o seu emprego estrutural ainda não é considerado satisfatório, cedendo espaço para as chamadas espécies nativas. Tal fato pode ser explicado por algumas razões:
  - elevado número de espécies tropicais;
  - grande disponibilidade dessas espécies nas florestas nativas, aliado ao excelente desempenho das espécies de uso consagrado;
  - reflorestamentos feitos para atender exclusivamente setores das indústrias de papel e celulose e de carvão vegetal;
  - carência de informações tecnológicas que possibilitem utilização adequada de madeira de reflorestamento para fins estruturais.

# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

As espécies de madeira escolhidas para compor este estudo, a metodologia empregada e os equipamentos utilizados para alcançar os objetivos propostos são descritos neste capítulo. Complementando essa descrição, uma seqüência de fotografias é apresentada no Apêndice C de maneira a ilustrar todo o trabalho desenvolvido, desde a seleção das árvores, o corte e o transporte dessas, até o preparo dos corpos-de-prova estruturais e de dimensões reduzidas, bem como seus respectivos ensaios.

Toda a experimentação foi realizada no LaMEM e também no Laboratório de Estruturas (LE), ambos do SET/EESC/USP.

Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4.

### 3.1 As espécies de madeira estudadas

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas espécies oriundas de florestas plantadas, dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*.

Na determinação dessas espécies foram levados em consideração os seguintes fatores:

- ◆ a grande área plantada dessas árvores no Estado de São Paulo, resultando assim na disponibilidade dessas madeiras na região de São Carlos;
- ◆ o fato de serem de reflorestamento, diminuindo assim a extração de espécies provenientes de florestas tropicais;
- ◆ o possível controle tecnológico no plantio e cultivo dessas florestas para a produção de madeira, acarretando numa otimização da qualidade das madeiras obtidas, como a melhora de características geométricas das árvores, com troncos de fustes retos e, dependendo do manejo, com menores defeitos de crescimento;
- ◆ estudos prévios de autores que pesquisaram características físicas e mecânicas desses gêneros, concluindo que podem ser alternativas viáveis na construção civil.

Num primeiro momento, duas espécies de pinus e duas de eucalipto foram solicitadas, em forma de doação, à Estação Ecológica de Itirapina, da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, com base nos números apresentados por Kronka (2002). Das espécies de reflorestamento mais plantadas na região de Itirapina, a estação forneceu os exemplares de *Pinus elliottii* e de *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

As duas espécies restantes, de eucalipto, foram então solicitadas à indústria Postes IRPA, localizada em São Carlos, que pôde fornecer os exemplares da espécie *Eucalyptus citriodora* sob a forma de empréstimo (cabe ressaltar que a mesma doou aproximadamente 2,4 metros lineares de cada exemplar para a realização dos ensaios destrutivos).

Na determinação do número de árvores adquiridas, foram relevantes o fato das mesmas terem sido solicitadas sob forma de doação ou empréstimo e também a espécie escolhida. Outro fator importante para a determinação da quantidade das árvores foi o transporte, limitado pelas dimensões das peças e pelo custo de sua mobilização.

Optou-se, então, por adotar um número mínimo de exemplares referido em documentos normativos e em outras obras consultadas. Hellmeister (1973, p.106), nas conclusões de sua tese de doutorado, aponta: “O número mínimo de árvores a ser estudado por espécie é 10 (dez), sempre obtidas por amostragem ocasional.”. Já a norma técnica americana ASTM D5536-94 sugere um número mínimo de 5 elementos para a população cujas árvores apresentem diâmetros maiores que 30 centímetros, e 10 árvores para a população com diâmetros inferiores ao valor citado.

A norma brasileira NBR 7190:1997 estabelece um número de 12 corpos-de-prova para a caracterização mínima da resistência de um lote de madeira serrada cujo volume não seja superior a 12 metros cúbicos. Em observações de campo, chegou-se à conclusão que as árvores estudadas apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP) médios em torno de 30 centímetros e 15 metros de comprimento (descartando-se a copa da planta), e com essas informações calculou-se então o volume de uma peça, adotando o diâmetro como constante ao longo de seu fuste. O valor encontrado foi de aproximadamente 1 metro cúbico por peça.

Como seriam realizados também ensaios estruturais, ou seja, cada árvore seria praticamente um corpo-de-prova, e com base na literatura citada, optou-se finalmente pelo número de 12 árvores para as espécies de pinus, e 24 para a espécie de eucalipto. Esse último número justifica-se em função de que as peças de pinus foram cortadas ao meio, ou seja, cada árvore deu origem a dois postes, conforme será explicado no próximo subitem.

No total, foram adquiridos 24 exemplares de pinus (divididos em duas espécies), com 15 metros de comprimento, e 24 postes de eucalipto, com aproximadamente 9 metros de comprimento.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Obtenção das árvores

Atendidos os pedidos pelos fornecedores, procedeu-se então o processo de retirada das árvores.

No caso dos pinus, um técnico da Estação Ecológica de Itirapina determinou de qual área poderiam ser cortadas as árvores, uma vez que na região existem talhões plantados com diferentes espécies e diferentes idades. Para o *Pinus elliottii*, o talhão foi o de número 41 e para o *Pinus caribaea* var. *caribaea*, o de número 12, com as árvores de ambas espécies tendo cerca de 25 anos de idade. Em seguida, as peças foram escolhidas aleatoriamente dentro do talhão, evitando-se selecionar as plantas que cresceram nas bordas da área, uma vez que essas árvores podem apresentar defeitos de crescimento, como madeira de reação, fibras torcidas e fustes curvos.

As árvores foram marcadas com um número para posterior identificação, e em seguida foram cortadas, carregadas e transportadas para o LaMEM. Para esses procedimentos, uma empresa de Itirapina foi contratada.

Cada árvore de pinus de aproximadamente 15 metros foi dividida em duas partes, de comprimentos equivalentes. Tal procedimento explica-se pelo fato de que o comprimento original das peças era excessivo para os ensaios estruturais propostos, e para contribuir também para uma economia de transporte, uma vez que os novos 48 elementos de 7,5 metros puderam ser transportados todos de uma vez por um caminhão com duplo eixo traseiro.

A Figura 6 mostra um exemplar de *Pinus caribaea* var. *caribaea* selecionado para o corte.



Figura 6 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* selecionado para corte

Já para o caso dos eucaliptos, a empresa IRPA disponibilizou 24 postes com comprimentos variando entre 9 e 9,5 metros, oriundos de uma área plantada no Estado de Goiás e com cerca de 25 anos de idade. Estes foram fornecidos secos, descascados e sem tratamento preservativo. Para o carregamento e transporte das peças em seus tamanhos originais foi utilizado um caminhão “munk”, da Prefeitura do Campus Administrativo de São Carlos/USP (PCASC/USP).

Convém salientar ainda que os postes chegaram ao LaMEM em duas etapas cronológicas: na primeira chegaram os pinus, e cerca de seis meses depois, o eucalipto. Esse fato foi determinante na ordem dos ensaios das espécies.

## **3.2.2 Ensaios em elementos estruturais**

### **3.2.2.1 Flexão estática em elementos estruturais**

Após o descarregamento e armazenamento das peças de pinus no LaMEM, iniciou-se a série de ensaios estruturais. Tal procedimento imediato foi necessário, pois, a princípio, todos os ensaios para todas as espécies foram previstos em corpos-de-prova com valores de teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras, na chamada condição de madeira verde. Com isso, buscou-se uma padronização dos resultados, descartando-se a possibilidade da influência do teor de umidade na composição dos mesmos.

O primeiro ensaio realizado foi o de flexão estática com carga concentrada no meio do vão, não destrutivo, para a determinação dos módulos de elasticidade das peças, longitudinal e transversal (MOE e G, respectivamente).

Com o propósito de se verificar a influência no deslocamento do elemento estrutural devido a tensões de cisalhamento na seção circular, uma variação da distância entre apoios foi feita, correspondendo a diferentes relações comprimento do vão/diâmetro no ponto médio da viga ( $\ell/d$ ). Essas relações corresponderam aos seguintes valores: 24, 21, 18, 15, 12 e 9.

Assim, por exemplo, para uma viga de 30 centímetros de diâmetro no meio de seu vão, e para uma relação máxima  $\ell/d = 24$ , o valor correspondente para o comprimento do vão dessa viga seria 7,2 metros. Como os elementos de pinus não alcançaram o valor de 30 centímetros de diâmetro no meio de seus vãos, optou-se então pela redução dos tamanhos originais das árvores de 15 metros para 7,5 metros, suficientes para os ensaios pretendidos.

As Figuras 7 e 8 mostram os esquemas dos ensaios de flexão estática para uma viga de seção circular simplesmente apoiada.

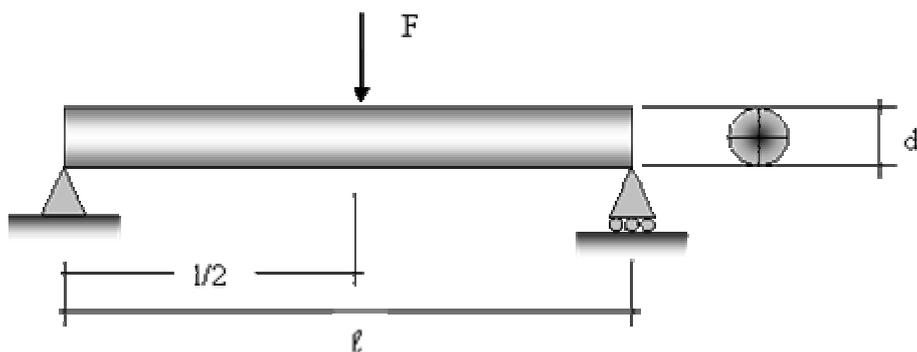


Figura 7 – Esquema de ensaio de flexão estática

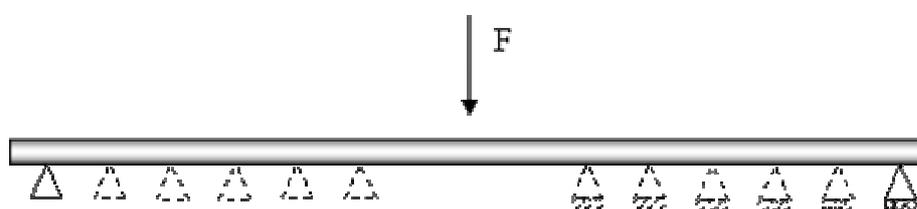


Figura 8 – Esquema de ensaio de flexão estática com variações de vãos

Antes do ensaio de flexão, cada poste de madeira foi pesado e suas circunferências medidas, na base, no topo e ao longo de seu fuste. Esses valores podem ser encontrados no Apêndice B (Tabelas 29, 30 e 31).

Na seqüência, os elementos eram posicionados em dois apoios articulados móveis, cada um contendo um berço de madeira com um corte circular que acomodava a extremidade da peça. Uma vez determinado o diâmetro no meio do vão, uma série de marcações era feita na peça, correspondentes às relações  $\ell/d$  já citadas, apontando as posições dos apoios. Devido ao fato das árvores de pinus estarem com casca, uma preparação da superfície de cada tora teve que ser feita nos pontos onde se localizavam os apoios, o ponto de aplicação de força e, principalmente, o relógio comparador. Esse preparo consistiu na raspagem da casca nos lugares citados com o emprego de um enxó, manualmente.

Em seguida efetuava-se o ensaio propriamente dito, com uma força concentrada sendo aplicada no meio do vão por meio de um pistão hidráulico. A força atuante na viga foi medida em um anel dinamométrico, sendo o correspondente deslocamento, abaixo do ponto de aplicação da força determinado com o auxílio de um relógio comparador. Com o intuito de se transferir o carregamento para o elemento estrutural de maneira mais eficiente, uma peça de madeira com uma semi-circunferência recortada foi utilizada. Três ciclos de carregamentos foram conduzidos em cada elemento roliço, sendo seus deslocamentos limitados ao valor do vão dividido por duzentos ( $l/200$ ), com base no estudo de Zangiácomo (2003).

A Figura 9 mostra um dos ensaios de flexão em uma viga de pinus, com destaque para o ponto de aplicação da força, onde percebe-se a peça de madeira adaptando-se perfeitamente à superfície curva da viga (detalhe).



Figura 9 – Ensaio de flexão estática em viga de Pinus

De posse dos valores de carga e deslocamentos correspondentes, utilizou-se a Equação 6 para o cálculo do valor do módulo de elasticidade longitudinal, desprezando-se o segundo termo da equação. Em função disso, optou-se por chamar o valor encontrado como Módulo de Elasticidade Aparente ( $MOE_{ap}$ ).

Cada procedimento como o anteriormente mencionado foi repetido para cada relação vão/diâmetro ( $\ell/d$ ). Para as espécies de pinus, sendo 48 (quarenta e oito) peças e 6 (seis) relações cada, chegou-se ao número de 288 (duzentos e oitenta e oito) ensaios de flexão estática efetuados em corpos-de-prova estruturais.

Para os postes de eucalipto, foram adotados basicamente os mesmos procedimentos citados anteriormente para os exemplares de pinus. Apesar de possuírem um comprimento maior (em torno de 9 metros), as peças de eucalipto foram assim mantidas, mudando apenas o preparo dos corpos-de-prova estruturais: como a empresa forneceu as peças descascadas, não foram necessárias as etapas de raspagens dos elementos.

Para essa espécie, foram realizados 144 (cento e quarenta e quatro) ensaios de flexão estática estruturais, correspondentes aos 24 (vinte e quatro) postes e às 6 (seis) relações estudadas.

Somando-se os números das três espécies, chega-se ao total de 432 (quatrocentos e trinta e dois) ensaios de flexão estática.

Para a determinação do Módulo de Elasticidade Transversal (G), foi utilizada a seguinte metodologia com base na proposta por Lahr (1983) em sua tese de doutorado:

- a) determinou-se o valor do módulo de elasticidade ( $MOE_{ap}$ ) em ensaio de flexão estática onde a relação  $\ell/d$  foi igual a vinte e quatro ( $\ell/d = 24$ ), desprezando-se assim o segundo termo da Equação 6 ;

- b) em seguida, realizou-se na peça um novo ensaio de flexão estática, com uma diminuição do vão dos apoios ( $\ell/d = 9$ ), obtendo-se assim um novo deslocamento correspondente à força aplicada;
- c) De posse do valor de  $MOE_{ap}$  calculado em (a), da força e do deslocamento obtidos em (b), empregou-se a Equação 6, onde a única incógnita restante foi  $G$  no segundo termo, sendo então calculado seu valor.

### 3.2.2.2 Compressão paralela às fibras em elementos estruturais

Após os ensaios de flexão, cada poste era então transportado para fora do LaMEM, onde uma porção de sua extremidade de menor diâmetro era cortada. Essa parte do poste foi escolhida devido à capacidade da máquina de ensaios de compressão paralela ser de 2000 kN (insuficiente para romper algumas peças caso fossem da outra extremidade) e devido aos seus pratos de apoios internos não acomodarem diâmetros superiores a 23 centímetros.

A nova peça apresentava um comprimento médio de 2,4 metros, e destinava-se à confecção de dois corpos-de-prova estruturais para ensaios de compressão paralela às fibras, dois corpos-de-prova de dimensões reduzidas para ensaios de flexão estática e dois corpos-de-prova de dimensões reduzidas para ensaios de compressão paralela às fibras. Além disso, discos de pequenas espessuras foram cortados para as determinações do teor de umidade e da densidade. Um esquema da região do poste de onde foram retiradas as peças pode ser visto na Figura 10, com as dimensões sendo apresentadas em centímetros, o diâmetro menor representado por  $d$  e o diâmetro maior por  $D$  (sem escala).

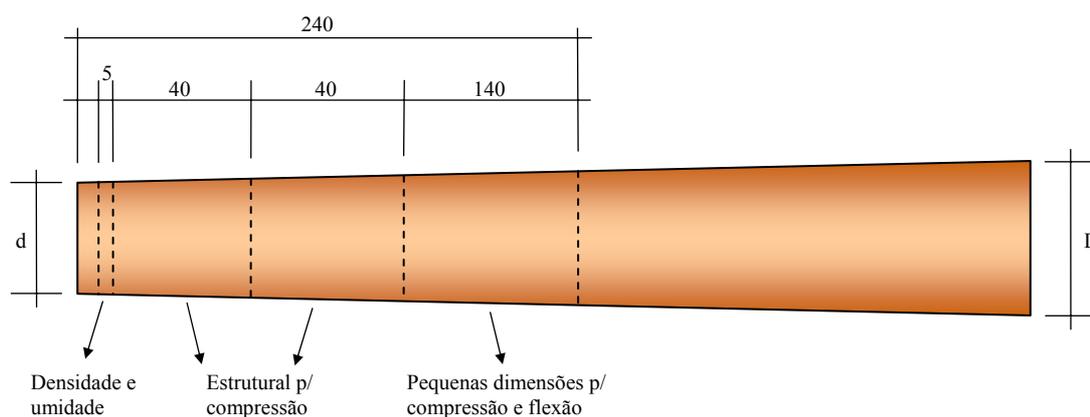


Figura 10 – Esquema para retirada dos corpos-de-prova (dimensões em centímetros – sem escala)

Cada corpo-de-prova estrutural para o ensaio de compressão apresentou 37 centímetros de comprimento, em média, e recebeu raspagens laterais para a fixação de cantoneiras metálicas. Tais elementos foram pregados à madeira e serviram para a colocação de dois relógios comparadores, em posições diametralmente opostas, com a finalidade de se medir a deformação axial da peça comprimida. A distância de referência para o cálculo da deformação específica foi de 20 centímetros, valor adotado que correspondeu, em média, aos valores dos diâmetros das peças. Cabe aqui ressaltar uma dificuldade encontrada para a realização desse tipo de ensaio: a norma americana ASTM D198, por exemplo, especifica que o comprimento da peça deve ter, no mínimo, 3 vezes a sua largura. No entanto, o equipamento disponível e utilizado nos testes possuía altura limitada para atender a essa especificação, sendo empregado predominantemente em ensaios de compressão de peças de concreto de pequenas dimensões, o que influenciou na determinação do comprimento das peças de madeira. Apesar disso, considera-se que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Os ensaios de compressão paralela às fibras nos corpos-de-prova estruturais foram conduzidos com base nas recomendações prescritas pelo documento normativo brasileiro para elementos de pequenas dimensões, com três ciclos de carregamento. Para cada exemplar, um

corpo-de-prova gêmeo foi ensaiado para a estimativa da resistência, sendo utilizada para a determinação do módulo de elasticidade, a Equação 10, e para o módulo de resistência (MOR), a Equação 11.

A foto mostrada na Figura 11 ilustra o ensaio de um elemento estrutural de pinus na máquina ELE, onde se podem observar os relógios comparadores colocados em posições diametralmente opostas.



Figura 11 – Ensaio de compressão paralela às fibras em elemento estrutural de Pinus

Foram realizados para cada espécie de pinus 24 (vinte e quatro) ensaios de compressão paralela às fibras, totalizando para as duas espécies 48 (quarenta e oito) ensaios.

Do mesmo modo como aconteceu nos ensaios de flexão, os mesmos procedimentos adotados nos ensaios de compressão para os pinus foram utilizados para o eucalipto, com exceção da raspagem dos elementos. Para essa espécie, foram executados 24 (vinte e quatro) ensaios.

A Figura 12 mostra uma peça de eucalipto submetida à compressão paralela.

Considerando-se as três espécies, 72 (setenta e dois) ensaios de compressão paralela às fibras foram efetuados em elementos estruturais.



Figura 12 – Peça de eucalipto submetida à compressão

### **3.2.3 Ensaios em corpos-de-prova de dimensões reduzidas**

Como realizado para as peças estruturais, os corpos-de-prova de dimensões reduzidas foram obtidos a partir das peças de 2,4 metros descritas anteriormente, de maneira que os resultados pudessem ser posteriormente comparados de maneira correta.

O primeiro passo para a obtenção das peças a serem ensaiadas foi a retirada de duas barras prismáticas, com dimensões 5,5 x 5,5 x 140 centímetros, de cada tora restante daquelas que mediam 2,4 metros e de onde foram retirados os elementos estruturais para os ensaios de compressão. A região na seção transversal de onde essas barras foram obtidas situava-se a uma determinada distância da medula, evitando-se a presença desta nos elementos e também

qualquer outro tipo de defeito que pudesse afetar o comportamento da peça nos ensaios. Uma referência nesta fase da pesquisa foi o documento normativo ASTM D143-52 (1978), além do documento brasileiro NBR 7190:1997 e da obra de Hellmeister (1973).

A região da seção transversal de onde foram retiradas as barras (destacadas em vermelho) pode ser observada na ilustração da Figura 13.

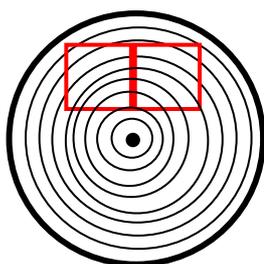


Figura 13 – Região da seção transversal para obtenção das barras prismáticas

As barras prismáticas foram então aparelhadas até atingirem as dimensões nominais de 5 x 5 centímetros de seção. Feito isso, cada uma foi serrada de modo a originar um elemento para ensaio de flexão estática e um para ensaio de compressão paralela.

Ensaio de flexão estática e de compressão paralela às fibras foram então efetuados de acordo com a norma brasileira, em seu anexo B (Figuras 14 e 15, respectivamente).



Figura 14 – Ensaio de flexão estática em corpo-de-prova de dimensões reduzidas



Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras

Salienta-se aqui que as espécies de pinus tiveram todos os seus ensaios, estruturais e não estruturais, feitos em madeira com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. No caso da espécie de eucalipto, todos os ensaios foram realizados com a madeira com teor de umidade em torno de 12%, uma vez que foi assim fornecida.

### 3.2.4 Análise estatística

A análise estatística dos resultados obtidos foi feita empregando-se a técnica chamada Análise de Variância das Médias (ANOVA), com a utilização do *software* estatístico Minitab™. Usual nos meios acadêmicos, essa técnica gera resultados considerados satisfatórios pelos pesquisadores, e será descrita a seguir de maneira simplificada. Autores como Drumond, Werkema e Aguiar (1996), apresentam-na detalhadamente.

De acordo com Milone (2004), entre outros, a análise de variância é a técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de  $k$  populações e decidir se as diferenças amostrais observadas são reais ou casuais, isto é, se decorrentes de diferenças significativas nas populações avaliadas ou da mera variabilidade amostral.

Em outras palavras, com essa técnica é possível afirmar-se, com certo grau de confiança, se as médias das populações em estudos diferem entre si ou não.

Na análise de variância, parte-se dos seguintes pressupostos:

- a) as amostras são aleatórias e independentes;
- b) as populações têm distribuição normal;
- c) as variâncias populacionais são iguais.

As hipóteses testadas neste trabalho, tanto nas comparações das relações *Ud*, como nas verificações de diferenças entre elementos estruturais e corpos-de-prova de dimensões reduzidas, foram:

- ◆  $H_0$  : as médias populacionais são iguais;
- ◆  $H_1$  : as médias populacionais são diferentes.

Usa-se chamar a hipótese  $H_0$  de *hipótese nula*, e  $H_1$  de *hipótese alternativa*.

Descrevendo sucintamente, o *software* citado calcula os parâmetros necessários para a realização do teste, como as médias, as variâncias, os desvios-padrão, a razão  $F_{\text{calc}}$  e o *p-valor* (probabilidade de significância).

Quando, para os graus de liberdade e significância definidos, o parâmetro calculado pelo software  $F_{\text{calc}}$  for menor que o parâmetro tabelado  $F_{\text{tab}}$ , aceita-se a hipótese nula  $H_0$ , ou ainda, se *p-valor* for menor que o nível de significância  $\alpha$ , rejeita-se a hipótese nula  $H_0$ . No Anexo B, Tabela 32, são encontrados os valores de  $F_{\text{tab}}$ .

Na primeira análise, para cada espécie, a amostra de 24 valores obtidos para cada relação *Ud* foi agrupada, e então determinadas as correspondentes médias dos grupos. Assim, o número de amostras foi 6, relativo a cada grupo (ou relação), sendo o tamanho  $n$  da amostra de cada população igual a 24. Na seqüência as médias foram comparadas entre si.

Nas análises seguintes, as médias dos resultados obtidos nos ensaios padronizados foram comparadas com as obtidas nos ensaios estruturais, também para cada espécie, e com o tamanho de cada amostra igual a 24.

Em todas as análises, os valores de cada amostra foram fornecidos ao *software* em forma de colunas, e em seguida, com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 5\%$ ), o programa estatístico calculou os parâmetros já mencionados. De posse dos valores necessários, a análise dos resultados foi feita e é apresentada no Capítulo 5.

Para todas as comparações entre as médias, preliminarmente à análise de variância, foram realizados gráficos para verificação da distribuição normal dos dados e da igualdade de variância, apresentados no Apêndice D.

### 3.3 Equipamentos utilizados

Os equipamentos empregados durante a pesquisa são apresentados a seguir.

Os postes de madeira eram manejados por homens, geralmente três, com a ajuda de alavancas de aço. Fora do prédio do LaMEM, dois carrinhos de madeira eram utilizados para a locomoção das peças, enquanto que dentro do prédio era utilizada a monovia do laboratório, com capacidade para 1000 kg.

Na pesagem dos postes, um anel dinamométrico com constante  $k = 10,823$  daN/divisão foi empregado para as espécies de pinus, e outro com constante  $k = 16,910$  daN/divisão foi utilizado para o eucalipto, sendo as medidas geométricas obtidas com uma trena de 10 metros.

Nos ensaios de flexão estáticas desses grandes elementos, um pistão hidráulico foi instalado num pórtico de aço para a aplicação da força. Na extremidade desse pistão foi colocado um anel dinamométrico de constante  $k = 4,659$  daN/divisão para a medição da força

aplicada nos elementos de pinus, enquanto que para os de eucalipto o anel possuía  $k=10,823$  daN/divisão. Os deslocamentos no meio do vão foram medidos com um relógio comparador de 0,01 milímetros de precisão.

Nas extremidades dos postes foram empregados apoios articulados de aço, com berços de madeira para a acomodação das superfícies curvas. Já as marcações dos pontos de apoio foram feitas com giz colorido. A Figura 16 mostra o detalhe de um suporte onde são vistos a peça metálica articulada, o berço de madeira sobre esta, o poste apoiado e as marcações de giz indicando os pontos onde os apoios devem ser posicionados.



Figura 16 – Detalhe de suporte de elemento estrutural em ensaio de flexão

Utilizou-se uma moto-serra na obtenção das peças de 2,40 metros, com o número de identificação destas sendo anotado nas mesmas com lápis-cópia.

O desdobro das toras foi feito com o uso de uma serra-fita, sendo obtidos os corpos-de-prova estruturais para os ensaios de compressão com o auxílio de um gabarito de madeira. Tal objeto foi de fundamental importância para a garantia de um corte eficiente e perpendicular ao eixo longitudinal da peça cortada. Pequenos ajustes nas seções transversais dos elementos estruturais foram feitos na plaina da oficina do LaMEM, para uma correta adaptação aos pratos da máquina de ensaio e garantia da transmissão dos esforços.

Os corpos-de-prova de pequenas dimensões foram obtidos com o emprego de serra-fita, plaina, desengrossadeira e serra circular. Na determinação da densidade e umidade, foram usadas uma balança digital, uma estufa e um paquímetro digital.

No Laboratório de Estruturas foi utilizada uma máquina de ensaios de compressão da marca ELE com capacidade para 2000 kN. Os elementos estruturais nela ensaiados foram transportados até o laboratório com um carrinho de mão, e medidas suas dimensões com uma trena de 3 metros.

Nos ensaios estruturais de compressão paralela e nos isentos de defeitos foram utilizadas cantoneiras metálicas fixadas com pregos nos elementos. Os deslocamentos foram medidos com dois relógios comparadores com 0,001 milímetros de precisão, sendo usados extensores nos experimentos estruturais.

Para os ensaios das peças de pequenas dimensões, medidas com paquímetro digital, foi empregada a máquina de ensaios universal AMSLER.



## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior são aqui apresentados. Optou-se por posicionar os valores das análises estatísticas no próximo capítulo, bem como dividir a apresentação das respostas em função da espécie estudada e do elemento ensaiado, buscando facilitar a leitura do texto.

#### 4.1 *Pinus caribaea* var. *caribaea*

Os ensaios desta espécie foram conduzidos em madeira com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras (madeira verde), apresentando densidade aparente média obtida em corpos-de-prova igual a 0,52 g/cm<sup>3</sup>.

##### 4.1.1 Ensaios em elementos estruturais

A Tabela 5 apresenta os valores de  $MOE_{ap}$  (em MPa) calculados para as relações  $l/d$  nos ensaios de flexão estática, suas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação.

Tabela 5 – *Pinus caribaeae* var. *caribaeae*: MOE<sub>ap</sub> (MPa) – estruturais – flexão estática

Peça	Relação vão/diâmetro ( $l/d$ )					
	24	21	18	15	12	9
PC1	7.091	7.403	7.081	7.072	6.154	5.509
PC2	7.205	7.141	7.319	7.011	6.436	5.550
PC3	8.706	8.857	8.453	8.039	7.023	5.312
PC4	8.590	9.025	8.862	8.479	8.178	6.940
PC5	9.328	8.966	9.121	8.986	8.176	7.193
PC6	7.566	7.647	7.793	7.736	6.845	6.132
PC7	7.327	7.494	7.129	7.226	6.834	5.505
PC8	9.229	9.170	9.157	8.853	8.303	6.737
PC9	7.973	7.602	7.869	7.710	6.941	5.487
PC10	6.720	6.427	6.822	6.194	5.856	4.901
PC11	9.992	10.057	9.767	9.066	8.883	7.198
PC12	10.697	10.582	10.219	9.602	9.044	6.851
PC13	11.395	11.239	10.751	9.732	8.752	6.695
PC14	13.083	12.540	11.912	11.902	9.824	7.358
PC15	9.612	9.408	9.222	8.866	7.524	6.140
PC16	7.657	7.869	7.326	7.014	6.133	5.314
PC17	7.412	7.457	6.888	7.508	6.284	4.149
PC18	11.632	11.390	10.928	10.280	9.499	7.805
PC19	8.160	8.246	8.015	7.686	6.837	5.674
PC20	11.523	11.008	10.501	10.025	8.744	6.313
PC21	8.609	8.439	8.520	7.789	6.848	5.535
PC22	9.137	8.988	8.511	8.568	7.513	6.513
PC23	8.919	8.673	8.617	8.198	7.107	5.233
PC24	6.995	6.935	7.037	6.648	6.089	4.535
<b>Média</b>	<b>8.940</b>	<b>8.857</b>	<b>8.659</b>	<b>8.341</b>	<b>7.493</b>	<b>6.024</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>1.713</b>	<b>1.591</b>	<b>1.436</b>	<b>1.327</b>	<b>1.175</b>	<b>946</b>
<b>C. V.</b>	<b>0,19</b>	<b>0,18</b>	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>	<b>0,16</b>	<b>0,16</b>

Na determinação das respostas mostradas, foram utilizados valores do diagrama Força x Deslocamento correspondentes ao regime elástico. A Figura 17 traz um exemplo desse diagrama ilustrado para a peça PC13, para as seis relações  $l/d$ .

Como citado no Capítulo 3, calculou-se os valores de G com o emprego dos números de MOE<sub>ap</sub> correspondentes a  $l/d = 24$  e  $l/d = 9$ . Os resultados obtidos estão na Tabela 6.

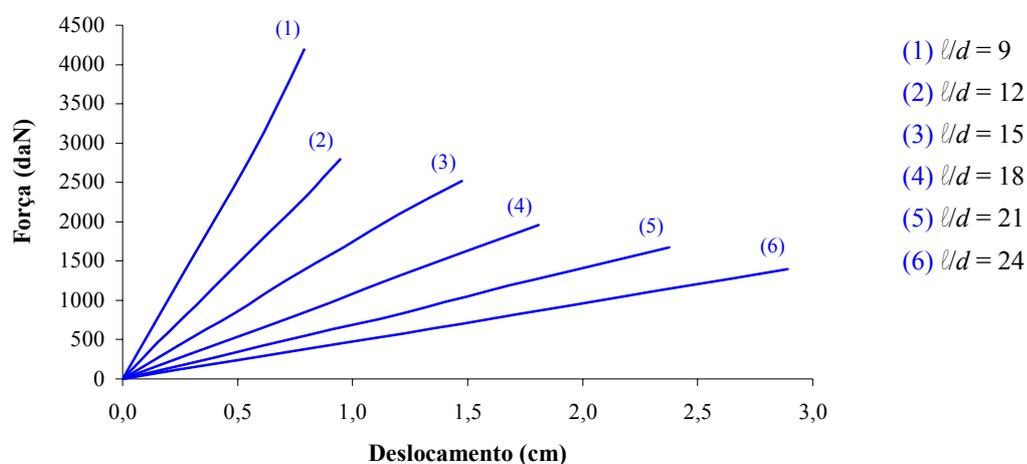


Figura 17 – Diagrama força x deslocamento – peça PC13

Tabela 6 – *Pinus caribaea* var. *caribaea*: G (MPa) – estruturais – flexão estática

Peça	G	Peça	G
PC1	235	PC13	161
PC2	221	PC14	173
PC3	137	PC15	163
PC4	308	PC16	171
PC5	287	PC17	117
PC6	286	PC18	109
PC7	221	PC19	181
PC8	231	PC20	140
PC9	164	PC21	157
PC10	181	PC22	220
PC11	247	PC23	117
PC12	191	PC24	126
		<b>Média</b>	<b>189</b>
		<b>Desv. P.</b>	<b>56</b>
		<b>C. v.</b>	<b>0,30</b>

Os resultados de MOE e MOR obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova com dimensões estruturais são mostrados na Tabela 7. A ausência de três valores na coluna de MOE é devida a um atípico comportamento das peças solicitadas à

compressão: deformações significativas e muito distintas foram observadas nos relógios comparadores, resultando, nos cálculos, em valores considerados não aproveitáveis.

Tabela 7 – *Pinus caribaea* var. *caribaea*: MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela às fibras

Peça	MOE	MOR
PC1	10.076	22
PC2	11.765	26
PC3	7.836	22
PC4	11.066	24
PC5	14.694	22
PC6	13.952	27
PC7	15.754	26
PC8	7.446	23
PC9	8.180	21
PC10	10.911	21
PC11	15.041	31
PC12	17.625	29
PC13	19.365	27
PC14	11.613	32
PC15	***	25
PC16	***	24
PC17	14.785	27
PC18	14.642	18
PC19	15.114	23
PC20	20.499	29
PC21	10.703	23
PC22	10.311	26
PC23	15.559	26
PC24	***	26
<b>Média</b>	<b>13.187</b>	<b>25</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>3.628</b>	<b>3</b>
<b>C. v.</b>	<b>0,28</b>	<b>0,13</b>

#### 4.1.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas

Neste item são apresentados os valores encontrados nos ensaios conduzidos de acordo com o prescrito pelo documento normativo brasileiro. A Tabela 8 mostra os resultados

de MOE e MOR dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em quarenta e oito (48) corpos-de-prova (resultados em MPa).

Tabela 8 – *Pinus caribaea* var. *caribaea*: MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – flexão estática e compressão paralela às fibras

Peça	Flexão estática		Compressão paralela	
	MOE	MOR	MOE	MOR
PC1	7.300	49	9.084	21
PC2	8.238	43	12.365	23
PC3	8.880	43	10.040	20
PC4	9.654	46	8.739	22
PC5	7.184	35	10.478	22
PC6	9.351	53	10.952	24
PC7	8.899	42	9.399	23
PC8	6.509	42	6.473	20
PC9	8.505	45	8.884	21
PC10	6.611	36	8.167	19
PC11	10.416	59	11.572	27
PC12	11.000	55	15.296	27
PC13	7.668	37	8.237	19
PC14	11.825	59	11.909	25
PC15	8.224	44	9.177	21
PC16	3.872	24	5.985	16
PC17	10.402	48	14.424	24
PC18	6.070	34	6.164	16
PC19	9.670	51	10.755	20
PC20	9.689	49	17.458	27
PC21	5.958	37	7.503	20
PC22	9.971	48	10.862	19
PC23	9.835	53	12.464	24
PC24	7.590	42	6.415	19
<b>Média</b>	<b>8.472</b>	<b>45</b>	<b>10.117</b>	<b>22</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>1.863</b>	<b>8</b>	<b>2.924</b>	<b>3</b>
<b>C. v.</b>	<b>0,22</b>	<b>0,19</b>	<b>0,29</b>	<b>0,14</b>

## 4.2 *Pinus elliottii*

Para esta espécie também foram realizados ensaios de flexão estática e de compressão paralela em madeira verde. A densidade aparente média foi de 0,55 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.2.1 Ensaios em elementos estruturais

Tabela 9 – *Pinus elliottii*: MOE<sub>ap</sub> (MPa) – estruturais – flexão estática

Peça	Relação vão/diâmetro ( $l/d$ )					
	24	21	18	15	12	9
PE1	10.545	10.748	10.500	9.899	9.024	7.316
PE2	11.904	11.627	11.523	11.054	9.110	7.338
PE3	7.305	7.210	7.138	6.710	6.574	5.637
PE4	10.182	10.025	9.459	10.058	8.839	6.403
PE5	7.379	6.711	7.194	6.929	7.056	5.297
PE6	8.638	8.865	8.569	7.849	7.568	5.527
PE7	7.127	7.214	6.961	6.635	6.416	5.084
PE8	11.554	11.583	11.700	10.939	10.549	7.629
PE9	8.534	8.526	8.612	8.039	7.572	5.986
PE10	10.725	10.955	10.441	9.880	8.887	6.639
PE11	8.740	8.465	7.938	8.051	7.431	6.267
PE12	10.375	9.940	9.745	9.593	8.171	6.934
PE13	13.861	14.125	13.325	12.615	10.245	7.645
PE14	8.384	8.388	7.793	7.675	6.744	5.075
PE15	12.824	13.510	12.215	8.573	9.677	7.838
PE16	15.042	14.172	13.731	11.906	10.793	7.399
PE17	10.295	10.937	10.404	9.186	8.352	7.175
PE18	13.212	12.302	12.327	11.317	9.738	7.591
PE19	13.802	14.236	13.049	12.464	10.853	8.361
PE20	11.306	11.190	11.213	10.509	9.402	6.298
PE21	12.623	12.437	11.336	10.981	9.876	7.601
PE22	11.982	12.413	11.106	10.400	9.252	7.559
PE23	11.250	11.323	10.165	9.635	9.047	6.931
PE24	10.635	10.644	10.376	9.360	9.177	6.767
<b>Média</b>	<b>10.759</b>	<b>10.731</b>	<b>10.284</b>	<b>9.594</b>	<b>8.765</b>	<b>6.762</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>2.201</b>	<b>2.234</b>	<b>1.999</b>	<b>1.749</b>	<b>1.326</b>	<b>941</b>
<b>C. V.</b>	<b>0,20</b>	<b>0,21</b>	<b>0,19</b>	<b>0,18</b>	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>

Os valores de  $MOE_{ap}$  (em MPa) calculados para as relações  $l/d$  nos ensaios de flexão estática, suas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação estão contidos na Tabela 9. Já o diagrama Força x Deslocamento para as relações  $l/d$  da peça PE2 é mostrado na Figura 18. Na seqüência, a Tabela 10 mostra os valores calculados para G nos ensaios de flexão estática.

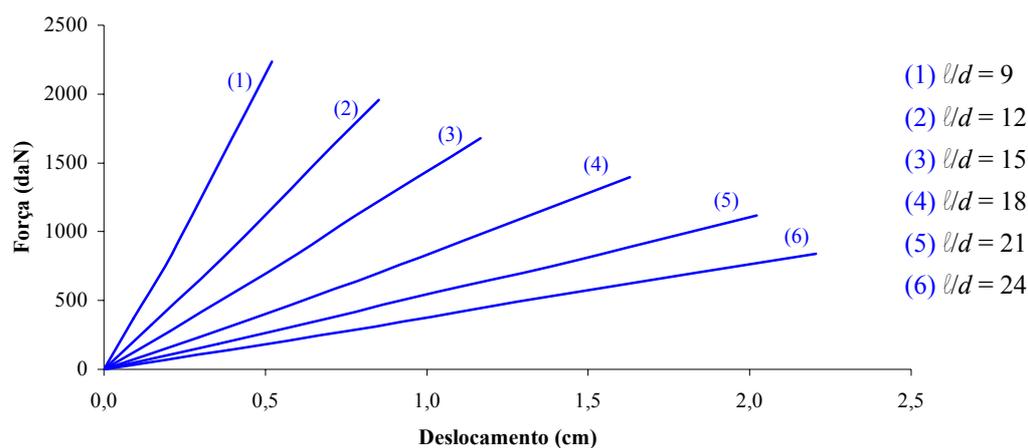


Figura 18 – Diagrama força x deslocamento – peça PE2

Tabela 10 – *Pinus elliottii*: G (MPa) – estruturais – flexão estática

Peça	G	Peça	G
PC1	224	PC13	163
PC2	176	PC14	123
PC3	235	PC15	208
PC4	165	PC16	142
PC5	173	PC17	214
PC6	135	PC18	175
PC7	158	PC19	191
PC8	209	PC20	143
PC9	179	PC21	168
PC10	163	PC22	185
PC11	196	PC23	180
PC12	177	PC24	160
		<b>Média</b>	<b>177</b>
		<b>Desv. P.</b>	<b>28</b>
		<b>C. v.</b>	<b>0,16</b>

A Tabela 11 contém os dados de MOE e MOR obtidos nos ensaios de compressão.

Tabela 11 – *Pinus elliottii*: MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela às fibras

Peça	MOE	MOR
PE1	7.660	11
PE2	6.115	14
PE3	6.117	12
PE4	6.467	17
PE5	7.689	9
PE6	10.052	12
PE7	7.996	11
PE8	4.992	16
PE9	7.998	12
PE10	9.544	17
PE11	10.860	10
PE12	10.213	17
PE13	***	15
PE14	10.128	11
PE15	10.017	16
PE16	11.115	17
PE17	4.860	12
PE18	5.064	18
PE19	5.187	12
PE20	***	17
PE21	9.887	20
PE22	10.972	15
PE23	6.668	14
PE24	8.101	16
<b>Média</b>	<b>8.077</b>	<b>14</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>2.150</b>	<b>3</b>
<b>C. v.</b>	<b>0,27</b>	<b>0,21</b>

#### 4.2.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas

Os valores encontrados nos ensaios realizados de acordo com a norma brasileira são aqui apresentados. A Tabela 12 mostra os resultados de MOE e MOR dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras em 38 corpos-de-prova (resultados em MPa).

Tabela 12 – *Pinus elliottii*: MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – ensaios de flexão e compressão

Peça	Flexão estática		Compressão paralela	
	MOE	MOR	MOE	MOR
PE1	6.556	32	11.579	16
PE2	9.786	31	11.888	18
PE3	5.905	25	9.555	15
PE4	6.358	32	7.732	14
PE5	4.833	21	6.527	9
PE6	8.249	32	12.275	14
PE7	8.120	36	7.023	14
PE8	3.494	17	5.819	14
PE9	***	***	***	***
PE10	11.552	48	16.829	***
PE11	***	***	***	***
PE12	***	***	***	***
PE13	7.552	35	10.571	19
PE14	6.733	29	10.817	17
PE15	13.332	45	13.433	18
PE16	9.889	31	12.727	18
PE17	8.652	30	17.910	17
PE18	7.105	34	10.791	14
PE19	6.781	31	11.701	14
PE20	10.388	40	16.951	19
PE21	5.769	17	10.644	14
PE22	***	***	***	***
PE23	5.710	21	15.548	17
PE24	***	***	***	***
<b>Média</b>	<b>7.724</b>	<b>31</b>	<b>11.596</b>	<b>16</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>2.431</b>	<b>8</b>	<b>3.488</b>	<b>3</b>
<b>C.v.</b>	<b>0,31</b>	<b>0,27</b>	<b>0,30</b>	<b>0,17</b>

### 4.3 *Eucalyptus citriodora*

Para a espécie de dicotiledônea estudada neste trabalho, seus corpos-de-prova estruturais e de dimensões reduzidas apresentaram teor de umidade igual a 12%, com densidade aparente média de 0,90 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras são mostrados a seguir.

### 4.3.1 Ensaio em elementos estruturais

Os valores de  $MOE_{ap}$  (em MPa) calculados para as relações  $\ell/d$  nos ensaios de flexão

estática, suas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – *Eucalyptus citriodora*:  $MOE_{ap}$  (MPa) – estruturais – flexão estática – madeira 12%

Peça	Relação vão/diâmetro ( $\ell/d$ )					
	24	21	18	15	12	9
EC1	21.591	21.388	20.745	19.429	17.090	13.011
EC2	25.876	25.503	25.426	23.289	19.925	16.220
EC3	20.194	20.224	19.630	18.733	17.650	12.601
EC4	19.825	20.077	18.962	17.699	15.381	11.211
EC5	15.203	14.497	14.755	13.590	12.605	9.916
EC6	18.930	18.919	17.791	16.111	15.214	10.871
EC7	17.906	16.916	17.677	17.026	15.106	13.045
EC8	23.383	23.721	22.269	20.457	19.049	14.857
EC9	21.037	20.578	19.778	19.188	17.796	14.174
EC10	18.291	17.804	16.096	16.487	15.066	12.155
EC11	16.167	16.171	15.095	14.861	13.823	11.561
EC12	19.571	19.968	19.590	18.051	16.157	12.833
EC13	20.047	19.228	18.649	18.574	15.888	14.694
EC14	20.803	20.123	19.617	17.747	15.571	11.121
EC15	19.063	18.839	17.992	16.635	14.870	11.769
EC16	16.987	16.370	16.008	15.433	14.223	11.939
EC17	17.189	17.236	16.643	15.748	14.099	11.261
EC18	17.610	17.231	17.265	15.346	14.476	10.947
EC19	22.679	22.285	21.411	20.309	17.753	14.003
EC20	18.359	18.993	17.771	16.770	14.771	12.207
EC21	17.962	17.275	17.535	16.336	14.640	12.719
EC22	18.930	18.943	18.123	16.948	15.855	11.364
EC23	16.442	15.930	16.275	15.754	13.933	11.486
EC24	22.598	22.474	21.941	20.736	19.814	16.499
<b>Média</b>	<b>19.443</b>	<b>19.196</b>	<b>18.627</b>	<b>17.552</b>	<b>15.865</b>	<b>12.603</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>2.531</b>	<b>2.631</b>	<b>2.496</b>	<b>2.222</b>	<b>1.936</b>	<b>1.705</b>
<b>C.v.</b>	<b>0,13</b>	<b>0,14</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	<b>0,14</b>

A Figura 19 mostra o diagrama Força x Deslocamento para a peça EC6, onde cada reta corresponde a uma relação  $U/d$ .

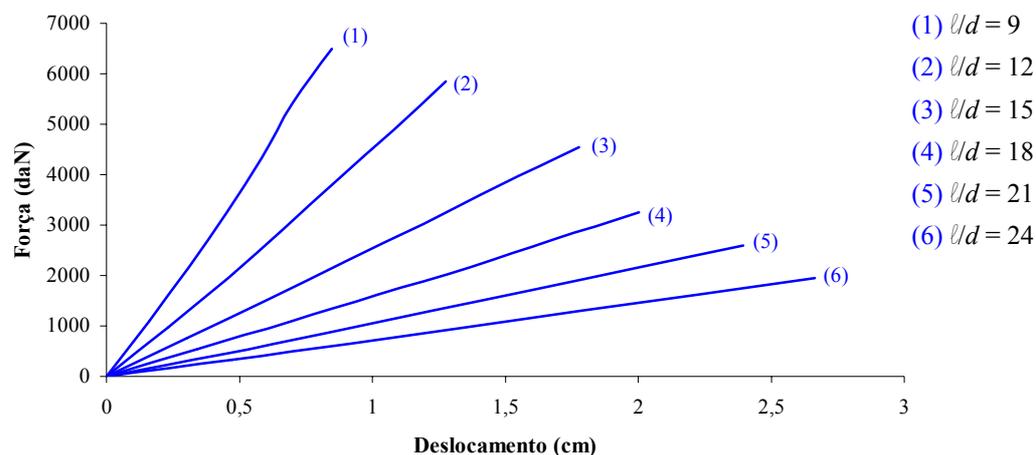


Figura 19 – Diagrama força x deslocamento – peça EC6

Na seqüência, a Tabela 14 mostra os valores calculados para G.

Tabela 14 – *Eucalyptus citriodora*: G (MPa) – estruturais – flexão estática – madeira 12%

Peça	G	Peça	G
PC1	307	PC13	427
PC2	376	PC14	210
PC3	322	PC15	285
PC4	251	PC16	335
PC5	261	PC17	288
PC6	235	PC18	201
PC7	378	PC19	325
PC8	376	PC20	320
PC9	383	PC21	356
PC10	322	PC22	265
PC11	376	PC23	336
PC12	344	PC24	471
		<b>Média</b>	<b>323</b>
		<b>Desv. P.</b>	<b>66</b>
		<b>C. v.</b>	<b>0,20</b>

Os resultados de MOE e MOR, as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação obtidos nos ensaios de compressão paralela são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – *Eucalyptus citriodora*: MOE e MOR (MPa) – estruturais – compressão paralela – madeira a 12%

Peça	MOE	MOR
EC1	20.393	53
EC2	21.738	40
EC3	23.421	47
EC4	26.266	61
EC5	22.368	48
EC6	30.749	48
EC7	15.255	57
EC8	40.860	55
EC9	20.199	58
EC10	16.431	48
EC11	18.739	50
EC12	24.319	51
EC13	***	43
EC14	18.557	40
EC15	16.437	45
EC16	32.179	54
EC17	***	41
EC18	14.615	53
EC19	23.525	59
EC20	20.728	39
EC21	20.536	55
EC22	25.276	44
EC23	16.707	48
EC24	17.762	60
<b>Média</b>	<b>22.139</b>	<b>50</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>6.227</b>	<b>7</b>
<b>C. v.</b>	<b>0,28</b>	<b>0,13</b>

### 4.3.2 Ensaio em elementos de dimensões reduzidas

Os valores encontrados nos ensaios realizados seguindo as diretrizes do documento normativo brasileiro são mostrados na Tabela 16. Assim como para as outras espécies, são

apresentados os números calculados de MOE e MOR dos ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras, para quarenta e oito (48) corpos-de-prova (resultados em MPa).

Tabela 16 – *Eucalyptus citriodora*: MOE e MOR (MPa) – dimensões reduzidas – ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras – madeira a 12% de teor de umidade

Peça	Flexão estática		Compressão paralela	
	MOE	MOR	MOE	MOR
EC1	19.388	99	25.615	57
EC2	19.623	97	32.401	54
EC3	17.578	113	21.794	55
EC4	20.018	102	22.782	56
EC5	15.651	113	19.179	51
EC6	12.825	86	15.158	41
EC7	12.883	79	15.558	54
EC8	17.457	107	37.948	49
EC9	16.689	111	26.209	53
EC10	16.042	79	34.648	53
EC11	16.517	102	22.421	52
EC12	15.542	90	27.280	40
EC13	17.207	93	23.540	47
EC14	15.066	90	23.944	41
EC15	16.633	96	21.830	48
EC16	16.315	91	24.348	47
EC17	12.930	91	27.500	44
EC18	14.109	93	23.679	41
EC19	16.334	120	28.037	59
EC20	14.105	93	16.387	43
EC21	17.482	105	27.132	54
EC22	15.339	100	13.556	36
EC23	16.850	104	29.968	50
EC24	16.069	126	21.867	60
<b>Média</b>	<b>16.194</b>	<b>99</b>	<b>24.283</b>	<b>49</b>
<b>Desv. P.</b>	<b>1.959</b>	<b>12</b>	<b>5.997</b>	<b>7</b>
<b>C. v.</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,25</b>	<b>0,13</b>



# CAPÍTULO 5

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta as análises dos resultados dispostos anteriormente. As médias dos valores de  $MOE_{ap}$  para cada relação  $l/d$  são comparadas entre si, sendo verificadas também possíveis diferenças entre as médias encontradas para os corpos-de-prova estruturais e para os de tamanhos reduzidos. São calculadas ainda as relações entre as médias de MOE obtidas nos ensaios estruturais de flexão estática e de compressão paralela às fibras, e também entre as médias de MOE na compressão paralela e de G.

Para as comparações entre as médias utilizou-se a análise de variância, e os resultados são apresentados para cada espécie estudada. No final do capítulo é apresentado um quadro contendo um resumo das análises realizadas e, para uma comparação dos resultados, os dados obtidos por Miná (2005) em sua tese de doutorado.

### **5.1 *Pinus caribaea* var. *caribaea***

#### **5.1.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ )**

A partir das médias dos valores de  $MOE_{ap}$  para cada relação comprimento do vão/diâmetro, apresentadas na Tabela 5, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 20:

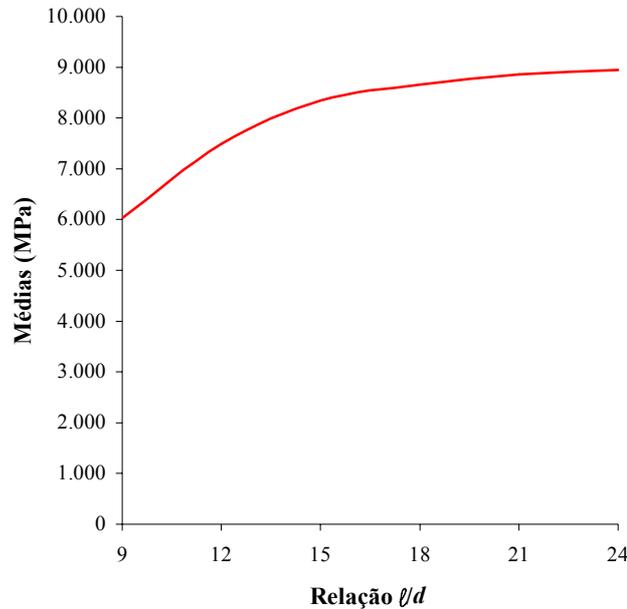


Figura 20 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico dos valores médios de  $MOE_{ap}$  versus relação  $l/d$

Através da análise visual do gráfico percebe-se, de modo aproximado, que a partir da relação  $l/d = 15$  os valores de  $MOE_{ap}$  tendem a ficarem próximos, com a curva dos valores diminuindo de inclinação à medida que  $l/d$  aumenta. Para as relações inferiores a 15, os valores de  $MOE_{ap}$  diferem mais acentuadamente.

Corroborando com a essa primeira exposição, tem-se, a seguir, a análise de variância dos dados. Inicialmente, neste processo, foram realizados o teste de normalidade dos dados e a verificação de igualdade de variâncias populacionais. Para isso foram construídos os gráficos do teste de normalidade de Ryan-Joiner, similar ao teste de Shapiro, para os valores de  $MOE_{ap}$ , e o gráfico dos resíduos versus valores estimados, ambos apresentados no Apêndice D, Figuras 68 e 69, respectivamente.

Uma vez verificadas a normalidade dos dados e as variâncias populacionais, procedeu-se a análise de variância propriamente dita. A Tabela 17 mostra os resultados para os grupos formados pelas relações  $U/d$  nos ensaios de flexão estática.

Tabela 17 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Resultados da análise de variância para as relações  $U/d$

Relações comparadas ( $U/d$ )	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{tabelado}}$	p-valor
24 x 21	0,03	4,05	0,862
24 x 21 x 18	0,20	3,14	0,820
24 x 21 x 18 x 15	0,73	2,72	0,535
24 x 21 x 18 x 15 x 12	3,87	2,46	0,005
24 x 21 x 18 x 15 x 12 x 9	15,72	2,30	0,000

Os dados apresentados mostram que as médias são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%, entre as relações  $U/d = 24, 21, 18$  e  $15$ , uma vez que apresentam valores de  $F_{\text{calculado}}$  menores que os  $F_{\text{tabelado}}$ , além de p-valores maiores que 0,05.

Quando são inseridas nas análises as médias correspondentes a  $U/d = 12$  e  $U/d = 9$ , o mesmo já não pode ser afirmado, uma vez que os valores de  $F_{\text{calculado}}$  são maiores que os valores de  $F_{\text{tabelado}}$ , com p-valores inferiores a 0,05.

## 5.1.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova

### 5.1.2.1 Ensaios de flexão estática

Para a comparação dos valores das médias dos módulos de elasticidade (MOE) entre peças estruturais e corpos-de-prova, nos ensaios de flexão estática, utilizaram-se os números

encontrados para a relação  $l/d = 15$ , com base nas análises feitas anteriormente. Assim como já descrito, aqui também são feitos os testes para a verificação da distribuição normal dos dados e da igualdade de variância populacional, mostrados nas Figuras 70 e 71, respectivamente, do Apêndice D.

A análise estatística mostrada na Tabela 18 indica que as médias comparadas são estatisticamente equivalentes, com um valor de  $F_{\text{calculado}}$  muito abaixo do valor de  $F_{\text{tabelado}}$ . O p-valor maior que  $\alpha=0,05$  confirma essa equivalência.

Tabela 18 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática

	Médias (MPa)	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{tabelado}}$	p-valor
Estruturais	8.341	0,08	4,057	0,781
Cp's	8.472			

### 5.1.2.2 Ensaios de compressão paralela às fibras

Para a comparação das médias dos valores de MOE no ensaio de compressão paralela às fibras nas peças estruturais e nos corpos-de-prova, os mesmos procedimentos descritos no sub-item anterior, ensaios de flexão estática, são realizados aqui. Os gráficos do teste de normalidade dos resíduos versus valores estimados são mostrados no Apêndice D, respectivamente Figuras 72 e 73.

Os valores da análise estatística na comparação entre os valores das médias dos módulos de elasticidade (MOE) obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras nas peças estruturais e nos corpos-de-prova de dimensões reduzidas são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estruturais	13.187	9,87	4,07	0,003
Cp's	10.117			

Já para este ensaio é observada a não equivalência entre as médias comparadas, com p-valor inferior a 0,05, e F<sub>tabelado</sub> inferior a F<sub>calculado</sub>.

Na seqüência, de maneira similar aos procedimentos descritos anteriormente, são mostrados os valores encontrados na análise de variância das médias dos valores de resistência (MOR) à compressão paralela às fibras da madeira, Tabela 20, com os gráficos de teste de normalidade, Figura 74, e de resíduos versus valores estimados para verificação de equivalência de variâncias, Figura 75, sendo apresentados no Apêndice D.

Tabela 20 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estrutural	25	13,16	4,057	0,001
Cp's	22			

Apesar de apresentarem valores próximos, 25 MPa e 22 MPa, a análise estatística aponta para uma não equivalência entre as médias comparadas para a resistência à compressão paralela às fibras, entre peças estruturais e corpos-de-prova.

No cálculo da relação entre as médias de MOE na flexão e de MOE na compressão, em ensaios estruturais, obteve-se o número de 0,63, utilizando-se os valores de 8.341 MPa (correspondente a  $l/d = 15$ ) e de 13.187 MPa, respectivamente.

Para a relação entre a média dos números de MOE obtidos nos ensaios de compressão estruturais (13.187 MPa) e a média dos resultados de G (189 MPa), obtém-se o

valor aproximado de 70, muito superior ao valor de 20 contida no documento normativo brasileiro para corpos-de-prova de dimensões reduzidas (Equação 9).

## 5.2 *Pinus elliottii*

### 5.2.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ )

Como realizado para a outra espécie de pinus, construiu-se aqui também o gráfico das médias dos valores de  $MOE_{ap}$  para cada relação comprimento do vão/ diâmetro, mostrado na Figura 21:

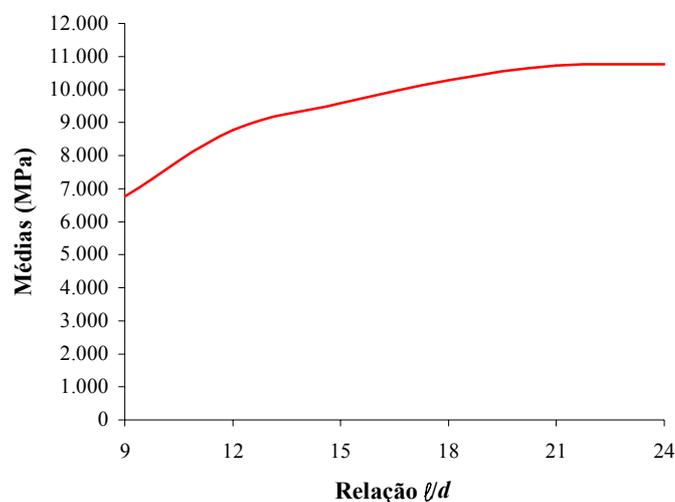


Figura 21 – *Pinus elliottii* – Gráfico dos valores médios de  $MOE_{ap}$  versus relação  $l/d$

Neste gráfico, analisando-o visualmente, percebe-se que a linha que passa pelos valores tende a diminuir de inclinação à medida que as relações  $l/d$  aumentam. Parece certo dizer, num primeiro momento, que os valores de  $MOE_{ap}$  correspondentes às três maiores

relações, 24, 21 e 18, são equivalentes. No entanto, nota-se aqui uma dificuldade em se apontar a partir de qual  $l/d$  os números podem ser ditos como equivalentes, uma vez que a linha que passa pelas médias sofre um pequeno pico entre as relações  $l/d=12$  e  $l/d=15$ , sugerindo a exclusão desta última. Este tipo de questionamento pode então ser respondido com o emprego da análise de variância.

Os resultados referentes a essa análise são apresentados na seqüência, Tabela 21, com os gráficos do teste de normalidade, Figura 76, e de resíduos versus valores estimados, Figura 77, sendo apresentados no Apêndice D.

Tabela 21 – *Pinus elliottii* – Resultados da análise de variância para as relações  $l/d$

Relações comparadas ( $l/d$ )	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
24 x 21	0,00	4,05	0,965
24 x 21 x 18	0,37	3,14	0,692
24 x 21 x 18 x 15	1,68	2,72	0,176
24 x 21 x 18 x 15 x 12	4,63	2,46	0,002
24 x 21 x 18 x 15 x 12 x 9	17,34	2,29	0,000

Os números mostrados indicam que as médias referentes às relações  $l/d = 24, 21, 18$  e 15 são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%, apresentando F<sub>calculado</sub> menores que os F<sub>tabelado</sub> e p-valores maiores que 0,05. Apontam ainda que ao serem inseridas  $l/d = 12$  e 9, as médias tornam-se não equivalentes, com as análises das respectivas apresentando valores de F<sub>calculado</sub> maiores que os F<sub>tabelado</sub> (4,63 sendo maior que 2,46 e 17,34 também maior que 2,29), além de p-valores menores que 0,05.

## 5.2.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova

### 5.2.2.1 Ensaio de flexão estática

Como já feito anteriormente para a outra espécie de pinus, foram utilizados os números encontrados para a relação  $U/d = 15$  na comparação dos valores das médias dos módulos de elasticidade (MOE) entre peças estruturais e corpos-de-prova, nos ensaios de flexão estática. Os gráficos da distribuição normal dos dados e dos resíduos versus valores estimados são mostrados nas Figuras 78 e 79, respectivamente, do Apêndice D.

Os números obtidos na análise de variância são mostrados na Tabela 22, e indicam que as médias comparadas não são estatisticamente equivalentes, com um valor de  $F_{\text{calculado}}$ , 8,60, superior ao valor de  $F_{\text{tabelado}}$ , 4,08. O p-valor muito inferior a  $\alpha=0,05$  confirma a desigualdade.

Tabela 22 – *Pinus elliottii* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática

	Médias (MPa)	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{tabelado}}$	p-valor
Estruturais	9.594	8,60	4,08	0,005
Cp's	7.724			

### 5.2.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras

A Tabela 23 apresenta os valores da análise de variância das médias dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras das peças estruturais e dos

corpos-de-prova isentos de defeito. As Figuras 80 e 81 mostram, respectivamente, os gráficos do teste de normalidade dos resíduos versus valores estimados (Apêndice D).

Tabela 23 – *Pinus elliottii* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estruturais	8.077	15,57	4,09	0,000
Cp's	11.596			

Observa-se nesta comparação a não equivalência entre as médias, com p-valor igual a 0,000, e F<sub>calculado</sub> igual a 15,57 maior que F<sub>tabelado</sub> igual a 4,09.

As médias dos valores de resistência são comparadas a seguir, com os valores da análise de variância das médias sendo mostrados na Tabela 24. O Apêndice D contém os gráficos do teste de normalidade, Figura 82, e de resíduos versus valores estimados para verificação de equivalência de variâncias, Figura 83.

Tabela 24 – *Pinus elliottii* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estruturais	14	3,15	4,08	0,084
Cp's	16			

Neste caso, os valores mostrados na tabela acima apontam para a equivalência estatística entre as médias. Apesar de distintos, os valores das médias são próximos, com F<sub>calculado</sub> igual a 3,15 e menor que F<sub>tabelado</sub>, que é igual a 4,08, e p-valor igual a 0,097, maior que 0,05.

Em ensaios estruturais, a relação entre as médias de MOE na flexão (9.594 MPa, para  $l/d = 15$ ) e de MOE na compressão (8.077 MPa) foi de 1,18 MPa.

Na relação entre a média dos números de MOE obtidos nos ensaios de compressão estruturais (8.077 MPa) e a média dos resultados de G (177 MPa), o resultado foi aproximadamente 46, também superior ao valor para corpos-de-prova de dimensões reduzidas encontrado no documento normativo brasileiro (20).

### 5.3 *Eucalyptus citriodora*

#### 5.3.1 Análise das relações vão/diâmetro ( $l/d$ )

Como realizado para as duas primeiras espécies estudadas, aqui também foi construído um gráfico (Figura 22) a partir das médias dos valores de  $MOE_{ap}$  para cada relação comprimento do vão/ diâmetro, apresentadas na Tabela 13.

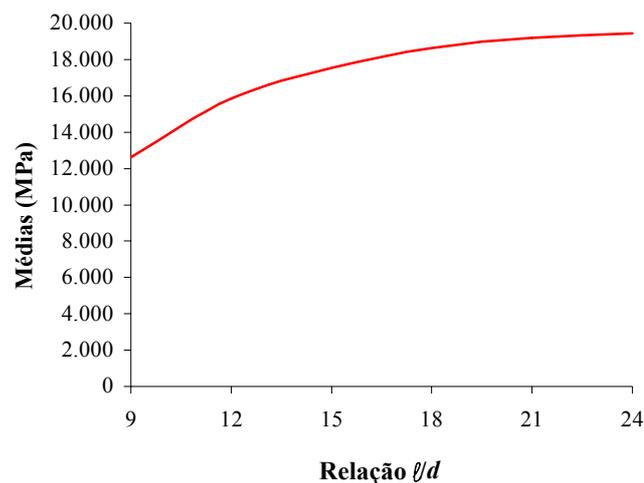


Figura 22 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico dos valores médios de  $MOE_{ap}$  versus relação  $l/d$

Nota-se, pela análise visual do gráfico, que os valores de  $MOE_{ap}$  aproximam-se mais a partir da relação  $l/d = 18$ , com a inclinação da linha que passa pelas médias diminuindo. Aparentemente essa mesma linha apresenta um ângulo, em relação ao eixo das abcissas, mais acentuado para a relação  $l/d = 15$ , o que leva a crer que o valor de  $MOE_{ap}$  desta última difere-se significativamente dos demais considerados aproximados.

A seguir é apresentada a Tabela 25, correspondente à análise de variância dos dados das médias de  $MOE_{ap}$  obtidas para as diferentes relações  $l/d$ . A Figura 84 mostra o gráfico do teste de normalidade dos dados e a Figura 85, o gráfico dos resíduos versus valores aproximados, ambas contidas no Apêndice D.

Tabela 25 – *Eucalyptus citriodora* – Resultados da análise de variância para as relações  $l/d$

Relações comparadas ( $l/d$ )	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	p-valor
24 x 21	0,11	4,05	0,741
24 x 21 x 18	0,65	3,14	0,528
24 x 21 x 18 x 15	2,77	2,72	0,046
24 x 21 x 18 x 15 x 12	9,10	2,46	0,000
24 x 21 x 18 x 15 x 12 x 9	31,52	2,29	0,000

Os dados apresentados mostram que as médias são estatisticamente equivalentes, a um nível de significância de 5%, entre as relações  $l/d = 24, 21$ , e 18, apresentando valores de  $F_{calculado}$  menores que os  $F_{tabelado}$ , além de p-valores maiores que 0,05.

Quando são inseridas nas análises as médias correspondentes a  $l/d = 15, 12$  e 9, os valores de  $F_{calculado}$  são maiores que os valores de  $F_{tabelado}$ , com p-valores inferiores a 0,05, apontando para uma não equivalência dos dados.

## 5.3.2 Peças estruturais versus corpos-de-prova

### 5.3.2.1 Ensaio de flexão estática

Utilizaram-se os números encontrados para a relação  $l/d = 18$  na comparação dos valores das médias dos módulos de elasticidade (MOE) entre peças estruturais e corpos-de-prova, nos ensaios de flexão estática. Os testes para a verificação da distribuição normal dos dados e da igualdade de variância populacional são mostrados nas Figuras 86 e 87, respectivamente, do Apêndice D.

A análise estatística mostrada na Tabela 26 indica que as médias comparadas não são estatisticamente equivalentes, com um valor de  $F_{\text{calculado}}$  (14,11) acima do valor de  $F_{\text{tabelado}}$ (4,05). O p-valor inferior a  $\alpha=0,05$  confirma essa equivalência.

Tabela 26 – *Eucalyptus citriodora* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido: valores de MOE obtidos em ensaios de flexão estática

	Médias (MPa)	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{tabelado}}$	p-valor
Estruturais	18.627	14,11	4,05	0,000
Cp's	16.194			

### 5.3.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras

Na Tabela 27 estão contidos os resultados da comparação entre as médias dos valores de MOE no ensaio de compressão paralela às fibras nas peças estruturais e nos corpos-de-

prova. Os gráficos do teste de normalidade dos resíduos versus valores estimados são mostrados no Apêndice D, respectivamente Figuras 88 e 89.

Tabela 27 – *Eucalyptus citriodora* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOE obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estruturais	22.139	1,41	4,06	0,241
Cp's	24.283			

Observa-se aqui uma equivalência estatística entre as médias comparadas, com p-valor igual a 0,241, e F<sub>tabelado</sub>, 4,06, maior que F<sub>calculado</sub>, 1,41.

Na seqüência, Tabela 28, são mostrados os números encontrados na análise de variância das médias dos valores de resistência (MOR) à compressão paralela às fibras. A Figura 90 corresponde ao gráfico do teste de normalidade, e a Figura 91, ao de resíduos versus valores estimados, ambos contidos no Apêndice D.

Tabela 28 – *Eucalyptus citriodora* – Análise de variância entre peças estruturais e corpos-de-prova: valores de MOR obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras

	Médias (MPa)	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabelado</sub>	p-valor
Estrutural	50	0,07	4,05	0,796
CP's	49			

Os valores das médias são bastante próximos, 50 MPa e 49 MPa, o que sugere uma equivalência estatística, que é confirmada pelos dados apresentados na tabela acima.

Para esta espécie, o número calculado para a relação entre a média dos números de MOE obtidos nos ensaios de flexão (18.627 MPa, para  $Ud = 18$ ) e a média dos resultados de MOE nos ensaios de compressão (22.139 MPa), estruturais, foi aproximadamente 0,84.

O valor encontrado para a relação entre a média dos números de MOE obtidos nos ensaios de compressão estruturais (22.139 MPa) e a média dos resultados de G (323 MPa) foi aproximadamente 69 (a relação apresentada na NBR 7190:1997 para corpos-de-prova de dimensões reduzidas é 20).

## 5.4 Resumo das análises

A Figura 23 contém os dados das análises feitas anteriormente para cada espécie estudada e na última coluna, para comparação, os resultados obtidos por Miná (2005), que pesquisou as propriedades mecânicas da espécie *Eucalyptus citriodora* num estudo sobre estacas de madeira para fundações de pontes de madeira.

	<i>P. caribaea</i>	<i>P. elliottii</i>	<i>E. citriodora</i>	<i>E. citriodora</i> (Miná)
relação $l/d$	15	15	18	
flexão - $MOE_{\text{estrut}} \times MOE_{\text{cp}}$	equivalentes	não equiv.	não equiv.	não equiv.
compressão - $MOE_{\text{estrut}} \times MOE_{\text{cp}}$	não equiv.	não equiv.	equivalentes	não equiv.
compressão - $MOR_{\text{estrut}} \times MOR_{\text{cp}}$	não equiv.	equivalentes	equivalentes	equivalente
$MOE_{\text{flexão}}/MOE_{\text{compressão}}$	0,63	1,18	0,84	
MOE/G	70	46	69	

Figura 23 – Resultados das análises

Tem-se nessa tabela uma não-padronização dos resultados, ou seja, observando-se qualquer linha ou qualquer coluna, não se têm um padrão de respostas.

Tomem-se como exemplo as análises feitas para o *Eucalyptus citriodora*: não se pode afirmar que os valores encontrados nas comparações entre elementos estruturais e entre corpos-de-prova são equivalentes para todos os ensaios realizados, pois nos ensaios de flexão

estática, MOE, estes foram considerados não-equivalentes, apesar do contrário ter acontecido para os ensaios de compressão paralela. E mesmo tendo sido considerados equivalentes neste estudo, os números de MOE na compressão, peças estruturais versus corpos-de-prova, apresentaram-se não-equivalentes no estudo conduzido por Miná (2005), indicando que a variabilidade da espécie é um fator importante que pode influenciar nos resultados.

De maneira similar, observando-se uma linha, ou seja, uma análise realizada, como a comparação entre os ensaios de flexão estática para peças estruturais e para corpos-de-prova isentos de defeitos, percebe-se também respostas distintas para as diferentes espécies: equivalentes, para o *Pinus caribaea*; e não-equivalentes para as demais espécies ensaiadas.

Diante desta não-padronização dos resultados, foram então feitas as conclusões apresentadas no capítulo a seguir.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas no Capítulo 5, conclui-se que:

- Para relações  $l/d \geq 18$ , em peças estruturais roliças, é possível desconsiderar as deformações decorrentes do cisalhamento no cálculo do módulo de elasticidade longitudinal;
- Há diferenças significativas entre os valores de módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática em elementos estruturais e em corpos-de-prova de dimensões reduzidas;
- Há diferenças significativas entre os valores de módulos de elasticidade obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras em elementos estruturais e em corpos-de-prova de dimensões reduzidas;
- Há diferenças significativas entre os valores de resistência obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras em elementos estruturais e em corpos-de-prova de dimensões reduzidas;
- A relação  $G = E/20$  não é um bom estimador para o módulo de elasticidade transversal das peças estruturais roliças das espécies aqui estudadas;

- É recomendável o estabelecimento de metodologia de ensaio específica para peças estruturais roliças, sendo proposta a que se segue para ensaios de flexão estática com força concentrada aplicada no meio do vão:
  - a) Cada peça estrutural deve ter seu comprimento e seus diâmetros de base, de topo e no meio da peça medidos;
  - b) Em função do diâmetro medido no meio da peça (ponto de aplicação da carga), calcula-se a distância que a peça deve conter entre os apoios para a realização do ensaio, que deve ser igual a, no mínimo, dezoito (18) vezes esse diâmetro;
  - c) Determinadas suas posições, os apoios, móveis e articulados, devem conter “berços” de madeira para acomodarem adequadamente as peças com suas seções circulares, e devem então ser posicionados adequadamente;
  - d) Deve-se garantir uma eficiente aplicação da força concentrada na seção da peça (meio do vão). Para isso, é aconselhável a utilização de uma peça de madeira que se adapte ao contorno da seção;
  - e) Os deslocamentos devem ser medidos com a utilização de um relógio comparador com 0,01 mm de precisão, posicionado diametralmente oposto ao ponto de aplicação da força;
  - f) A taxa de carregamento corresponde à preconizada pelo documento normativo brasileiro NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, em seu anexo B, ou seja, 10 MPa/min, sendo aplicados três ciclos de carregamento;

- g) Para ensaios não-destrutivos, onde pretende-se estimar o valor de MOE, o carregamento de cada ciclo deve ser conduzido até um deslocamento correspondente ao vão dividido por duzentos,  $\ell/200$ ;
- h) Na estimativa do MOE, emprega-se a seguinte equação:

$$MOE = \frac{F \ell^3}{48 \delta I}$$

Onde  $F$  é a força aplicada concentrada no meio do vão;  $\ell$  é o vão da viga;  $\delta$  é o deslocamento correspondente a  $\ell/200$ ; e  $I$  é o momento de inércia da seção.

- i) Para a determinação do módulo de resistência à flexão,  $f_M$ , emprega-se a seguinte equação:

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e}$$

Onde  $M_{m\acute{a}x}$  é o máximo momento aplicado à peça; e  $W_e$  é o módulo de resistência elástico da seção transversal, sendo  $W_e = \frac{\pi D^3}{32}$ , com  $D$  correspondendo ao diâmetro da peça;

- j) Demais procedimentos seguem o recomendado pela NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, em seu Anexo B, ensaios de flexão estática, para corpos-de-prova isentos defeitos.

## Sugestões para futuras pesquisas

Sugerem-se os seguintes tópicos a serem desenvolvidos em futuras pesquisas:

- Os ensaios de flexão realizados para postes de acordo com a NBR 6231:1980 – Postes de Madeira: Resistência à Flexão são de trabalhosa execução, apresentando dificuldade para se garantir um perfeito engastamento numa das extremidades das peças. O autor deste trabalho acredita que a metodologia aqui empregada é mais simples de ser realizada, obtendo valores de MOE compatíveis com a literatura consultada. Seria interessante, então, a realização de ensaios de flexão estática empregando-se ambas as metodologias, de modo a determinar-se uma correlação entre os resultados obtidos;
- A determinação do módulo de resistência à flexão para peças estruturais roliças e sua comparação com as respostas obtidas, para o mesmo ensaio, para corpos-de-prova de pequenas dimensões também é um estudo considerado relevante para o futuro;
- Ensaios de compressão paralela às fibras podem ser realizados para elementos estruturais roliços que possuam comprimentos maiores do que os estudados neste trabalho. Sugere-se a realização de testes com peças que possuam, pelo menos, um comprimento igual a três vezes o seu diâmetro, com base em recomendações de documentos normativos internacionais;
- Elementos estruturais apresentam defeitos decorrentes do crescimento da árvore e/ou da sua secagem. Além de ensaios mecânicos, pode ser feita também uma classificação visual para diminuir a presença desses defeitos, o que sugere uma melhor resposta do material, principalmente em ensaios de

flexão estática, além de um melhor resultado estético no uso final da peça. Assim, é interessante a realização de testes em elementos classificados e em elementos não-classificados visualmente, comparando os resultados obtidos e verificando a possível influência desses defeitos no comportamento do material;

- Outras espécies de madeira, de reflorestamento ou tropicais, devem ser estudadas em sua forma roliça original, em ensaios como os aqui realizados, aumentando o conhecimento do comportamento das mesmas para fins estruturais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, A. C. P. B. **Utilização de madeira de Eucalyptus em estruturas de pontes.** 2002. 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **NDS** – National Design Specification. Washington, DC. 1991.
- AMERICAN LUMBER STANDARD COMMITTEE. **American softwood lumber standard.** Germantown, MD. 1999.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI O5.1** – American national standard for wood poles. Washington, DC. 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D25** – Standard specification for round timber piles. Philadelphia, PA. 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 – 52** – Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, PA. 1978.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198** – Static tests of timbers in structural sizes. Philadelphia, PA. 1976.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1036** – Standard test methods of static tests of wood poles. Philadelphia, PA. 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2899** – Standard method for establishing design stresses for round timber piles. Philadelphia, PA. 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3200** – Standard specification and test method for establishing recommended design stresses for round timber construction poles. Philadelphia, PA. 1974.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3957** – Standard methods for establishing stress grades for structural members used in log buildings. Philadelphia, PA. 1980.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5536** – Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties. Philadelphia, PA. 1994.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASAE EP 388** – Design properties of round, sawn and laminated preservative-treated construction poles. St. Joseph, MI. 1996.

AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **AWPA C1** – All timber products – preservative treatment by pressure processes. Birmingham, AL. 2003.

AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **AWPA C3** – Piles – preservative treatment by pressure processes. Birmingham, AL. 2003.

AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **AWPA C4** – Poles – preservative treatment by pressure processes. Birmingham, AL. 2003.

AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **AWPA C23** – Round poles and posts used in building construction – preservative treatment by pressure processes. Birmingham, AL. 2003.

AMERICAN WOOD-PRESERVERS' ASSOCIATION. **AWPA C35** – Western red cedar, Alaska yellow cedar, Northern white cedar and western larch poles – preservative treatment by thermal processes. Birmingham, AL. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6231** – Postes de madeira – resistência à flexão. Rio de Janeiro. 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8456** – Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8457** – Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica – dimensões. Rio de Janeiro. 1984.

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

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF – **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2006**. Brasília, 2007. 80p.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 2209** – Timber – poles for over heads lines. Australia. 1994.
- BATISTA, A. M.; ROSSI, N.; MASCIA, N. T.; FURLANI, J. E. Estudo da flexão estática: relação entre peças de madeira com dimensões estruturais e dimensões reduzidas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000. São Carlos, SP.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York, Van Nostrand Reinhold Company. 1982. 712 p.
- CAMPOS, J. A. O. **Método para avaliação da durabilidade e da reabilitação da madeira de estruturas em serviço**. 2002. 99 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **DIN EN 14251** – Structural round timbers – test methods. Bruxelas, Bélgica. 2004.
- CORSINI, T. A.; FONTE, T. F.; CALIL JÚNIOR, C. Propriedades mecânicas de peças estruturais versus corpos-de-prova isentos de defeitos. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá, MT.
- CUNHA, R. D. A. O eucalipto roliço na arquitetura brasileira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá, MT.
- DRUMOND, F. B.; WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Análise de variância**: comparação de varias situações. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni. 1996
- GERE, J. M. **Mecânica dos materiais**. Tradução Luiz Fernando de Castro Paiva. São Paulo, Pioneira Thomson. 2003.
- GREEN, D. W.; HERNANDEZ, R. Codes and standards for structural wood products and their use in the United States. . Madison, WI. 2000.
- HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. 1973. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1973.

- \_\_\_\_\_. **Pontes de Eucalipto Citriodora**. 1978. 85 p. Tese (Livre-docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.
- KRONKA, F. J. N. (Org.) **Inventário florestal das áreas reflorestadas do Estado de São Paulo**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Instituto Florestal. 2002.
- LAHR, F. A. R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. 1983. 221 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.
- LARSON, D.; MIRTH, R.; WOLFE, R. (2004). Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending. **Forest Products Journal**, Madison, WI, v.54, p.52-58, dezembro 2004.
- MILONE, G. **Estatística: geral e aplicada**. São Paulo, Pioneira Thomson. 2004. 483 p.
- MINÁ, A. J. S. **Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira**. 2005. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- MINÁ, A. J. S.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR., C. Avaliação da rigidez e da resistência de postes de madeira para uso como estacas para fundações. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá, MT.
- PARTEL, P. M. P. **Sistemas estruturais e construtivos utilizando madeira roliça de reflorestamento**. 1999. 134 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- PINTO NETO, J.; CALIL JÚNIOR, C.; ESPINOZA, M. M. Propriedades de resistência e rigidez de peças estruturais roliças de pequeno diâmetro. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá, MT.
- PLETZ, E. **Passarela estaiada com tabuleiro e madeira laminada protendida em módulos curvos**. 2003. 172 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.
- PIGOZZO, J. C.; PLETZ, E.; LAHR, F. A. R. Aspectos da classificação mecânica de peças estruturais de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000. São Carlos, SP.
- RANTA-MAUNUS, A. Bending and compression properties of small diameter round timber. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2000. Whistler, Canada.

- ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs. 2001. Research Paper. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- SALES, A.; PELIZAN, T. R.; OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; SALGON, J. L.; MILLER, K. P. Avaliação de propriedades mecânicas de peças roliças de Eucalipto por meio de ultra-som. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá, MT.
- SANTOS, E. S.; BALLARIN, A. W. Correlações entre os módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras e à flexão para algumas espécies de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002. Uberlândia, MG.
- WOLFE, R.; MOSELEY, C. Small-diameter log evaluation for value-added structural applications. **Forest Products Journal**. Madison, WI. v.50. p. 48-58. Outubro 2000.
- WOLFE, R.; MURPHY, J. Strength of small-diameter round and tapered bending members. **Forest Products Journal**. Madison, WI. v.55. p. 50-55. Março 2005
- WOOD handbook: wood as an engineering material. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI. 1999.
- ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.



## **APÊNDICE A**

### **Exemplo de cálculo**

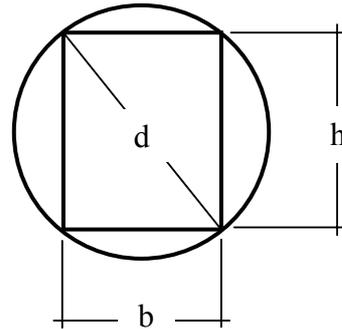
### APÊNDICE A – Exemplo de cálculo – viga de 6 x 16 centímetros

Para a viga de seção nominal com base 6 centímetros e altura 16 centímetros, o primeiro passo é o cálculo da diagonal utilizando-se a Equação 1:

$$d = \sqrt{b^2 + h^2}$$

Sendo  $b = 6$  cm,  $h = 16$  cm, tem-se:

$$d = \sqrt{6^2 + 16^2} = 17 \text{ cm}$$



E, empregando-se as Equações 2 e 3:

$$I_{\text{circular}} = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I_{\text{circular}} = \frac{\pi \cdot 17^4}{64} = 4099 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{retangular}} = \frac{b h^3}{12}$$

$$I_{\text{retangular}} = \frac{6 \cdot 16^3}{12} = 2048 \text{ cm}^4$$

Finalmente, a razão  $IR$  é dada por:

$$IR = \frac{I_{\text{circular}}}{I_{\text{retangular}}} = 2,00$$

## **APÊNDICE B**

### **Dados dos postes**

Tabela 29– *Pinus caribaeae* var. *caribaeae*: peso, comprimentos e diâmetros dos postes

Peça	I	II	III	B	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	T
PC1	281	750	528	24	25	24	23	23	22	21	21	20	19	19
PC2	281	750	504	24	24	24	22	21	21	20	19	19	18	18
PC3	260	758	504	24	24	23	23	22	21	21	21	20	20	19
PC4	260	750	504	24	23	23	23	22	21	21	21	20	20	18
PC5	238	750	480	23	23	23	22	21	20	20	20	18	18	17
PC6	238	752	504	23	23	23	23	22	21	20	19	19	19	17
PC7	238	745	504	22	23	22	21	21	21	20	20	19	18	18
PC8	206	750	432	21	21	21	20	19	18	18	18	18	17	16
PC9	238	750	480	23	23	22	22	21	20	20	19	18	18	16
PC10	281	750	528	25	25	25	24	24	22	22	21	20	19	18
PC11	238	748	504	22	23	23	22	22	21	21	20	20	19	19
PC12	281	752	528	25	25	24	25	22	22	22	22	21	20	19
PC13	379	755	600	30	31	29	28	28	25	26	26	25	24	23
PC14	357	748	576	29	28	26	25	26	24	25	24	24	24	23
PC15	368	748	600	33	32	29	27	26	25	25	25	24	23	23
PC16	455	750	672	35	34	31	29	29	28	28	27	27	25	24
PC17	368	748	648	30	32	30	29	28	27	26	25	25	24	22
PC18	465	748	672	34	32	31	30	30	28	28	28	27	26	25
PC19	357	750	600	33	31	28	26	26	25	25	24	24	24	23
PC20	433	755	648	35	32	29	30	28	27	27	26	26	25	25
PC21	390	750	624	32	29	28	28	27	26	26	25	24	25	24
PC22	368	752	624	35	32	30	28	27	26	26	25	25	24	23
PC23	390	750	624	32	32	29	27	27	26	26	26	25	24	23
PC24	303	750	576	31	30	28	27	25	24	24	23	22	22	21

I - Peso (daN)

II - Comprimento do poste (cm)

III - Comprimento do vão ensaiado (cm)

B – diâmetro da base da peça (cm)

d1 – diâmetro no apoio 1 (cm)

d9 – diâmetro no apoio 2 (cm)

T – diâmetro do topo da peça (cm)

Tabela 30– *Pinus elliottii*: peso, comprimentos e diâmetros dos postes

Peça	I	II	III	B	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	T
PE1	216	750	456	21	21	22	21	20	19	19	19	18	18	18
PE2	205	743	456	20	19	19	19	20	19	19	18	18	19	17
PE3	271	750	576	25	25	24	23	22	24	21	21	20	19	18
PE4	162	750	408	19	19	19	18	18	17	17	17	17	18	15
PE5	238	750	504	21	23	23	23	22	21	22	23	23	18	18
PE6	260	723	528	23	24	24	25	22	22	21	21	20	17	18
PE7	260	750	552	23	23	23	24	23	23	22	21	22	19	20
PE8	216	750	456	22	22	24	22	21	19	19	20	19	19	18
PE9	238	743	504	23	23	23	22	22	21	21	22	20	19	18
PE10	216	747	480	21	23	22	22	22	20	19	19	18	17	15
PE11	216	750	456	20	21	20	19	18	19	18	19	18	18	15
PE12	152	750	384	18	18	18	18	17	16	17	16	16	15	13
PE13	346	750	528	37	38	32	28	25	22	23	23	22	23	21
PE14	400	758	648	36	33	32	31	29	27	27	26	26	26	26
PE15	325	750	552	35	32	30	27	24	23	23	25	24	22	21
PE16	368	750	552	31	31	29	27	25	23	25	25	24	23	22
PE17	346	752	576	34	32	30	28	24	24	23	25	24	24	22
PE18	433	763	600	35	37	32	30	26	25	27	26	25	25	25
PE19	281	755	480	31	27	27	25	22	20	22	20	20	21	19
PE20	357	750	576	35	34	32	27	25	24	24	25	24	23	22
PE21	314	750	552	32	33	29	27	24	23	23	22	22	23	21
PE22	368	750	576	34	33	29	26	26	24	23	24	23	22	21
PE23	303	759	528	29	27	26	25	21	22	23	22	23	21	21
PE24	260	750	480	31	29	26	23	21	20	20	19	21	19	18

I - Peso (daN)

II - Comprimento do poste (cm)

III - Comprimento do vão ensaiado (cm)

B – diâmetro da base da peça (cm)

d1 – diâmetro no apoio 1 (cm)

d9 – diâmetro no apoio 2 (cm)

T – diâmetro do topo da peça (cm)

Tabela 31 – *Eucalyptus citriodora*: peso, comprimentos e diâmetros dos postes

Peça	I	II	III	B	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	T
EC1	473	960	600	29	27	27	26	26	25	25	24	23	23	23
EC2	287	900	432	28	22	22	21	20	18	19	19	18	17	17
EC3	406	916	552	29	25	25	24	24	23	22	22	22	21	20
EC4	372	906	528	24	23	23	22	22	22	21	21	21	21	20
EC5	338	906	504	25	23	22	22	21	21	21	20	20	19	19
EC6	473	900	552	26	24	24	23	23	23	22	22	22	22	20
EC7	287	900	480	25	21	21	20	20	20	19	19	18	18	18
EC8	423	950	528	26	24	23	23	23	22	22	22	21	21	20
EC9	338	900	480	24	22	21	21	20	20	19	19	19	18	18
EC10	321	900	504	25	22	22	22	20	21	20	20	19	18	17
EC11	338	900	504	26	23	23	22	22	21	20	20	19	19	18
EC12	321	900	504	24	23	22	22	21	21	20	19	18	18	17
EC13	254	900	456	19	19	19	19	18	19	18	18	18	18	17
EC14	321	900	480	25	22	22	21	21	20	20	19	19	19	18
EC15	389	900	504	25	23	23	22	22	21	21	20	20	19	18
EC16	338	900	480	25	22	22	21	21	20	19	19	19	18	18
EC17	271	900	504	24	22	21	21	21	21	20	20	19	19	18
EC18	507	920	624	30	29	28	27	26	26	25	24	24	23	22
EC19	389	900	528	27	25	25	24	23	22	22	21	21	20	20
EC20	338	910	528	27	25	24	23	23	22	22	21	22	21	20
EC21	237	900	432	22	19	19	18	18	18	18	17	17	17	15
EC22	389	900	552	25	25	24	24	23	23	22	22	22	21	22
EC23	423	900	552	27	25	25	25	24	23	22	22	21	21	18
EC24	254	900	408	24	20	19	19	18	17	18	18	17	17	15

I - Peso (daN)

II - Comprimento do poste (cm)

III - Comprimento do vão ensaiado (cm)

B – diâmetro da base da peça (cm)

d1 – diâmetro no apoio 1 (cm)

d9 – diâmetro no apoio 2 (cm)

T – diâmetro do topo da peça (cm)

## **APÊNDICE C**

### **Figuras**



Figura 25 – Árvore marcada para corte



Figura 24 – Vista do talhão



Figura 27 – Árvore cortada



Figura 26 – Corte de árvore



Figura 28



Figura 30



Figura 29



Figura 31

Figuras 28 a 31 – Carregamento das peças



Figura 32



Figura 33



Figura 34



Figura 35

Figuras 32 a 35 – Descarregamento das peças no LaMEM



Figura 36



Figura 37



Figura 38

Figuras 36 a 38 – Descarregamento e armazenamento das peças no LaMEM



Figura 39



Figura 40



Figura 41



Figura 42



Figura 44



Figura 43



Figura 45



Figura 46

Figuras 43 a 46 – Transporte, pesagem e posicionamento das peças



Figura 47



Figura 48



Figura 49



Figura 50

Figuras 47 a 50 – Poste posicionado, preparo, medição e ensaio da peça

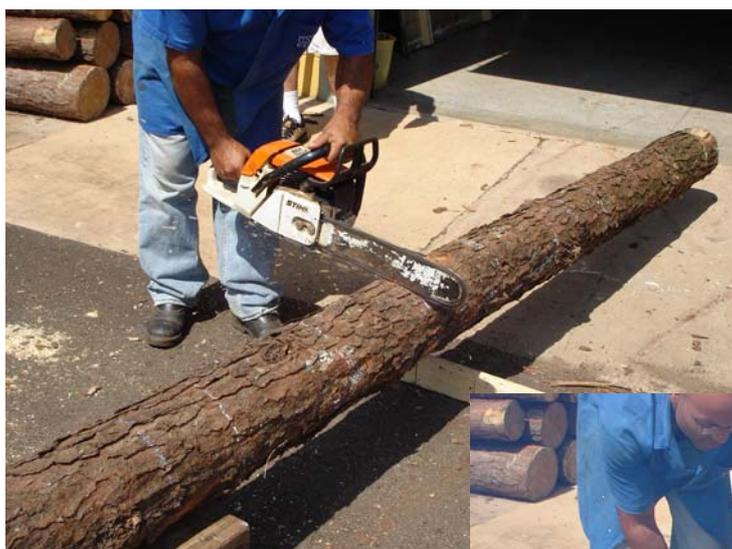


Figura 51



Figura 52



Figura 53



Figura 54

Figuras 51 a 54 – Obtenção dos segmentos das peças para desdobro



Figura 55



Figura 56



Figura 57



Figura 58



Figura 59

Figuras 55 a 59 – Desdobro das toras para obtenção de corpos-de-prova



Figura 60



Figura 61



Figura 62



Figura 63

Figuras 60 a 63 – Obtenção de corpos-de-prova



Figura 64



Figura 65



Figura 66



Figura 67

Figuras 64 a 67 – Ensaio em corpos-de-prova de dimensões reduzidas e em elementos estruturais

## **APÊNDICE D**

**Gráficos dos testes de normalidade**

**Gráficos dos resíduos versus valores estimados**

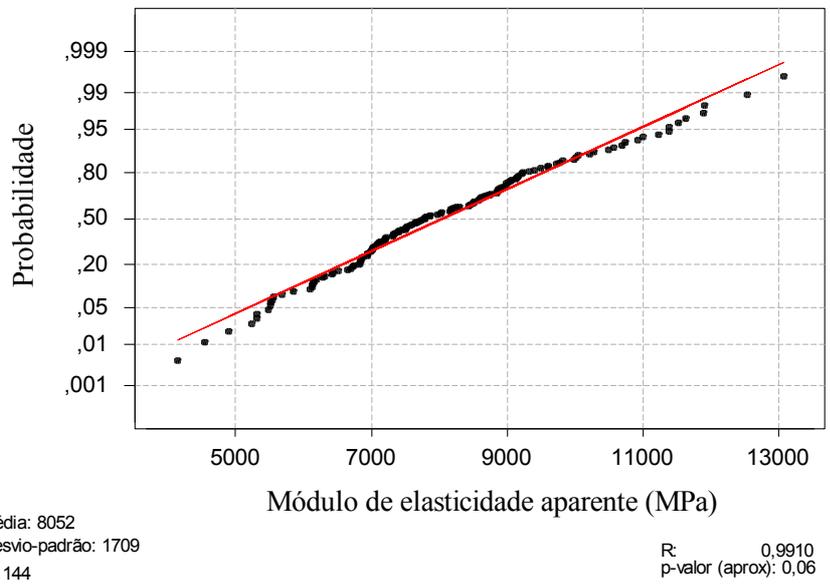


Figura 68 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações  $U/d$  – MOE na flexão estática

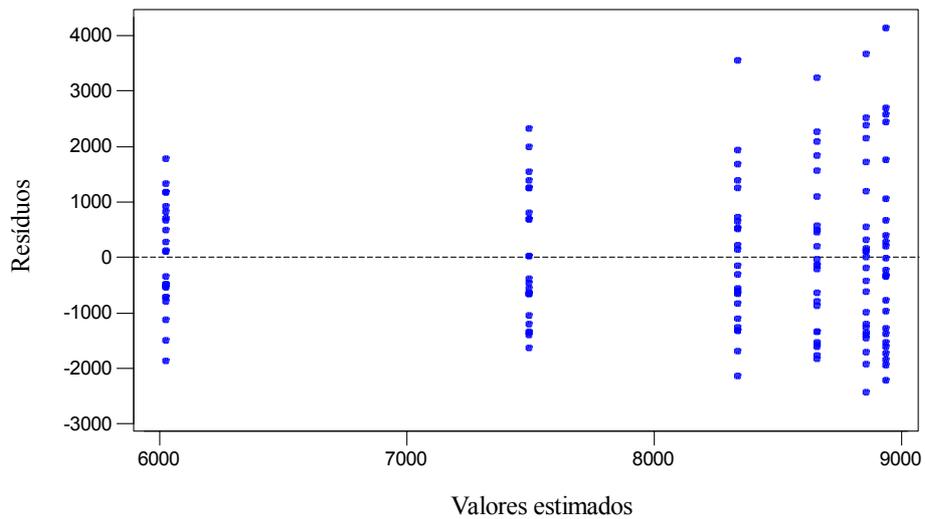


Figura 69 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações  $U/d$  – MOE na flexão estática

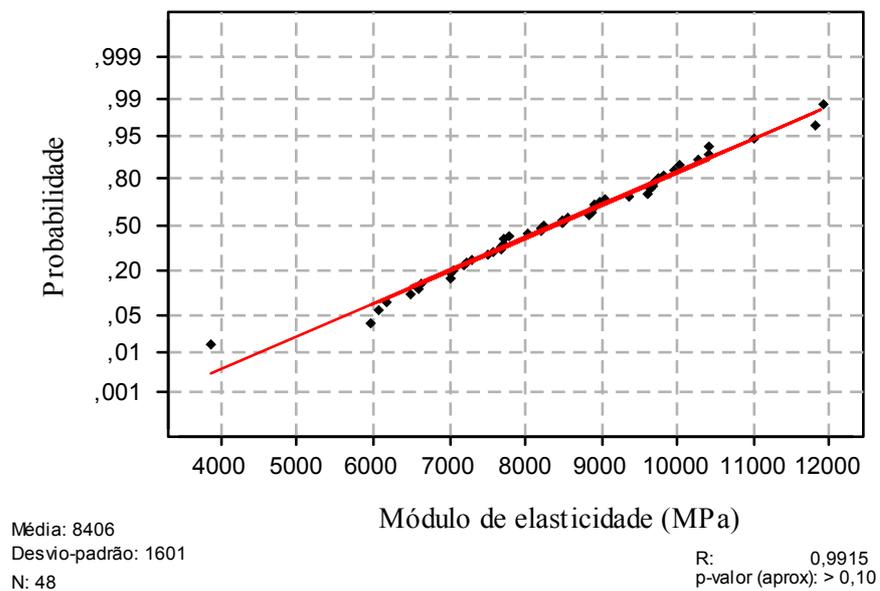


Figura 70 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

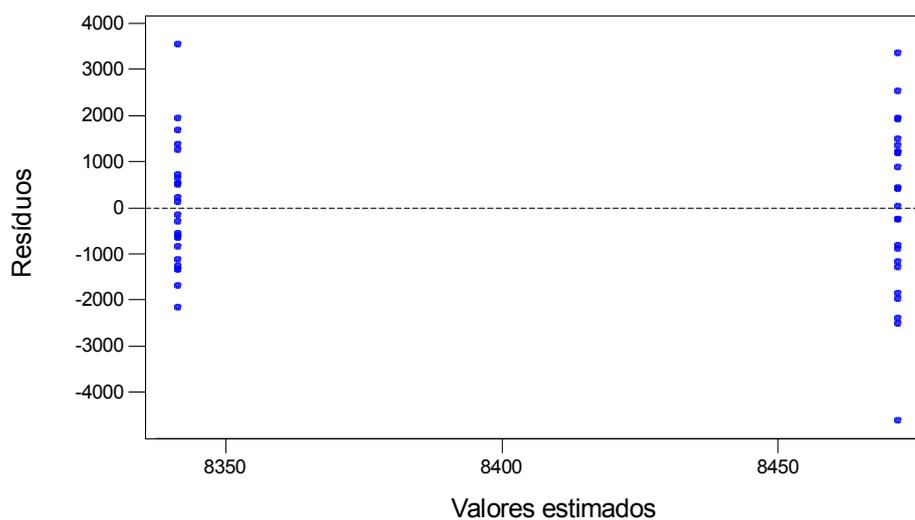


Figura 71 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

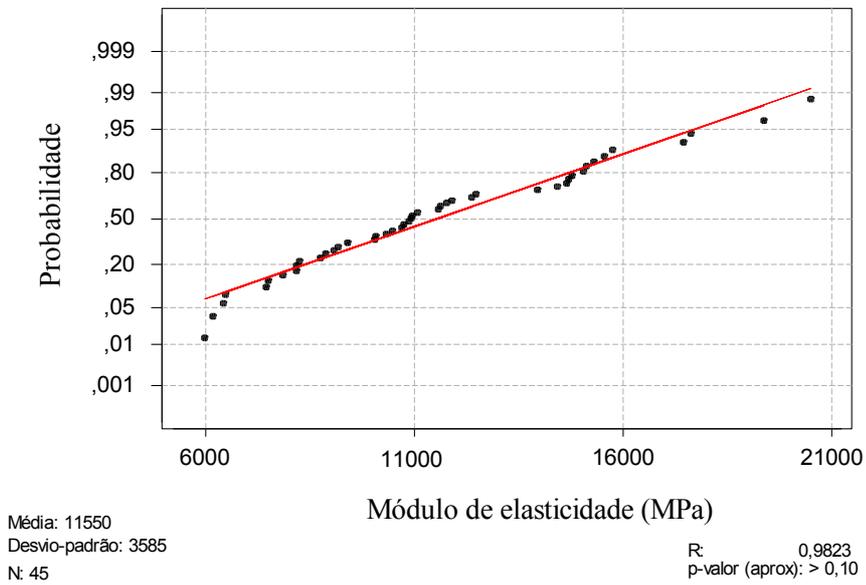


Figura 72 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

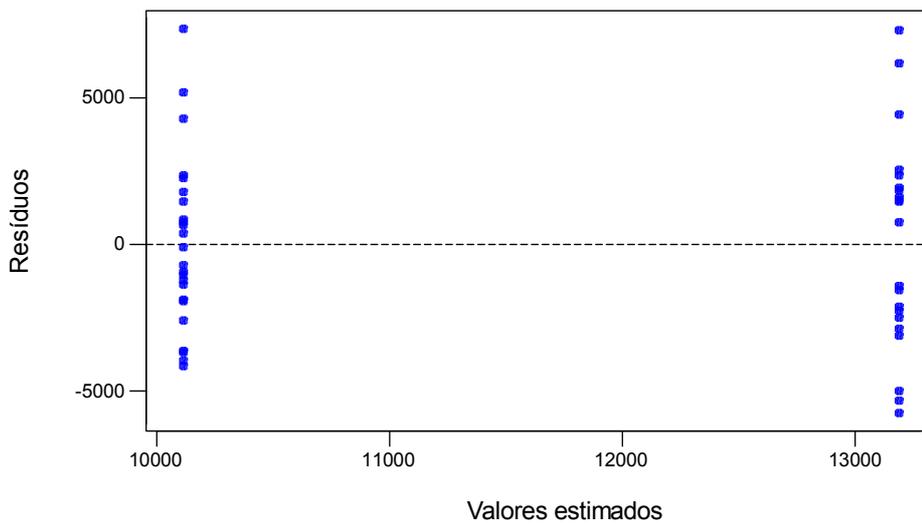


Figura 73 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

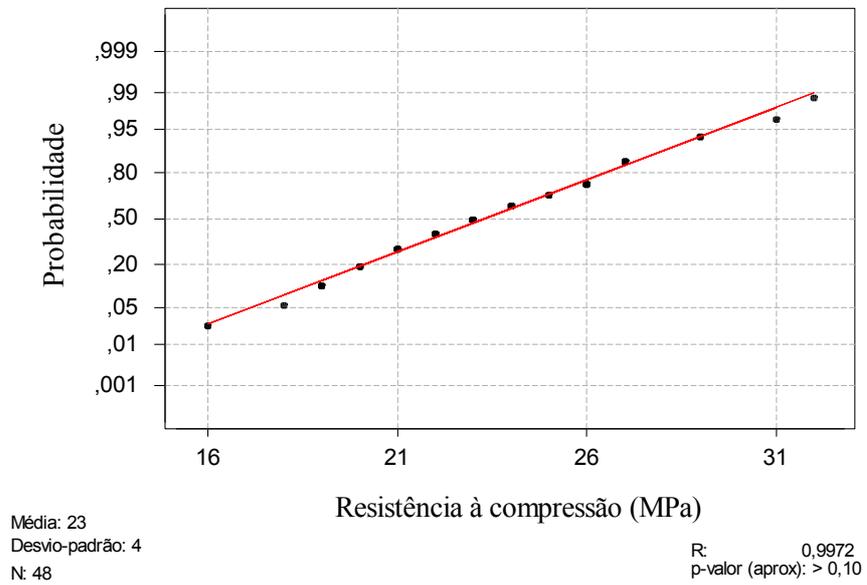


Figura 74 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela

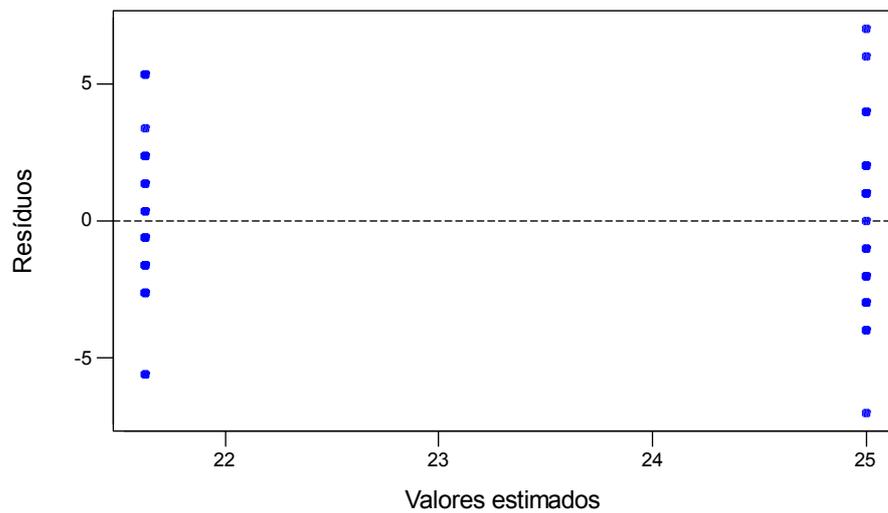


Figura 75 – *Pinus caribaea* var. *caribaea* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela

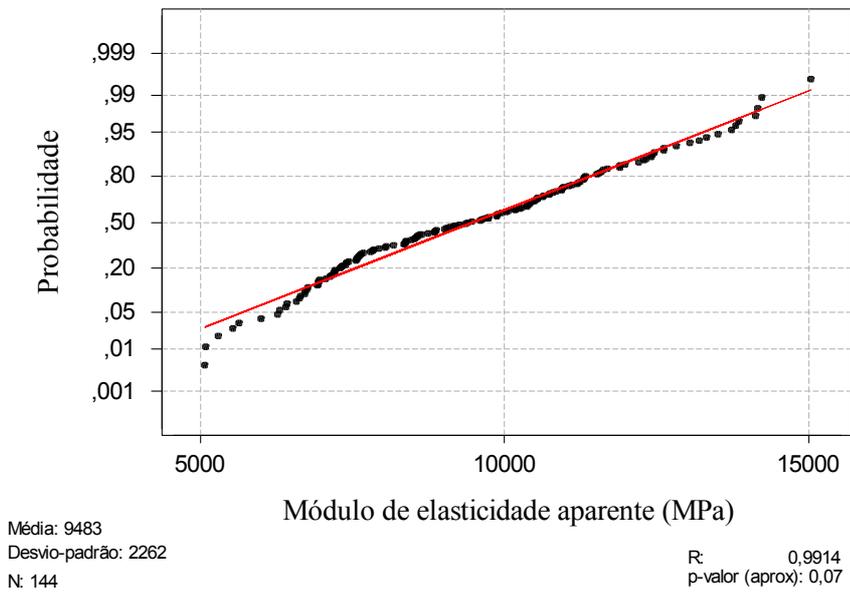


Figura 76 – *Pinus elliottii* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações  $U_d$  – MOE na flexão estática

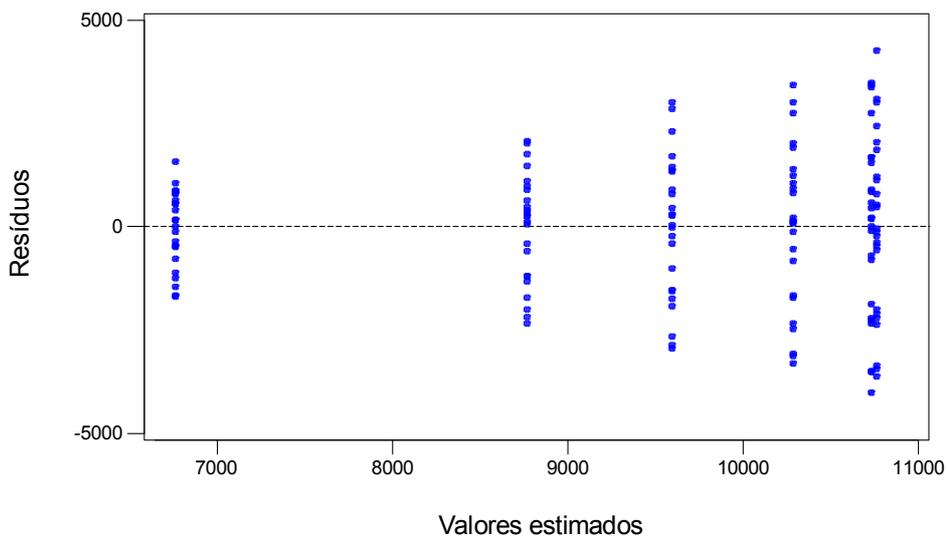


Figura 77 – *Pinus elliottii* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações  $U_d$  – MOE na flexão estática

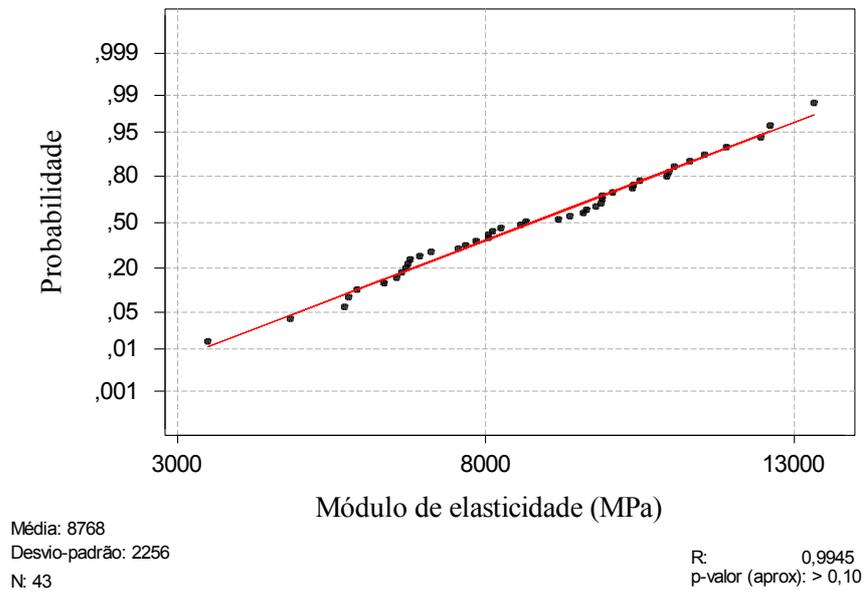


Figura 78 – *Pinus elliottii* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

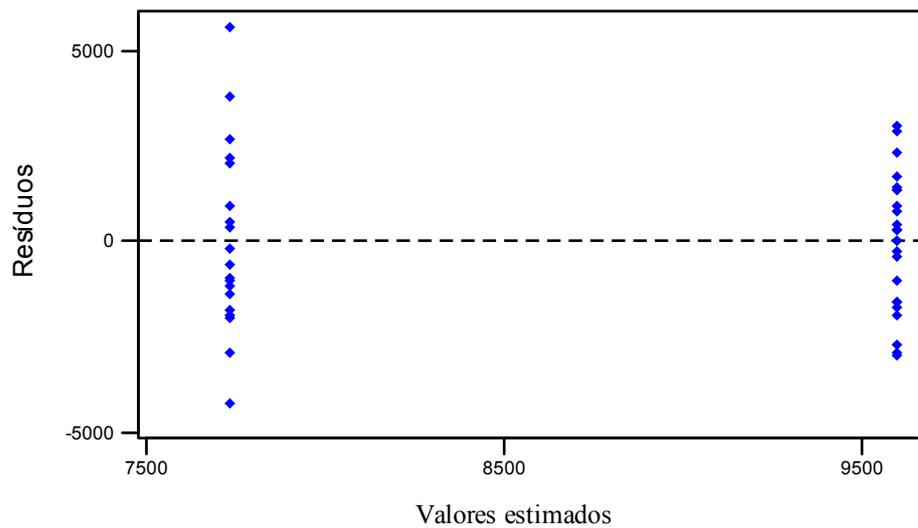


Figura 79 – *Pinus elliottii* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

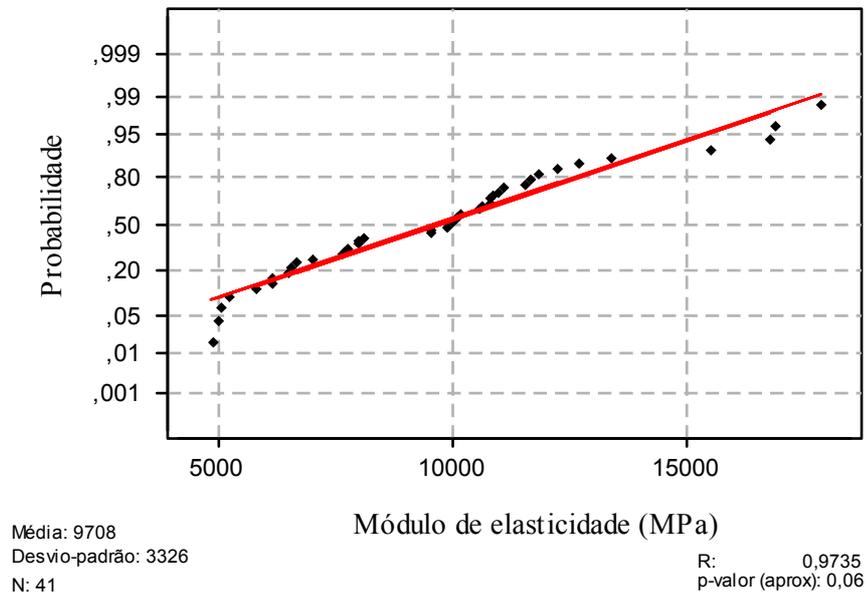


Figura 80 – *Pinus elliottii* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

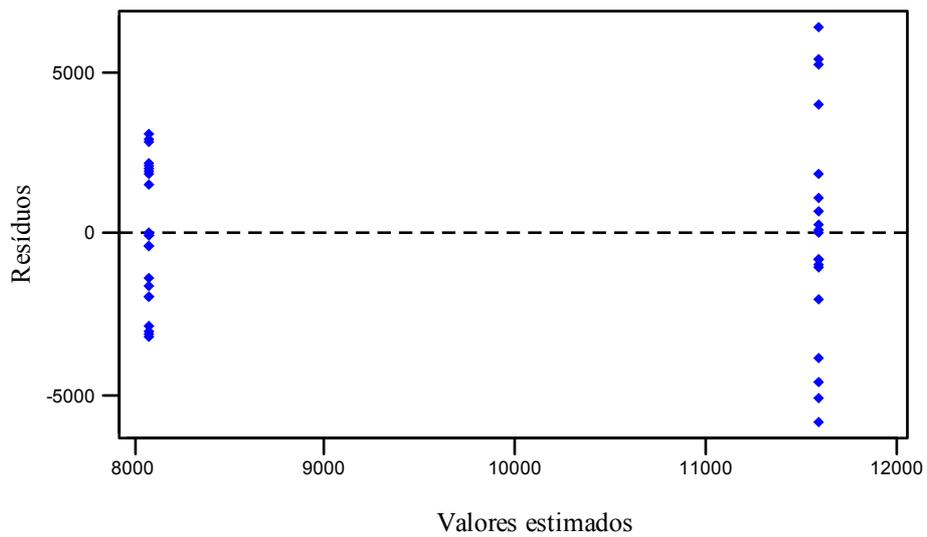


Figura 81 – *Pinus elliottii* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

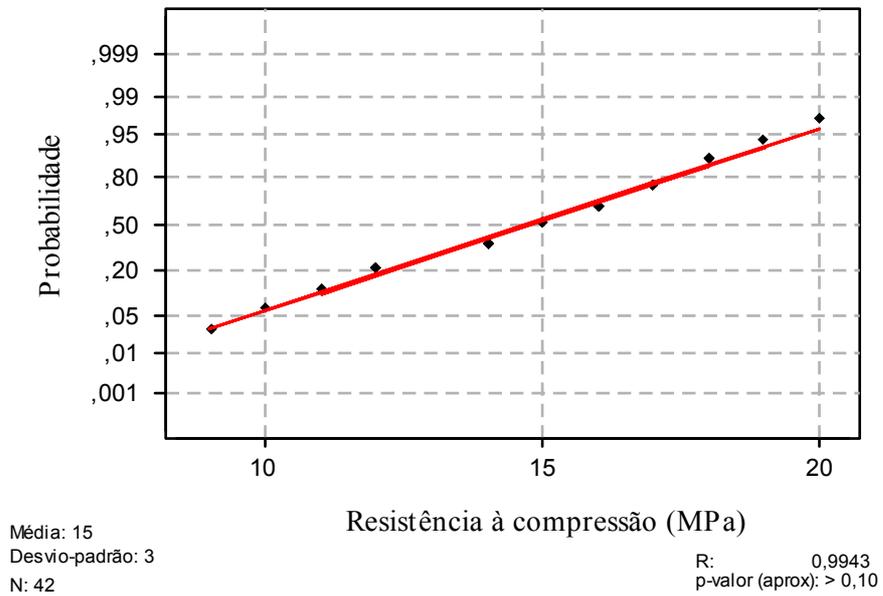


Figura 82 – *Pinus elliottii* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela

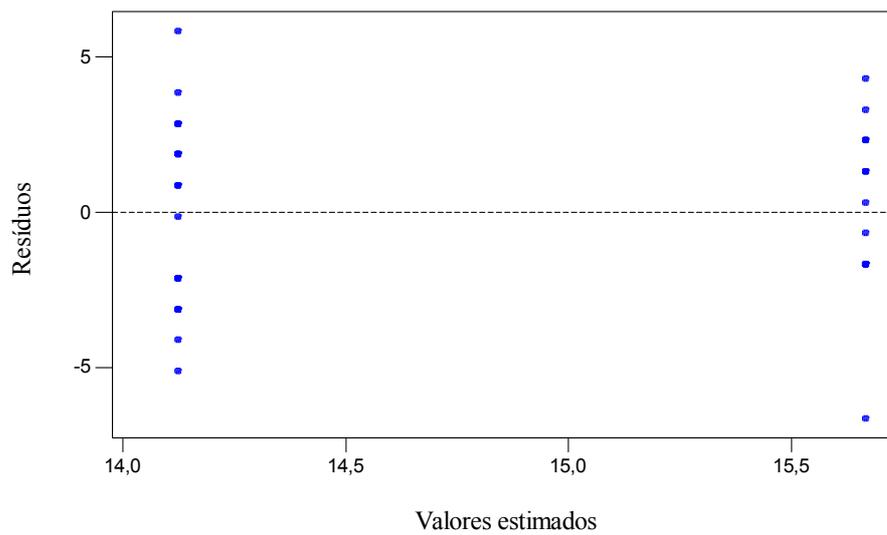


Figura 83 – *Pinus elliottii* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela

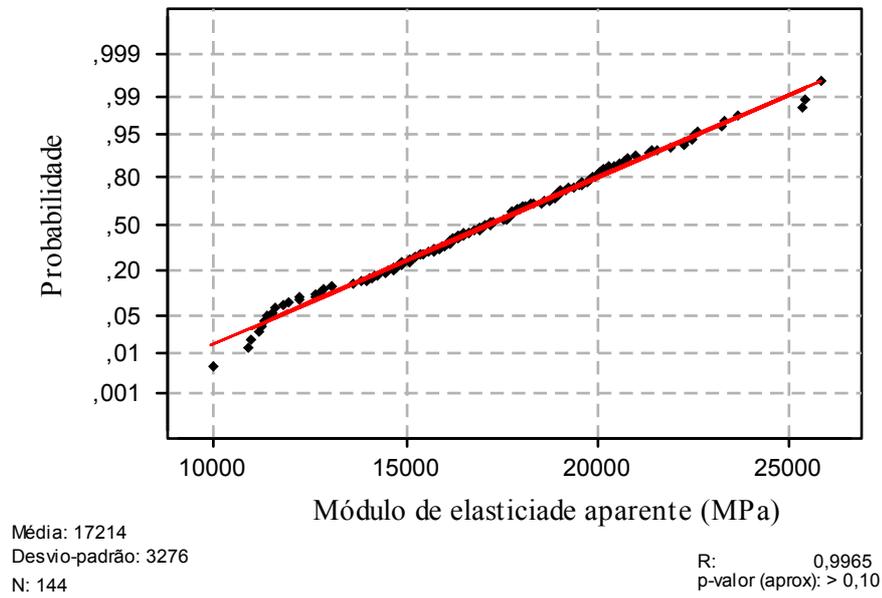


Figura 84 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as relações  $l/d$  – MOE na flexão estática

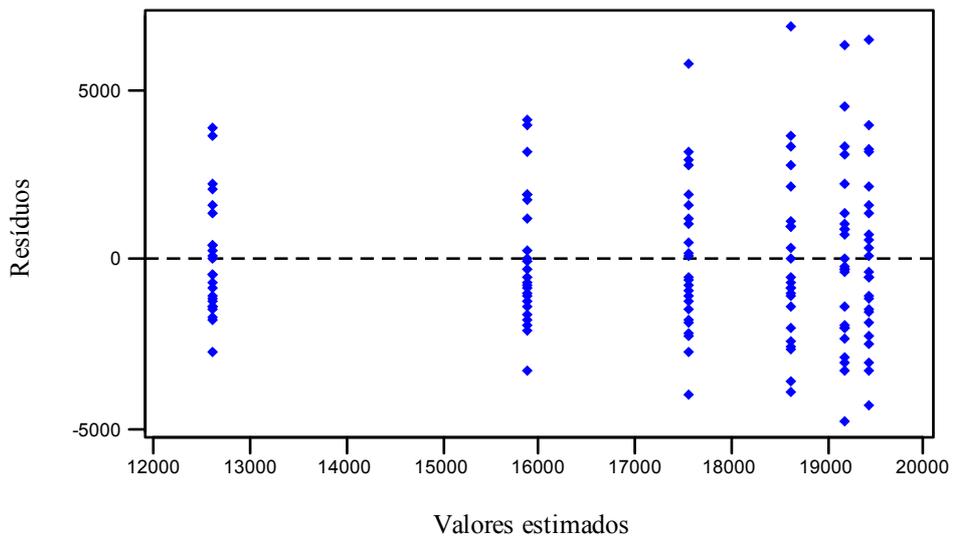


Figura 85 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as relações  $l/d$  – MOE na flexão estática

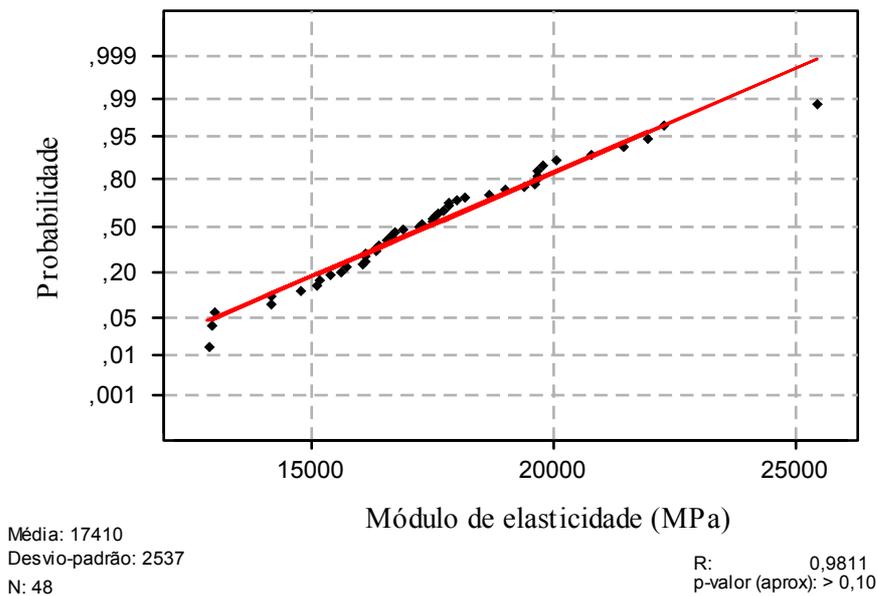


Figura 86 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

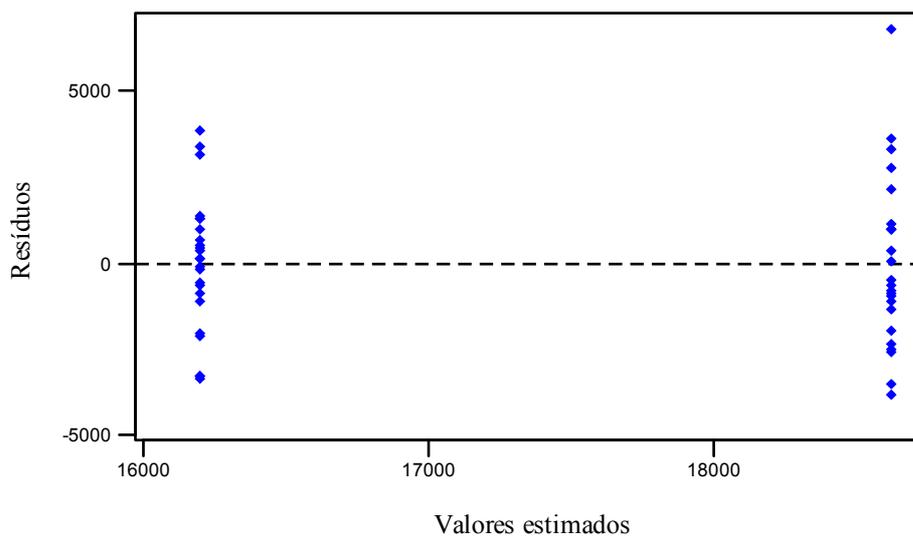


Figura 87 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na flexão estática

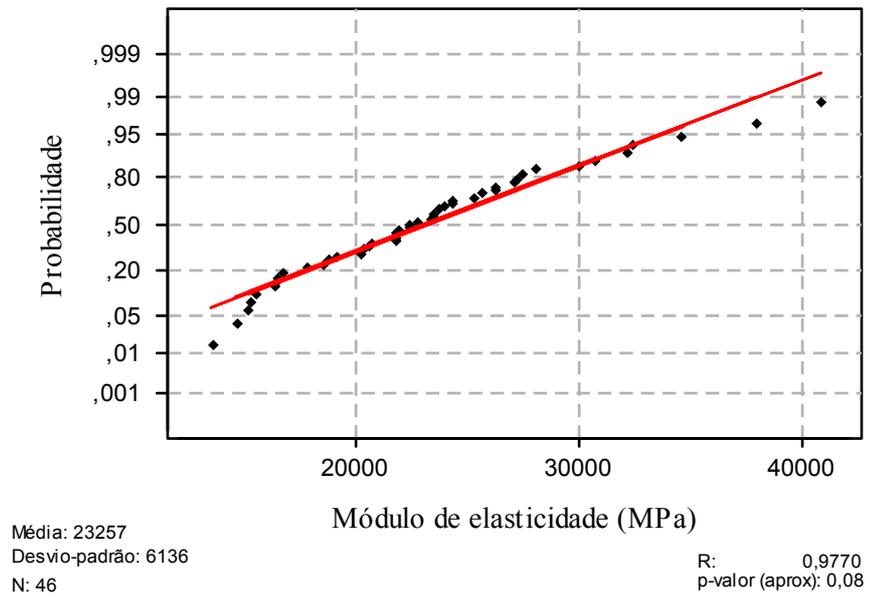


Figura 88 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

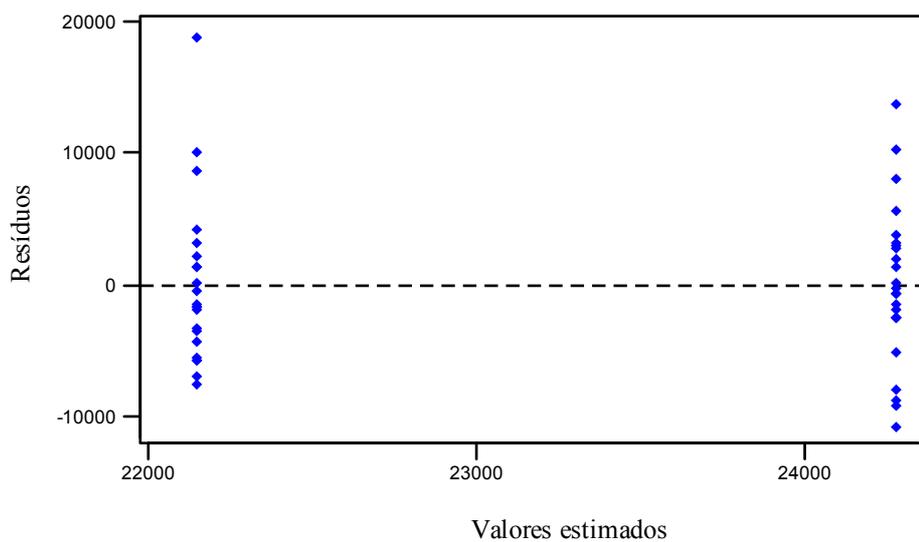


Figura 89 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOE na compressão paralela

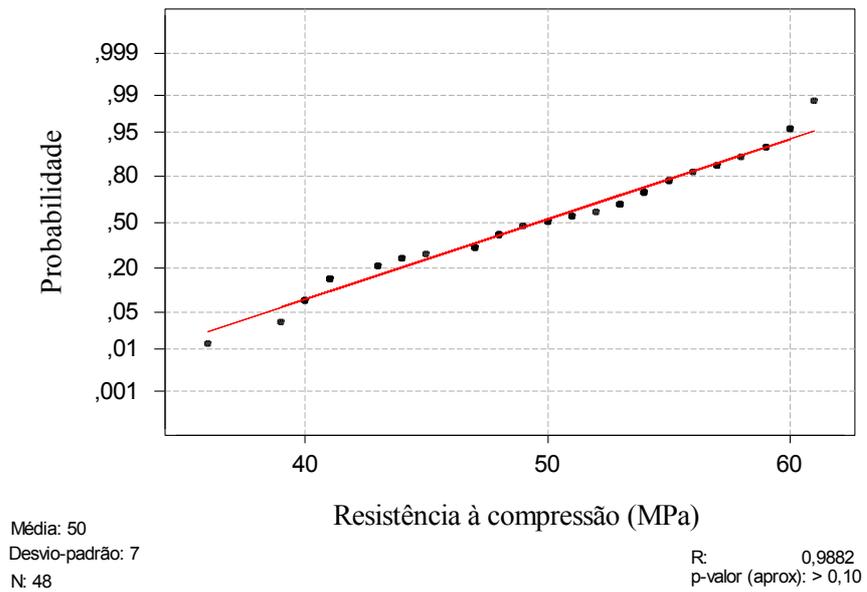


Figura 90 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico do teste de normalidade de Ryan-Joyner para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela

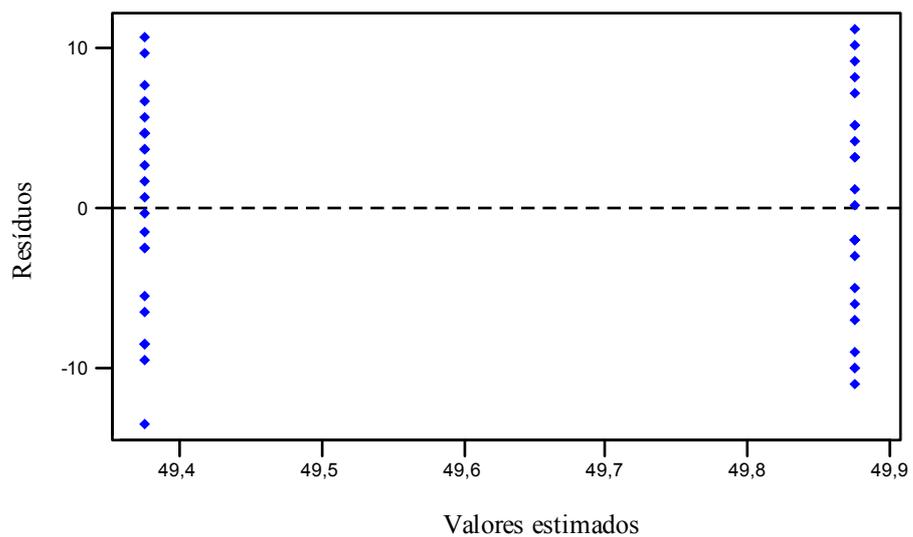


Figura 91 – *Eucalyptus citriodora* – Gráfico dos resíduos versus valores estimados para as comparações entre peças estruturais e corpos-de-prova de tamanho reduzido – MOR na compressão paralela



## **ANEXO A**

### **Valores de $k_s$ e $k_b$**

Carregamento	Extremidades da viga	Deslocamento	$k_b$	$k_s$
Uniformemente distribuído	• ambas simplesmente apoiadas	meio do vão	5/384	1/8
	• ambas engastadas	meio do vão	1/384	1/8
Concentrado no meio do vão	• ambas simplesmente apoiadas	meio do vão	1/48	1/4
	• ambas engastadas	meio do vão	1/192	1/4
Concentrado nos quartos externos	• ambas simplesmente apoiadas	meio do vão	11/768	1/8
	• ambas simplesmente apoiadas	ponto do carregamento	1/96	1/8
Uniformemente distribuído	• em balanço, uma livre, uma engastada	extremidade livre	1/8	1/2
Concentrado na extremidade livre	• em balanço, uma livre, uma engastada	extremidade livre	1/3	1

Fonte: Wood Handbook: Wood As An Engineering Material

Figura 92 – Valores de  $k_b$  e  $k_s$  para diferentes carregamentos

## **ANEXO B**

### **Tabela da Distribuição Fischer-Snedecor**

Tabela 32– Tabela de distribuição de Fischer-Snedecor

	Graus de liberdade no numerador																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234	236,8	238,9	240,5	241,9	243	243,9	244,7	245,4	245,9	246,5	246,9	247,3	247,7	248	249,3	250,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,35	19,37	19,39	19,4	19,41	19,41	19,42	19,42	19,43	19,42	19,44	19,44	19,44	19,45	19,46	19,46	19,48	19,49	19,5
3	10,13	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,785	8,763	8,745	8,729	8,715	8,703	8,692	8,683	8,675	8,667	8,66	8,643	8,617	8,572	8,549	8,526
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,936	5,912	5,891	5,873	5,858	5,844	5,832	5,821	5,811	5,803	5,769	5,746	5,688	5,658	5,628
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,05	4,95	4,876	4,818	4,772	4,735	4,704	4,678	4,655	4,636	4,619	4,604	4,59	4,579	4,568	4,558	4,521	4,496	4,431	4,398	4,365
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,06	4,027	4,000	3,976	3,956	3,938	3,922	3,908	3,896	3,884	3,874	3,835	3,808	3,74	3,705	3,669
7	5,591	4,737	4,347	4,12	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,603	3,575	3,55	3,529	3,511	3,494	3,48	3,467	3,455	3,445	3,404	3,376	3,304	3,267	3,23
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,688	3,581	3,5	3,438	3,388	3,347	3,313	3,284	3,259	3,237	3,218	3,202	3,187	3,173	3,161	3,15	3,108	3,079	3,005	2,967	2,928
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,23	3,179	3,137	3,102	3,073	3,048	3,025	3,006	2,989	2,974	2,96	2,948	2,936	2,893	2,864	2,787	2,748	2,707
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,02	2,978	2,943	2,913	2,887	2,865	2,845	2,828	2,812	2,798	2,785	2,774	2,73	2,7	2,621	2,58	2,538
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,818	2,788	2,761	2,739	2,719	2,701	2,685	2,671	2,658	2,646	2,601	2,57	2,49	2,448	2,404
12	4,747	3,885	3,49	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,717	2,687	2,66	2,637	2,617	2,599	2,583	2,568	2,555	2,544	2,498	2,466	2,384	2,341	2,296
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,635	2,604	2,577	2,554	2,533	2,515	2,499	2,484	2,471	2,459	2,412	2,38	2,297	2,252	2,206
14	4,6	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,565	2,534	2,507	2,484	2,463	2,445	2,428	2,413	2,4	2,388	2,341	2,308	2,223	2,178	2,131
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,79	2,707	2,641	2,588	2,544	2,507	2,475	2,448	2,424	2,403	2,385	2,368	2,353	2,34	2,328	2,28	2,247	2,16	2,114	2,066
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,456	2,425	2,397	2,373	2,352	2,333	2,317	2,302	2,288	2,276	2,227	2,194	2,106	2,059	2,01
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,81	2,699	2,614	2,548	2,494	2,45	2,413	2,381	2,353	2,329	2,308	2,289	2,272	2,257	2,243	2,23	2,181	2,148	2,058	2,011	1,96
18	4,414	3,555	3,16	2,928	2,773	2,661	2,577	2,51	2,456	2,412	2,374	2,342	2,314	2,29	2,269	2,25	2,233	2,217	2,203	2,191	2,141	2,107	2,017	1,968	1,917
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,74	2,628	2,544	2,477	2,423	2,378	2,34	2,308	2,28	2,256	2,234	2,215	2,198	2,182	2,168	2,155	2,106	2,071	1,98	1,93	1,878
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,31	2,278	2,25	2,225	2,203	2,184	2,167	2,151	2,137	2,124	2,074	2,039	1,946	1,896	1,843
21	4,325	3,467	3,072	2,84	2,685	2,573	2,488	2,42	2,366	2,321	2,283	2,25	2,222	2,197	2,176	2,156	2,139	2,123	2,109	2,096	2,045	2,01	1,916	1,866	1,812
22	4,301	3,443	3,049	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342	2,297	2,259	2,226	2,198	2,173	2,151	2,131	2,114	2,098	2,084	2,071	2,02	1,984	1,889	1,838	1,783
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,64	2,528	2,442	2,375	2,32	2,275	2,236	2,204	2,175	2,15	2,128	2,109	2,091	2,075	2,061	2,048	1,996	1,961	1,865	1,813	1,757
24	4,26	3,403	3,009	2,776	2,621	2,508	2,423	2,355	2,3	2,255	2,216	2,183	2,155	2,13	2,108	2,088	2,07	2,054	2,04	2,027	1,975	1,929	1,842	1,79	1,733
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,49	2,405	2,337	2,282	2,236	2,198	2,165	2,136	2,111	2,089	2,069	2,051	2,035	2,021	2,007	1,955	1,919	1,822	1,768	1,711
26	4,225	3,369	2,975	2,743	2,587	2,474	2,388	2,321	2,265	2,22	2,181	2,148	2,119	2,049	2,072	2,052	2,034	2,018	2,003	1,99	1,938	1,901	1,803	1,749	1,691
27	4,21	3,354	2,96	2,728	2,572	2,459	2,373	2,305	2,25	2,204	2,166	2,132	2,103	2,078	2,056	2,036	2,018	2,002	1,987	1,974	1,921	1,884	1,785	1,731	1,672
28	4,196	3,34	2,947	2,714	2,558	2,445	2,359	2,291	2,236	2,19	2,151	2,118	2,089	2,064	2,041	2,021	2,003	1,987	1,972	1,959	1,906	1,869	1,769	1,714	1,654
29	4,183	3,328	2,934	2,701	2,545	2,432	2,346	2,278	2,223	2,177	2,138	2,104	2,075	2,05	2,027	2,007	1,989	1,973	1,958	1,945	1,891	1,854	1,754	1,698	1,638
30	4,171	3,316	2,922	2,69	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	2,126	2,092	2,063	2,037	2,015	1,995	1,976	1,96	1,945	1,932	1,878	1,841	1,74	1,683	1,622
60	4,001	3,15	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,04	1,993	1,952	1,917	1,887	1,86	1,836	1,815	1,796	1,778	1,763	1,748	1,69	1,649	1,534	1,467	1,389
120	3,92	3,072	2,68	2,447	2,29	2,175	2,087	2,016	1,959	1,91	1,869	1,834	1,803	1,775	1,75	1,728	1,709	1,69	1,674	1,659	1,598	1,554	1,429	1,352	1,254
∞	3,842	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,01	1,938	1,88	1,831	1,789	1,752	1,72	1,692	1,666	1,644	1,623	1,604	1,587	1,571	1,507	1,459	1,318	1,221	1,000