

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS**  
**INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

**DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA  
MADEIRA: PROPOSTA PARA SIMPLIFICAÇÃO DE  
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

ELEN APARECIDA MARTINES MORALES

Dissertação apresentada à Área Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Francisco Antonio Rocco Lahr

**São Carlos**  
**2002**

*“Porque o Senhor dá a sabedoria; da sua boca vem  
o conhecimento e o entendimento.”  
Provérbios 2:6*

*Aos meus pais Roseli e Joaquim,  
pelo amor e dedicação que sempre dedicaram a mim.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pois tudo vem d'Ele;*

*Aos meus pais, pois sem eles não seria o que sou hoje;*

*Ao professor Francisco Antonio Rocco Lahr, pois, além de um excelente orientador, é um grande amigo;*

*Ao professor João César Hellmeister (in memoriam), pois me iniciou no estudo das madeiras;*

*A todos os professores que já tive desde a iniciação escolar, pois sem eles não teria o conhecimento que tenho hoje;*

*A todos os amigos que conquistei, pois contribuíram em minha caminhada;*

*Ao amigo Pigozzo, pelo apoio e contribuição neste trabalho;*

*A todos os amigos do LaMEM, em especial: Alexandre, Cristiane, Denise, Edna, Fabiana, Fabrício, Fátima, Jorge, Johnny, Juliano, Mariano, Max, Ricardo, Sérgio e Waldemir, pois me auxiliaram e foram companheiros tanto nas horas tristes quanto nas alegres, e nas fáceis quanto nas difíceis;*

*A todos os professores do LaMEM, Arnaldo, Bragatto, Cido, Jaime, Silvio, Roberto e Tânia, pois fazem parte deste trabalho;*

*A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho.*

**SUMÁRIO**

Lista de figuras .....	vii
Lista de tabelas.....	viii
Lista de abreviaturas ou siglas.....	xi
Lista de símbolos.....	xii
Resumo.....	xvii
Abstract.....	xviii
1. Introdução.....	01
2. Objetivos.....	04
3. Revisão Bibliográfica.....	05
3.1.    NBR 7190/1997 – Anexo B.....	06
3.1.1. Compressão normal às fibras.....	06
3.1.2. Compressão paralela às fibras.....	08
3.1.3. Flexão estática.....	10
3.1.4. Tração paralela às fibras.....	12
3.2.    Outros documentos normativos.....	14
3.2.1. Compressão normal às fibras.....	15
3.2.1.1. ASTM D- 143.....	15
3.2.1.2. COPANT R-466.....	16
3.2.1.3. ISO 3132.....	16
3.2.1.4. CEN 1193.....	17
3.2.2. Compressão paralela às fibras.....	19
3.2.2.1. AFNOR B 51-077.....	19
3.2.2.2. ASTM D-143.....	19
3.2.2.3. COPANT R-464.....	19
3.2.2.4. ISO 3787.....	20
3.2.2.5. ABNT – NBR 6230.....	21

3.2.2.6.	CEN 408.....	22
3.2.3.	Flexão estática.....	23
3.2.3.1.	AFNOR B 51-016.....	23
3.2.3.2.	ASTM D-143.....	23
3.2.3.3.	COPANT R-555.....	24
3.2.3.4.	ISO 3349 e 3133.....	25
3.2.3.5.	ABNT – NBR 6230.....	26
3.2.3.6.	CEN 408.....	27
3.2.4.	Tração paralela às fibras.....	28
3.2.4.1.	AFNOR B 51-018.....	28
3.2.4.2.	ASTM D-143.....	29
3.2.4.3.	COPANT R-742.....	29
3.2.4.4.	ISO 3345.....	30
3.2.4.5.	CEN 408.....	30
3.3.	O estudo da equivalência estatística entre os módulos de elasticidade de espécies tropicais brasileiras obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.....	31
3.4	Conclusão da revisão bibliográfica.....	34
4.	Materiais e métodos.....	36
4.1.	Comparação estatística entre os valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento.....	36
4.1.1.	Equipamentos.....	38
4.1.2.	Espécies de madeiras.....	39
4.1.3.	Metodologia estatística.....	39
4.2.	Comparação estatística entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.....	41
4.2.1.	Equipamentos.....	41
4.2.2.	Espécies de madeiras.....	42
4.2.3.	Metodologia estatística.....	43

5. Resultados.....	46
5.1. Comparação dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento.....	46
5.2. Comparação entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.....	57
6. Discussão dos resultados.....	67
6.1. Comparação dos valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento.....	67
6.2. Comparação entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.....	68
7. Conclusão.....	71
8. Referências bibliográficas.....	73
ANEXO I.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão normal às fibras.....	6
Figura 2 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão normal às fibras e compressão paralela às fibras.....	7
Figura 3 - Diagrama tensão x deformação específica para determinação da resistência e da rigidez da madeira na direção normal às fibras...	7
Figura 4 - Corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras....	8
Figura 5 - Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras.....	9
Figura 6 - Corpo-de-prova para ensaio de flexão.....	10
Figura 7 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão estática.....	11
Figura 8 - Diagrama força aplicada x flecha na flexão.....	11
Figura 9 - Corpos-de-prova para ensaios de tração paralela às fibras.....	12
Figura 10 - Diagrama tensão x deformação de carregamento para determinação da rigidez da madeira à tração paralela às fibras....	13
Figura 11 - Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.....	14
Figura 12 - Ensaio de compressão normal às fibras e posicionamento do corpo-de-prova no equipamento.....	15
Figura 13 - Diagrama de força x deformação no ensaio de compressão normal às fibras.....	18
Figura 14 - Arranjo do ensaio de flexão estática para a determinação do valor do módulo de elasticidade.....	27
Figura 15 - Ensaio de compressão normal às fibras da madeira.....	37
Figura 16 - Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira.....	37
Figura 17 - Ensaio de flexão estática da madeira.....	37
Figura 18 - Ensaio de tração paralela às fibras da madeira.....	38
Figura 19 - Máquina Universal AMSLER para ensaios mecânicos.....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Nomes vulgares, nomes científicos, classes de resistência, densidades e local de procedência das espécies utilizadas.....	39
Tabela 2	- Nomes vulgares, nomes científicos, procedência e número de corpos-de-prova das amostras das espécies utilizadas.....	43
Tabela 3	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Cambará Rosa nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	47
Tabela 4	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Eucalipto Grandis nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	47
Tabela 5	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para a Envira nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	47
Tabela 6	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Champanhe nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	48
Tabela 7	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Caribaea nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	48
Tabela 8	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Elliottii nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	48
Tabela 9	- Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Hondurensis nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa).....	49
Tabela 10	- Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Cambará Rosa (MPa).....	49
Tabela 11	- Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Eucalipto Grandis (MPa).....	49
Tabela 12	- Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para a Envira (MPa).....	50
Tabela 13	- Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Champanhe (MPa).....	50

Tabela 14 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus Caribaea (MPa).....	50
Tabela 15 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus Elliottii (MPa).....	50
Tabela 16 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus Hondurensis (MPa).....	50
Tabela 17 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Cambará Rosa	51
Tabela 18 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Eucalipto Grandis.....	51
Tabela 19 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para a Envira.....	51
Tabela 20 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Champanhe.....	51
Tabela 21 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Caribaea.	52
Tabela 22 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Elliottii.....	52
Tabela 23 - Valores de $\bar{x}_m$ e $s_m$ em $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Hondurensis.....	52
Tabela 24 - Valores de n e de $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ para cada tipo de ensaio e espécie de madeira.....	53
Tabela 25 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Cambará Rosa (MPa).....	54
Tabela 26 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Eucalipto Grandis(MPa).....	54
Tabela 27 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para a Envira (MPa).....	54
Tabela 28 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Champanhe (MPa).....	54
Tabela 29 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus Caribaea (MPa).....	54
Tabela 30 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus Elliottii (MPa).....	55
Tabela 31 - Intervalos de confiança para $E_A$ , $E_B$ e $E_C$ para o Pinus	

Hondurensis (MPa).....	55
Tabela 32 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Cambará Rosa.....	55
Tabela 33 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Eucalipto Grandis.....	55
Tabela 34 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para a Envira.....	56
Tabela 35 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Champanhe.....	56
Tabela 36 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Caribaea.....	56
Tabela 37 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Elliottii.....	56
Tabela 38 - Intervalos de confiança para $E^*_A$ , $E^*_B$ e $E^*_C$ para o Pinus Hondurensis.....	56
Tabela 39 - Valores de $E_{c0}$ , $E_{t0}$ e $E_M$ (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras.....	57
Tabela 40 - Resultado da análise estatística individual e em conjunto das trinta e quatro espécies tropicais brasileiras.....	66
Tabela 41 - Valores de $E_{c0}$ , $E_{t0}$ e $E_M$ (MPa), postos destes valores por tratamento, $R_n$ , H e p para o Castelo.....	68
Tabela 42 - Valores de $E_{c0}$ , $E_{t0}$ e $E_M$ (MPa), postos destes valores por tratamento $R_n$ , H e p, para o Champanhe.....	69

**LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

*ABNT* - Associação Brasileira de Normas Técnicas

*AFNOR* - Association Française de Normalisation

*ASTM* - American Society for Testing and Materials

*C* - Espécie de madeira Champanhe

*CEN* - European Committee for Standardization

*COPANT* - Comisión Panamericana de Normas Técnicas

*CN* - Compressão normal às fibras

*CP* - Compressão paralela às fibras

*CR* - Espécie de madeira Cambará Rosa

*EG* - Espécie de madeira Eucalipto Grandis

*EN* - Espécie de madeira Envira

*FE* - Flexão estática

*ISO* - International Standard Organization

*PC* - Espécie de madeira Pinus Caribaea

*PE* - Espécie de madeira Pinus Elliottii

*PH* - Espécie de madeira Pinus Hondurensis

*TP* - Tração paralela às fibras

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon_1$  - Deformação mínima

$\varepsilon_2$  - Deformação máxima

$\varepsilon_{10\%}$  - Deformação correspondente a 10% da resistência estimada

$\varepsilon_{50\%}$  - Deformação correspondente a 50% da resistência estimada

$\varepsilon_T$  - Deformação igual à diferença entre a deformação máxima  $\varepsilon_2$  e a mínima  $\varepsilon_1$

$\mu$  - Deformação específica

$\sigma$  - Tensão

$\sigma_{10\%}$  - Tensão correspondente a 10% da resistência estimada

$\sigma_{50\%}$  - Tensão correspondente a 50% da resistência estimada

$\sigma_W$  - Tensão última a W% de umidade

$\sigma_E$  - Tensão específica

$\sigma_R$  - Tensão de ruptura

$\sigma_W$  - Tensão a W% de umidade

$\sigma_{yW}$  - Tensão última convencional a W% de umidade

$w_1$  - Deformação correspondente à  $F_1$

$w_2$  - Deformação correspondente à  $F_2$

$w_{10}$  - Deformação correspondente à  $F_{10}$

$w_{40}$  - Deformação correspondente à  $F_{40}$

$A$  - Área da seção transversal

$a$  - Espessura da seção transversal do corpo-de-prova

$b$  - Largura da seção transversal do corpo-de-prova

$c$  - Distância entre as braçadeiras do relógio comparador nos ensaios de compressão paralela às fibras e tração paralela às fibras

$d$  - Distância entre os dispositivos de aplicação de força no ensaio de flexão estática

$d_l$  - Deformação correspondente a  $P_l$

$E$  - Módulo de elasticidade

$E^*_1$  - Valor do módulo de elasticidade do primeiro ciclo de carregamento dividido pelo valor do módulo de elasticidade do primeiro ciclo de carregamento

$E^*_2$  - Valor do módulo de elasticidade do segundo ciclo de carregamento dividido pelo valor do módulo de elasticidade do primeiro ciclo de carregamento

$E^*_3$  - Valor do módulo de elasticidade do terceiro ciclo de carregamento dividido pelo valor do módulo de elasticidade do primeiro ciclo de carregamento

$$E^*_A = E^*_1 - E^*_2$$

$$E^*_B = E^*_1 - E^*_3$$

$$E^*_C = E^*_2 - E^*_3$$

$E_1$  - Módulo de elasticidade no primeiro ciclo de carregamento

$E_2$  - Módulo de elasticidade no segundo ciclo de carregamento

$E_3$  - Módulo de elasticidade no terceiro ciclo de carregamento

$$E_A = E_1 - E_2$$

$$E_B = E_1 - E_3$$

$$E_C = E_2 - E_3$$

$E_{C0}$  - Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras

$E_{C90}$  - Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras

$ELP$  - Tensão no limite de proporcionalidade no ensaio de tração paralela às fibras

$ELP_f$  - Tensão no limite de proporcionalidade no ensaio de flexão estática

$E_M$  - Módulo de elasticidade na flexão estática

$E_{M0}$  - Módulo de elasticidade na flexão estática

$EM$  - Tensão máxima no ensaio de tração paralela às fibras

$E_{Mf}$  - Tensão máxima no ensaio de flexão estática

$E_{t0}$  - Módulo de elasticidade na tração paralela às fibras

$E_{trl,H}$  - Módulo de elasticidade

$E_W$  - Módulo de elasticidade

$f$  - Deslocamento do corpo-de-prova dentro da zona de flexão pura igual à média das diferenças entre os deslocamentos máximo  $f_1$  e mínimo  $f_2$  referentes aos três ciclos de carregamento

$F$  - Força aplicada

$f_1$  - Deslocamento máximo

$F_1$  - Força no início da parte linear da curva força x deformação

$F_{10}$  - Força correspondente a parte linear da curva tensão x deformação no ensaio de compressão normal às fibras equivalente a 10% de  $F_{c,90,max}$

$F_{10\%}$  - Força correspondente a 10% da força estimada

$f_2$  - Deslocamento mínimo

$F_2$  - Força no final da parte linear da curva força x deformação

$F_{40}$  - Força correspondente a parte linear da curva tensão x deformação no ensaio de compressão normal às fibras equivalente a 40% de  $F_{c,90,max}$

$F_{50\%}$  - Força correspondente a 50% da força estimada

$f_c$  - Deslocamento no centro do corpo-de-prova

$f_{CO}$  - Resistência à compressão paralela às fibras

$f_{c0,est}$  - Resistência estimada à compressão paralela às fibras

$F_{co,max}$  - Máxima força de compressão aplicada no corpo-de-prova

$F_{c,90}$  - Força de compressão normal às fibras aplicada no corpo-de-prova

$F_{c,90,max}$  - Máxima força de compressão normal às fibras aplicada no corpo-de-prova

$F_{c,90,Max,est}$  - Máxima força de compressão normal às fibras estimada

$f_M$  - Resistência convencional à flexão estática

$f_{M,est}$  - Resistência estimada convencional à flexão estática

$f_{Max}$  - Força máxima

$f_{t0}$  - Resistência à tração paralela às fibras

$f_{t0,est}$  - Resistência estimada à tração paralela às fibras

$F_{to,max}$  - Máxima força de compressão aplicada no corpo-de-prova

$f_W$  - Deslocamento correspondente à diferença de forças  $P_W$

$F_{WC,90}$  - Resistência à compressão normal às fibras

$h$  - Altura da seção transversal do corpo-de-prova

$h_0$  - Distância entre os pontos de fixação do extensômetro

$I$  - Momento de inércia

$l$  - Distância entre os apoios (vão livre) no ensaio de flexão estática

$m$  - Distância entre os eixos dos cilindros do suporte do instrumento para medir o deslocamento vertical

$M$  - Momento fletor

$MOE$  - Módulo de elasticidade

$MOE_f$  - Módulo de elasticidade no ensaio de flexão estática

$P$  - Força aplicada

$P_1$  - Força igual a 500N

$P_2$  - Força igual a 1500N

$P_{2,5}$  - Força correspondente à deformação de 2,5 mm

$P_d$  - Força correspondente à deformação  $d_l$  abaixo do limite de proporcionalidade

$P_l$  - Força no limite de proporcionalidade

$P_M$  - Força aplicada no ensaio de flexão, para a determinação do módulo de elasticidade, igual à média das diferenças entre o valor máximo  $P_1$  e mínimo  $P_2$  aplicados, correspondentes aos três ciclos de carregamento

$P_R$  - Força máxima causadora da ruptura

$P_T$  - Força de tração =  $P_{2máx} - P_{1mín}$

$P_W$  - Diferença entre os limites superior e inferior de força na fase elástica

$RLP$  - Resistência no limite de proporcionalidade

$RUM$  - Resistência máxima



$V_{10\%}$  - Deslocamento no meio de vão em força de 10%

$V_{50\%}$  - Deslocamento no meio de vão em força de 50%

$W$  - Módulo de resistência

$W_S$  - Módulo da seção

$W\%$  - Porcentagem de umidade

## RESUMO

O texto normativo NBR 7190/1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), adota três ciclos de carregamento nos ensaios para a determinação de propriedades de *rigidez* e *resistência* da *madeira*. A partir das recomendações de tal documento foram realizados ensaios de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras com corpos-de-prova de Cambará Rosa (*Erisma* sp), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Envira (*Xylopia* sp), Champanhe (*Dipteryx odorata*), Pinus Caribaea (*Pinus caribaea* var. *caribaea*), Pinus Elliottii (*Pinus elliotii* var. *elliottii*) e Pinus Hondurensis (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*). Os valores dos *módulos de elasticidade* (E) obtidos mostraram-se estatisticamente equivalentes no segundo e terceiro *ciclos de carregamento*. Esta análise sugere, então, que o terceiro ciclo de carregamento é desnecessário. Foram comparados, também, os valores dos *módulos de elasticidade* de trinta e quatro espécies de madeiras tropicais brasileiras, obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática. Concluiu-se que estes são estatisticamente equivalentes.

**Palavras-chave:** ciclos de carregamento, madeira, módulos de elasticidade, resistência e rigidez.

## ABSTRACT

The NBR 7190/1997, adopted by of Brazilian Technical Standard Association (ABNT), indicates three *loading cycles* for tests to determine *wood stiffness* and *strength*. Based on recommendations of ABNT methods tests were carried out in compression perpendicular to grain, compression parallel to grain, static bending and tension parallel to grain, with Cambará Rosa (*Erisma sp*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Envira (*Xylopia sp*), Champanhe (*Dipteryx odorata*), Pinus Caribaea (*Pinus caribaea var. caribaea*), Pinus Elliottii (*Pinus elliottii var. elliottii*) and Pinus Hondurensis (*Pinus caribaea var. hondurensis*) species. Modulus of elasticity values (E) obtained were statistically equivalent in second and third *loading cycles*. This analysis suggests that the third *loading cycle* is not necessary. *Modulus of elasticity* values of thirty four Brazilian tropical wood species were compared in compression parallel to grain, tension parallel to grain and static bending. The analysis showed that these values are statistically equivalent.

**Keywords:** loading cycles, modulus of elasticity, stiffness, strength and wood.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo das madeiras e de sua caracterização mecânica é de fundamental importância para que se possa alcançar melhor utilização desse material, ao lado daqueles cujas propriedades são largamente conhecidas, quaisquer que sejam os segmentos industriais envolvidos.

Muitos estudos têm sido conduzidos com o objetivo de caracterizar a madeira de diferentes espécies, mas o tema ainda está longe de se esgotar. Em particular no Brasil, a partir da revisão do texto da NBR 7190, em 1997, alguns dos ensaios para caracterização físico-mecânica, como os de compressão normal e paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, passaram a ser realizados com dois ciclos prévios de carregamento e o ciclo final, a partir do qual são determinados os valores da resistência e do correspondente módulo de elasticidade.

Surgem diversas questões quando são analisados os referidos ciclos e os tipos de ensaios para a determinação de E (módulo de elasticidade longitudinal). Algumas delas são aqui discutidas.

Para os ensaios, seriam imprescindíveis três ciclos de carregamento?

A eventual supressão do terceiro ciclo de carregamento levaria ao comprometimento da representatividade dos resultados obtidos nos ensaios?

Na determinação do módulo de elasticidade longitudinal, é imprescindível a realização dos ensaios de flexão estática, compressão e tração paralela às fibras?

Para melhor situar o problema, são apresentadas, ao lado das recomendações de ensaio contidas no documento normativo brasileiro, indicações

dos métodos de ensaio internacionais mais expressivos. São citados os métodos propostos pela AFNOR (Association Française de Normalization), pela ASTM (American Society for Testing and Materials), pela COPANT (Comisión Panamericana de Normalización), pela ISO (International Organization for Standardization), pelo CEN (European Committee for Standardization), além do NBR 6230, antigo MB-26 (Brasil).

Dentre esses métodos, somente os propostos pela ISO e pela AFNOR recomendam a realização de mais de um ciclo de carregamento nos ensaios para a determinação de algumas propriedades de resistência e de rigidez da madeira. Por outro lado, na maioria dos métodos mencionados, está prevista a realização de mais de um ensaio para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal.

Registra-se que, embora a análise proposta pelo trabalho focalize a rigidez da madeira, são apresentadas, também, recomendações relacionadas à determinação das propriedades de resistência. Isto se deve ao fato de os valores dos módulos de elasticidade serem calculados a partir dos resultados obtidos nos ensaios dos mesmos corpos-de-prova utilizados para a determinação da resistência do material.

Na bibliografia consultada não foram encontrados artigos que apresentem justificativas para a adoção de ciclos de carregamento, nem mesmo que se posicionem contrariamente a tal procedimento. Em outras palavras, não estão disponíveis quaisquer informações bibliográficas que possibilitem a comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

Desta forma, especial atenção necessitou ser dada à parte experimental da pesquisa, desde a preparação dos corpos-de-prova até a execução propriamente dita dos ensaios.

Foi avaliada, também, a possibilidade de se estabelecer a equivalência estatística ou determinar correlações entre os módulos de elasticidade longitudinal (ensaio de flexão estática, compressão e tração paralela às fibras) visando

simplificar a caracterização. Para tal, foram utilizados os resultados de E obtidos para trinta e quatro espécies de madeiras tropicais brasileiras.

Com isto, buscou-se a geração de informações seguras e significativas para fundamentar eventuais futuras providências para revisão de documentos normativos brasileiros no que diz respeito à caracterização de espécies.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral investigar e analisar alguns aspectos referentes à caracterização de espécies de madeira, com a finalidade de simplificá-la no tocante às suas propriedades de rigidez.

Como objetivos específicos, são citados:

- 2.1. Verificar se existe equivalência estatística entre os valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento recomendados pela NBR 7190:1997, para os ensaios de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras da madeira.
- 2.2. Verificar se existe equivalência estatística entre os valores dos módulos de elasticidade longitudinal de madeiras tropicais brasileiras nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados, de modo resumido, os procedimentos de ensaio para a determinação de propriedades de resistência e rigidez da madeira na compressão normal e paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras recomendados pelos documentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR 7190 - Brasil), L'Association Française de Normalisation (AFNOR - França), American Society for Testing and Materials (ASTM - EUA), Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT - países sul-americanos), International Standard Organization (ISO) e European Committee for Standardization (CEN). A título de ilustração incluíram-se as recomendações da NBR 6230, antigo MB-26, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Não foram encontrados, na bibliografia disponível, artigos nacionais ou internacionais que abordassem o tema da realização de ciclos de carregamento nos ensaios para a caracterização da resistência e rigidez da madeira. Foram consultadas diversas bibliotecas, revistas eletrônicas e bases de dados, entre elas Probe e Web of Science.

Para fundamentar uma das abordagens da dissertação, apresentam-se, também, referências aos estudos realizados a respeito da equivalência estatística entre os módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática de madeiras tropicais brasileiras.



### 3.1. NBR 7190:1997, Anexo B

Neste item estão apresentados, de modo resumido, os procedimentos de ensaio para determinar propriedades de resistência e rigidez da madeira na compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras, recomendados pelo documento normativo da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR 7190, Anexo B.

#### 3.1.1. Compressão Normal às Fibras:

As dimensões nominais dos corpos-de-prova estão representadas na Figura 1.

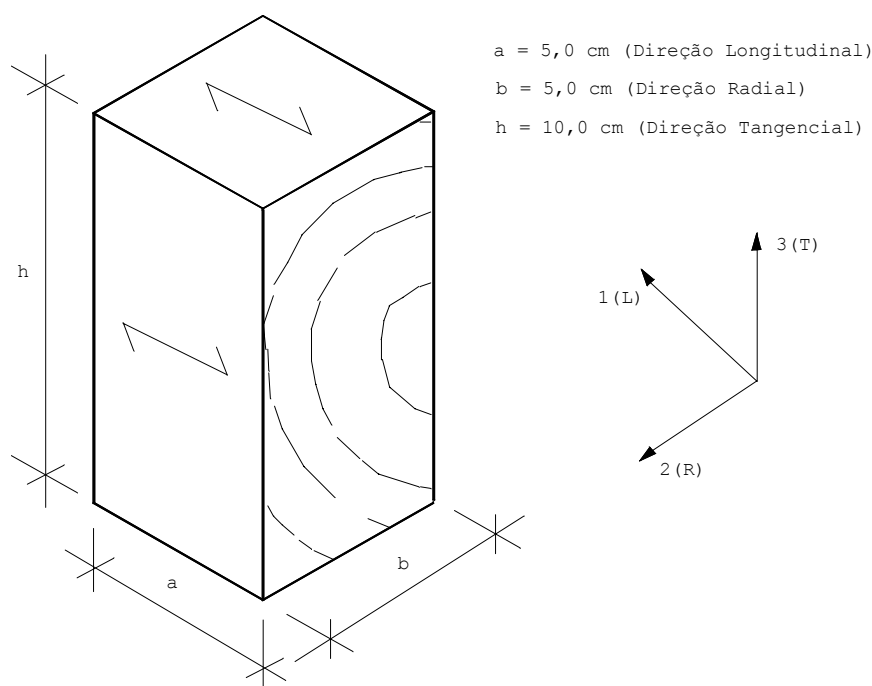


Figura 1 - Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de compressão normal às fibras.  
Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

No ensaio são realizados dois ciclos de carregamento prévios e um ciclo de carregamento final, de acordo com o apresentado no diagrama da Figura 2.

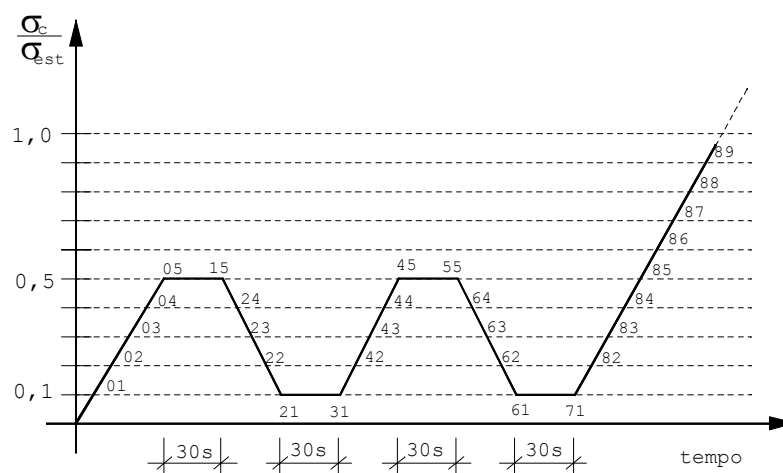


Figura 2 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à compressão normal às fibras e compressão paralela às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A resistência convencional à compressão normal às fibras ( $f_{wc,90}$  ou  $f_{c90}$ ), dada pela NBR 7190:1997, é a tensão correspondente à deformação específica residual de 0,2% (Figura 3), obtida em ensaio do corpo-de-prova padronizado.

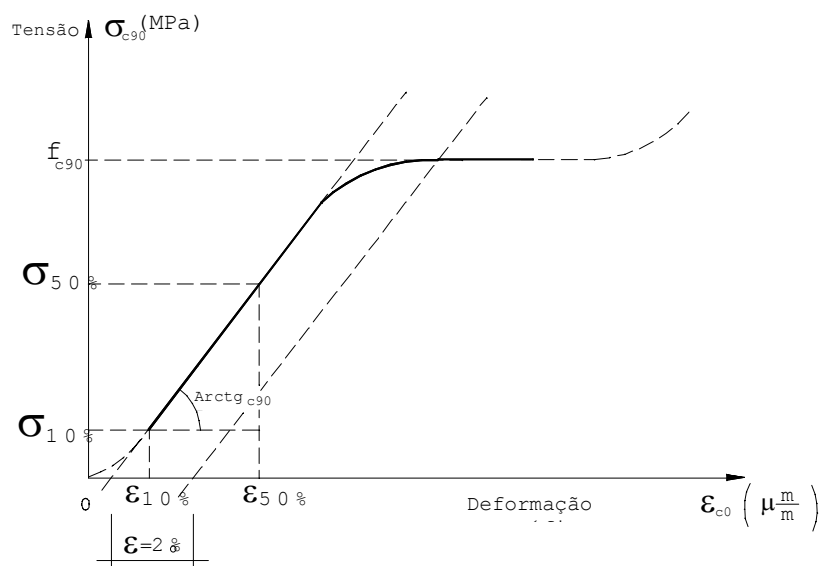


Figura 3 - Diagrama tensão x deformação específica para determinação da resistência e da rigidez da madeira na direção normal às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A rigidez da madeira na direção normal às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, referente ao terceiro ciclo de carregamento, como indicado na Figura 3.

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade ( $E_{c90}$ ), dado em MPa, deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação específica, definida pelos pontos  $(\sigma_{10\%}, \varepsilon_{10\%})$  e  $(\sigma_{50\%}, \varepsilon_{50\%})$ , correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão normal às fibras, determinada no ensaio, sendo dado pela expressão 1:

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (1)$$

### 3.1.2. Compressão Paralela às Fibras:

As dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5 \text{ cm}$ ,  $b = 5 \text{ cm}$  e  $h = 15 \text{ cm}$ , representados pela Figura 4.

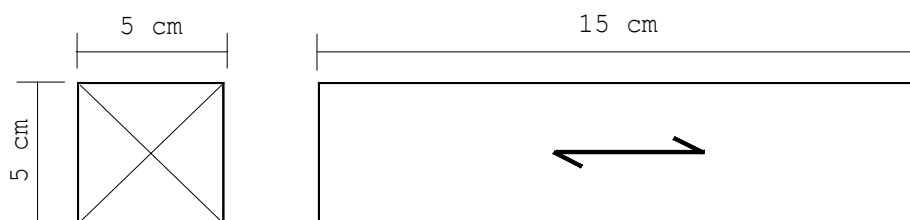


Figura 4 - Corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{wc,0}$  ou  $f_{c0}$ ) em MPa é dada pela expressão 2:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,\max}}{A} \quad (2)$$

Os corpos-de-prova devem ser colocados na prensa com relógios em pelo menos duas faces opostas dos mesmos, sendo de 10 cm a distância entre os respectivos pontos de fixação.

Deve-se realizar o carregamento de um corpo-de-prova de referência e levá-lo à ruptura para se estimar a resistência da amostra ( $f_{c0,est}$ ). Em seguida, nos demais corpos-de-prova, são realizados dois ciclos de carregamento prévios e um ciclo de carregamento final, de acordo com o apresentado no diagrama de carregamento da Figura 2.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade, obtido no trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, entre os pontos 71 e 85, como mostrado na Figura 5.

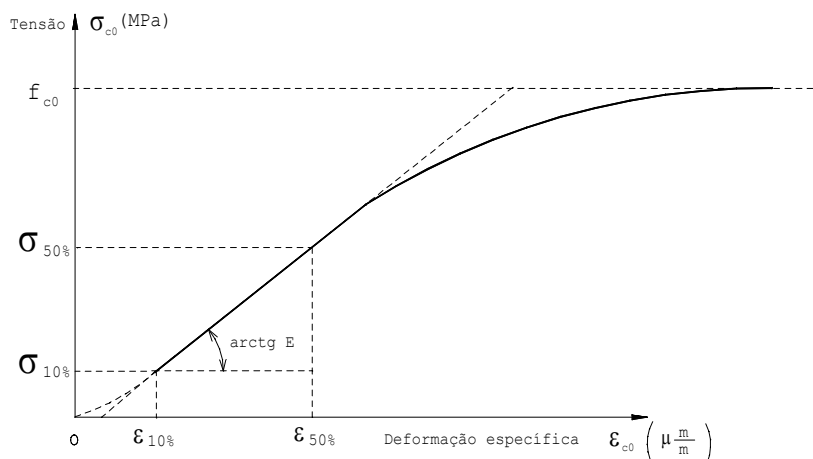


Figura 5 - Diagrama tensão deformação específica para determinação da rigidez à compressão paralela às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade ( $E_{c0}$ ) em MPa deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, definida pelos pontos  $(\sigma_{10\%}, \epsilon_{10\%})$  e  $(\sigma_{50\%}, \epsilon_{50\%})$ , correspondentes respectivamente a 10%

e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, determinada no ensaio, sendo dada pela expressão 3:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3)$$

### 3.1.3. Flexão Estática:

As dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser:  $b = 5 \text{ cm}$ ,  $h = 5 \text{ cm}$  e  $l = 115 \text{ cm}$ , onde o vão livre entre apoios é equivalente a 21 vezes a altura, representadas pela Figura 6.

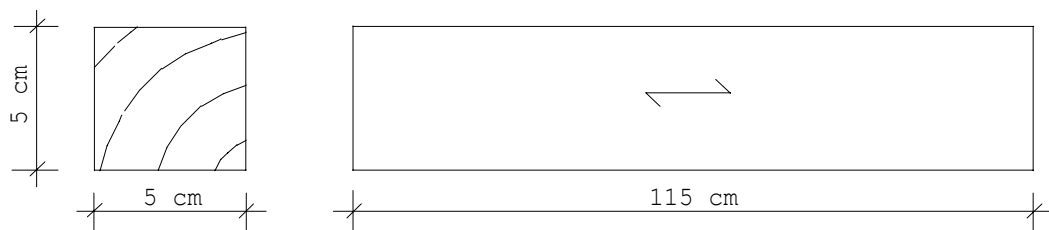


Figura 6 – Corpo-de-prova para ensaio de flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A resistência convencional ( $f_M$ ) em MPa é dada pela expressão 4:

$$f_M = \frac{M}{W} \quad (4)$$

que é equivalente a

$$f_M = \frac{\frac{P.l}{6}}{b.h^2} \quad (5)$$

Deve-se realizar o carregamento de um corpo-de-prova de referência e levá-lo à ruptura, para se estimar a resistência da amostra ( $f_{M,est}$ ). Em seguida, nos demais corpos-de-prova, são realizados dois ciclos de carregamento prévios e um

ciclo de carregamento final, de acordo com o apresentado no diagrama de carregamento da Figura 7.

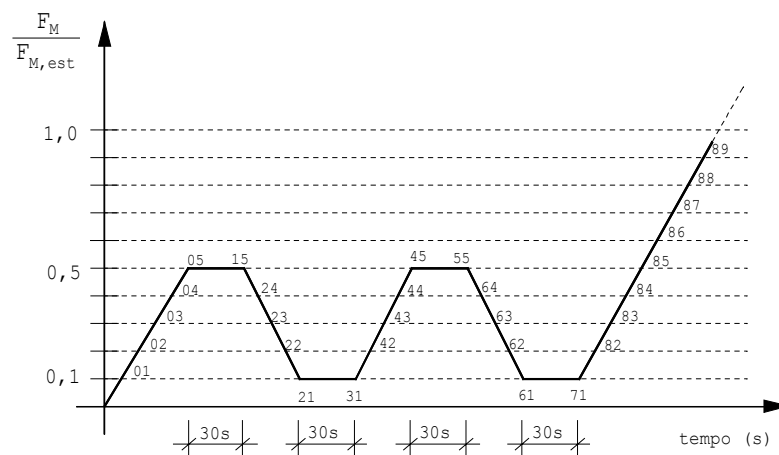


Figura 7 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão estática. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama força x deslocamento, entre os pontos 71 e 85, como indica a Figura 8.

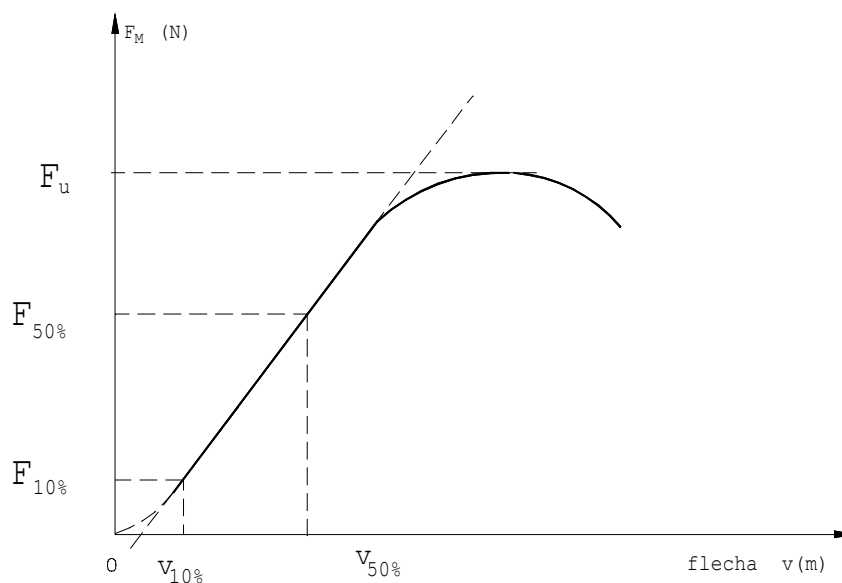


Figura 8 - Diagrama força aplicada x flecha na flexão. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

Para esta finalidade, o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) em MPa deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva força aplicada x flecha no meio do vão (Figura 8), definida pelos pontos ( $F_{10\%}; V_{10\%}$ ) e ( $F_{50\%}; V_{50\%}$ ), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da força máxima, determinada no ensaio, sendo dada pela expressão 6:

$$E_M = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%})L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%})4bh^3} \quad (6)$$

### 3.1.4. Tração Paralela às Fibras:

As dimensões nominais do corpo-de-prova devem ser  $a = 0,7$  cm,  $b = 5$  cm e  $h \geq 35$  cm, representadas na Figura 9.

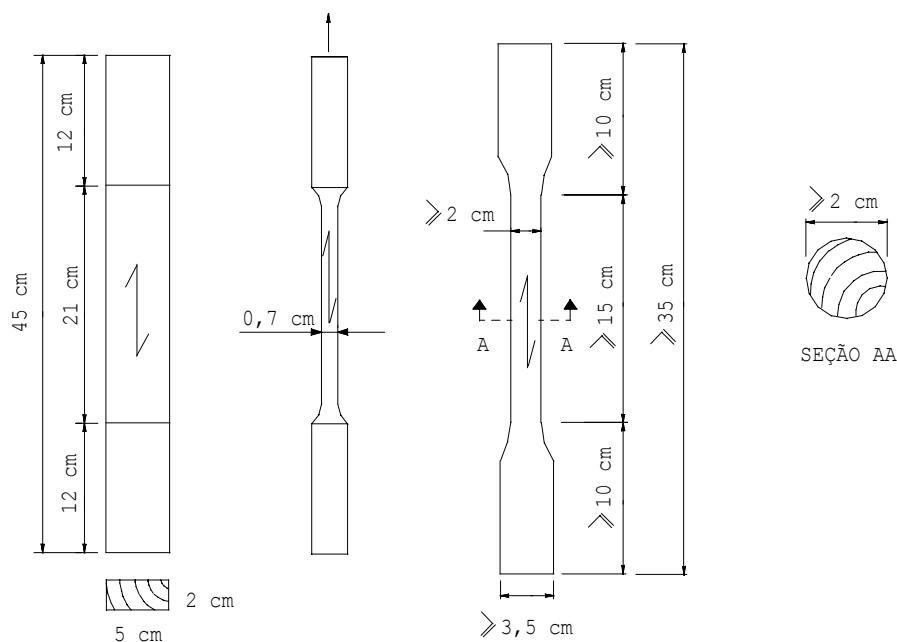


Figura 9 - Corpos-de-prova para ensaios de tração paralela às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

A resistência ( $f_{t0}$ ) em MPa é calculada pela expressão 7:

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,\max}}{A} \quad (7)$$

Deve-se realizar o carregamento de um corpo-de-prova de referência e levá-lo à ruptura para se estimar a resistência da amostra ( $f_{t0,est}$ ). Em seguida, nos demais corpos-de-prova, são realizados dois ciclos de carregamento prévios e um ciclo de carregamento final, de acordo com o apresentado no diagrama de carregamento da Figura 10.

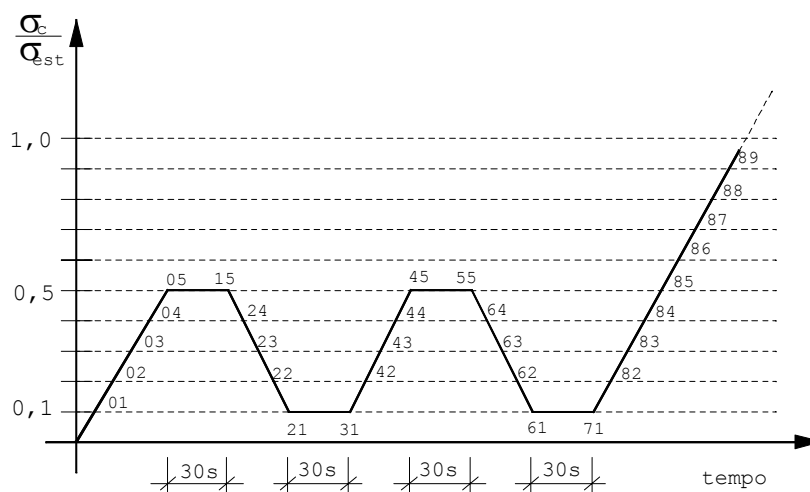


Figura 10 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira à tração paralela às fibras. Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

Os corpos-de-prova devem ser colocados na prensa com relógios em pelos menos duas faces opostas dos mesmos, sendo que 10 cm a distância entre os respectivos pontos de fixação.

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras, obtida pelo ensaio de tração paralela às fibras, é caracterizada pelo seu módulo de elasticidade, obtido no trecho linear do diagrama tensão x deformação específica, entre os pontos 71 e 85, como indica a Figura 11.



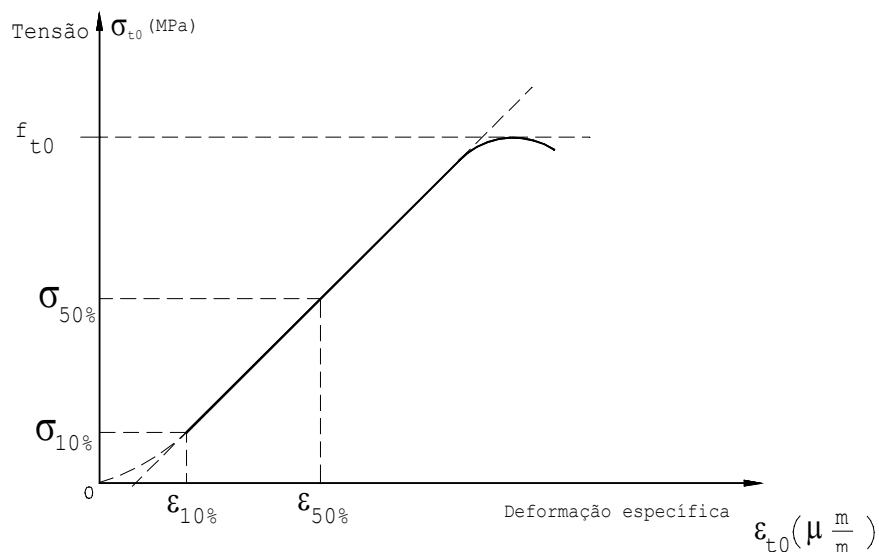


Figura 11 - Diagrama tensão x deformação específica na tração paralela às fibras.  
Fonte: ABNT-NBR 7190:1997, Anexo B.

O módulo de elasticidade ( $E_{t0}$ ) em MPa deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação específica (Figura 11), definida pelos pontos  $(\sigma_{10\%}, \varepsilon_{10\%})$  e  $(\sigma_{50\%}, \varepsilon_{50\%})$ , correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à tração paralela às fibras, determinada no ensaio, sendo dada pela expressão 8:

$$E_{t0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (8)$$

### 3.2. Outros Documentos Normativos

Neste item estão apresentados, sumariamente, os procedimentos de ensaio para a caracterização da resistência e rigidez da madeira na compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras recomendados pelos documentos normativos da L'Association Française de Normalisation (AFNOR - França), American Society for Testing and Materials (ASTM - EUA), Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT- países

sul-americanos), International Standard Organization (ISO - países europeus), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR 6230, antigo MB-26 - Brasil) e European Committee for Standardization (CEN – países europeus).

### 3.2.1. Compressão Normal às Fibras

#### 3.2.1.1. ASTM D-143

Segundo a ASTM D-143 (1982), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5$  cm,  $b = 5$  cm e  $h = 15$  cm. O arranjo para o ensaio está representado na Figura 12.

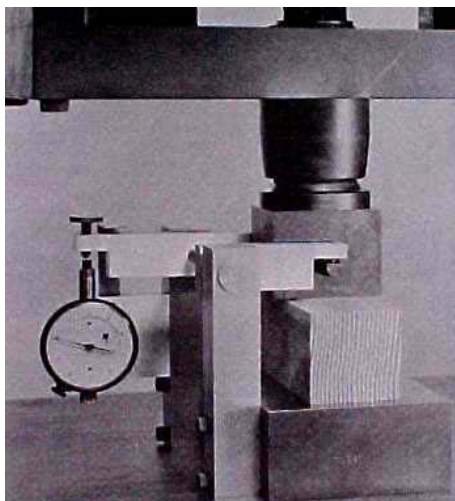


Figura 12 – Ensaio de compressão normal às fibras e posicionamento do corpo-de-prova no equipamento. Fonte: ASTM D 143 – 52.

A força deve ser aplicada uniformemente, de modo a produzir deformação de 0,03 cm/min, através de uma placa metálica de 5 cm de largura, localizada na superfície superior do corpo-de-prova, a iguais distâncias das extremidades. Mede-se a deformação entre as superfícies carregadas. As curvas tensão x deformação podem ser obtidas para todos os corpos-de-prova, acima de 0,25 cm de compressão, depois que o teste é descontinuado.

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

### 3.2.1.2. COPANT R-466

Segundo a COPANT R-466 (1973), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5 \text{ cm}$ ,  $b = 5 \text{ cm}$  e  $h = 15 \text{ cm}$ .

A força deve ser aplicada, até alcançar intensidade superior a 2000 kgf, por uma prensa com duas placas, uma fixa e outra móvel, e uma válvula ou mecanismo que permita regular a velocidade linear da placa móvel.

A velocidade do ensaio deve ser de 0,03 mm/min e o mesmo é realizado até que a deformação atinja 2,5 mm. Traça-se uma curva sobre a qual se determina a força no limite de proporcionalidade e, depois, a força máxima no ponto onde a deformação é de 2,5 mm.

São calculadas a resistência no limite de proporcionalidade (RLP) e a resistência máxima (RUM), dadas pelas expressões 9 e 10, respectivamente:

$$RLP = \frac{P_l}{A} \quad (9)$$

e

$$RUM = \frac{P_{2,5}}{A} \quad (10)$$

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

### 3.2.1.3. ISO 3132

Segundo a ISO 3132 (1975), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 20 \text{ mm}$ ,  $b = 20 \text{ mm}$  e  $h = 30 \text{ a } 60 \text{ mm}$ .

O corpo-de-prova é colocado em um equipamento que possui duas placas de aço alinhadas, cujas superfícies esféricas proporcionam distribuição uniforme da força na extremidade superior do corpo-de-prova. A velocidade do carregamento é uniforme de tal forma que a ruptura ocorra entre 1,5 a 2,0 minutos.

A força correspondente ao limite de resistência será determinada no diagrama de compressão normal às fibras na ordenada do ponto onde a tangente do ângulo formado pela tangente a curva com o eixo da carga é 50% maior do que seu valor na região linear do diagrama.

A resistência última convencional ( $\sigma_{yW}$ ) em 0,1 MPa e a W% de umidade é calculada pela expressão 11:

$$\sigma_{yW} = \frac{P}{A} \quad (11)$$

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

#### 3.2.1.4. CEN 1193

Segundo a CEN 1193 (1995), as dimensões do corpo-de-prova devem ser  $a = 70$  mm,  $b = 45$  mm e  $h = 90$  mm.

O corpo-de-prova deve ser colocado entre as placas da máquina e a força  $F$  deve ser aplicada centricamente, com precisão de 1%, a uma velocidade constante e ajustada até que a força máxima  $F_{c,90,max,est}$ , em N, seja alcançada dentro de  $300 \pm 120$  s.

A resistência à compressão normal às fibras ( $f_{c90}$ ) em MPa é calculada pela expressão 12:

$$f_{c90} = \frac{F_{c,90,max}}{a.b} \quad (12)$$

A determinação de  $F_{c,90,max}$  é realizada através dos seguintes passos: estima-se o seu valor, traça-se a curva tensão x deformação, calculam-se os valores de  $0,1 F_{c,90,max}$  e de  $0,4 F_{c,90,max}$  e determina-se onde estes dois pontos interceptam a curva (Figura 13).

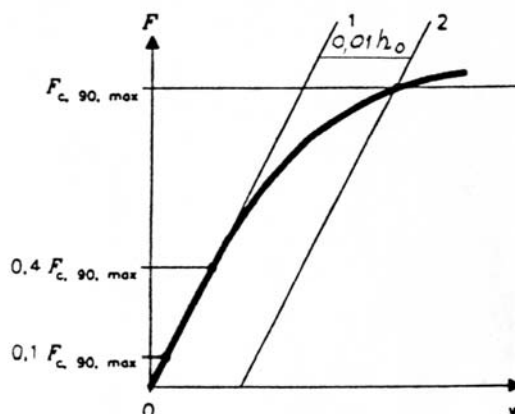


Figura 13 – Diagrama de força x deformação no ensaio de compressão normal às fibras. Fonte: CEN 1193.

Por estes dois pontos traça-se a reta 1 e, paralelamente, a reta 2, de maneira que estas distem o equivalente a uma deformação de  $0,01h_0$ . O ponto onde a reta 2 intercepta a curva determina o valor de  $F_{c,90, max}$ . Se este valor for menor que 5% de  $F_{c,90, max, est}$ , pode ser usado para determinar a resistência à compressão. Se isto não ocorrer, deve-se repetir o procedimento até que se atenda a esta especificação.

O módulo de elasticidade ( $E_{c90}$ ), em MPa, pode ser determinado através destas mesmas recomendações e é calculado de acordo com a expressão 13:

$$E_{c90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) \cdot h_0}{(w_{40} - w_{10}) \cdot b \cdot a} \quad (13)$$

Não são citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

### **3.2.2. Compressão Paralela às Fibras:**

#### **3.2.2.1. AFNOR B 51-077**

Segundo a AFNOR B 51-077 (1942), as dimensões nominais do corpo-de-prova devem ser  $a = 20$  mm,  $b = 20$  mm e  $h = 60$  mm.

A força deve ser aplicada com a velocidade contínua de modo a se obter uma tensão de 200 a 300 kgf/cm<sup>2</sup> por minuto.

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

#### **3.2.2.2. ASTM D-143**

Segundo a ASTM D-143 (1982), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5$  cm,  $b = 5$  cm e  $h = 20$  cm.

A força deve ser aplicada continuamente, de modo a se ter deformação de 0,00762 cm/cm do comprimento do corpo-de-prova por min. As curvas tensão x deformação podem ser obtidas para todos os corpos-de-prova acima de um comprimento que não exceda 15 cm.

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

#### **3.2.2.3. COPANT R-464**

Segundo a COPANT R-464 (1972), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5$  cm,  $b = 5$  cm e  $h = 20$  cm.

Coloca-se o corpo-de-prova na prensa, que possui duas placas, uma fixa e outra móvel, e capaz de produzir forças de intensidade superior a 2000 kgf.

Dispõem-se os extensômetros para se medir a deformação, com uma distância de 15 cm entre seus pontos de fixação.

É aplicada uma força contínua, que produza deformação de 0,6 mm/min na face de seção transversal do corpo-de-prova, levando-se o mesmo à ruptura e tomando-se nota dos valores das forças e dos deslocamentos correspondentes para se construir o gráfico tensão x deformação.

A seguir, são calculadas a resistência máxima (RUM) em kgf/cm<sup>2</sup> e a resistência no limite de proporcionalidade (RLP) em kgf/cm<sup>2</sup> dadas, respectivamente, pelas expressões (14) e (15):

$$RUM = \frac{P_R}{A} \quad (14)$$

e

$$RLP = \frac{P_l}{A} \quad (15)$$

O módulo de elasticidade (MOE) em kgf/cm<sup>2</sup> é dado pela expressão 16:

$$MOE = \frac{P_l \cdot c}{A \cdot d_l} \quad (16)$$

Não são citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

#### **3.2.2.4. ISO 3787**

Segundo a ISO 3787 (1976), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser a = 20 mm, b = 20 mm e h = 30 a 60 mm.

Aplica-se a força no corpo-de-prova utilizando aparelho que proporcione carregamento uniforme. Este consiste de uma prensa com duas placas de aço

alinhadas, cujas superfícies esféricas permitem distribuição uniforme da força na extremidade superior dos corpos-de-prova. O carregamento é realizado de modo que o corpo-de-prova tenha ruptura entre 1,5 e 2,0 minutos. Determina-se  $F_{C0,max}$  em N.

A tensão ( $\sigma_W$ ) em 0,5 MPa é calculada pela expressão 17:

$$\sigma_W = \frac{P_R}{A} \quad (17)$$

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

### 3.2.2.5. ABNT - NBR 6230

Segundo a ABNT-NBR 6230 (1940), as dimensões nominais dos corpos-de-prova deveriam ser  $a = 2$  cm,  $b = 2$  cm e  $h = 3$  cm. O número de corpos-de-prova devia ser igual a 80, sendo 40 para ensaio de madeira seca ao ar e 40 para ensaio de madeira verde. Rompiam-se os corpos-de-prova na prensa com aumento de força na razão de  $100 \text{ kg/cm}^2$  por minuto. A tensão de ruptura ( $\sigma_R$ ) em  $\text{kgf/cm}^2$  era dada pela expressão 18:

$$\sigma_R = \frac{F}{A} \quad (18)$$

O módulo de elasticidade (E), em  $\text{kgf/cm}^2$ , era determinado pela média dos resultados do ensaio de doze corpos-de-prova com dimensões  $a = 6$  cm,  $b = 6$  cm e  $h = 18$  cm, e dado pela expressão 19:

$$E = \frac{P_l}{d_l} \quad (19)$$

Não eram citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.



### 3.2.2.6. CEN 408

Segundo a CEN 408 (1995), os corpos-de-prova devem ter comprimento nominal (h) equivalente a seis vezes a menor dimensão (a ou b) da seção transversal, com medidas em mm.

A força deve ser aplicada centricamente, a uma velocidade constante até que a força máxima seja alcançada dentro de  $300 \pm 120$  s, utilizando um conjunto de aparelhos que possuam sensibilidade de leitura de 1%.

A resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) em N é dada pela expressão 20:

$$f_{c0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (20)$$

Para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_{c0}$ ), em MPa, utilizam-se estas mesmas recomendações desde que a velocidade constante de aplicação da força não ultrapasse  $0,00005h$  mm/s. A deformação será medida acima de um comprimento padrão de quatro vezes a menor dimensão da seção transversal do corpo-de-prova, através de dois extensômetros. O seu valor é dado pela expressão 21:

$$E_{c0} = \frac{c \cdot (F_2 - F_1)}{A \cdot (w_2 - w_1)} \quad (21)$$

Não são citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

### 3.2.3. Flexão Estática:

#### 3.2.3.1. AFNOR B 51-016

Segundo a AFNOR B 51-016 (1987), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $b = 20$  mm,  $h = 20$  mm e  $l = 360$  mm. Na realização do ensaio, o corpo-de-prova deve ser biapoiado, com a distância de 320 mm entre os apoios, e os dois aplicadores de força devem ser distanciados de  $d = 160$  mm. Os apoios e os aplicadores de força têm o formato cilíndrico com diâmetro nominal de 30 mm.

Efetua-se um ensaio prévio para verificar se, no intervalo considerado, a curva força x deslocamento é linear. Se isto não ocorrer, modificam-se as forças mínima e máxima com a finalidade de efetuar as medidas na fase elástica.

Colocam-se os dois aplicadores de força em contato com a face superior do corpo-de-prova e carrega-se até  $P_1 = 600$  N em  $30 \pm 10$  s, à velocidade constante de aplicação de força. Descarrega-se, nas mesmas condições, até  $P_2 = 200$  N. Repetem-se duas vezes esses ciclos de carregamento e descarregamento.

Mede-se o deslocamento em menos de 10s quando a carga vale 200N e quando vale 600N. Medem-se os deslocamentos máximo  $f_1$  e mínimo  $f_2$  durante os três ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos.

O valor do módulo de elasticidade ( $E_M$ ) em MPa é dado pela expressão 22:

$$E_M = \frac{3.P_M.(l-d).m^2}{8.b.h^3.f} \quad (22)$$

#### 3.2.3.2. ASTM D-143

Segundo a ASTM D-143 (1982), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 5$  cm,  $b = 5$  cm e  $h = 76$  cm. Estes são biapoiados, sendo que a

distância  $l$  entre os apoios deve ser de 70 cm. A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 2,5 mm/min. Em ao menos um terço dos ensaios, a curva pode ser continuada até 15 cm de deflexão, ou até que o corpo-de-prova falhe por suportar uma força de magnitude igual ou superior a 90 kgf.

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

### 3.2.3.3. COPANT R-555

Segundo a COPANT R-555 (1973), as dimensões nominais do corpo-de-prova devem ser  $b = 5$  cm,  $h = 5$  cm e  $l = 15h$ .

O ensaio é realizado com o corpo-de-prova biapoiado recebendo uma força aplicada com velocidade constante que proporcione deslocamento de 2,5 mm/min no ponto médio do vão. A distância  $l$  entre os apoios é igual a 14 vezes a altura.

Através de relógios comparadores, medem-se os deslocamentos ( $f_c$ ) produzidos no ponto médio do corpo-de-prova para forças progressivas, com intervalos de tempo convenientemente escolhidos, de modo que com as leituras registradas possa se efetuar a determinação do limite de proporcionalidade ( $P_I$ ) no gráfico força x deslocamento. Anota-se o valor da força máxima ( $P_R$ ) obtida no ensaio.

No gráfico força x deslocamento,  $P_I$  é o ponto extremo da parte retilínea, correspondendo à força no limite de proporcionalidade.

Calculam-se a tensão no limite de proporcionalidade ( $ELP_f$ ) em kgf/cm<sup>2</sup> e a tensão máxima ( $EM_f$ ) em kgf/cm<sup>2</sup>, dadas respectivamente pelas expressões 23 e 24:

$$ELP_f = \frac{3.P_I.l}{2.b.h^2} \quad (23)$$

e

$$EM_f = \frac{3.P_R.l}{2.b.h^2} \quad (24)$$

Para se calcular o módulo de elasticidade ( $MOE_f$ ) em  $\text{kgf/cm}^2$  utiliza-se a expressão 25:

$$MOE_f = \frac{P_l.l^3}{4.f_c.b.h^3} \quad (25)$$

Não são citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

#### 3.2.3.4. ISO 3349 e 3133

Segundo as ISO 3349 e 3133 (1975), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 20$  mm,  $b = 20$  mm e  $h = 300$  a  $380$  mm. No ensaio, o corpo-de-prova deve ser biapoiado e a força deve ser introduzida por dois aplicadores com velocidade constante, de modo que ocorra a ruptura entre 1,5 e 2,0 min. A distância  $l$  entre os apoios é de 240 a 320 mm e entre os pontos de aplicação das forças igual a  $1/3$  ou  $1/2$  da distância entre os apoios. O raio de curvatura dos suportes é de 30 mm.

Aplica-se a força com velocidade constante até que a superfície do corpo-de-prova atinja a tensão de 18 MPa em 30 segundos. Quando se atinge 18 MPa, a força aplicada é reduzida até se alcançar 5 MPa, então aumenta-se a força a 18 MPa e diminui-se novamente a 5 MPa. A partir deste ponto as forças são aplicadas com incrementos iguais no tempo e, nos primeiros quatro incrementos, são registrados os respectivos deslocamentos.

A resistência convencional última ( $\sigma_{bw}$ ) em MPa e a  $W\%$  de umidade, é dada pela expressão 26:

$$\sigma_{bw} = \frac{3.P_R.l}{2.b.h^2} \quad (26)$$

O módulo de elasticidade ( $E_w$ ) em 0,1 GPa é dado pelas expressões 27 e 28:

a) Para distância entre os pontos de aplicação de força igual a 1/3 do vão:

$$E_w = \frac{P_w \cdot l^3}{36 \cdot b \cdot h^3 \cdot f_w} \quad (27)$$

b) Para distância entre os pontos de aplicação das forças de 1/2 do vão:

$$E_w = \frac{3 \cdot P_w \cdot l^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot f_w} \quad (28)$$

### 3.2.3.5. ABNT - NBR 6230

Segundo a ABNT-NBR 6230 (1940), as dimensões nominais dos corpos-de-prova deveriam ser  $b = 2$  cm,  $h = 2$  cm e  $l = 30$  cm, com número total igual a 80, sendo 40 destes de madeira verde e os outros 40 de madeira seca ao ar.

O corpo-de-prova seria biapoado e os apoios de aço teriam forma cilíndrica com raio igual a 1,5 cm. Aplicar-se-ia a força tangencialmente aos anéis de crescimento por um cutelo central, com o mesmo formato dos apoios. A distância entre os apoios seria de 24 cm e a velocidade da aplicação da força tal que a ruptura do corpo-de-prova ocorresse em 2 minutos.

A resistência específica ( $\sigma_E$ ) em  $\text{kgf/cm}^2$  seria calculada pela expressão 29:

$$\sigma_E = \frac{M}{W} \quad (29)$$

Ou calculada pela expressão 30:

$$\sigma_E = \frac{3 \cdot P_R \cdot l}{2 \cdot b^3} \quad (30)$$

O módulo de elasticidade ( $E_w$ ) em  $\text{kgf/cm}^2$  seria determinado pelo ensaio feito com doze corpos-de-prova com dimensões  $b = 6$  cm,  $h = 6$  cm e  $l = 100$  cm. Neste caso o vão livre entre os apoios deveria ser de 84 cm, o raio do cutelo central igual a 85 cm e  $E_w$  calculado através da expressão 31:

$$E_w = \frac{P_l \cdot l^3}{4 \cdot f_c \cdot b \cdot h^3} \quad (31)$$

Não eram citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

### 3.2.3.6. CEN 408

Segundo a CEN 408 (1995), os corpos-de-prova devem ter comprimento mínimo ( $l$ ) de dezenove vezes a altura ( $h$ ) da seção transversal, medidos em mm.

A força deve ser aplicada simetricamente em dois pontos sobre o corpo-de-prova, cujo vão livre mínimo é de dezoito vezes  $b$ , conforme indicado na Figura 14. A aplicação deve ter precisão de 1% e a velocidade constante, até que se atinja a força máxima dentro de  $300 \pm 120$  s.

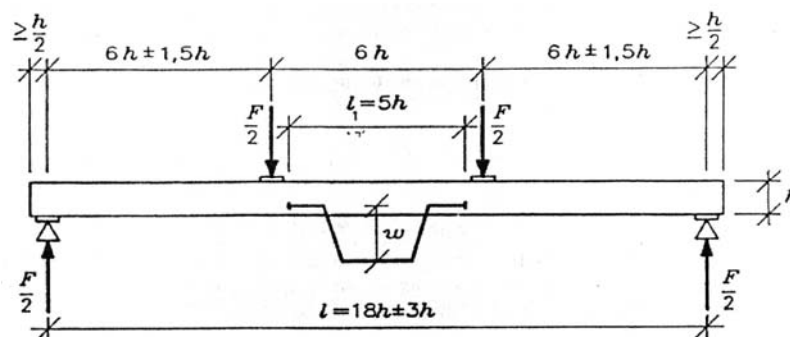


Figura 14 – Arranjo do ensaio de flexão estática para a determinação do valor do módulo de elasticidade. Fonte: CEN 408.

A resistência convencional à flexão ( $f_M$ ) em MPa é dada pela expressão 32:

$$f_M = \frac{a \cdot F_{\max}}{2 \cdot W} \quad (32)$$

Estas mesmas recomendações devem ser seguidas para o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_M$ ), dado em MPa, desde que a velocidade de carregamento não seja maior que  $0,003b$  mm/s. As deformações devem ser medidas no centro do

corpo-de-prova, num trecho de comprimento igual a cinco vezes a dimensão b. O seu valor é dado pela expressão 33:

$$E_M = \frac{a.d^2.(F_2 - F_1)}{16.I.(w_2 - w_1)} \quad (33)$$

### 3.2.4. Tração Paralela às Fibras:

#### 3.2.4.1. AFNOR B 51-018

Segundo a AFNOR B 51-018 (1988), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser a = 20 mm, b = 20 mm e h = 350 mm. Colocam-se os extensômetros paralelamente ao eixo de simetria do corpo-de-prova e realiza-se um ensaio preliminar. Medem-se as deformações dentro do intervalo de forças P<sub>1</sub> = 500N e P<sub>2</sub> = 1500N, desde que a relação tensão x deformação nesse intervalo seja linear. Se isto não ocorrer modifica-se um desses dois limites de forma a efetuar as medidas dentro da fase elástica.

Aumenta-se a força de tração à velocidade constante de maneira a atingir o valor de P<sub>2</sub> entre 20 e 40 s. Depois, diminui-se a força de tração nas mesmas condições até atingir o valor de P<sub>1</sub>. Mede-se a deformação ε<sub>1</sub> em P<sub>1</sub> em menos de 10 s. Aumenta-se novamente a força de tração à velocidade constante de maneira a alcançar o valor de P<sub>2</sub> entre 20 e 40 s. Mede-se a deformação ε<sub>2</sub> correspondente a P<sub>2</sub>.

O módulo de elasticidade (E<sub>tr,H</sub>) em MPa é dado pela expressão 34:

$$E_{tr,H} = \frac{P_T}{a.b.\varepsilon_T} \quad (34)$$

### 3.2.4.2. ASTM D-143

Segundo a ASTM D-143 (1982), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser  $a = 2,5$  cm,  $b = 2,5$  cm e  $h = 45$  cm.

Esses são fixados em garras especiais e as deformações lidas com precisão 0,0002 cm. A força deve ser aplicada a uma velocidade constante de 1 mm/min.

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

### 3.2.4.3. COPANT R-742

Segundo a COPANT R-742 (1973), as dimensões nominais do corpo-de-prova devem ser  $a = 4,5$  cm,  $b = 25$  cm e  $h = 450$  cm. O ensaio é realizado com o corpo-de-prova submetido a uma prensa que possui duas garras, sendo uma fixa e a outra móvel, que possibilite ter sua velocidade regulada. Para medir as deformações decorrentes do ensaio, são utilizados relógios comparadores de sensibilidade de 0,0002 mm. Os corpos-de-prova utilizados devem estar a 12% de umidade. A velocidade do carregamento é de  $1$  mm/min  $\pm 0,25$  mm/min.

A força aplicada é aumentada progressivamente até que haja a ruptura do corpo-de-prova. Traça-se, para cada corpo-de-prova, a curva tensão x deformação. Determinam-se a força no limite de proporcionalidade ( $P_1$ ), a força na ruptura ( $P_R$ ) e a força correspondente à deformação  $d_1$  abaixo do limite de proporcionalidade ( $P_d$ ), todas medidas em N.

São calculadas a tensão máxima (EM) em  $N/cm^2$  e a tensão no limite de proporcionalidade (ELP), em  $N/cm^2$ , dadas, respectivamente, pelas expressões 35 e 36:

$$EM = \frac{P_R}{A} \quad (35)$$

e



$$ELP = \frac{P_l}{A} \quad (36)$$

Para se calcular o módulo de elasticidade (MOE) em N/cm<sup>2</sup> utiliza-se a expressão 37:

$$MOE = \frac{P_d \cdot c}{A \cdot d_l} \quad (37)$$

Não são citados ciclos de carregamento para o cálculo do módulo de elasticidade.

#### 3.2.4.4. ISO 3345

Segundo a ISO 3345 (1975), as dimensões nominais dos corpos-de-prova devem ser a = 5 a 10 mm, b = 10 a 20 mm e h = 50 a 100 mm.

No ensaio, as braçadeiras da máquina são colocadas no corpo-de-prova à distância de 20 a 25 mm e a taxa de carregamento da máquina é constante de modo que a ruptura ocorra entre 1,5 e 2 min. Registra-se o valor da força de ruptura.

A resistência ( $\sigma_w$ ) em MPa e a W% de umidade é dada pela expressão 38:

$$\sigma_w = \frac{P_R}{A} \quad (38)$$

Não se faz menção ao cálculo do valor do módulo de elasticidade.

#### 3.2.4.5. CEN 408

Segundo a CEN 408 (1995), os corpos-de-prova deverão ter comprimento (h) suficiente para providenciar um ensaio seguro através das garras da máquina, distanciadas de, no mínimo, nove vezes a maior dimensão da seção transversal, medida em mm.

Os corpos-de-prova deverão ser carregados utilizando aparelhos de garras, a uma velocidade constante até alcançar a força máxima dentro de  $300 \pm 120$  s. A resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ), em MPa, é dada pela expressão 39:

$$f_{t0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (39)$$

O módulo de elasticidade ( $E_{t0}$ ), em MPa, é obtido sob estas mesmas condições, desde que a velocidade de deformação não seja maior que 0,00005 mm/s, e seu valor é dado pela expressão 40:

$$E_{t0} = \frac{c.(F_2 - F_1)}{A.(w_2 - w_1)} \quad (40)$$

### **3.3. O estudo da equivalência estatística entre os módulos de elasticidade longitudinal de espécies tropicais brasileiras obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática**

Neste item serão analisadas as recomendações para a caracterização da rigidez da madeira, de acordo com a NBR 7190:1997, Anexo B, bem como os resultados dos estudos já realizados em relação à comparação dos valores dos módulos de elasticidade longitudinal na compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, com espécies tropicais brasileiras.

Segundo a NBR 7190:1997, Anexo B, item 6.3.4, a caracterização da rigidez das madeiras é feita através dos valores dos módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras e à compressão normal às fibras, determinados com pelo menos dois ensaios tanto para caracterização mínima, simplificada ou completa, admitindo-se que os módulos de elasticidade à compressão e à tração paralela às fibras tenham valores equivalentes, ou seja,  $E_{t0} = E_{c0}$ .

Na impossibilidade da realização do ensaio de compressão simples, permite-se avaliar o módulo de elasticidade  $E_{c0}$  por meio de ensaio de flexão. Determina-se, então, por este ensaio, o módulo aparente de elasticidade na flexão, admitindo-se  $E_M = 0,90 E_{c0}$  (para as dicotiledôneas) e  $E_M = 0,85 E_{c0}$  (para as coníferas).

A investigação da relação entre os valores dos módulos de elasticidade da madeira na compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática tem sido realizada por pesquisadores como apresentado a seguir.

Kollmann (1968) afirmou que os módulos de elasticidade na tração, compressão e flexão da madeira são equivalentes. O autor trabalhou com espécies das coníferas.

Rocco Lahr (1983), estudando a variação do módulo de elasticidade aparente ( $E_a$ ) na flexão, em função da relação vão livre-altura da peça ( $l/h$ ), constatou que há equivalência estatística entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras e flexão estática quando  $\frac{l}{h} \geq 21$ . As espécies utilizadas para este resultado foram (onde os números representam o número de corpos-de-prova da amostra considerada): Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*, 35), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*, 33), Jatobá (*Hymenea sp*, 28), e mais quarenta espécies de madeiras escolhidas do Boletim n. 31 do IPT<sup>1</sup>.

Lamarle apud Chahud (1989), concluiu que os módulos de elasticidade na tração paralela às fibras e compressão paralela às fibras na madeira são equivalentes.

Chahud (1989), no estudo da distribuição das tensões normais e um procedimento para se verificar o dimensionamento de peças fletidas considerando-

---

<sup>1</sup> INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Madeiras Nacionais* – Tabela de resultados de ensaios físicos e mecânicos. Separata da 2<sup>a</sup>. ed. do Boletim n. 31. SP, 1956. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Madeiras Nacionais* – Tabela de resultados de ensaios físicos e mecânicos. Tabela complementar ao Boletim n. 31 de 1956. SP, 1964.

se o estado limite referente às tensões normais, mostrou que para o Jatobá (*Hymenea sp*, 10), Cumaru (*Dipteryx odorata*, 4), Garapa (*Apuleia leiocarpa*, 5), Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*, 5) e Castanheira (*Bertholletia excelsa*, 26) os valores dos módulos de elasticidade em ensaios de flexão com  $\frac{l}{h} \geq 21$ , de compressão paralela às fibras e de tração paralela às fibras apresentam valores estatisticamente equivalentes.

O mencionado autor não encontrou tal equivalência para os valores dos módulos de elasticidade desses dois últimos tipos de ensaio para o Cambará (*Erismia uncinatum*, 7). Entretanto, para as seis espécies analisadas em conjunto, ficou mostrado que os valores dos módulos de elasticidade nesses três tipos de ensaio são estatisticamente equivalentes.

Sales (1996), estudando os procedimentos para a definição de classes de resistência para as coníferas e dicotiledôneas, concluiu que os valores dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras e tração paralela às fibras são estatisticamente equivalentes.

As espécies utilizadas para este resultado foram (os números representam o número de corpos-de-prova da amostra considerada): Pinus Caribaea (*Pinus caribaea var. caribaea*, 32), Pinus Bahamensis (*Pinus caribaea var. bahamensis*, 28), Pinus Hondurensis (*Pinus caribaea var. hondurensis*, 20), Pinus Elliottii (*Pinus elliotii var. elliotii*, 98), Pinus Oocarpa (*Pinus oocarpa*, 70) e Pinus Taeda (*Pinus taeda*, 14), representando as coníferas; Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*, 103), Eucalipto Maculata (*Eucalyptus maculata*, 53), Eucalipto Paniculata (*Eucalyptus paniculata*, 29), Eucalipto Propinqua (*Eucalyptus propinqua*, 63), Eucalipto Saligna (*Eucalyptus saligna*, 66), Eucalipto Tereticornis (*Eucalyptus tereticornis*, 29), Eucalipto Urophylla (*Eucalyptus urophylla*, 84), Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*, 15), Angelim Ferro (*Hymenolobium sp*, 20), Angelim Pedra

(*Hymenolobium petraeum*, 39), Angelim Pedra Verdadeiro (*Dinizia excelsa*, 12), Branquilho (*Terminalia sp*, 10), Cafearana (*Andira sp*, 11), Canafistula (*Cassia ferruginea*, 12), Casca Grossa (*Vochysia sp*, 31), Castelo (*Gossypiospermum praecox*, 12), Cedro Amargo (*Cedrella odorata*, 21), Cedro Doce (*Cedrella sp*, 10), Champanhe (*Dipteryx odorata*, 12), Cupiúba (*Goupia glabra*, 33), Cutiúba (*Qualea paraensis*, 13), Garapa Roraima (*Apuleia leiocarpa*, 12), Guaiçara (*Luetzelburgia sp*, 11), Guarucaia (*Peltophorum vogelianum*, 12), Ipê (*Tabebuia serratifolia*, 22), Jatobá (*Hymenea sp*, 19), Louro Preto (*Ocotea sp*, 21), Maçaranduba (*Manilkara sp*, 12), Mandioqueira (*Qualea sp*, 16), Oiticica Amarela (*Clarisa racemosa*, 12), Oiuchu (*Inga sp*, 10), Quarubarana (*Erisma uncinatum*, 11), Sucupira (*Diploptropis sp*, 12) e Tatajuba (*Bagassa guianensis*, 10), representando as dicotiledôneas.

Santos; Ballarin (2002) concluíram que a relação  $E_M/E_{C0}$  varia entre 0,75 e 0,78 para as espécies Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*, 64), Eucalipto Saligna (*Eucalyptus saligna*, 27) e Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*, 50), sendo que os números representam a quantidade de corpos-de-prova da amostra considerada. As amostras foram retiradas de árvores com idade de 31, 26 e 21 anos, respectivamente.

### **3.4. Conclusão da revisão bibliográfica**

Quanto à realização de ciclos de carregamento no ensaio para determinação do módulo de elasticidade, a análise da bibliografia mostrou que, além da NBR 7190:1997, Anexo B, dentre os documentos normativos investigados, somente a ISO 3349 recomenda três ciclos de carregamento no ensaio de flexão estática e a AFNOR B 51-016 e a B 51-018 recomendam, respectivamente, três ciclos de carregamento para os ensaios de flexão estática e dois ciclos de carregamento para os ensaios de tração paralela às fibras.

Quanto à comparação entre os valores dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática com espécies tropicais brasileiras, a análise da bibliografia mostrou que os estudos já realizados a este respeito não levam a resultados conclusivos.

Deste modo, entende-se que o desenvolvimento do trabalho aqui proposto está adequadamente justificado pelo que foi possível depreender da revisão bibliográfica efetuada.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos utilizados para a comparação entre os módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento dos ensaios de compressão normal e paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, bem como para a comparação dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.

### **4.1. Comparação estatística entre os valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento**

Para calcular os módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento foram realizados, no âmbito do presente trabalho, ensaios de compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, segundo prescrito na NBR 7190:1997, Anexo B, de sete espécies de madeira, com doze corpos-de-prova para cada tipo de ensaio, totalizando quarenta e oito corpos-de-prova para cada espécie.

Estes quatro tipos de ensaio estão ilustrados nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

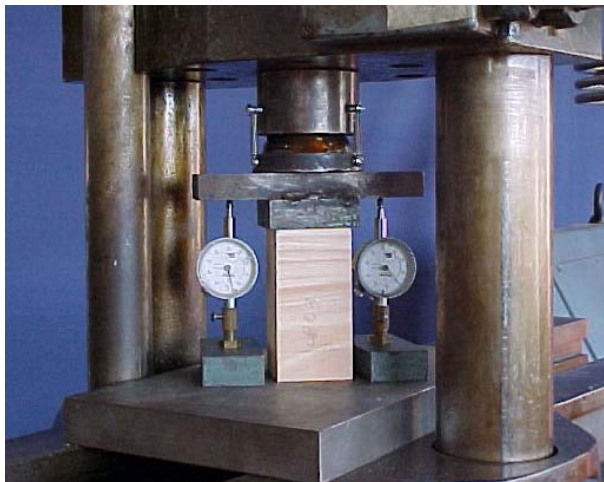


Figura 15 – Ensaio de compressão normal às fibras da madeira

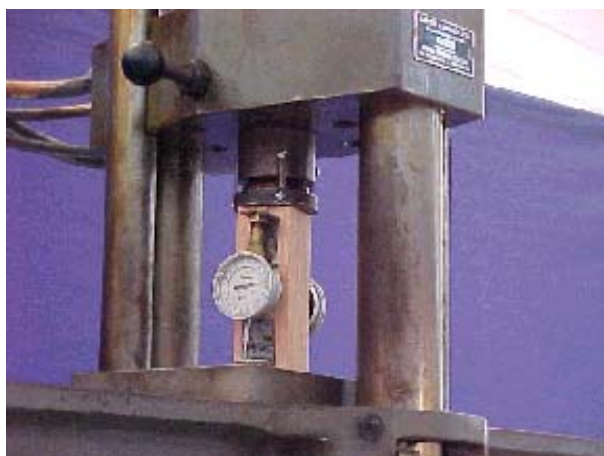


Figura 16 – Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira

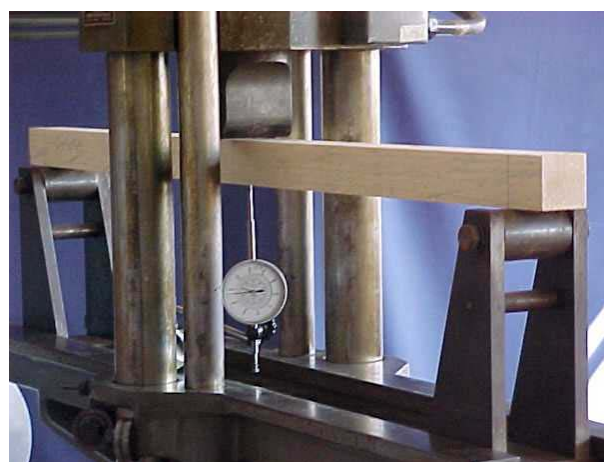


Figura 17 – Ensaio de flexão estática da madeira



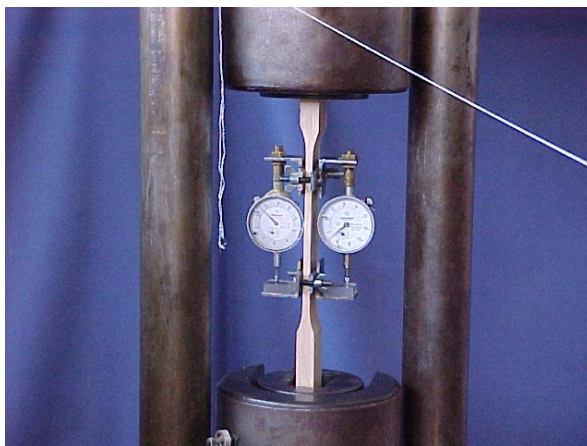


Figura 18 – Ensaio de tração paralela às fibras da madeira

#### 4.1.1. Equipamentos

Os ensaios foram realizados na Máquina Universal AMSLER (Figura 19), capacidade 250 kN, no LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras), do SET (Departamento de Engenharia de Estruturas), da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos), USP.

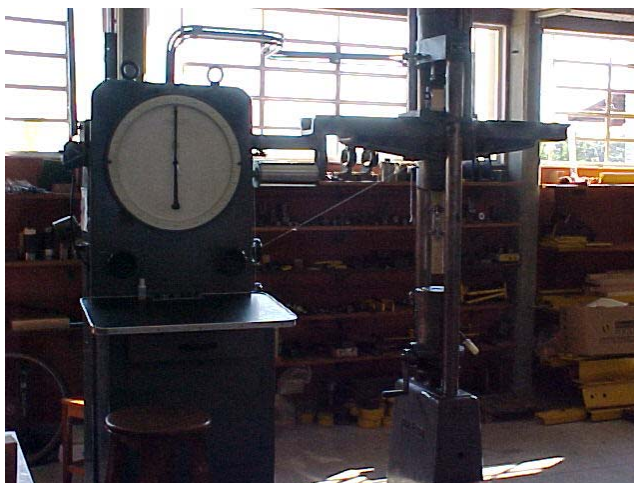


Figura 19 – Máquina Universal AMSLER para ensaios mecânicos

Utilizaram-se relógios comparadores Mitutoyo com sensibilidade de 0,01mm para os ensaios de compressão normal às fibras e flexão estática, e de 0,001 mm para os ensaios de compressão paralela às fibras e tração paralela às fibras.

Para o cálculo dos módulos de elasticidade bem como para as análises estatísticas foi utilizado o software Excel – versão 2000.

#### 4.1.2. Espécies de madeiras

Foram utilizados lotes de sete espécies escolhidas de acordo com a sua densidade e classe de resistência, sendo quatro de dicotiledôneas e três de coníferas. Estas são descritas, de maneira breve, no Anexo I.

A Tabela 1 mostra as espécies utilizadas com o seu nome vulgar, nome científico, classes de resistência, densidades e local de procedência.

Tabela 1 - Nome vulgar, nome científico, classes de resistência, densidades e local de procedência das espécies utilizadas

Nome vulgar	Nome científico	Classe de resistência (MPa)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Procedência
Cambará Rosa	<i>Erisma sp</i>	C20	0,67	Norte de Mato Grosso
Eucalipto Grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	C30	0,70	Telêmaco Borba (PR)
Envira	<i>Xylopi sp</i>	C40	0,90	Norte de Mato Grosso
Champanhe	<i>Dipteryx odorata</i>	C60	1,09	Norte de Mato Grosso
Pinus Caribaea	<i>Pinus caribaea var. cariabaea</i>	C20	0,46	Horto de Itirapina (SP)
Pinus Elliottii	<i>Pinus elliotii var. elliotii</i>	C25	0,60	Horto de Itirapina (SP)
Pinus Hondurensis	<i>Pinus caribaea var. hondurensis</i>	C30	0,62	Horto de Itirapina (SP)

#### 4.1.3. Metodologia estatística

Para análise dos resultados, empregou-se a metodologia descrita a seguir.

Considerem-se os módulos de elasticidade  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  no primeiro, segundo e terceiro ciclos de carregamento, respectivamente, como populações. Estas são

dependentes (correlatas), pois são obtidas a partir do ensaio de um mesmo corpo-de-prova para cada tipo de solicitação. Assim, o método estatístico utilizado para a análise dos resultados é o da comparação de pares.

Neste, através das diferenças individuais entre os valores de duas populações, é gerada uma terceira, a população das diferenças. A partir daí, é calculada a média das diferenças  $\bar{x}_m$  e o seu respectivo intervalo de confiança, dado pela expressão 41 (Berquó, 1981):

$$\bar{x}_m - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{S_\mu}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x}_m + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{S_\mu}{\sqrt{n}} \quad (41)$$

Onde,

$\bar{x}_m$  é a média aritmética amostral das diferenças

$s_m$  é o desvio padrão amostral das diferenças

$n$  é o número de corpos-de-prova que constituem a amostra

$\alpha$  é o nível de confiança

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  é o valor tabelado pela distribuição “t” de Student com n-1 graus de liberdade

e nível de confiança  $\frac{\alpha}{2}$

A análise é feita a partir deste intervalo. Se o zero pertencer ao mesmo, diz-se que as populações podem ser consideradas estatisticamente equivalentes.

Os dados foram tratados pela distribuição “t” de Student com n-1 graus de liberdade, pois 12 corpos-de-prova constituem uma pequena amostra. Utilizando-se esta distribuição pode-se admitir que o desvio padrão das diferenças da amostra  $s_\mu$  é uma estimativa do desvio padrão das diferenças da população  $\sigma$ .

A hipótese  $H_0$  é de que  $E_1=E_2=E_3$ , ou seja, de que os valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento são estatisticamente equivalentes,

considerando  $\alpha=5\%$ . Assim, aceita-se rejeitar  $H_0$  em até cinco por cento dos casos quando ela é verdadeira. Rejeitar  $H_0$  é aceitar  $H_1$  que, neste caso, indica que pelo menos um par de módulos de elasticidade não é equivalente estatisticamente.

Os módulos de elasticidade foram comparados dois a dois,  $E_1$  a  $E_2$ ,  $E_1$  a  $E_3$  e  $E_2$  a  $E_3$ , sendo realizada a diferença entre esses, gerando respectivamente as populações de diferenças  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$ .

Para eliminar a variabilidade inerente ao material, os valores  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  foram divididos pelo valor  $E_1$ , obtendo-se  $E^*_1$ ,  $E^*_2$  e  $E^*_3$ . Também foram comparados dois a dois  $E^*_1$  a  $E^*_2$ ,  $E^*_1$  a  $E^*_3$  e  $E^*_2$  a  $E^*_3$ , obtendo-se as populações das diferenças  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$ .

## **4.2. Comparação estatística entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática**

Nesta comparação foram considerados os resultados dos ensaios realizados no SET/LaMEM, para caracterização de trinta e quatro espécies tropicais brasileiras, segundo as recomendações da NBR 7190: 1997, Anexo B. Os ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática foram ilustrados anteriormente nas figuras 16, 17 e 18.

### **4.2.1. Equipamentos**

Os ensaios foram realizados na Máquina Universal AMSLER (Figura 19), no LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras), no SET (Departamento de Engenharia de Estruturas), da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos), USP.

Utilizaram-se relógios comparadores Mitutoyo com sensibilidade de 0,01mm para os ensaios de flexão estática, e de 0,001 mm para os ensaios de compressão paralela às fibras e tração paralela às fibras.

Os dados foram processados através do software MINITAB – versão 10, for Windows.

#### **4.2.2. Espécies de madeiras**

Foram utilizadas trinta e quatro espécies de madeiras tropicais escolhidas de acordo com a sua disponibilidade no mercado madeireiro nacional. O modo de obtenção das amostras foi aleatório, constando de vigas com dimensões nominais (6x16x300) cm<sup>3</sup>, disponibilizadas em serrarias da região.

Cada espécie foi analisada individualmente, considerando-se uma amostra com doze observações de uma população. Para as espécies com mais de doze conjuntos de resultados disponíveis, selecionaram-se ao acaso, por sorteio, apenas doze.

A Tabela 2 mostra as espécies utilizadas com o seu nome vulgar, nome científico, local de procedência e número total de corpos-de-prova que compuseram a amostra. Uma breve descrição destas espécies está contida no Anexo I.

Tabela 2 – Nomes vulgares, nomes científicos, procedência e número de corpos-de-prova das amostras das espécies utilizadas

<b>Espécie</b>	<b>Nome científico</b>	<b>Procedência</b>	<b>Total</b>
Angelim Amargoso	<i>Andira anthelmia</i>	Sul de Roraima	12
Angelim Araroba	<i>Vataireopsis araroba</i>	Sul de Roraima	12
Angelim Ferro	<i>Hymenolobium sp</i>	Norte do Pará	16
Angelim Pedra	<i>Hymenolobium petraeum</i>	Norte do Pará	38
Angelim Pedra Verdadeiro	<i>Dinizia excelsa</i>	Norte do Pará	12
Angico Preto	<i>Piptadenia macrocarpa</i>	Mato Grosso do Sul	12
Branquilho	<i>Terminalia sp</i>	Sul de Rondônia	12
Cafearana	<i>Andira sp</i>	Sul de Roraima	13
Canafístula	<i>Cassia ferruginea</i>	Mato Grosso	12
Casca Grossa	<i>Vochysia sp</i>	Sul de Roraima	34
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>	Sul do Pará	12
Catanudo	<i>Calophyllum sp</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Cedro Amargo	<i>Cedrella odorata</i>	Sul de Roraima	21
Cedro Doce	<i>Cedrella sp</i>	Sul de Roraima	12
Champanhe	<i>Dipteryx odorata</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Copaíba	<i>Copaifera langsdorffii</i>	Mato Grosso do Sul	12
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	Noroeste do Mato Grosso	37
Cutiúba	<i>Bowdichia virgilioides</i>	Norte do Pará	12
Garapa	<i>Apuleia leiocarpa</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Goiabão	<i>Planchonella pachycarpa</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Guaíçara	<i>Luetzelburgia sp</i>	Sul de Rondônia	12
Guaruaia	<i>Peltophorum vogelianum</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	Noroeste do Mato Grosso	19
Itaúba	<i>Mezilaurus itauba</i>	Sul de Rondônia	12
Jatobá	<i>Hymenaea sp</i>	Noroeste do Mato Grosso	28
Louro Preto	<i>Ocotea sp</i>	Sul de Roraima	23
Mandioqueira	<i>Qualea sp</i>	Norte do Pará	15
Oiticica Amarela	<i>Clarisia racemosa</i>	Norte do Pará	12
Quarubarana	<i>Erisma uncinatum</i>	Noroeste do Mato Grosso	12
Rabo de Arraia	<i>Vochysia sp</i>	Sul de Roraima	15
Sucupira	<i>Diploptropis sp</i>	Sul do Pará	12
Tachi	<i>Triplaris surinamensis</i>	Sul do Pará	12
Tatajuba	<i>Bagassa guaianensis</i>	Sul de Roraima	12
Umirana	<i>Qualea retusa</i>	Sul do Pará	14

Resultados dos ensaios realizados no SET/LaMEM, para a caracterização de trinta e quatro espécies tropicais brasileiras.

#### 4.2.3. Metodologia estatística

Para análise dos resultados, empregou-se a metodologia descrita a seguir.

Considerem-se os valores dos módulos de elasticidade  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  na compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, respectivamente, como populações. Estas são independentes (não-correlatas), pois são obtidas a partir do ensaio de corpos-de-prova diferentes, para cada tipo de solicitação (Berquó, 1981).

Análises prévias desses valores de cada espécie, e também em conjunto, não demonstraram normalidade ou homogeneidade da variância. Desta forma escolheu-se a prova não paramétrica de Kruskal-Wallis ao invés da correspondente prova paramétrica F.

Esta prova verifica a hipótese de nulidade  $H_0$  de que k amostras provenham da mesma população ou de populações idênticas. Cada uma das n observações é substituída por um posto, isto é, todos os escores de todas as k amostras combinadas são dispostos em uma única série de postos. Ao menor posto atribui-se o posto 1, ao seguinte o posto 2, e assim sucessivamente até o n-ésimo posto. A seguir, calcula-se a soma dos postos em cada uma das k amostras. A prova de Kruskal-Wallis verifica se estas somas são tão díspares que não seja provável se refiram elas a amostras extraídas da mesma população.

Utiliza-se a estatística H definida pela expressão 42, que tem distribuição qui-quadrado com k-1 graus de liberdade, desde que o tamanho das amostras não seja muito pequeno, de acordo com Siegel (1975).

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1) \quad (42)$$

onde,

k = número de amostras

$n_j$  = número de casos da amostra j

$$N = \sum n_j$$

$R_j$  = soma de postos na amostra (coluna) j

$\sum_{j=1}^k$  = somatório entre todas as k amostras (colunas)

Fixa-se um nível de confiança  $\alpha$  e calcula-se a probabilidade p associada ao grau de liberdade (gl) k-1 e a estatística calculada H. A hipótese de nulidade  $H_0$  é rejeitada se o valor de p for inferior ao valor de  $\alpha$ .

Nesse estudo foram considerados  $N = 1215$ ,  $k = 3$ ,  $gl=2$  e foi adotado  $\alpha = 0,05$ . Assim, se  $p$  for menor que  $0,05$ , rejeita-se  $H_0$  e os valores dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática não podem ser considerados estatisticamente equivalentes. Se  $p$  for maior que  $0,05$  aceita-se  $H_0$  e os valores dos módulos de elasticidade mencionados podem ser considerados estatisticamente equivalentes.

Quando neste método não-paramétrico rejeita-se a hipótese nula  $H_0: t_1 = t_2 = \dots = t_k$ , então conclui-se que pelo menos dois dos tratamentos considerados diferem entre si. Utiliza-se, então, o método de comparações múltiplas, que tem como finalidade localizar, quando existem, as diferenças significativas entre os pares de tratamentos e é um complemento ao método não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Campos, 1983)

Utilizam-se comparações envolvendo todos os pares de tratamentos, para grandes amostras.

Primeiro, para cada par  $i$  e  $j$  de tratamentos, são calculados os valores de  $R_i$  e  $R_j$ , que representam as somas dos postos atribuídos a estes tratamentos, na classificação das  $N$  observações referentes aos  $k$  tratamentos. Depois são calculados os valores  $\overline{R}_i = \frac{R_i}{n_i}$  e  $\overline{R}_j = \frac{R_j}{n_j}$ , onde  $n_i$  e  $n_j$  são os números de repetições dos tratamentos  $i$  e  $j$  respectivamente. Determinam-se as diferenças  $|\overline{R}_i - \overline{R}_j|$ , e compara-se com a d.m.s. (diferença mínima significativa), calculada pela expressão 43:

$$d.m.s. = Q \sqrt{\frac{k \cdot (N + 1)}{12}} \quad (43)$$

A diferença em módulo maior que o valor de d.m.s. indica quais os  $t_i$  e  $t_j$  são não equivalentes. Os valores de  $Q$  estão apresentados na Tabela 1C, no Apêndice C.



## **5. RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados utilizados para a comparação entre os módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento dos ensaios de compressão normal e paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, bem como para a comparação dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática.

### **5.1. Comparação dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento**

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de compressão normal às fibras (CN), compressão paralela às fibras (CP), flexão estática (FE) e tração paralela às fibras (TP), realizados de acordo com as instruções da NBR 7190:1997, Anexo B, bem como os resultados das análises estatísticas quanto à comparação dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento.

As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 contêm os valores dos módulos de elasticidade, em MPa, nos três ciclos de carregamento para cada espécie de madeira e para cada tipo de ensaio.

Quando ocorreram problemas na confecção e/ou nos ensaios dos corpos-de-prova, foi utilizado o símbolo (-).

Tabela 3 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Cambará Rosa nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
721	686	684	9721	9496	9537	10096	9857	9556	12002	11656	11689
962	896	909	11021	10613	10664	12337	13406	13192	11887	11398	11079
977	885	862	13544	13412	13232	12859	12970	12751	13995	13122	13271
1020	945	963	12378	11959	11725	7772	8320	8427	12652	12241	12525
831	734	722	11995	11297	11511	14278	14391	14323	10620	10034	10584
1237	1187	1062	15762	14683	14524	11199	11837	11915	16193	15349	15569
906	800	810	10820	11042	10722	-	-	-	11545	11257	11056
889	776	790	10720	9886	10156	12170	12478	12145	10677	10289	10616
1150	1006	968	17159	16684	16621	6384	6278	6227	13544	13400	13253
1016	922	941	15691	15119	15119	11949	12985	13127	11428	11277	11045
1237	1087	1068	14890	14586	14822	12173	12545	12399	15759	15370	15416
984	886	908	13981	13726	13859	-	-	-	14142	14299	14001

Tabela 4 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Eucalipto Grandis nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
970	1071	941	19115	18708	18414	14931	14811	14731	16114	17614	17030
687	796	782	15218	16186	16113	13817	13851	13646	14799	15500	15582
593	727	673	26805	23588	22976	16702	17566	17480	18640	16423	16694
589	709	667	21752	24897	24897	29783	30441	30274	20737	19631	19121
584	735	651	22986	26867	26523	20366	19366	19889	11188	11568	11835
327	453	457	22789	24407	24121	16872	17054	17107	21016	24196	23727
938	1072	1047	13338	14361	14667	12985	13299	13235	14373	14835	14568
456	543	524	19984	19793	19421	16185	16209	17628	19243	20617	20223
220	251	253	19215	19125	18439	14042	14202	14202	12442	13656	13546
284	330	323	11812	11812	12963	11232	11879	12007	21452	20875	20988
297	339	378	26181	25531	25373	18893	19055	19187	20006	20644	24410
308	366	360	21291	23335	23075	14573	14787	14846	18593	17756	17836

Tabela 5 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para a Envira nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
991	1180	1167	10403	11398	11268	12642	12524	12543	17786	18035	18059
971	1136	1148	16397	17123	17276	10454	10573	10546	19027	19482	19548
798	957	993	14987	15978	15978	14800	14663	14556	15933	15890	16062
1241	1445	1426	17933	19845	20049	17707	19420	17408	18893	18690	18392
1189	1533	1511	17885	18221	18307	17241	16815	16850	16985	17320	17370
1068	1271	1286	16577	20098	21915	16919	16373	16440	19946	20600	20465
1186	1369	1387	15184	16063	15802	13782	13412	13345	-	-	-
1026	1286	1302	19247	19341	19247	20935	16407	16407	16973	17323	17022
976	1156	1182	16114	19939	18535	11742	11829	11777	-	-	-
1399	1692	1692	20917	20378	20378	14145	13759	13830	17925	17925	18353
1087	1286	1318	17641	18834	18565	15536	15716	15303	17942	17998	18055
1063	1309	1309	22618	23425	22618	16986	16378	16249	17786	18035	18059

Tabela 6 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Champanhe nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
1437	1727	1727	29758	32114	31588	22887	23186	22757	23863	24598	24699
1473	1836	1792	20454	22506	23238	20145	20647	20702	24898	25254	25110
1588	1796	1840	24974	26530	25815	21488	21488	21548	27513	25423	24967
1782	2122	2091	28700	30270	30270	23154	23154	23351	21900	21900	22010
1495	1860	1769	23388	24105	24031	24623	23644	24442	22122	23173	22482
1554	1781	1803	24130	23694	23622	25227	25266	25113	26464	22931	23611
1589	1679	1698	24394	25271	24945	21298	21071	20632	21496	22508	22950
1334	1594	1528	20188	21133	21133	21178	21178	21638	-	-	-
1502	1755	1735	24763	28095	27792	22464	19845	22720	24269	23231	23419
1460	1715	1695	27912	29976	29860	20664	20695	20483	25382	25737	25809
1173	1568	1535	29574	32832	32556	22733	22989	22765	15103	15129	15588
696	911	922	26500	28891	16247	15723	16042	15934	23301	22988	23065

Tabela 7 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Caribaea nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
218	238	238	8239	9554	9411	7538	7722	8340	10136	10377	9981
512	569	569	12424	11370	11171	7217	7229	7834	7556	8330	9158
526	564	535	10968	11832	11723	8396	8381	8171	12904	11406	11406
378	392	382	12267	13623	13695	8131	8270	8138	15704	15338	15162
232	263	184	10350	11692	11224	9067	9467	9448	8140	9915	10066
286	306	312	12025	13886	13586	11567	11716	11641	9923	9495	9564
203	322	272	9954	10953	10765	8049	8795	8686	10804	10888	9490
277	306	303	9585	9622	14162	-	-	-	11408	10357	10426
442	504	504	12232	13548	13621	9931	9605	9802	11938	12866	12621
581	638	739	10014	10014	10014	10405	9170	10262	16122	18620	18620
273	322	319	10904	11242	11445	9341	9271	9143	9106	12058	12767
265	294	287	18820	14115	13960	8964	8963	9147	9685	10001	10134

Tabela 8 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Elliottii nos ensaios de CN, CP, FE e TP (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
309	331	325	11142	11025	11182	12628	11835	11799	17651	17528	17775
588	705	726	16467	18786	18339	9723	10549	10695	16343	16136	16239
457	489	483	11708	13026	12971	11311	10150	10343	15397	15780	15586
410	439	472	13693	13403	13518	9583	9981	10427	13187	13330	12911
596	659	695	12166	13489	13258	10736	11656	11399	12898	13230	13438
532	561	561	11698	11569	11526	9788	10484	10370	13098	13039	12640
443	505	522	9824	11016	11136	9405	10006	10155	12981	12372	12489
371	455	461	12061	12794	12154	9757	10133	10277	15663	15228	14978
697	857	836	8085	9086	9140	10535	11328	11328	16193	15241	15241
399	472	479	10827	11998	11682	8249	8449	8620	13618	14060	13836
325	428	464	9980	13436	13207	11543	11987	12006	9781	10187	10036
412	479	465	11846	11292	11053	11978	12527	12548	15132	14668	14403

Tabela 9 – Valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento para o Pinus Hondurensis (MPa)

Compressão normal			Compressão paralela			Flexão estática			Tração paralela		
E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
402	481	468	9223	11994	14802	10956	10956	10816	9391	10184	10271
427	471	465	10636	13272	13507	12252	12023	11995	11541	11884	11744
326	344	347	8333	8818	8895	10150	9992	10051	8612	8770	9232
650	739	725	13935	15108	14743	12964	12997	12931	15154	14982	14925
480	520	513	10219	11105	10718	-	-	-	14189	14139	14040
404	464	459	16165	16514	14618	10766	10583	10524	14048	14565	14914
656	747	732	10651	11247	11505	11374	11200	10961	11186	11158	11158
573	632	621	12262	12361	12361	10469	10321	10239	11279	10734	10918
504	557	557	7930	8827	8827	10839	10635	10568	8011	7934	7889
570	618	628	17130	17724	17324	11152	10890	10866	10084	10667	10451
511	549	533	5791	6241	6254	-	-	-	9748	10191	10371
480	520	527	11345	12306	12110	11192	10972	10996	11213	11602	11759

A partir dos valores de E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> e E<sub>3</sub> foram calculados E<sub>A</sub>, E<sub>B</sub> e E<sub>C</sub>. As Tabelas 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam os valores da média aritmética das diferenças amostrais  $\bar{x}_m$  e do desvio padrão das diferenças amostrais  $s_m$  de E<sub>A</sub>, E<sub>B</sub> e E<sub>C</sub>, em MPa, para cada espécie e para cada tipo de ensaio.

Tabela 10 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em E<sub>A</sub>, E<sub>B</sub> e E<sub>C</sub> para o Cambará Rosa (MPa)

	E <sub>A</sub>		E <sub>B</sub>		E <sub>C</sub>	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>CR</b>						
<b>CN</b>	93	34	104	49	10	41
<b>CP</b>	432	341	433	326	1	194
<b>FE</b>	-385	443	-285	541	100	170
<b>TP</b>	396	289	362	256	-34	279

Tabela 11 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em E<sub>A</sub>, E<sub>B</sub> e E<sub>C</sub> para o Eucalipto Grandis (MPa)

	E <sub>A</sub>		E <sub>B</sub>		E <sub>C</sub>	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>EG</b>						
<b>CN</b>	-95	41	-67	41	28	45
<b>CP</b>	-677	1888	-541	2010	136	483
<b>FE</b>	-178	473	-321	513	-143	444
<b>TP</b>	-393	1424	-580	1758	-187	1167

Tabela 12 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para a Envira (MPa)

	$E_A$		$E_B$		$E_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>EN</b>						
<b>CN</b>	-219	56	-227	48	-8	19
<b>CP</b>	-1228	1291	-1169	1556	59	746
<b>FE</b>	418	1432	636	1246	218	580
<b>TP</b>	-250	292	-273	357	-23	222

Tabela 13 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Champanhe (MPa)

<b>C</b>	$E_A$		$E_B$		$E_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>CN</b>	-272	85	-255	65	17	39
<b>CP</b>	-1723	1090	-530	3564	1193	3623
<b>FE</b>	198	848	-42	329	-240	903
<b>TP</b>	-313	1410	237	1349	-76	397

Tabela 14 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Pinus Caribaea (MPa)

	$E_A$		$E_B$		$E_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>PC</b>						
<b>CN</b>	-44	28	-38	49	6	42
<b>CP</b>	-306	1772	-583	2177	-277	1355
<b>FE</b>	2	493	-182	371	-184	417
<b>TP</b>	-519	1354	-497	1623	21	559

Tabela 15 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Pinus Elliottii (MPa)

	$E_A$		$E_B$		$E_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>PE</b>						
<b>CN</b>	-70	42	-79	44	-9	20
<b>CP</b>	-952	1156	-806	1095	146	248
<b>FE</b>	-321	646	-394	628	-74	177
<b>TP</b>	95	455	198	470	102	230

Tabela 16 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Pinus Hodurensis (MPa)

	$E_A$		$E_B$		$E_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>PH</b>						
<b>CN</b>	-55	22	-49	18	5	9
<b>CP</b>	-991	853	-1003	1739	-12	1048
<b>FE</b>	155	97	217	107	62	83
<b>TP</b>	-196	382	-268	440	-72	203

A partir dos valores de  $E^*_1$ ,  $E^*_2$  e  $E^*_3$  foram calculados  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$ . As Tabelas 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23 apresentam os valores da média aritmética das diferenças amostrais  $\bar{x}_m$  e do desvio padrão das diferenças amostrais  $s_m$  de  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para cada espécie e para cada tipo de ensaio.

Tabela 17 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Cambará Rosa

	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>CR</b>						
<b>CN</b>	0,094	0,030	0,101	0,037	0,007	0,035
<b>CP</b>	0,033	0,027	0,032	0,022	0,000	0,016
<b>FE</b>	-0,033	0,040	-0,025	0,051	0,008	0,015
<b>TP</b>	0,031	0,021	0,028	0,020	-0,003	0,024

Tabela 18 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Eucalipto Grandis

	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>EG</b>						
<b>CN</b>	-0,192	0,074	-0,157	0,101	0,034	0,073
<b>CP</b>	-0,037	0,081	-0,035	0,090	0,002	0,034
<b>FE</b>	-0,012	0,027	-0,021	0,033	-0,009	0,027
<b>TP</b>	-0,026	0,076	-0,035	0,090	-0,009	0,059

Tabela 19 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para a Envira

	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>EN</b>						
<b>CN</b>	-0,202	0,039	-0,211	0,038	-0,009	0,019
<b>CP</b>	-0,077	0,079	-0,074	0,093	0,003	0,044
<b>FE</b>	0,021	0,071	0,034	0,059	0,013	0,033
<b>TP</b>	-0,014	0,016	-0,016	0,020	-0,002	0,013

Tabela 20 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Champanhe

	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
<b>C</b>						
<b>CN</b>	-0,200	0,077	-0,188	0,070	0,012	0,027
<b>CP</b>	-0,067	0,041	-0,022	0,136	0,044	0,137
<b>FE</b>	0,008	0,038	-0,002	0,016	-0,010	0,040
<b>TP</b>	0,010	0,055	0,006	0,054	-0,004	0,018

Tabela 21 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Caribaea

PC	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
CN	-0,145	0,142	-0,101	0,135	0,044	0,131
CP	-0,045	0,118	-0,075	0,171	-0,030	0,141
FE	-0,003	0,052	-0,025	0,047	-0,021	0,047
TP	-0,056	0,129	-0,058	0,162	-0,003	0,058

Tabela 22 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Elliottii

PE	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
CN	-0,153	0,082	-0,175	0,104	-0,022	0,046
CP	-0,086	0,106	-0,075	0,103	0,012	0,020
FE	-0,034	0,058	-0,042	0,058	-0,008	0,018
TP	0,004	0,032	0,012	0,033	0,008	0,016

Tabela 23 – Valores de  $\bar{x}_m$  e  $s_m$  em  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Hondurensis

PH	$E^*_A$		$E^*_B$		$E^*_C$	
	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$	$\bar{x}_m$	$s_m$
CN	-0,109	0,039	-0,099	0,033	0,010	0,017
CP	-0,098	0,088	-0,109	0,177	-0,012	0,100
FE	0,014	0,009	0,019	0,009	0,005	0,008
TP	-0,019	0,036	-0,027	0,042	-0,007	0,020

A Tabela 24 apresenta os valores de  $n$  e de  $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  para cada espécie de madeira e para cada tipo de ensaio. Tais valores são necessários para se determinarem os intervalos das médias de  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ ,  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$ .

Tabela 24 – Valores de n e de  $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  para cada tipo de ensaio e espécie de madeira

<b>Espécie</b>	<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>n</b>	$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$
<b>Cambará Rosa</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	10	2,262
	<b>TP</b>	12	2,201
<b>Eucalipto Grandis</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	12	2,201
	<b>TP</b>	12	2,201
<b>Envira</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	12	2,201
	<b>TP</b>	10	2,262
<b>Champanhe</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	12	2,201
	<b>TP</b>	11	2,228
<b>Pinus Caribaea</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	11	2,228
	<b>TP</b>	12	2,201
<b>Pinus Elliottii</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	12	2,201
	<b>TP</b>	12	2,201
<b>Pinus Hondurensis</b>	<b>CN</b>	12	2,201
	<b>CP</b>	12	2,201
	<b>FE</b>	10	2,262
	<b>TP</b>	12	2,201

A partir dos valores das médias aritméticas das diferenças amostrais  $\bar{x}_m$  e dos desvios padrões das diferenças amostrais  $s_m$  de  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  determinaram-se os intervalos de confiança das médias das diferenças.

As Tabelas 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam os intervalos de confiança das médias de  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$ , para cada espécie e para cada ensaio.



Tabela 25 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Cambará Rosa (MPa)

CR	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$71 \leq \mu \leq 115$	$73 \leq \mu \leq 135$	$-16 \leq \mu \leq 36$
CP	$215 \leq \mu \leq 649$	$226 \leq \mu \leq 640$	$-122 \leq \mu \leq 124$
FE	$-702 \leq \mu \leq -68$	$-672 \leq \mu \leq 102$	$-22 \leq \mu \leq 222$
TP	$212 \leq \mu \leq 580$	$199 \leq \mu \leq 525$	$-211 \leq \mu \leq 143$

Tabela 26 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Eucalipto Grandis (MPa)

EG	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-121 \leq \mu \leq -69$	$-93 \leq \mu \leq -41$	$-1 \leq \mu \leq 57$
CP	$-1877 \leq \mu \leq -523$	$-1819 \leq \mu \leq -736$	$-171 \leq \mu \leq 443$
FE	$-479 \leq \mu \leq 122$	$-647 \leq \mu \leq 5$	$-425 \leq \mu \leq 140$
TP	$-1298 \leq \mu \leq -512$	$-1967 \leq \mu \leq -537$	$-929 \leq \mu \leq 555$

Tabela 27 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para a Envira (MPa)

EN	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-255 \leq \mu \leq -183$	$-258 \leq \mu \leq -197$	$-20 \leq \mu \leq 4$
CP	$-2048 \leq \mu \leq -408$	$-2158 \leq \mu \leq -180$	$-415 \leq \mu \leq 533$
FE	$-492 \leq \mu \leq 1328$	$-156 \leq \mu \leq 1428$	$-151 \leq \mu \leq 587$
TP	$-459 \leq \mu \leq -41$	$-529 \leq \mu \leq -18$	$-182 \leq \mu \leq 136$

Tabela 28 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Champanhe (MPa)

C	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-326 \leq \mu \leq -218$	$-296 \leq \mu \leq -214$	$-8 \leq \mu \leq 42$
CP	$-2416 \leq \mu \leq -1030$	$-2794 \leq \mu \leq 1735$	$-1109 \leq \mu \leq 3495$
FE	$-341 \leq \mu \leq 737$	$-251 \leq \mu \leq 167$	$-714 \leq \mu \leq 434$
TP	$-1260 \leq \mu \leq 634$	$-670 \leq \mu \leq 1143$	$-343 \leq \mu \leq 191$

Tabela 29 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o Pinus Caribaea (MPa)

PC	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-62 \leq \mu \leq -26$	$-69 \leq \mu \leq -6$	$-21 \leq \mu \leq 33$
CP	$-1432 \leq \mu \leq 820$	$-1966 \leq \mu \leq 800$	$-1138 \leq \mu \leq 584$
FE	$-330 \leq \mu \leq 333$	$-431 \leq \mu \leq 67$	$-464 \leq \mu \leq 96$
TP	$-1379 \leq \mu \leq 341$	$-1529 \leq \mu \leq 534$	$-334 \leq \mu \leq 376$

Tabela 30 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o *Pinus Elliottii* (MPa)

PE	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-97 \leq \mu \leq -44$	$-107 \leq \mu \leq -51$	$-22 \leq \mu \leq 3$
CP	$-1686 \leq \mu \leq -218$	$-1501 \leq \mu \leq -110$	$-11 \leq \mu \leq 303$
FE	$-731 \leq \mu \leq 90$	$-793 \leq \mu \leq 5$	$-186 \leq \mu \leq 39$
TP	$-193 \leq \mu \leq 384$	$-101 \leq \mu \leq 496$	$-44 \leq \mu \leq 248$

Tabela 31 – Intervalos de confiança para  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$  para o *Pinus Hondurensis* (MPa)

PH	$E_A$	$E_B$	$E_C$
CN	$-69 \leq \mu \leq -41$	$-60 \leq \mu \leq -38$	$-1 \leq \mu \leq 11$
CP	$-1533 \leq \mu \leq -449$	$-2108 \leq \mu \leq 102$	$-678 \leq \mu \leq 654$
FE	$82 \leq \mu \leq 228$	$136 \leq \mu \leq 297$	$-1 \leq \mu \leq 125$
TP	$-439 \leq \mu \leq 47$	$-548 \leq \mu \leq 12$	$-201 \leq \mu \leq 57$

A partir dos valores das médias aritméticas das diferenças amostrais  $\bar{x}_m$  e dos desvios padrões das diferenças amostrais  $s_m$  de  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  calcularam-se os intervalos de confiança das médias das diferenças. As Tabelas 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38 apresentam os intervalos de confiança das médias de  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para cada espécie e para cada ensaio.

Tabela 32 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o *Cambará Rosa*

CR	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$0,075 \leq \mu \leq 0,113$	$0,077 \leq \mu \leq 0,125$	$-0,015 \leq \mu \leq 0,029$
CP	$0,016 \leq \mu \leq 0,050$	$0,018 \leq \mu \leq 0,046$	$-0,010 \leq \mu \leq 0,010$
FE	$-0,062 \leq \mu \leq -0,004$	$-0,061 \leq \mu \leq 0,011$	$-0,003 \leq \mu \leq 0,019$
TP	$0,018 \leq \mu \leq 0,044$	$0,041 \leq \mu \leq 0,015$	$-0,018 \leq \mu \leq 0,012$

Tabela 33 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o *Eucalipto Grandis*

EG	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,239 \leq \mu \leq -0,145$	$-0,221 \leq \mu \leq -0,093$	$-0,012 \leq \mu \leq 0,080$
CP	$-0,088 \leq \mu \leq 0,015$	$-0,092 \leq \mu \leq 0,022$	$-0,020 \leq \mu \leq 0,024$
FE	$-0,029 \leq \mu \leq 0,005$	$-0,042 \leq \mu \leq 0,000$	$-0,026 \leq \mu \leq 0,008$
TP	$-0,074 \leq \mu \leq 0,022$	$-0,092 \leq \mu \leq 0,022$	$-0,046 \leq \mu \leq 0,028$

Tabela 34 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para a Envira

EN	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,227 \leq \mu \leq -0,177$	$-0,235 \leq \mu \leq -0,187$	$-0,021 \leq \mu \leq 0,003$
CP	$-0,127 \leq \mu \leq -0,027$	$-0,133 \leq \mu \leq -0,015$	$-0,025 \leq \mu \leq 0,031$
FE	$-0,024 \leq \mu \leq 0,066$	$-0,003 \leq \mu \leq 0,071$	$-0,008 \leq \mu \leq 0,034$
TP	$-0,026 \leq \mu \leq 0,002$	$-0,030 \leq \mu \leq 0,001$	$-0,011 \leq \mu \leq 0,007$

Tabela 35 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Champanhe

C	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,249 \leq \mu \leq -0,151$	$-0,232 \leq \mu \leq -0,144$	$-0,005 \leq \mu \leq 0,029$
CP	$-0,093 \leq \mu \leq -0,041$	$-0,108 \leq \mu \leq 0,064$	$-0,043 \leq \mu \leq 0,131$
FE	$-0,016 \leq \mu \leq 0,032$	$-0,012 \leq \mu \leq 0,008$	$-0,035 \leq \mu \leq 0,015$
TP	$-0,027 \leq \mu \leq 0,047$	$-0,030 \leq \mu \leq 0,042$	$-0,016 \leq \mu \leq 0,008$

Tabela 36 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Caribaea

PC	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,235 \leq \mu \leq -0,054$	$-0,187 \leq \mu \leq -0,015$	$-0,040 \leq \mu \leq 0,127$
CP	$-0,120 \leq \mu \leq 0,030$	$-0,184 \leq \mu \leq 0,033$	$-0,120 \leq \mu \leq 0,059$
FE	$-0,038 \leq \mu \leq 0,032$	$-0,056 \leq \mu \leq 0,007$	$-0,053 \leq \mu \leq 0,010$
TP	$-0,137 \leq \mu \leq 0,026$	$-0,161 \leq \mu \leq 0,045$	$-0,040 \leq \mu \leq 0,034$

Tabela 37 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Elliottii

PE	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,205 \leq \mu \leq -0,101$	$-0,241 \leq \mu \leq -0,108$	$-0,051 \leq \mu \leq 0,007$
CP	$-0,153 \leq \mu \leq -0,019$	$-0,140 \leq \mu \leq -0,009$	$-0,001 \leq \mu \leq 0,025$
FE	$-0,071 \leq \mu \leq 0,003$	$-0,078 \leq \mu \leq -0,005$	$-0,019 \leq \mu \leq 0,004$
TP	$-0,016 \leq \mu \leq 0,025$	$-0,009 \leq \mu \leq 0,033$	$-0,003 \leq \mu \leq 0,018$

Tabela 38 – Intervalos de confiança para  $E^*_A$ ,  $E^*_B$  e  $E^*_C$  para o Pinus Hondurensis

PH	$E^*_A$	$E^*_B$	$E^*_C$
CN	$-0,134 \leq \mu \leq -0,084$	$-0,120 \leq \mu \leq -0,078$	$-0,001 \leq \mu \leq 0,021$
CP	$-0,154 \leq \mu \leq -0,042$	$-0,221 \leq \mu \leq 0,003$	$-0,076 \leq \mu \leq 0,052$
FE	$0,008 \leq \mu \leq 0,020$	$0,012 \leq \mu \leq 0,027$	$0,000 \leq \mu \leq 0,011$
TP	$-0,042 \leq \mu \leq 0,004$	$-0,054 \leq \mu \leq 0,000$	$-0,020 \leq \mu \leq 0,006$

## 5.2. Comparação entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática

Os valores de  $E$ , em MPa, dos ensaios de compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras realizados com as trinta e quatro espécies de madeiras tropicais brasileiras estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras

Espécie	$E_{c0}$	$E_{t0}$	$E_M$
Angelim Amargoso	13650	15220	16405
	9632	12936	12771
	11782	18343	14042
	13765	16221	14465
	17887	26298	21437
	18040	16887	13659
	14120	17500	13907
	13291	11804	15141
	15109	11232	13661
	10769	16781	13813
	17041	19598	13961
Angelim Araroba	15606	16484	18128
	13250	11644	11939
	9850	13212	8126
	9869	11114	14783
	12527	9383	11542
	12205	11381	10090
	12463	13380	13074
	18308	14736	16983
	13167	11124	11503
	12007	13067	12521
	13167	12207	11653
Angelim Ferro	12393	11600	10791
	12655	12077	12091
	16554	20814	15270
	18249	20104	21534
	18189	18512	17508
	21089	18517	18864
	25056	25012	22497
	21015	19924	20528
	27230	24106	24780
	17009	18226	17457
	16982	14140	17081
	16401	18786	17253
21247	19567	21647	
19440	21116	15573	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Angelim Pedra	11178	10747	10991
	11249	13981	12569
	11314	10495	9328
	11063	12040	11588
	8367	8822	9333
	16608	19779	17595
	11569	9305	12077
	10775	16475	13312
	15536	17492	18697
	11793	13714	12789
	12384	13598	17993
15084	16392	13268	
Angelim Pedra Verdadeiro	18016	19372	15590
	14856	22730	16093
	17887	15867	15253
	10962	14634	14439
	9494	12842	15456
	18684	15219	16868
	17805	17612	14477
	13663	16888	16171
	16660	20917	17969
	16842	18638	18262
	15681	13984	14721
18014	15964	16813	
Angico Preto	24566	16716	18609
	10030	14230	16243
	8930	16702	15625
	10564	13513	17171
	11600	15781	16779
	16272	21712	19399
	20140	19505	16958
	14702	14367	13887
	15107	16249	15559
	14408	14199	15670
	11434	11484	13030
12620	18019	19043	
Branquilha	14925	14382	14214
	15679	16048	15890
	12677	13009	12360
	14525	15228	16031
	12374	11980	13335
	16595	18762	22120
	11835	13281	20042
	11635	12581	13988
	15272	16093	13919
	12378	13206	14041
	11394	11865	12880
16472	16831	17060	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Cafearana	19021	15979	15309
	10016	11350	11621
	13524	12687	13270
	12463	12061	13700
	14033	13610	13136
	14635	14809	13535
	11470	10079	12584
	9727	9335	11210
	20777	15972	17738
	13008	12274	11660
	11340	11911	12261
19061	18471	17848	
Canafistula	15854	17034	13747
	12904	14127	16413
	17227	15935	18293
	17982	16264	17643
	17530	15984	16737
	12831	12626	13792
	12421	13849	13282
	9882	9021	12012
	11241	10077	10537
	16095	15071	15180
	17082	14968	15998
14307	14089	13591	
Casca Grossa	15296	15733	14121
	19060	19832	17535
	18657	12735	16502
	16878	15746	13951
	21762	20662	18070
	12297	12686	12530
	18770	19275	15227
	13376	13405	12288
	10482	13028	15954
	11784	15497	18324
	16179	19960	16504
15701	23025	19130	
Castelo	12632	14819	12599
	10877	10642	10435
	12356	14615	12936
	10415	14673	10946
	11226	12442	11598
	11511	12646	10942
	9249	11506	9886
	11620	11524	11230
	13128	18359	13488
	9297	10977	10344
	11574	13640	11826
9374	12159	10270	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Catanudo	15547	17205	15991
	13621	11979	15081
	14615	17409	15389
	13909	13949	13884
	11987	15169	11444
	12130	15790	14125
	13276	16016	16504
	11708	13267	14150
	17456	15701	16231
	17641	15499	12262
	16950	20830	16931
	14016	13171	15653
Cedro Amargo	9026	12200	8774
	7394	8442	9450
	7423	10499	8979
	10845	9331	9601
	9416	10256	8542
	10219	7386	8317
	10357	11045	9785
	9331	11049	10201
	11515	13649	11298
	9860	9684	8718
	8087	11035	12431
	9446	8683	9962
Cedro Doce	6788	7814	6592
	8651	10510	12384
	8751	8013	6591
	6515	6743	7501
	8892	15499	10870
	8778	9215	8414
	7586	11801	9551
	8306	5916	7073
	10915	10205	9473
	8495	8435	9144
	9153	10743	8400
	7413	9383	8608
Champanhê	24659	20791	26676
	24544	21723	23401
	18480	22210	22571
	19398	23120	25238
	22601	18426	23588
	26550	23680	27289
	22087	20946	25915
	21748	16718	20382
	24005	21098	28505
	21847	22534	24276
	23842	20101	29463
	22314	20093	24785

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{i0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Copaíba	13245	12897	13721
	16267	14298	13595
	9416	11402	10164
	9447	10591	10918
	12970	13573	11391
	10022	13431	11651
	12960	15391	12121
	11985	15482	12634
	16018	13154	12969
	16850	14561	13387
	12111	12712	14296
	12845	13408	12441
Cupiúba	17246	15710	16031
	13371	17752	14108
	16054	15383	14774
	9559	11082	9773
	14142	17954	12194
	10121	15092	12629
	8564	9345	9730
	11419	9052	9785
	13915	14740	13559
	17452	11513	14709
	16155	10837	16347
	18577	20460	18436
Cutúba	12184	16913	14274
	17545	15671	12636
	24534	22970	18639
	21498	18124	25004
	20449	22259	21262
	18828	14752	11452
	21865	18172	22405
	13873	12629	16865
	18299	15306	14419
	19523	13226	15928
	17516	14676	18030
	12739	14127	12897
Garapa	17357	14777	11259
	19259	18516	18041
	19334	20673	21825
	21121	18204	16631
	19392	19037	19625
	14436	12994	16342
	16802	15662	16671
	12583	15826	14477
	15451	14389	15780
	21222	19610	18997
	17943	13970	16509
	17718	16696	16923



Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Goiabão	15038	15687	14361
	13501	17950	15278
	19748	11468	16509
	18464	20310	18587
	19198	16522	20184
	20358	22685	18481
	22752	21138	26237
	18200	15278	17847
	22581	18311	18778
	16516	19773	17749
	18655	19511	17508
19591	20576	18886	
Guaíçara	16949	18101	16334
	17959	12423	16922
	17868	15579	17225
	16816	16428	13583
	11073	17463	15149
	11945	13635	13508
	12589	16369	12521
	16559	16688	16636
	16513	18990	12549
	16832	13977	16202
	13215	19702	15762
15302	16305	15126	
Guarucaia	16234	13446	12328
	16566	14045	14986
	19605	15909	14986
	17509	11109	15576
	18165	14916	14443
	19220	17513	24559
	15562	13085	14513
	13578	10510	12554
	15001	18075	14931
	13717	10765	13223
	13196	13198	12925
-	-	-	
Ipê	16457	14418	15127
	17161	15798	15939
	15782	17590	16624
	14117	20024	17512
	17839	16324	16209
	18927	15448	21782
	16488	19665	17418
	18985	14227	14054
	18306	17332	15803
	17382	16099	16225
	17634	13729	16014
20055	17653	17186	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{i0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Itaúba	17738	17580	17383
	18398	19481	19810
	16646	18277	16113
	14619	16250	13292
	19059	18647	20274
	18298	18804	17864
	14959	19047	17451
	18650	15121	16419
	19243	14030	16042
	17024	19223	18430
	14993	17573	17575
19691	17523	17484	
Jatobá	17205	15136	19848
	11771	10136	10549
	14434	13782	14524
	17942	17732	18358
	22556	20714	24667
	21846	20366	20032
	23599	21233	21525
	20993	21396	21559
	12576	14466	13047
	18363	14080	15154
	23873	20628	22402
25359	22724	20726	
Louro Preto	16555	16091	19026
	15158	16209	13515
	14118	11725	17025
	16698	12345	13861
	17224	16884	12534
	14541	12042	19360
	16557	14884	24323
	15272	14167	13073
	15596	12270	12237
	9432	10811	10147
	16769	14864	14439
16213	14842	15715	
Mandioqueira	23297	16312	18719
	18049	18030	16960
	17454	21936	22706
	17180	19104	16367
	19143	18738	18303
	20865	21391	25526
	21183	17098	17154
	20626	18393	20049
	20866	20313	16519
	21951	18825	19301
	19062	20494	17277
18545	16952	17902	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{i0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Oiticica Amarela	16889	16381	16439
	11994	15271	13725
	14556	13358	13701
	16127	14968	12281
	14682	15541	14058
	15374	16661	14050
	15754	13321	16871
	14962	14086	14491
	15400	16293	14613
	13642	13122	13844
	14200	14638	15081
13044	12466	14742	
Quarubarana	7814	9060	9367
	11525	11346	11793
	7208	7647	7012
	6242	7778	7568
	5656	10017	7309
	8162	9690	9482
	10719	7692	10198
	7154	8509	7548
	7965	10609	8113
	8451	8093	7425
	9355	8046	9305
15144	11580	10982	
Rabo de Arraia	12304	11990	12504
	11994	10598	14313
	16595	17352	15415
	13566	8483	10262
	12012	13948	10758
	14082	13584	13482
	12419	17985	16062
	12536	17882	13181
	17976	15807	16545
	11103	13376	12602
	12757	10730	10913
16073	12346	12041	
Sucupira	19763	18095	18314
	20531	19572	18446
	16284	26209	18048
	21919	18073	19366
	21854	24476	23163
	24175	24884	24416
	17097	19246	20029
	21271	21693	20586
	23717	19611	20614
	22093	23702	22471
	21383	21802	20247
20917	21578	20518	

Tabela 39 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{i0}$  e  $E_M$  (MPa) para as 34 espécies tropicais brasileiras (continuação)

Tachi	18592	16454	17331
	25239	23967	21398
	23271	27315	24832
	20753	25546	23975
	21355	15244	23287
	19469	19382	19278
	21463	19285	19602
	16365	21720	20862
	14745	11302	14759
	21472	17676	19885
	16181	16338	23731
19900	19475	20813	
Tatajuba	20402	18519	24828
	24425	18625	20283
	21138	21940	20631
	-	-	-
	18866	17516	15403
	10566	14292	17103
	18295	12482	13697
	-	-	-
	19633	17982	18884
	17230	14922	15637
	18571	15843	17382
16586	16239	17293	
Umirana	11197	9391	10488
	10841	11988	10300
	10332	9943	16378
	8519	7911	7955
	12101	10620	9360
	13765	16221	14467
	9721	12108	8590
	10210	10462	13100
	10332	9943	16378
	10863	11733	9128
	8451	11214	11496
9929	7620	7397	

Os (-) representam problemas com corpos-de-prova.

Os resultados das análises estatísticas estão expostos na Tabela 40 de maneira resumida, por espécie e também em conjunto, onde  $n_A$  representa o número dos corpos-de-prova que compuseram as amostras em cada um dos ensaios.

Tabela 40 – Resultado da análise estatística individual e em conjunto das trinta e quatro espécies tropicais brasileiras

<b>Espécie</b>	<b>n<sub>A</sub></b>	<b>H</b>	<b>p</b>
Angelim Amargoso	12	2,85	0,24
Angelim Araroba	12	1,50	0,47
Angelim Ferro	12	0,49	0,78
Angelim Pedra	12	1,15	0,56
Angelim Pedra Verdadeiro	12	0,77	0,68
Angico Preto	12	4,51	0,11
Branquilha	12	2,11	0,35
Cafearana	12	0,22	0,90
Canafístula	12	0,41	0,82
Casca Grossa	12	0,71	0,70
Castelo	12	7,28	0,03
Catanudo	12	1,06	0,59
Cedro Amargo	12	1,68	0,43
Cedro Doce	12	1,45	0,48
Champanhe	12	14,30	0,00
Copaíba	12	2,39	0,30
Cupiúba	12	0,17	0,92
Cutiúba	12	1,24	0,54
Garapa	12	1,23	0,54
Goiabão	12	0,76	0,68
Guaíçara	12	2,06	0,36
Guarucaia	11	5,53	0,06
Ipê	12	2,93	0,23
Itaúba	12	0,47	0,79
Jatobá	12	1,06	0,59
Louro Preto	12	3,12	0,21
Mandioqueira	12	2,94	0,23
Oiticica Amarela	12	0,39	0,82
Quarubarana	12	1,19	0,55
Rabo de Arraia	12	0,19	0,91
Sucupira	12	1,05	0,59
Tachi	12	0,96	0,62
Tatajuba	10	2,25	0,33
Umirana	12	0,07	0,97
<b>Conjunto</b>	<b>405</b>	<b>0,24</b>	<b>0,89</b>

## **6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo estão discutidos os resultados apresentados no capítulo 5.

### **6.1. Comparação dos valores dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento**

Conforme o que consta das Tabelas 25 a 31, nem todos os intervalos de confiança das médias das diferenças dos módulos de elasticidade contêm o zero, considerados os lotes de Cambará Rosa, Eucalipto Grandis, Envira, Champanhe, Pinus Caribaea, Pinus Elliottii e Pinus Hondurensis, nos ensaios de compressão normal e paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras, quando são analisados o primeiro e o segundo e o primeiro e o terceiro ciclos de carregamento. Isto ocorre tanto para os valores de E absolutos quanto para os valores relativos ao E do primeiro ciclo de carregamento.

Quando são comparados os módulos de elasticidade do segundo e terceiro ciclos de carregamento, nestas mesmas condições, o zero pertence a todos os intervalos de confiança das médias das diferenças.

## 6.2. Comparação entre os valores dos módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática

Pelos resultados mostrados na Tabela 40, pode-se observar que apenas duas das trinta e quatro espécies utilizadas apresentaram valores de  $p < 0,05$ : Champanhe com  $p = 0,00$  e o Castelo com  $p = 0,03$ .

A justificativa deste resultado muito provavelmente está relacionada às particularidades anatômicas destas espécies em relação às demais já caracterizadas.

Desta forma, para estas espécies analisadas individualmente, os valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  não poderiam, a princípio, ser considerados estatisticamente equivalentes. Assim, segue a análise segundo o método de comparações múltiplas.

As Tabelas 41 e 42 apresentam os valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa), os postos destes valores por tratamento e os valores de  $R_j$ ,  $H$  e  $p$ , respectivamente, para o Castelo e Champanhe.

Tabela 41 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa), postos destes valores por tratamento,  $R_j$ ,  $H$  e  $p$  para o Castelo

	<b>Castelo</b>		
	<b><math>E_{c0}</math></b>	<b><math>E_{t0}</math></b>	<b><math>E_M</math></b>
1	12632 (27)	14819 (35)	12599 (26)
2	10877 (10)	10642 (9)	10435 (8)
3	12356 (24)	14615 (33)	12936 (29)
4	10415 (7)	14673 (34)	10946 (13)
5	11226 (14)	12442 (25)	11598 (20)
6	11511 (17)	12646 (28)	10942 (11)
7	9249 (1)	11506 (16)	9886 (4)
8	11620 (21)	11524 (18)	11230 (15)
9	13128 (30)	18359 (36)	13488 (31)
10	9297 (2)	10977 (12)	10344 (6)
11	11574 (19)	13640 (32)	11826 (22)
12	9374 (3)	12159 (23)	10270 (5)
<b><math>R_j</math></b>	175	301	190
<b><math>H</math></b>		7,28	
<b><math>p</math></b>		0,03	

Tabela 42 - Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  (MPa), postos destes valores por tratamento,  $R_j$ , H e p para o Champanhe

<b>Champanhe</b>			
	<b><math>E_{c0}</math></b>	<b><math>E_{t0}</math></b>	<b><math>E_M</math></b>
1	24659 (28)	20791 (8)	26676 (33)
2	24544 (27)	21723 (11)	23401 (21)
3	18480 (3)	22210 (15)	22571 (18)
4	19398 (4)	23120 (20)	25238 (30)
5	22601 (19)	18426 (2)	23588 (22)
6	26550 (32)	23680 (23)	27289 (34)
7	22087 (14)	20946 (9)	25915 (31)
8	21748 (12)	16718 (1)	20382 (7)
9	24005 (25)	21098 (10)	28505 (35)
10	21847 (13)	22534 (17)	24276 (26)
11	23842 (24)	20101 (6)	29463 (36)
12	22314 (16)	20093 (5)	24785 (29)
<b><math>R_j</math></b>	217	127	322
<b>H</b>		14,30	
<b>p</b>		0,00	

Para estas três espécies:

$$d.m.s. = 3,341 \sqrt{\frac{3 \cdot (36 + 1)}{12}} = 10,1$$

Para o Castelo tem-se:

$$\overline{R}_1 = 14,6$$

$$\overline{R}_2 = 25,1$$

$$\overline{R}_3 = 15,8$$

$$|\overline{R}_1 - \overline{R}_2| = 10,5$$

$$|\overline{R}_1 - \overline{R}_3| = 1,2$$

$$|\overline{R}_2 - \overline{R}_3| = 9,3$$

Para o Champanhe tem-se:

$$\overline{R}_1 = 18,4$$

$$\overline{R}_2 = 10,6$$

$$\overline{R}_3 = 26,8$$



$$|\overline{R_1} - \overline{R_2}| = 7,5$$

$$|\overline{R_1} - \overline{R_3}| = 8,7$$

$$|\overline{R_2} - \overline{R_3}| = 16,2$$

Para o Castelo,  $|\overline{R_1} - \overline{R_2}| = 10,5 > 10,1$ . Assim, os valores de  $E_{c0}$  e  $E_{t0}$  não podem ser considerados equivalentes.

Para o Champanhe,  $|\overline{R_2} - \overline{R_3}| = 16,2 > 10,1$ . Assim, os valores de  $E_{t0}$  e  $E_M$  não podem ser considerados equivalentes.

## 7. CONCLUSÃO

No que concerne à comparação entre os três ciclos de carregamento, os resultados mostram que é análogo analisar o intervalo de confiança das médias das diferenças ( $\mu$ ) para os valores de  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  e  $E^*_1$ ,  $E^*_2$  e  $E^*_3$  e que os módulos de elasticidade no segundo e no terceiro ciclos de carregamento são estatisticamente equivalentes. Este resultado foi constatado para as quatro classes de resistência de dicotiledôneas e três classes de resistência de coníferas.

Portanto, fica evidenciado, pela análise dos resultados das comparações entre  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  e  $E^*_1$ ,  $E^*_2$  e  $E^*_3$  dos três ciclos de carregamento propostos pela NBR 7190/1997, Anexo B, que o terceiro ciclo de carregamento pode ser suprimido dos ensaios de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras, sem qualquer prejuízo da significância dos resultados.

No caso da comparação entre os módulos de elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão, trinta e duas espécies analisadas individualmente apresentaram valores de  $p$  superiores a 0,05 e, desta forma, para estas, os valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  podem ser considerados estatisticamente equivalentes. O mesmo ocorreu quando foram analisados os valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  para as trinta e quatro espécies em conjunto, para as quais se obteve  $p=0,89$ .

Pode-se concluir que, a menos das exceções comentadas (espécies Castelo e Champanhe), de uma maneira generalizada os valores dos módulos de

elasticidade nos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e flexão estática, podem ser considerados estatisticamente equivalentes para as espécies tropicais brasileiras.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-143 – *Standard methods of testing small clear specimens of timber*, Philadelphia, USA, p.12-16, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 26 – *Ensaio físicos e mecânicos de madeiras*, Rio de Janeiro, Brasil, p.8-12, 1940.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – *Projeto de estruturas de madeira – Anexo B*, Rio de Janeiro, Brasil, p.50-58, 65-67, 1997.

BERQUÓ, E. S.; SOUZA, J. M. P.; GOTLIEB, S. L. D. *Bioestatística*. 1 ed. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 1981. 350 p.

CAMPOS, H. *Estatística experimental não-paramétrica*. 4. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1983. 360 p.

CHAHUD, E. *Aspectos do comportamento da madeira submetida a solicitações mecânicas*. São Carlos, 1989. p.29-56. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT R 464 – *Método de determinación de la compresión axial o paralela al grano*, Buenos Aires, Argentina, p.1-4, 1972.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT R 466 – *Método de determinación de la compresión perpendicular al grano*, Buenos Aires, Argentina, p.1-5, 1973.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT R 555 – *Método de ensayo de flexión estática*, Buenos Aires, Argentina, p.3-9, 1973.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. COPANT R 742 – *Método de ensayo de tracción paralela al grano*, Buenos Aires, Argentina, p.1-10, 1973.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN EN 408 – *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*, Bruxelles, 19 p, 1995.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN prEN 1193 – *Timber structures – Test methods - Structural timber and glued laminated timber – Determination of additional physical and mechanical properties*, Dublin, 15 p, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3132 – *Wood – Testing in compression perpendicular to grain*, Geneve, Switzerland, 1 ed, p.1-2, 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3133 – *Wood – Determination of ultimate strength in static bending*, Geneve, Switzerland, 1 ed, p.1-2, 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3345 – *Wood– Determination of ultimate tensile stress parallel to grain*, Geneve, Switzerland, 1 ed, p.1-2, 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3349 – *Wood - Determination of modulus of elasticity in static bending*, Geneve, Switzerland, 1 ed, p.1-3, 1975.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3787: *Wood – Test methods – Determination of ultimate stress in compression parallel to grain*, Geneve, Switzerland, 1 ed, p.1-2, 1976.

KOLLMANN, F.E.P.; CÔTÉ JR., W. A. *Principles of wood science and technology: solid wood*. Heilderberg, Germany, Springer/Verlag, 1968. v.1.

L' ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR B 51-007 – *Bois – Méthodes d'essais – essai de compression axiale*, Paris, France, p.1-4, 1942.

L' ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR. B 51-016 – *Bois – Méthodes d'essais – Essai de choc ou flexion statique*, Paris, France, p.1-4, 1987.

L' ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. AFNOR. B 51-018 – *Bois – Méthodes d'essais – Essai de traction axiale*, Paris, France, p.1-4, 1988.

MEYER, P. L. *Probabilidade: aplicações à estatística*. 3 ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1973. 391p.

ROCCO LAHR, F. A. *Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira*. São Carlos, 1983. p.210. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SALES, A. *Proposição de classes para a madeira*. São Paulo, 1996. p.223. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo.

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 DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, VIII, Uberlândia, 2002. *Anais*. Uberlândia, MG, 2002. 9 p. Cd rom, arquivo digital.

SIEGEL, S. *Estatística não-paramétrica - para as ciências do comportamento*. Trad. de Alfredo Alves de Farias. São Paulo, MacGraw – Hill do Brasil Ltda, 1975. 350p.

## ANEXO I

### **Descrição das espécies utilizadas, realizadas no LaMEM.**

O Angelim Amargoso possui parênquima contrastado, visível a olho nu, predominantemente aliforme e confluyente, formando trechos oblíquos; poros pequenos, notados a olho nu, poucos, na maioria solitários, com obstrução por óleo-resina; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouco distintas; cerne de coloração castanho-clara, de aspecto fibroso e gosto amargo acentuado.

O Angelim Araroba possui parênquima contrastado, visível a olho nu, aliforme, confluyente, formando arranjos oblíquos, curtos eventualmente em finas linhas marginais; poros visíveis a olho nu, poucos, médios, às vezes com substância amarelada; raios notados a olho nu no topo e visíveis somente sob lente na face tangencial; camadas de crescimento pouco distintas, às vezes demarcadas por finas linhas marginais; cerne amarelado quando recém cortado, passando a castanho-amarelado com a exposição ao ar; de aspecto fibroso atenuado, e sabor fortemente amargo.

O Angelim Ferro possui parênquima visível a olho nu, confluyente em trechos curtos derivado do parênquima aliforme, ocorrendo também alguma linhas marginais; poros pequenos a médios, solitários e múltiplos, vazios ou obstruídos por óleo-resina ou substância esbranquiçada; raios visíveis somente sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas ou delimitadas pelo parênquima marginal ou zonas fibrosas mais escuras; cerne de coloração variada do castanho a castanho-rosado, a escuro.

O Angelim Pedra possui parênquima contrastado, distinto a olho nu, aliforme. Estendendo-se em faixas longas, largas, algumas regulares, outras irregulares, outras irregulares, onduladas e mesmo em trechos oblíquos e eventualmente em

finas linhas marginais; poros médios, raros, grandes, solitários e múltiplos, às vezes em cadeias radiais, vazios ou com substância esbranquiçada; raios notados a olho nu no topo e na face tangencial, onde a sua estratificação (2 a 3 por mm) é regular; camadas de crescimento mal definidas, demarcadas por zonas fibrosas e finas linhas marginais; cerne bege-rosado-claro ou escuro, róseo-acastanhado ou castanho-escuro-avermelhado, de aspecto fibroso, com manchas castanhas mais escuras, devido à exudação de óleo-resina.

O Angelim Pedra Verdadeiro possui parênquima contrastado, visível a olho nu, aliforme, confluyente, formando arranjos oblíquos, ou eventualmente em faixas tangenciais curtas e em linhas marginais curtas e em linhas marginais finais; poros notados a olho nu, pequenos a médios, pouco numerosos, solitários e múltiplos, obstruídos por óleo-resina ou substância esbranquiçada; raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouco distintas, demarcadas por finas linhas de parênquima marginal e por zonas fibrosas; cerne castanho-claro quando recém cortado, passando a castanho-avermelhado; de cheiro desagradável.

O Angico Preto possui parênquima não muito contrastado, distinto a olho nu, aliforme com confluências curtas ou longas formando trechos irregulares e também vasicêntrico; poros visíveis a olho nu, pouco numerosos, na maioria pequenos, em geral preenchidos com óleo-resina nas partes manchadas do lenho, podendo ocorrer como solitários ou múltiplos; raios medulares visíveis apenas com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouquíssimo distintas, raramente demarcadas por trechos de parênquima marginal; cerne de coloração variando do pardo levemente amarelado ao bege escuro, com freqüentes veios mais escuros; dispostos irregularmente, com aspecto fibroso.

O Branquilho possui parênquima pouco contrastado, notado a olho nu, predominantemente confluyente derivado do aliforme, também vasicêntrico e



ocasionalmente marginal e linhas finas; poros notados a olho nu, pouco numerosos, pequenos e médios, solitários e múltiplos, em geral vazios; raios vazios; raios visíveis apenas sob lente em todas as faces; camadas de crescimento demarcadas por zonas fibrosas mais escuras e ocasionalmente pelas finas linhas de parênquima marginal; cerne de coloração pardo-claro-olivácea, com veios mais escuros presentes em alguns espécimes.

A Cafearana possui parênquima contrastado, visível a olho nu, vasicêntrico aliforme, confluyente em trechos curtos, oblíquos; poros médios, poucos, solitários e múltiplos, obstruídos por óleo-resina; raios notados a olho nu no topo e na face tangencial, onde a sua estratificação (2 a 3 por mm) é um tanto regular; camadas de crescimento demarcadas por zonas fibrosas e parênquima marginal em suas linhas; cerne bege-rosado-claro ou escuro.

O Cambará Rosa possui parênquima visível a olho nu, em faixas curtas ou longas, tangenciando ou envolvendo os poros; poros visíveis a olho nu, na maioria médios, solitários e múltiplos, com obstrução por tilas; raios visíveis sob lente no topo e na face tangencial; cerne de coloração variando do bege ao rosado. Ocorre na Floresta Tropical Amazônica, dispersa principalmente no estado do Pará e no norte do Estado do Mato Grosso.

A Canafístula possui parênquima distinto a olho nu, predominantemente aliforme, com expansões curtas e longas, agrupando poros em arranjos oblíquos; poros visíveis a olho nu, poucos, médios, solitários e múltiplos; raios visíveis apenas com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento distintas, em geral demarcadas por zonas fibrosas mais escuras; cerne de coloração variando entre o bege-rosado escuro ao acastanhado.

A Casca Grossa possui parênquima contrastado, visível a olho nu, aliforme, estendendo-se em prolongamentos estreitos, longos, unindo vários poros; estes visíveis a olho nu, poucos, médios a grandes, solitários na maioria, alguns

obstruídos por tilas; raios, os mais largos visíveis a olho nu, e na face tangencial somente sob lente; presentes, às vezes, canais secretores traumáticos; camadas de crescimento indistintas; cerne bege-rosado.

O Castelo possui parênquima praticamente indistinto; poros notados apenas com auxílio de lente muito pequenos, muito numerosos, em geral vazios, podendo ocorrer como solitários ou múltiplos; raios medulares visíveis apenas com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas; cerne de coloração variando do amarelo muito claro a pardo levemente amarelado; presença esporádica de algumas manchas irregulares de cor escura.

O Catanudo possui parênquima praticamente indistinto; poros visíveis a olho nu, pouco numerosos, pequenos a médios, predominantemente solitários, com alguns arranjos oblíquos; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouco distintas; cerne de coloração róseo-acastanhada, com manchas esparsas escurecidas.

O Cedro Amargo possui parênquima contrastado, distinto a olho nu, em faixas estreitas ou largas, regulares, tocando ou envolvendo parcialmente os poros; destes, os maiores estão freqüentemente dispostos em anéis semiporosos, distintos a olho nu, grandes e médios, predominando os solitários, contendo substância branca ou óleo-resina; presença eventual de canais secretores, em séries verticais; raios pouco visíveis a olho nu no topo e na face tangencial; camadas de crescimento demarcadas pelos anéis semiporosos e parênquima marginal; cerne variando do bege-rosado-escuro ao castanho-claro-rosado e ao castanho-avermelhado, de cheiro característico.

O Cedro Doce possui parênquima indistinto a olho nu, vasicêntrico, escasso; poros notados a olho nu, pouco numerosos, médios, vazios ou contendo resina creme ou preta, solitários em maioria; raios visíveis apenas sob lente no topo e na

face tangencial; camadas de crescimento indistintas ou pouco distintas; cerne de coloração variadas do vinho-claro ao abóbora, de cheiro típico agradável.

O Champanhe possui parênquima pouco contrastado, visível mais claramente com auxílio de lente, predominando o aliforme com expansões laterais curtas; poros notados a olho nu, em geral pequenos e obstruídos por óleo-resina, pouco numerosos, podendo ocorrer como solitários e múltiplos; raios medulares visíveis apenas com auxílio de lente no topo e na face tangencial; sua estratificação medular na proporção de três raios por milímetro, é visível a olho nu; camadas de crescimento pouco distintas, eventualmente demarcadas por zonas fibrosas; cerne de coloração variando do bege amarelado ao castanho amarelado, com aspecto fibroso atenuado. Ocorre na Floresta Tropical Amazônica.

A Copaíba possui parênquima distinto a olho nu, predominantemente em faixas marginais estreitas; poros notados a olho nu, pouco numerosos, em geral pequenos e solitários; presença de canais secretores axiais localizados nas faixas marginais; raios visíveis a olho nu no topo e distintos com auxílio de lente na face tangencial; camadas de crescimento distintas, demarcadas pelo parênquima marginal; cerne de coloração variando do castanho ao castanho-avermelhado escuro, com veios escuros e manchas irregularmente dispersas.

A Cupiúba possui parênquima muito escasso, difuso, às vezes indistinto; poros pouco notados a olho nu, pouco numerosos, pequenos, exclusivamente solitários, vazios ou obstruídos por óleo-resina; raios visíveis apenas sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouco distintas às vezes demarcadas por zonas fibrosas; cerne castanho-rosado; de cheiro desagradável.

A Cutiúba possui parênquima aliforme com finas expansões, às vezes agrupando vários poros; poros numerosos, médios a grandes, vazios ou obstruídos com substâncias rosa, creme ou branca, solitários; raios médios, pouco numerosos; camadas de crescimento pouco distintas, às vezes demarcadas por faixas de

parênquima confluyente derivado do aliforme; canais secretores em séries verticais bem destacadas; cerne de coloração vinho-claro-abóbora.

A Envira possui parênquima visível a olho nu, em faixas longas, envolvendo poros e em faixas marginais; poros médios, pouco numerosos, solitários e múltiplos, em geral, obstruídos por tilas; raios visíveis a olho nu somente sob lentes no topo e nas faces tangenciais; camadas de crescimento demarcadas por zonas de fibras mais escuras; coloração do cerne variando entre a castanho-olivácea e castanho-escura, apresentando ocasionalmente canais de secreção. Ocorre na Floresta Tropical Amazônica.

O Eucalipto Grandis possui parênquima visível sob lente, vasicêntrico, escasso e, ocasionalmente, disperso; poros visíveis a olho nu, numerosos, médios, raramente com obstruções; raios visíveis sob lente no topo e na face tangencial; cerne de coloração fortemente rosada. Ocorre nas áreas de reflorestamento das regiões sul e sudeste do Brasil.

A Garapa possui parênquima ligeiramente contrastado, visível mais claramente com auxílio de lente, predominando o aliforme em confluências curtas, com a tendência a formar faixas e também em finíssimas linhas marginais; poros visíveis apenas com o auxílio de lente, numerosos, em geral pequenos e solitários, obstruídos por óleo-resina; raios medulares visíveis apenas com auxílio de lente no topo e na face tangencial, onde é notada estratificação ligeiramente irregular; camadas de crescimento distintas, demarcadas por zonas fibrosas um pouco mais escuras, cerne de coloração variando do bege-amarelado ao pardo claro.

O Goiabão possui parênquima distinto sob lente, em linhas finas aparentemente concêntricas, ligando os poros e formando um reticulado com os raios; poros solitários e múltiplos, na maioria vazios; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento demarcadas

pelas linhas de parênquima; cerne de aspecto fibroso atenuado e coloração variando do beje queimado ao castanho claro.

A Guaiçara possui parênquima bem contrastado, visível a olho nu, predominantemente aliforme, com confluências em trechos curtos e oblíquos, podendo ocorrer também em finas linhas marginais; poros médios, pouco numerosos, na maioria obstruídos por óleo-resina, podendo ocorrer como solitários ou múltiplos; raios medulares visíveis apenas com lente no topo, na face tangencial; sua estratificação é regular, na proporção de quatro raios por milímetro, e visível a olho nu; camadas de crescimento distintas, demarcadas por zonas fibrosas mais escuras e, às vezes, pelas finas linhas de parênquima marginal; cerne de coloração variando do pardo-acastanhado ao castanho-avermelhado, com acentuado aspecto fibroso.

A Guaruaia possui parênquima visível a olho nu, vasicêntrico e eventualmente aliforme, também em finas linhas marginais afastadas; poros médios, poucos, solitários e múltiplos, vazios ou obstruídos por óleo-resina ou substância branca; raios somente visíveis sob lente tanto no topo como na face tangencial; camadas de crescimento demarcadas pelo parênquima marginal e ocasionalmente por zonas fibrosas; cerne variável do róseo-acastanhado ao bege-rosado-escuro, com veios irregulares.

O Ipê possui parênquima pouco contrastado, aliforme, confluyente, formando pequenos arranjos oblíquos; poros visíveis somente sob lente, muito numerosos, muito pequenos, obstruídos por ipeína; raios visíveis somente sob lente no topo e na face tangencial, onde a sua estratificação é regular (3 por mm); camadas de crescimento pouco distintas, levemente demarcadas pelas linhas finas do parênquima marginal; cerne pardo-acastanhado, com reflexos esverdeados, de aspecto fibroso atenuado.

A Itaúba possui parênquima indistinto; poros visíveis sob lente, pouco numerosos, solitários e múltiplos, às vezes em cadeias radiais, obstruídos por tilas; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento apenas ocasionalmente delimitadas por zonas fibrosas; cerne de coloração amarelo-olivácea quando recém cortado, tornando-se parda com exposição ao ar.

O Jatobá possui parênquima bem contrastado e distinto a olho nu nas faixas marginais e ainda aliforme ou vasicêntrico escasso, apenas visível sob lente; poros distintos a olho nu, poucos, médios e grandes, solitários e múltiplos; raios notados no topo a olho nu e bem distintos sob lente na face tangencial; camadas de crescimento distintas e bem demarcadas pelo parênquima marginal; cerne extremamente variável em tons de bege, róseo e castanho.

O Louro Preto possui parênquima axial praticamente indistinto mesmo sob lente, vasicêntrico escasso; poros pouco notados a olho nu, solitários predominantes e raros múltiplos, pequenos, médios, pouco numerosos; raios pouco notados a olho nu no topo e na face tangencial; camadas de crescimento pouco demarcadas por zonas fibrosas mais escuras; cerne de coloração variada do castanho a pardo levemente amarelado.

A Mandioqueira possui parênquima pouco contrastado, visível somente sob lente, aliforme, de aletas curtas, eventualmente confluentes, podendo formar arranjos oblíquos; poros notados a olho nu, solitários e múltiplos, poucos a poucos numerosos, pequenos, obstruídos por substância esbranquiçada; raios somente visíveis sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas, eventualmente demarcadas por zonas fibrosas mais escuras; cerne bege-claro levemente rosado a bege-amarelado.

A Oiticica Amarela possui parênquima contrastado, notado a olho nu, aliforme, confluyente, formando faixas onduladas, e às vezes em finíssimas camadas

marginais; poros visíveis sob lente, poucos, muito pequenos, vazios; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial, onde se apresentam estratificados (4 por mm); camadas de crescimento ocasionalmente demarcadas por zonas fibrosas; cerne de coloração beje-amarelada.

No *Pinus Caribaea* o parênquima e poros estão ausentes; traqueídes individualmente indistintos a olho nu, mas visíveis com auxílio de lente, muito pequenos, com ligeira orientação radial; raios pouco notados no topo e na face tangencial; camadas de crescimento demarcadas por lenho inicial e tardio, com espessuras variáveis; textura média; cerne de coloração bege, levemente resinoso e de cheiro agradável.

No *Pinus Elliottii* o parênquima e os poros estão ausentes; traqueídes individualmente indistintos a olho nu, mas visível sob lente, minúsculos, com disposição tendendo para orientação radial; raios visíveis sob lente no topo e pouco notados na face tangencial, mesmo sob lente; camadas de crescimento claramente demarcadas por lenho inicial e tardio com espessuras variáveis; textura fina e média; cerne de tonalidade bege, resinoso e de cheiro agradável. Constitui uma das espécies de madeira de reflorestamento e sua ocorrência é nas regiões sul e sudeste.

No *Pinus Hondurensis* o parênquima e os poros estão ausentes; traqueídes individualmente indistintos a olho nu mas visíveis sob lente, minúsculo, com disposição radial bem definida; raios visíveis sob lente no topo, pouco notados nas faces tangencial e radial, mesmo sob lente; camadas de crescimento claramente demarcadas por lenho inicial e tardio, com espessuras variáveis; textura média; cerne de tonalidade bege acentuada, resinoso e de cheiro agradável. Constitui uma das espécies de madeira de reflorestamento e sua ocorrência é nas regiões sul e sudeste.

A Quarubarana possui parênquima distinto a olho nu, em faixas longas, tangenciando os poros, e também em trechos curtos, descontínuos; poros visíveis a olho nu, médios, múltiplos e solitários, obstruídos por tilas; raios visíveis somente sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas; cerne róseo-acastanhado.

O Rabo de Arraia possui parênquima contrastado, visível a olho nu, aliforme, com alguns prolongamentos envolvendo os poros; estes visíveis a olho nu, poucos, médios, solitários, predominantemente vazios e alguns com obstrução por tilas; raios visíveis com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas; cerne de coloração castanha.

A Sucupira possui parênquima contrastado, visível a olho nu, predominando o aliforme com expansões laterais curtas, formando, às vezes, pequenas confluências; poros notados a olho nu, poucos, pequenos a médios, solitários e múltiplos, obstruídos por óleo-resina; raios visíveis somente sob lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento indistintas; cerne pardo-acastanhado-escuro, de aspecto fibroso acentuado.

O Tachi possui parênquima vasicêntrico escasso; poros notados a olho nu, poucos, médios, solitários e múltiplos, com algumas cadeias radiais; raios visíveis somente com auxílio de lente no topo e na face tangencial; camadas de crescimento aparentemente demarcadas por zonas fibrosas; cerne de coloração pardo-claro-oliváceo.

A Tatajuba possui parênquima indistinto; poros médios, eventualmente grandes, solitários em predominância, obstruídos por tilas; raios visíveis a olho nu no topo e apenas sob lente na face tangencial; camadas de crescimento ligeiramente demarcadas por zonas fibrosas; cerne amarelo-dourado, escurecendo para amarelo-queimado ou castanho-amarelado.



A Umirana possui parênquima aliforme, com pequenas expansões, ocorrendo ainda longas expansões terminais; poros mediamente numerosos, médios, vazios, solitários ou duplos; raios pouco visíveis a olho nu no topo e na face tangencial, finos, pouco numerosos, sem estratificação; camadas de crescimento demarcadas por extensões do parênquima aliforme, formando linha terminal; cerne pardo-escuro-avinhado, com veios pouco ondulados.

## APÊNDICE A

### Exemplos gráficos para a determinação dos módulos de elasticidade ( $E_1$ , $E_2$ e $E_3$ ) nos três ciclos de carregamento

Neste apêndice estão apresentados dois exemplos gráficos referentes à determinação dos módulos de elasticidade nos três ciclos de carregamento  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ . O gráfico 1A refere-se a um corpo-de-prova de Envira submetido ao ensaio de flexão estática e, o gráfico 2A, a um corpo-de-prova de Pinus Hondurensis submetido ao ensaio de compressão paralela às fibras. Estão acompanhados, também, das tabelas 1A e 2A, que contêm os dados referentes a eles.

Tabela 1A – Dimensões,  $E_3$ , forças e flechas de um corpo-de-prova de Envira submetido à ensaio de flexão estática.

h (cm)	Forças (daN)	Flechas (cm)
5,163	50	0,146
	250	0,626
	250	0,623
b (cm)	50	0,115
5,075	50	0,114
	250	0,610
	250	0,610
l (cm)	50	0,118
105	50	0,118
	100	0,255
	150	0,368
$E_3$ (MPa)	200	0,490
16440	250	0,612
	300	0,750
	350	0,864

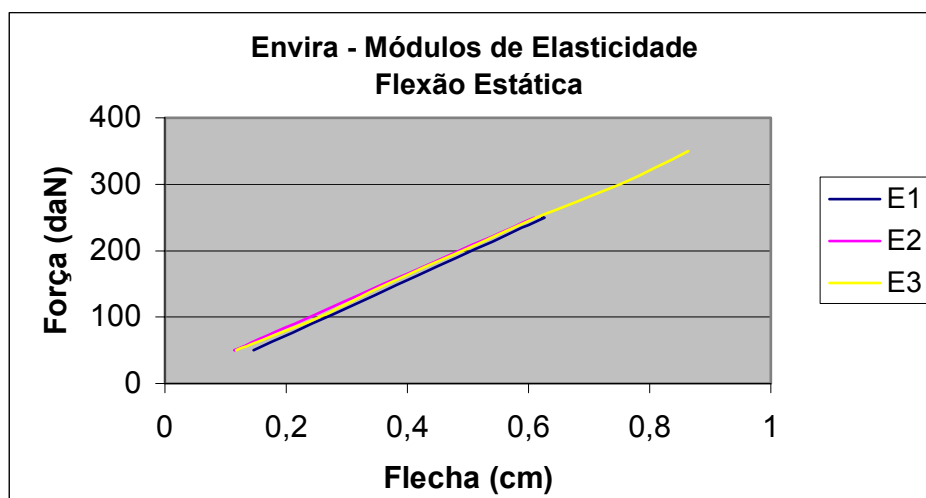


Gráfico 1A – Exemplo gráfico para a determinação dos módulos de elasticidade ( $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ) nos três ciclos de carregamento para um corpo-de-prova de Envira submetido ao ensaio de flexão estática.

Tabela 2A – Dimensões,  $E_3$ , leituras dos relógios 1 e 2, média das leituras dos relógios 1 e 2, forças, deformações e tensões de um corpo-de-prova de Pinus Hondurensis submetido ao ensaio de compressão paralela às fibras.

h (mm)	Relógio 1 (mm)	Relógio 2 (mm)	Média (mm)	Forças (daN)	Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
50,52	0,010	0,033	0,0215	1000	0,0002	3,8
	0,103	0,191	0,1470	5000	0,0015	19,2
b (mm)	0,105	0,193	0,1490	5000	0,0015	19,2
	50,42	0,013	0,040	0,0265	1000	0,0003
l (mm)	0,011	0,036	0,0235	1000	0,0002	3,8
	0,105	0,191	0,1480	5000	0,0015	19,2
100	0,106	0,192	0,1490	5000	0,0015	19,2
	0,012	0,037	0,0245	1000	0,0002	3,8
A (mm <sup>2</sup> )	0,010	0,035	0,0225	1000	0,0002	3,8
	2547	0,025	0,075	0,0500	2000	0,0005
E <sub>3</sub> (MPa)	0,051	0,119	0,0850	3000	0,0009	11,5
	0,076	0,153	0,1145	4000	0,0011	15,4
12361	0,105	0,189	0,1470	5000	0,0015	19,2
	0,135	0,226	0,1805	6000	0,0018	23,1
	0,170	0,267	0,2185	7000	0,0022	26,9

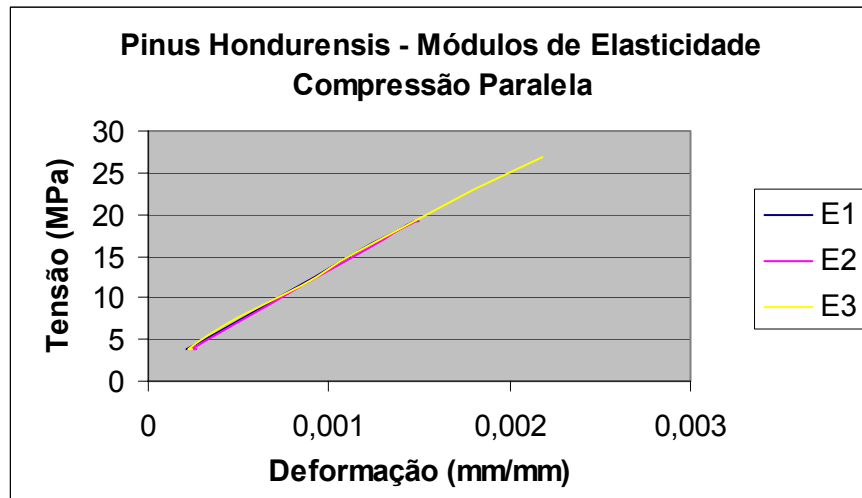


Gráfico 2A – Exemplo gráfico para a determinação dos módulos de elasticidade ( $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$ ) nos três ciclos de carregamento para um corpo-de-prova de Pinus Hondurensis submetido ao ensaio de compressão paralela às fibras.

## APÊNDICE B

### Exemplos de aplicação do método estatístico não-paramétrico Kruskal-Wallis

São expostos a seguir dois exemplos de análises utilizando os dados das espécies Champanhe e Rabo de Arraia, duas das trinta e quatro espécies utilizadas nesta pesquisa. Os valores dos módulos de elasticidade na compressão paralela às fibras ( $E_{c0}$ ), tração paralela às fibras ( $E_{t0}$ ) e flexão estática ( $E_M$ ) para estas espécies, em daN/cm<sup>2</sup> e com 2 graus de liberdade, estão representados nas tabelas 1B e 2B.

Os números entre parênteses representam os postos aos quais os valores dos módulos de elasticidade correspondem,  $R_j$  representa a soma dos postos em cada coluna,  $H$  o valor da estatística,  $CP$  representa o número do corpo-de-prova e  $p$  representa a probabilidade associada a  $H$  e a dois graus de liberdade.

Tabela 1B – Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  para o Champanhe, postos respectivos e valores de  $R_j$

CP	Champanhe		
	$E_{c0}$	$E_{t0}$	$E_M$
1	246585 (28)	207912 (8)	266756 (33)
2	245442 (27)	217234 (11)	234009 (21)
3	184796 (3)	222098 (15)	225705 (18)
4	193979 (4)	231198 (20)	252376 (30)
5	226012 (19)	184261 (2)	235880 (22)
6	265497 (32)	236795 (23)	272891 (34)
7	220871 (14)	209457 (9)	259145 (31)
8	217480 (12)	167175 (1)	203822 (7)
9	240051 (25)	210984 (10)	285050 (35)
10	218474 (13)	225341 (17)	242757 (26)
11	238421 (24)	201007 (6)	294631 (36)
12	223137 (16)	200929 (5)	247854 (29)
$R_j$	217	127	322
$H$		14,30	
$p$		0,001	

Tabela 2B – Valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  para o Rabo de Arraia, postos respectivos e valores de  $R_j$

CP	Rabo de Arraia		
	$E_c$	$E_t$	$E_f$
1	123042 (12)	119897 (8)	125041 (15)
2	119938 (9)	105976 (3)	143129 (26)
3	165949 (32)	173522 (33)	154150 (27)
4	135663 (22)	84827 (1)	102620 (2)
5	120119 (10)	139476 (24)	107578 (5)
6	140815 (25)	135838 (23)	134818 (21)
7	124193 (14)	179850 (36)	160615 (29)
8	125363 (16)	178818 (34)	131807 (19)
9	179760 (35)	158070 (28)	165452 (31)
10	111032 (7)	133759 (20)	126020 (17)
11	127573 (18)	107296 (4)	109133 (6)
12	160727 (30)	123458 (13)	120411 (11)
<b><math>R_j</math></b>	230	227	209
<b>H</b>		0,19	
<b>p</b>		0,908	

Através destes exemplos pode-se notar que o comportamento entre estas duas espécies diferem em relação aos módulos de elasticidade nestes três tipos de solicitações.

Para o Champanhe o maior  $R_j$  ocorreu nos valores de  $E_M$ , o  $R_j$  intermediário nos valores de  $E_{c0}$  e o menor  $R_j$  nos valores de  $E_{t0}$ , pois os maiores valores de módulos de elasticidade ocorreram na flexão, os medianos na compressão e os menores na tração.

Isto está relacionado, muito provavelmente, às particularidades anatômicas desta espécie em relação às demais já caracterizadas. Esse fato é verificado pelo valor de  $p=0,001$  que é menor que  $\alpha = 0,05$  e, desta forma, para o Champanhe os valores de  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$  não podem, a princípio, ser considerados estatisticamente equivalentes.

Para o Rabo de Arraia os valores de  $R_j$  estão muito próximos para  $E_{c0}$ ,  $E_{t0}$  e  $E_M$ , já que os valores ordenados dos módulos de elasticidade estão distribuídos de forma praticamente igual nos ensaios de compressão, tração e flexão. O valor de  $p=0,908$  é maior que  $\alpha = 0,05$  e assim os valores dos módulos de elasticidade

nestes três tipos de solicitações podem ser considerados estatisticamente equivalentes.

## APÊNDICE C

### Tabela dos valores da amplitude Q para o método das comparações múltiplas

Tabela 1C – Valores da amplitude Q a ser usada nas comparações múltiplas, caso de grandes amostras, com  $n_1 = n_2 = \dots = n_k = n$ , ( $n \rightarrow \infty$ ), onde k é igual ao número de tratamentos, ou amostras

k	$\alpha$				
	0,20	0,105	0,05	0,01	0,001
2	1,812	2,326	2,772	3,643	4,654
3	2,424	2,902	3,314	4,120	5,063
4	2,784	3,240	3,633	4,403	5,309
5	3,037	3,478	3,858	4,603	5,484
6	3,232	3,661	4,030	4,757	5,619
7	3,389	3,808	4,170	4,882	5,730
8	3,520	3,931	4,286	4,987	5,823
9	3,632	4,037	4,386	5,078	5,903
10	3,730	4,129	4,474	5,157	5,973
11	3,817	4,211	4,552	5,227	6,036
12	3,895	4,285	4,622	5,290	6,092
13	3,966	4,351	4,685	5,348	6,144
14	4,030	4,412	4,743	5,400	6,191
15	4,089	4,468	4,796	5,448	6,234
16	4,144	4,519	4,845	5,493	6,274
17	4,195	4,568	4,891	5,535	6,312
18	4,242	4,612	4,934	5,574	6,347
19	4,287	4,654	4,974	5,611	6,380
20	4,328	4,694	5,012	5,645	6,411
22	4,405	4,767	5,081	5,709	6,468
24	4,474	4,832	5,144	5,766	6,520
26	4,537	4,892	5,201	5,818	6,568
28	4,595	4,947	5,253	5,866	6,611
30	4,648	4,997	5,301	5,910	6,651
32	4,697	5,044	5,346	5,952	6,688
34	4,793	5,087	5,388	5,990	6,723
36	4,786	5,128	5,427	6,026	6,756
38	4,826	5,166	5,463	6,060	6,787
40	4,854	5,202	5,498	6,092	6,816
50	5,026	5,357	5,646	6,228	6,940
60	5,155	5,480	5,764	6,338	7,041
70	5,262	5,582	5,863	6,429	7,124
80	5,353	5,669	5,947	6,507	7,198
90	5,433	5,745	6,020	6,575	7,258
100	5,503	5,812	6,085	6,636	7,314

Tabela adaptada de: HARTER, H.L., 1960. Tables of Range and Studentized Range. Annals of Mathematical Statistical 31: 1122-47, apud CAMPOS, H., 1983.