

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

**ESTUDO DA CLASSIFICAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PEÇAS SERRADAS DE  
ESPÉCIES CULTIVADAS NO BRASIL PARA USO EM ESTRUTURAS**

**MARCELA CANDIAN**

**SÃO CARLOS**

**2007**

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

**“ESTUDO DA CLASSIFICAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PEÇAS SERRADAS  
DE ESPÉCIES CULTIVADAS NO BRASIL PARA USO EM ESTRUTURAS”**

**MARCELA CANDIAN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Construção Civil**.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos de Edificações.

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales

**SÃO CARLOS**

**2007**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

C217ec

Candian, Marcela.

Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas / Marcela Candian. -- São Carlos : UFSCar, 2007.  
115 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Estruturas de madeira. 2. Madeira. 3. Ultra-som. 4. Vibração transversal. 5. Classificação mecânica. I. Título.

CDD: 624.184 (20ª)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil  
Via Washington Luís, Km 235 - CEP: 13.565-905 - São Carlos/SP/Brasil  
Fone(16) 3351-8262- Ramal: 232 - Fax (16) 3351-8259  
Site: [www.deciv.ufscar.br/ppgciv](http://www.deciv.ufscar.br/ppgciv) Email: [ppgciv@power.ufscar.br](mailto:ppgciv@power.ufscar.br)

**“ESTUDO DA CLASSIFICAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA DE PEÇAS SERRADAS  
DE ESPÉCIES CULTIVADAS NO BRASIL PARA USO EM ESTRUTURAS”**

**MARCELA CANDIAN**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 02 de fevereiro de 2007

Banca Examinadora constituída pelos professores

Prof. Dr. Almir Sales – DECiv/PPGCIV/UFSCar  
Orientador

Prof. Dr. Carlito Calil Júnior – EESC/USP/São Carlos  
Examinador Externo

Profª Drª Fabiana Goia Rosa de Oliveira – UTFR/PR  
Examinadora Externa

**Dedicatória:**

Aos meus queridos pais Edison e Maria, razão da minha existência.

# AGRADECIMENTOS

---

---

A Deus por ter permitido a concretização deste trabalho e por ter sempre iluminado minha vida.

Aos meus pais Edison e Maria pelos belos ensinamentos que me passaram, pelo exemplo de vida, pelo carinho e amor dedicados a mim, pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida, sempre me dando força e coragem para seguir em frente, sem eles eu jamais chegaria em lugar algum.

Aos meus queridos irmãos Juliana e Edison, meus grandes amigos, por todo amor e carinho.

Ao Almir Sales, professor, orientador e grande amigo, agradeço pela paciência, pelos importantes ensinamentos, pela compreensão e pela confiança depositada em mim. Sou eternamente grata.

Aos funcionários do Lamem/USP pelo apoio na realização dos ensaios e pela amizade.

À amiga Fabiana Goia Rosa de Oliveira pela ajuda em tantos momentos durante o desenvolvimento desta pesquisa como co-orientadora e pela amizade e carinho.

A todos os amigos que estiveram presentes durante esta fase de minha vida, estando sempre por perto nos bons e nos maus momentos, em especial minha amiga Marcela Novischi Kataoka.

Às alunas de iniciação científica Viviane e Patrícia pela ajuda na realização dos ensaios e pela amizade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar.

Ao professor Dr. Carlito Calil Júnior pelo fornecimento das peças para a realização da parte experimental deste trabalho e pelas importantes contribuições para o desenvolvimento desta pesquisa.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

“Se muito vale o já feito, mais vale o que será”.  
(Milton Nascimento)

## RESUMO

---

**CANDIAN, M. (2007).** *Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas.* Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2007.

Este trabalho teve por finalidade verificar a acuracidade das técnicas de ultra-som e vibração transversal comparativamente aos valores obtidos em ensaios estáticos, para madeira serrada empregada em estruturas. Com os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho foi possível calibrar o coeficiente de modificação ( $k_{mod,3}$ ) da NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, além de ampliar o conhecimento relativo aos ensaios não-destrutivos em madeira. Na metodologia experimental foram realizados estudos com peças de dimensão estrutural das espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*, as quais foram classificadas mecanicamente utilizando as técnicas de ultra-som e vibração transversal, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ). Simultaneamente aos ensaios com ultra-som realizou-se a classificação visual das peças e ensaios de flexão estática (MOE). Os valores de coeficiente de determinação para a técnica de vibração transversal ( $R^2= 0,75$ ,  $R^2= 0,80$ ,  $R^2= 0,93$  e  $R^2= 0,89$ ) e para a técnica de ultra-som ( $R^2 = 0,65$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $R^2 = 0,66$  e  $R^2 = 0,88$ ), obtidos respectivamente para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*, são significativos, demonstrando que as técnicas de ultra-som e vibração transversal são importantes ferramentas para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira. A técnica de vibração transversal apresentou melhores resultados em relação ao ultra-som, pois apresenta uma melhor aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático associado. Na determinação dos valores de coeficiente de modificação  $k_{mod,3}$ , verificou-se que a técnica de vibração transversal apresentou valores superiores de coeficiente em relação a técnica de ultra-som, pois esta permite uma classificação mais próxima dos valores obtidos na flexão estática.

*Palavras-chave: madeira, ultra-som, vibração transversal, classificação mecânica.*

## ABSTRACT

---

**CANDIAN, M. (2007).** *Study of nondestructive classification of sawed parts of cultivated species in Brazil for use in structures.* Master Degree Thesis – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2007.

This research had for purpose comparatively to verify the accuracy of the techniques of transverse vibration and ultrasound to the values gotten in static testings, for sawed wood used in structures. With the results gotten in the development of the present research it was possible to calibrate the coefficient of modification ( $k_{\text{mod}, 3}$ ) of NBR 7190:1997, besides increasing the relative knowledge to the nondestructive tests in wood. In the experimental methodology studies with parts of structural members of *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* and *Goupia glabra* had been carried through, which had been classified using the techniques of ultrasound and transverse vibration, for the determination of the dynamic modulus of elasticity (Ed). Simultaneously to the tests with ultrasound they had been carried through the visual grading and tests of static bending (MOE). The values of coefficient of determination for the technique of transverse vibration ( $R^2 = 0,75$ ,  $R^2 = 0,80$ ,  $R^2 = 0,93$  and  $R^2 = 0,89$ ) and for the technique of ultrasound ( $R^2 = 0,65$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $R^2 = 0,66$  and  $R^2 = 0,88$ ), gotten respectively for the *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* and *Goupia glabra* are significant, demonstrating that the techniques of ultrasound and transverse vibration are important tools for nondestructive inference of the modulus of elasticity of wood. The technique of transverse vibration presented better resulted in relation to the ultrasound, therefore it presents one better tack enters the physical model of the phenomenon and the corresponding associated mathematical model. In the determination of the values of coefficient of modification  $k_{\text{mod}, 3}$ , was verified that the technique of transverse vibration presented superior values of coefficient in relation the ultrasound technique, therefore allows a classification next to the values gotten in the static bending.

*Keywords: wood, ultrasound, transverse vibration, mechanics classification.*

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 3.1.</b> Equipamentos de ultra-som.....	15
<b>Figura 3.2.</b> Influência da umidade nos módulos de elasticidade de <i>Sitka spruce</i> Fonte: Bucur (1995).....	17
<b>Figura 3.3.</b> Velocidade longitudinal em função da relação $L/\lambda$ – <i>Eucalyptus</i> <i>citriodora</i> . Fonte: Candian (2004).....	18
<b>Figura 3.4.</b> Velocidade longitudinal em função da relação $L/\lambda$ – <i>Hymenaea spp.</i> Fonte: Candian (2004).....	19
<b>Figura 3.5.</b> Velocidade longitudinal em função da relação $L/\lambda$ – <i>Goupia glabra</i> . Fonte: Candian (2004).....	19
<b>Figura 3.6.</b> Equipamento de vibração transversal.....	25
<b>Figura 3.7.</b> Sistema massa-mola e viga vibrando transversalmente. Fonte: Ross e Pellerin (1994).....	26
<b>Figura 3.8.</b> Esquema de um equipamento de vibração transversal.....	28
<b>Figura 3.9.</b> Ensaio com a MSR. Fonte: Freitas e Calil Jr. (2004).....	31
<b>Figura 3.10.</b> Esquema de funcionamento de uma máquina MSR Fonte: Carreira et al. (2004).....	32
<b>Figura 3.11.</b> Esquema de um ensaio de ondas de tensão Fonte: Forest Products Laboratory. (2000).....	35
<b>Figura 3.12.</b> Ensaio de ondas de tensão.....	36
<b>Figura 4.1.</b> Local onde as peças ficaram armazenadas para secagem.....	48
<b>Figura 4.2.</b> Balança e estufa.....	49
<b>Figura 4.3.</b> Corpo-de-prova para determinação da densidade básica e aparente.....	51
<b>Figura 4.4.</b> Nós em uma peça de madeira. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	53

<b>Figura 4.5.</b> Nó de centro.....	54
<b>Figura 4.6.</b> Nó de borda.....	54
<b>Figura 4.7.</b> Nó de face estreita.....	55
<b>Figura 4.8.</b> Medição da inclinação das fibras. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	55
<b>Figura 4.9.</b> Inclinação das fibras da madeira em uma viga.....	56
<b>Figura 4.10.</b> Medição de racha linear e fenda respectivamente. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	56
<b>Figura 4.11.</b> Fenda.....	57
<b>Figura 4.12.</b> Formas de medir a densidade em peças de madeira. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	58
<b>Figura 4.13.</b> Anéis de crescimento.....	58
<b>Figura 4.14.</b> Medição do encurvamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	59
<b>Figura 4.15.</b> Medição do encanoamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	59
<b>Figura 4.16.</b> Medição do arqueamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	60
<b>Figura 4.17.</b> Medição do torcimento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).....	60
<b>Figura 4.18.</b> Viga empenada (encurvamento).....	60
<b>Figura 4.19.</b> Fissuras de compressão.....	61
<b>Figura 4.20.</b> Equipamento de ultra-som.....	62
<b>Figura 4.21.</b> Ensaio de ultra-som.....	63
<b>Figura 4.22.</b> Equipamento de vibração transversal.....	63
<b>Figura 4.23.</b> Ensaio de vibração transversal.....	64
<b>Figura 4.24.</b> Ensaio de flexão estática.....	65
<b>Figura 5.1.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> .....	70
<b>Figura 5.2.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	72
<b>Figura 5.3.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Pinus sp</i> .....	74
<b>Figura 5.4.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Goupia glabra</i> .....	76

<b>Figura 6.1.</b> Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> – Ultra-som.....	81
<b>Figura 6.2.</b> Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> – Vibração transversal.....	82
<b>Figura 6.3.</b> Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> – Flexão estática.....	82
<b>Figura 6.4.</b> MOE versus $E_{d, us}$ – <i>Eucalyptus grandis</i> .....	86
<b>Figura 6.5.</b> MOE versus $E_{d, us}$ – <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	86
<b>Figura 6.6.</b> MOE versus $E_{d, us}$ – <i>Pinus sp.</i> .....	87
<b>Figura 6.7.</b> MOE versus $E_{d, us}$ – <i>Goupia glabra</i> .....	87
<b>Figura 6.8.</b> MOE versus $E_{d, vt}$ – <i>Eucalyptus grandis</i> .....	92
<b>Figura 6.9.</b> MOE versus $E_{d, vt}$ – <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	92
<b>Figura 6.10.</b> MOE versus $E_{d, vt}$ – <i>Pinus sp.</i> .....	93
<b>Figura 6.11.</b> MOE versus $E_{d, vt}$ – <i>Goupia glabra</i> .....	93
<b>Figura 6.12.</b> Histograma variação percentual média (%) x folhosas.....	99

## LISTA DE TABELAS

---

---

<b>Tabela 3.1.</b> Coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Fonte: Oliveira (2005).....	22
<b>Tabela 3.2.</b> Valores de $k_{mod,1}$ . Fonte: NBR 7190:1997.....	38
<b>Tabela 3.3.</b> Classes de carregamento. Fonte: NBR 7190:1997.....	38
<b>Tabela 3.4.</b> Valores de $k_{mod,2}$ . Fonte: NBR 7190:1997.....	39
<b>Tabela 3.5.</b> Classes de umidade. Fonte: NBR 7190:1997.....	39
<b>Tabela 3.6.</b> Distribuição das espécies de coníferas nas classes de resistência. Fonte: British Standards Institution (2000).....	41
<b>Tabela 3.7.</b> Distribuição das espécies de folhosas nas classes de resistência. Fonte: British Standards Institution (2000).....	42
<b>Tabela 5.1.</b> Classe das vigas da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> .....	69
<b>Tabela 5.2.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> .....	69
<b>Tabela 5.3.</b> Classe das vigas da espécie <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	71
<b>Tabela 5.4.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	71
<b>Tabela 5.5.</b> Classe das vigas da espécie <i>Pinus sp</i> .....	73
<b>Tabela 5.6.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Pinus sp</i> .....	73
<b>Tabela 5.7.</b> Classe das vigas da espécie <i>Goupia glabra</i> .....	75
<b>Tabela 5.8.</b> Quantidade de vigas em cada classe para a espécie <i>Goupia glabra</i> .....	75
<b>Tabela 5.9.</b> Valores obtidos para as vigas da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> no ensaio de ultra-som.....	77
<b>Tabela 5.10.</b> Valores obtidos para as vigas da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> no ensaio de vibração transversal.....	78
<b>Tabela 5.11.</b> Valores obtidos para as vigas da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> no	

ensaio de flexão estática.....	79
<b>Tabela 6.1.</b> Quadro de análise de variância.....	83
<b>Tabela 6.2.</b> Valores máximos, mínimos e médios e coeficientes de variação.....	85
<b>Tabela 6.3.</b> Quadro de análise de variância (MOE em função de $E_{d, us}$ ).....	89
<b>Tabela 6.4.</b> Coeficientes de regressão (MOE em função de $E_{d, us}$ ).....	90
<b>Tabela 6.5.</b> Regressões entre o MOE e $E_{d, us}$ .....	90
<b>Tabela 6.6.</b> Valores máximos, mínimos e médios de módulo de elasticidade dinâmico e estático e coeficientes de variação.....	91
<b>Tabela 6.7.</b> Quadro de análise de variância (MOE em função de $E_{d, vt}$ ).....	95
<b>Tabela 6.8.</b> Coeficientes de regressão (MOE em função de $E_{d, vt}$ ).....	96
<b>Tabela 6.9.</b> Regressões entre o MOE e $E_{d, vt}$ .....	96
<b>Tabela 6.10.</b> Valores de variação percentual média para as espécies em estudo.....	98
<b>Tabela 6.11.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para peças classificadas visualmente e pela flexão estática.....	99
<b>Tabela 6.12.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i> .....	100
<b>Tabela 6.13.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para a espécie <i>Eucalyptus citriodora</i> .....	100
<b>Tabela 6.14.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para a espécie <i>Pinus sp.</i> .....	101
<b>Tabela 6.15.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para a espécie <i>Goupia glabra</i> .....	101
<b>Tabela 6.16.</b> Variação percentual adotada para determinação do $k_{mod, 3}$ .....	102
<b>Tabela 6.17.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ aplicáveis às folhosas.....	102
<b>Tabela 6.18.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para coníferas classificadas como densas (D).....	103
<b>Tabela 6.19.</b> Valores de $k_{mod, 3}$ para coníferas classificadas como não-densas (ND).....	104
<b>Tabela 6.20.</b> Valores propostos de $k_{mod, 3}$ para folhosas.....	105
<b>Tabela 6.21.</b> Valores propostos de $k_{mod, 3}$ para coníferas classificadas como densas (D).....	105
<b>Tabela 6.22.</b> Valores propostos de $k_{mod, 3}$ para coníferas classificadas como não-densas (ND).....	105

# LISTA DE SÍMBOLOS

---

---

## Letras romanas maiúsculas

**D** - amortecimento

**E<sub>d</sub>** - módulo de elasticidade dinâmico

**E<sub>d, us</sub>** - módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de ultra-som

**E<sub>d, vt</sub>** - módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de vibração transversal

**EL** - módulo na direção longitudinal

**ER** - módulo na direção radial

**ET** - módulo na direção tangencial

**F** - variável de teste

**F<sub>I</sub>** - fator que considera o momento de inércia assumido

**F<sub>K</sub>** - fator que leva em consideração a constante K aplicada

**F<sub>overhang</sub>** - fator que leva em consideração o balanço da viga além do suporte

**F<sub>shear</sub>** - fator que leva em consideração as deformações por cisalhamento

**F<sub>support</sub>** - fator que considera quando o suporte não é rígido

**F<sub>W</sub>** - fator que leva em consideração a falta de homogeneidade na distribuição do peso

**I** - momento de inércia da seção transversal

**K** - rigidez da mola

**L** - vão da peça

**M** - massa

**MOE** - módulo de elasticidade estático

**MOE<sub>médio</sub>** - módulo de elasticidade estático médio

**MOR** - módulo de ruptura

**R<sup>2</sup>** - coeficiente de determinação

**U** - teor de umidade  
**U<sub>amb</sub>** – umidade relativa do ambiente  
**U<sub>atual</sub>** – teor de umidade da amostra de referência  
**U<sub>i</sub>** – teor de umidade inicial da amostra de referência  
**V<sub>LL</sub>** – velocidade longitudinal  
**V<sub>12</sub>** - volume da madeira a 12% de umidade  
**W** - massa da viga

### **Letras romanas minúsculas**

**fr** - frequência de ressonância  
**g** - aceleração da gravidade  
**k<sub>mod,1</sub>** – coeficiente parcial de modificação 1  
**k<sub>mod,2</sub>** – coeficiente parcial de modificação 2  
**k<sub>mod,3</sub>** – coeficiente parcial de modificação 3  
**m** – massa úmida da amostra de referência  
**m<sub>atual</sub>** – massa da amostra de referência  
**m<sub>i</sub>** - massa inicial da amostra  
**m<sub>s</sub>** - massa seca da amostra  
**m<sub>12</sub>** - massa da madeira a 12% de umidade  
**r** - coeficiente de correlação linear  
**r** - menor raio de curvatura das lâminas que compõe a seção transversal resistente.  
**t** é a espessura das lâminas  
**t** – t de Student  
**v** – velocidade da onda longitudinal

### **Letras gregas**

**β** - coeficiente angular  
**λ** - comprimento de onda

$\rho$  - densidade da madeira

$\rho_{ap,12\%}$  - densidade aparente a 12%

$\Delta F$  - incremento de carga

$\Delta v$  - incremento de deslocamento

# SUMÁRIO

---

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	03
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	04
3.1 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA EM MADEIRA.....	04
3.1.1 Classificação visual.....	07
3.1.2 Técnica de ultra-som.....	12
3.1.3 Técnica de vibração transversal.....	23
3.1.4 Classificação pela máquina MSR ( <i>Machine Stress Rate</i> ).....	31
3.1.5 Classificação por ondas de tensão.....	34
3.2 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO.....	37
3.2.1 Coeficiente de modificação segundo a Norma Brasileira NBR7190:1997.....	37
3.2.2 Sistemas de classificação adotados na normalização internacional.....	40
3.2.3 Comparação entre a NBR 7190: 1997 e as normas internacionais.....	43
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	47
4.1 ESPÉCIES UTILIZADAS NO ESTUDO.....	47
4.2 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	47
4.3 ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E NÃO-DESTRUTIVOS.....	49
4.3.1 Ensaio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ).....	50
4.3.2 Classificação visual.....	52
4.3.3 Ensaio de ultra-som.....	61
4.3.4 Ensaio de vibração transversal.....	63

4.3.5	Ensaio de flexão estática (MOE).....	64
4.4	METODOLOGIA ESTATÍSTICA UTILIZADA PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
5.1	CLASSIFICAÇÃO VISUAL.....	68
5.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO PELA TÉCNICA DE ULTRA-SOM.....	76
5.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	78
5.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO OBTIDO NA FLEXÃO ESTÁTICA.....	79
<b>6.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>
6.1	TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS OBTIDOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ESTÁTICO E DINÂMICO).....	80
6.2	TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE AS TÉCNICAS DE ULTRA-SOM E DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	83
6.3	CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO COM A TÉCNICA DE ULTRA-SOM.....	84
6.4	CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO COM A TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	90
6.5	VALORES DE $K_{mod,3}$ EM FUNÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRA-SOM E DA TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.....	97
6.6	VALORES DE $K_{mod,3}$ APLICÁVEIS ÀS FOLHOSAS E CONÍFERAS.....	101
6.7	PROPOSIÇÃO DE VALORES DE $k_{mod,3}$ PARA A NBR 7190:1997.....	105
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>107</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>110</b>

**ANEXO A**

**ANEXO B**

**ANEXO C**

**ANEXO D**

# 1. INTRODUÇÃO

---

---

Ao contrário de outros materiais homogêneos e isotrópicos como os metais, os plásticos e as cerâmicas, que apresentam propriedades mecânicas bem conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção, a madeira não possui essa característica, por ser um material gerado pela natureza. Devido a isto, a madeira apresenta uma grande variabilidade em suas propriedades mecânicas.

Em razão da elevada variabilidade das propriedades mecânicas da madeira, o seu uso racional pode ser alcançado com a classificação de todas as peças de madeira a serem empregadas. Com a classificação mecânica torna-se possível majorar o coeficiente de modificação  $k_{mod,3}$ , resultando em um ganho de confiabilidade estrutural.

A classificação de peças estruturais de madeira pode ser feita por uma metodologia não-destrutiva, a qual permitirá o posterior uso desta peça na estrutura a ser construída, uma vez que ela não é afetada durante a classificação.

Existem atualmente diversas técnicas de avaliação não-destrutiva que são empregadas para a classificação da madeira, dentre as quais podem-se destacar: a classificação visual, o ultra-som, MSR (*Machine Stress Rate*), ondas de tensão e vibração transversal.

A classificação visual é considerada uma técnica bastante simples e consiste na inspeção das quatro faces e das duas extremidades de cada peça. A classificação visual avalia

tanto a qualidade visual, por meio da observação da quantidade de defeitos, como avalia também a densidade do material.

A técnica utilizando o ultra-som baseia-se na propagação de ondas ultra-sônicas e trata-se de um fenômeno físico que auxilia na estimativa da rigidez de peças de madeira, bem como possibilita a detecção de aspectos de qualidade como, por exemplo, nós, medulas, etc.

A avaliação não-destrutiva com o emprego de vibração transversal é baseada na relação existente entre a rigidez e a frequência natural de vibração. Este foi um dos primeiros métodos não-destrutivos investigados para a estimativa do módulo de elasticidade.

Atualmente, pode-se constatar no Brasil um atraso em relação à tecnologia empregada para a classificação da madeira, deixando muitas vezes de ser realizada por falta de procedimentos adequados. Assim, esta pesquisa busca estimular e fomentar a cultura de classificação de madeira para estruturas no meio técnico, da mesma forma que outros materiais como o concreto e o aço. Além disso, será possível favorecer a utilização e disseminação de madeira classificada de espécies cultivadas no Brasil, podendo assim aumentar a conformidade desse material em níveis compatíveis com a sua utilização em estruturas de madeira.

Com a proposição de valores de coeficiente de modificação ( $k_{mod,3}$ ) em função das técnicas de ultra-som e de vibração transversal, também será possível contribuir com o meio técnico na especificação e dimensionamento de projetos de estrutura de madeira com uma maior confiabilidade.

## 2. OBJETIVOS

---

---

O presente trabalho tem como objetivos:

- Verificar a acuracidade das técnicas não-destrutivas de ultra-som e vibração transversal comparativamente aos valores obtidos em ensaios destrutivos (flexão estática), para peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas;
- Propor valores para o coeficiente de modificação ( $k_{\text{mod},3}$ ) da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, em função da utilização da técnica de ultra-som para a classificação de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas;
- Propor valores para o coeficiente de modificação ( $k_{\text{mod},3}$ ) da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, em função da utilização da técnica de vibração transversal para a classificação de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas.

## **3. REVISÃO DA LITERATURA**

---

---

Esta revisão apresenta um levantamento da bibliografia referente aos ensaios não-destrutivos aplicáveis à madeira e ao estabelecimento de coeficientes de modificação segundo a normalização nacional e internacional.

### **3.1 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA EM MADEIRA**

A madeira tem suas propriedades atualmente avaliadas pelo emprego de métodos destrutivos, que utilizam corpos-de-prova para a avaliação. Uma amostragem incorreta pode acarretar resultados não coerentes, e em alguns casos o corpo-de-prova pode não ser representativo de um lote de madeira.

Uma melhor avaliação pode ser realizada utilizando-se de métodos não-destrutivos, que permitem a avaliação no próprio elemento, sem a necessidade de extração de corpos-de-prova.

De acordo com a ABENDE (2006), os ensaios não-destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Jayne (1959 apud OLIVEIRA, 2005) foi quem iniciou a hipótese fundamental para a avaliação não-destrutiva da madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não-destrutivo, sejam controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático deste material. A nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a elasticidade estática. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade do som. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Em materiais homogêneos e isotrópicos, a avaliação não-destrutiva permite detectar falhas surgidas em processos de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente, pois consiste em um material gerado pela natureza. A influência das irregularidades da madeira sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não-destrutivos.

Desse modo, as pesquisas na área de avaliação não-destrutiva para madeira focalizam o desenvolvimento de técnicas que indiquem como o meio ambiente induz o surgimento de defeitos na madeira para então, determinar sua performance (ROSS et al., 1998).

---

JAYNE, B. A. **Vibrational properties of wood as indices of quality.** Forest Products Journal. v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

Segundo Carrasco e Azevedo Jr. (2001), a avaliação não-destrutiva de madeiras assume um papel de vital importância, pois permite obter e analisar o maior número de informações sobre o material, objetivando não somente maior precisão dos resultados, como também estabelecer critérios de classificação e caracterização da madeira, fornecendo subsídios para que sua utilização abandone o aspecto artesanal, empírico, passando a ser feita de forma racional e científica.

Segundo Bucur (1995), a avaliação não-destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos por meio de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

Algumas técnicas de avaliação não-destrutiva possibilitam a avaliação de estruturas em uso. O ultra-som é um exemplo de técnica que permite a avaliação “*in loco*”, possibilitando a manutenção ou reabilitação das mesmas, por meio de um mapeamento das áreas deterioradas, o que possibilita uma avaliação da integridade estrutural das peças sem a necessidade de remoção de parte da estrutura.

Existem diversas técnicas de avaliação não-destrutiva que são empregadas para a classificação da madeira, dentre as quais se destacam a classificação visual, a técnica de ultra-som, de vibração transversal, a classificação pela máquina MSR e a classificação por ondas de tensão.

### 3.1.1 Classificação visual

A classificação visual é o primeiro método não-destrutivo que foi aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, estando freqüentemente associada a outros ensaios de materiais. Consiste na atribuição de uma classe para cada peça de madeira, a partir da identificação visual de certas características de crescimento.

Segundo Carreira e Dias (2005), a classificação visual é baseada na premissa de que há diferenças entre as propriedades mecânicas de uma peça estrutural e as propriedades mecânicas de corpos-de-prova isentos de defeitos, em função da presença de características de crescimento, sendo que tais características podem ser verificadas e avaliadas pelo olho humano.

A classificação visual utilizada na Europa e nos Estados Unidos é o primeiro e mais tradicional método não-destrutivo de classificação da madeira, consistindo na análise das peças estruturais por um profissional de ampla experiência, visando a detecção de nós, distorção das fibras, presença de fungos, insetos e demais defeitos.

Segundo Madsen (1992), de toda madeira produzida na América do Norte, cerca de 95% a 98% é classificada apenas visualmente, sendo estimada em 235.000.000 m<sup>3</sup>/ano, correspondendo a um valor aproximado de 10 bilhões de dólares. Mas apesar da maior parte da madeira ser classificada apenas visualmente na América do Norte, tem crescido nos últimos anos a quantidade de madeira classificada mecanicamente.

Em países da América do Norte, a maior parte das espécies são distribuídas em grupo, e a madeira obtida a partir de espécies de um mesmo grupo é tratada como sendo

equivalente. As espécies são agrupadas quando apresentam as mesmas propriedades mecânicas, ou quando a madeira de duas ou mais espécies apresenta semelhança anatômica. Algumas espécies como, por exemplo, o *Pinus elliotti* e o *Pinus taeda*, que fazem parte do grupo *Southern Pine*, são classificadas visualmente segundo regras do *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB).

O SPIB é uma organização que não apresenta fins lucrativos, que se dedica à manutenção de normas de qualidade para a indústria de *Southern Pine*. Uma das suas funções consiste na formulação e na publicação de regras de classificação para a madeira serrada obtida do *Southern Pine*. O SPIB é composto por uma equipe de supervisores de qualidade, que inspeciona as práticas de classificação nas serrarias associadas.

A Norma PS 20-70 (*American Softwood Lumber Standard*) foi editada em 1970, incorporando várias características aos critérios até então vigentes, incluindo as dimensões verde e seca, para a determinação da retração da madeira.

Foi elaborada nos Estados Unidos uma regra nacional de classificação (*National Grading Rule*) que determina características uniformes para a classificação de todas as espécies de coníferas na dimensão de “*dimension lumber*”. A Norma *National Grading Rule* fixa as condições para a elaboração de regras de classificação visual de coníferas. Segundo esta mesma norma, as regras de classificação visual do SPIB, bem como todas as outras regras de classificação visual em vigor nos Estados Unidos, devem ser fundamentadas na norma ASTM D245, elaborada em 1993, para a definição de seus critérios de classificação.

Os princípios básicos da classificação visual, os quais estão descritos na norma ASTM D245 permitem a avaliação de qualquer peça de madeira em termos de uma razão de resistência à flexão (CARREIRA e DIAS, 2005). A razão de resistência é definida pela ASTM D245 (1993) como sendo uma relação hipotética entre a resistência de uma peça de madeira com características visíveis de crescimento que reduzem sua resistência, e a resistência de um corpo-de-prova isento de defeito desta mesma madeira.

A classificação visual é realizada pela inspeção das quatro faces e das duas extremidades (seções transversais) de cada peça. Em cada face são avaliadas, em todo o comprimento das peças, a localização e a natureza dos nós, a inclinação das fibras, empenamentos e fendas, sendo atribuído um nível de qualidade visual em função da dimensão dos defeitos apresentados.

Nas extremidades das peças avalia-se a quantidade de anéis, concomitantemente à quantidade de madeira de inverno presente em 2,5 cm medidos em uma linha radial representativa, atribuindo a peça um nível de densidade. A madeira de inverno corresponde à parte mais densa, com células de paredes grossas formadas no segundo ciclo anual de crescimento. Assim, a classificação visual avalia a qualidade visual, através da observação da quantidade de defeitos, e a densidade do material.

Em relação aos defeitos, a classificação visual segundo o método norte americano é realizada através da medida dos maiores defeitos presentes na peça e posterior comparação com os limites estabelecidos para os defeitos em cada classe.

São apresentadas a seguir algumas informações para a avaliação de parâmetros que influem na classificação visual.

Para a determinação dos nós são medidos em cada peça os três maiores nós posicionados, respectivamente, no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita.

A inclinação das fibras é medida pelo ângulo de inclinação em relação à extremidade da peça. Essa é verificada nas quatro faces, sempre medindo a máxima inclinação. Não devem ser considerados os desvios localizados em torno dos nós, sendo considerados apenas quando a peça apresentar menos de 89 mm de largura, ou altura inferior a 38 mm.

Segundo o Southern Pine Inspection Bureau (1994), as rachas entre os anéis de crescimento e as fendas devem ser medidas pelo seu comprimento paralelo ao comprimento da peça.

O método norte-americano define também três classes de densidade (*dense*, *medium* e *coarse*), de acordo com a quantidade de madeira de inverno presente na peça de madeira, e o número de anéis de crescimento existentes em uma extensão de 2,5 cm medida na direção radial. Na prática, as classes *medium* e *coarse* são agrupadas e recebem o nome de *non-dense*, sendo designadas por “ND”. As madeiras da classe *dense* são designadas por “D”.

Na NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, a qualidade da madeira é levada em consideração no dimensionamento dos elementos estruturais através do coeficiente de modificação  $k_{mod, 3}$ , que é adotado igual a 1,00 no caso de madeira de primeira categoria e igual a 0,80 no caso de madeira de segunda categoria, sendo que a madeira só pode ser considerada de primeira categoria se a peça for classificada como isenta de defeitos pelo método visual normalizado e também por uma classificação mecânica.

Em 2006, foram propostos os anexos G e H para a revisão da NBR 7190 (Projeto CE-02:126.10), abordando a classificação visual de madeira serrada de coníferas e folhosas, respectivamente.

O Anexo G aborda os seguintes procedimentos para a classificação de coníferas: determinação da densidade de anéis de crescimento, verificação de inclinação das fibras, presença de nós, rachas, fendas e empenamento.

O Anexo H aborda os mesmos procedimentos para a classificação de madeira serrada de coníferas, com exceção da determinação da densidade de anéis de crescimento. Outra distinção entre os anexos G e H, consiste em que neste último ocorre também a verificação das fissuras de compressão. Ambos foram elaborados baseados nas regras de classificação visual do *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB).

Estudo desenvolvido por Carreira e Dias (2005), no qual se realizou a classificação visual de 600 peças de *Pinus sp*, para verificação da adequação das regras de classificação visual do *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB), permitiu verificar que

o método de classificação visual descrito nas regras do SPIB é adequado para ser aplicado na madeira proveniente de florestas de *Pinus sp* plantadas no Brasil.

### **3.1.2 Técnica de ultra-som**

O ultra-som é uma técnica não-destrutiva baseada em propagação de ondas, tendo este método uma larga extensão de aplicação desde a própria árvore até os produtos finais da madeira (SANDOZ, 1993).

A utilização do ultra-som na engenharia civil iniciou-se na década de 50 na Europa, sendo empregado inicialmente em investigações de concreto. Posteriormente iniciaram-se estudos teóricos para a aplicação do ultra-som na madeira, sendo encontradas algumas dificuldades devido às peculiaridades anatômicas deste material.

Os primeiros resultados experimentais foram obtidos por Waubke, em 1983 na Alemanha (SANDOZ, 1989). Atualmente diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para comprovar a validade da técnica de ultra-som na classificação de peças de madeira.

A técnica não-destrutiva por meio de ultra-som apresenta diversificada finalidade, permitindo desde a determinação da existência de nós, presença de ataque de microorganismos ou insetos, direcionamento das fibras, decomposição, passando pela avaliação de elementos estruturais de madeira em uso, até a estimativa de parâmetros como módulos de elasticidade e ruptura (GORNIAK e MATOS, 2000).

A técnica de ultra-som apresenta diversas vantagens tais como: baixo custo de aquisição do equipamento, quando comparado com o custo de máquinas de classificação automática, facilidade de treinamento da mão-de-obra para a utilização e pode ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

Terezo et al. (2004) destaca ainda algumas das vantagens em aplicar a técnica de ultra-som em edificações, que consiste basicamente nos seguintes fatores: (1) possibilidade da determinação de propriedades “*in situ*”; (2) redução de perdas de material, comum nos métodos destrutivos; (3) classificação, de maneira quantitativa, da qualidade e da resistência das peças de madeira; (4) localização de defeitos internos; (5) detecção da distribuição variável da umidade ao longo da peça; e (6) diminuição do ciclo de tempo de inspeção e conseqüentemente do custo de hora/homem em serviço.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultra-sônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade (OLIVEIRA, 2001).

O ultra-som é caracterizado por freqüências acima de 20000 Hz. As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que se propagam em sólidos, líquidos e gases e possuem freqüências que se situam em um intervalo entre 20 e 20000 Hz, denominado como intervalo audível. Uma onda mecânica longitudinal que apresente freqüência abaixo do intervalo audível é denominada de onda infra-sônica, e se a freqüência estiver acima desse intervalo é denominada onda ultra-sônica.

De acordo com Carrasco e Azevedo Jr. (2004), existem diversas vantagens do uso de frequências ultra-sônicas no lugar do infra-som e da áudio-frequência (a qual possui intervalo de frequências capaz de sensibilizar o ouvido humano) na avaliação não-destrutiva de materiais:

- Quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda. Isso permite que se consiga, com maior facilidade, as condições necessárias à propagação de ondas planas no material, o que é essencialmente importante para pequenos corpos;
- Os coeficientes de absorção são usualmente mais altos e, conseqüentemente, muito mais fáceis de serem mensurados em altas frequências;
- Os ultra-sons são inaudíveis;
- As ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas.

O instrumento de ultra-som emprega um método de classificação ultra-sônica baseado no princípio da relação física entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. Na Figura 3.1 são apresentados dois equipamentos de ultra-som, o Sylvatest e o V-Meter, respectivamente.



Figura 3.1. Equipamentos de ultra-som.

As ondas ultra-sônicas são aplicadas na madeira, por meio do posicionamento de dois transdutores, onde um transmite a onda e o outro a recebe. O equipamento registra o tempo em microssegundos, para a onda ir de seu ponto de emissão até a sua chegada ao receptor. Com o tempo registrado é possível determinar a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e o módulo de elasticidade, o qual é obtido a partir da equação (1).

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

Onde:

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico ( $10^{-6}$ MPa);

$\rho$  é a densidade da madeira ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  é a velocidade da onda longitudinal (m/s).

Existem vários fatores que interferem na propagação de ondas ultra-sônicas em madeira, dentre os quais se podem citar, as propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie, condições do meio e o procedimento utilizado para tomada das medidas (BUCUR e BÖNHKE, 1994).

A madeira é um material higroscópico, sendo capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Esta característica peculiar da madeira afeta drasticamente suas propriedades físicas e mecânicas.

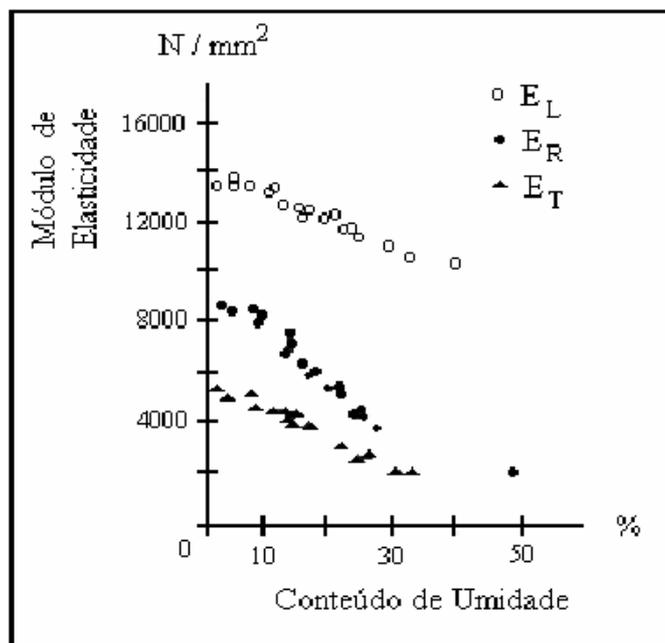
A água no interior da madeira pode ser encontrada sob as seguintes formas:

- **Água livre ou de embebição:** água contida nos espaços vazios entre as células, nos vasos e poros da madeira, circulando livremente e de fácil remoção;
- **Água de constituição ou impregnação:** água localizada no interior das células da madeira, que está quimicamente ligada por pontes de hidrogênio, às cadeias de celulose das paredes celulares.

Tiemann (1906 apud CARRASCO e AZEVEDO JR., 2001) foi quem primeiro observou que as propriedades mecânicas da madeira são afetadas somente pela água de constituição ou de impregnação, pois apenas a parede celular contribui efetivamente para a resistência. A redução da resistência e do módulo de elasticidade com o aumento do conteúdo de umidade, até o ponto de saturação, é mostrada na Figura 3.2. Nessa figura, as letras EL, ER e ET representam os módulos nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

---

TIEMANN, H. D. *Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood*. USA, 1906.



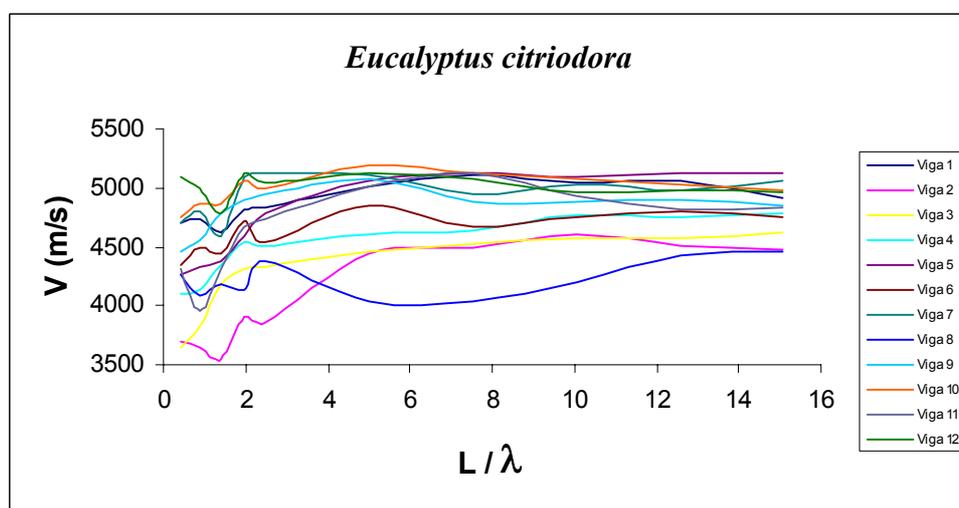
**Figura 3.2.** Influência da umidade nos módulos de elasticidade de *Sitka spruce*. Fonte: Bucur (1995 apud CARRASCO e AZEVEDO JR., 2001).

De acordo com Bucur (1995), para que ocorra uma preparação satisfatória das amostras são necessárias algumas condições que dependem da magnitude da atenuação da onda ultra-sônica na madeira. É possível obter uma maior exatidão dos resultados, quando são empregadas amostras de maiores dimensões, devido ao maior tempo de propagação do sinal ultra-sônico na madeira.

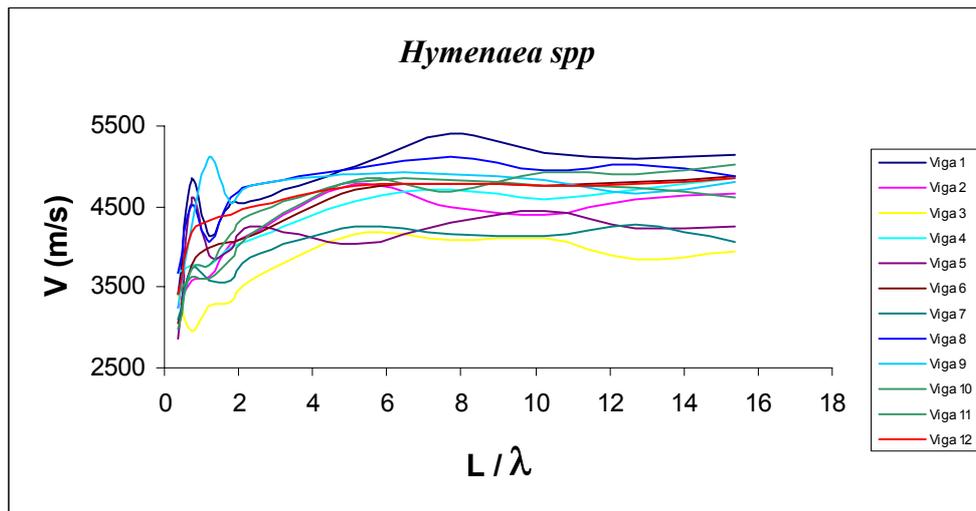
Estudo realizado por Candian (2004), no qual foi analisada a influência do comprimento de peças de madeira na propagação de ondas ultra-sônicas, demonstrou que foi possível estabelecer um valor para a relação entre o comprimento do corpo-de-prova (L) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), a partir do qual a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é constante, para as espécies estudadas: *Eucalyptus citriodora*, *Goupia glabra* e *Hymenaea spp.*

Nesse estudo verificou-se que para as espécies estudadas existe um ponto crítico para a relação  $L/\lambda$ , a partir do qual a velocidade não é mais afetada, ou seja, para a frequência utilizada, existe um comprimento mínimo da peça, equivalente a alguns comprimentos de onda, para que a velocidade obtida não sofra interferências significativas.

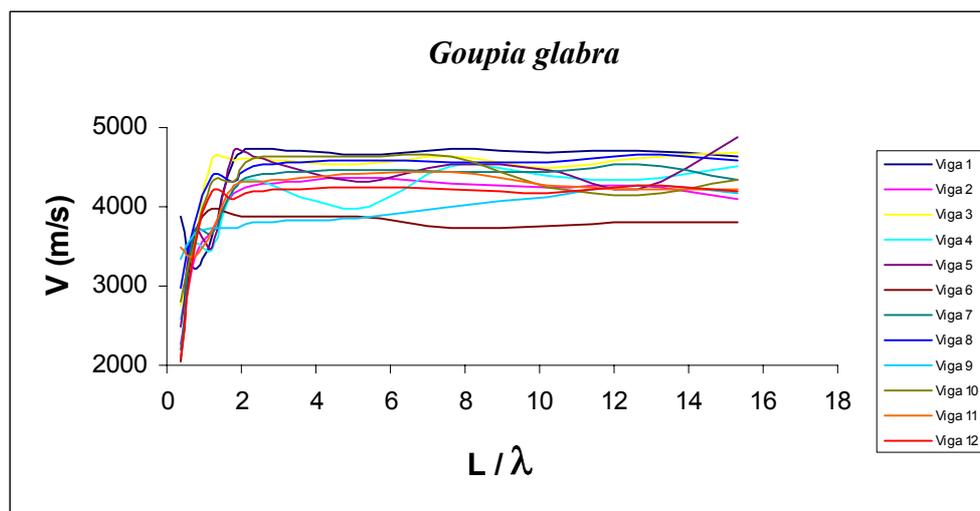
Este valor crítico ocorreu quando  $L/\lambda$  foi igual a três para as espécies *Eucalyptus citriodora* (Figura 3.3) e *Hymenaea spp* (Figura 3.4), e igual a dois para a espécie *Goupia glabra* (Figura 3.5), demonstrando a necessidade de se adequar à frequência do equipamento ao tamanho do corpo-de-prova, evitando desse modo que ocorram interferências na propagação da onda ultra-sônica. Na presente pesquisa, o valor da relação  $L/\lambda$  corresponde a um valor próximo de 14, não havendo assim, interferências nos valores obtidos de velocidade.



**Figura 3.3.** Velocidade longitudinal em função da relação  $L/\lambda$  – *Eucalyptus citriodora*. Fonte: Candian (2004).



**Figura 3.4.** Velocidade longitudinal em função da relação  $L/\lambda$  – *Hymenaea spp*. Fonte: Candian (2004).



**Figura 3.5.** Velocidade longitudinal em função da relação  $L/\lambda$  – *Goupia glabra*. Fonte: Candian (2004).

A propagação das ondas acústicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular (OLIVEIRA, 2001). A densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação em sua estrutura, desse modo, pode-se esperar um intervalo de valores para a velocidade de propagação (BUCUR, 1995).

A falta de homogeneidade da madeira limita a precisão das medidas de velocidade de propagação. Em uma amostra com fissuras internas, o pulso ultra-sônico será atenuado por difusão nas interfaces, mas se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena, permitindo bons resultados.

A intensidade de uma onda ultra-sônica diminui na medida em que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico. A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. Trata-se de um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial. Quando as ondas viajam através da direção transversal, cruzam a lignina, mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações (OLIVEIRA, 2001) e (BUCUR e BÖHNKE, 1994).

Segundo Bucur (1995), quando uma onda longitudinal se propaga ao longo da direção das fibras da madeira, os comprimentos de onda e o comprimento das células são da mesma ordem de grandeza. A propagação ocorre, dessa forma, no regime de dispersão estocástico. Por outro lado, ao longo das direções radial e tangencial, os comprimentos de onda são consideravelmente maiores que as dimensões médias das células e a propagação ocorre, provavelmente, dentro de um regime de dispersão conhecido como dispersão de Rayleigh. Estas duas condições de propagação estão diretamente relacionadas à frequência da onda utilizada.

Segundo Oliveira (2001), de modo geral, para uma mesma espécie de madeira e com teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções de propagação. Para uma melhor confiabilidade torna-se importante a utilização de amostras com menores teores de umidade e com maiores densidades.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas com o uso de técnicas de ultra-som e obtiveram resultados que evidenciam a eficácia desse método para estimar as propriedades mecânicas da madeira.

Alguns países como Canadá, Suíça, França, Japão e Estados Unidos vêm investindo recursos e esforços no desenvolvimento de novas técnicas de avaliação das propriedades da madeira, sendo um desses avanços o emprego de ultra-som para avaliação da qualidade da madeira.

Gonçalves e Bartholomeu (2000), por meio de estudos com as espécies *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*, onde foram realizados ensaios de ultra-som e de flexão estática em 50 corpos-de-prova de cada espécie, com dimensões de 6 cm x 12 cm x 250 cm, obtiveram coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade à flexão, obtido no ensaio de flexão estática e o módulo de elasticidade dinâmico obtido no ensaio não-destrutivo de ultra-som, de 0,85 para a espécie *Eucalyptus citriodora* e de 0,88 para a espécie *Pinus elliottii*, mostrando-se uma adequação da técnica de ultra-som para classificação de peças de madeira em serraria.

Estudos realizados por Ballarin et al. (2004), utilizando-se de madeiras usualmente empregadas na confecção de dormentes ferroviários, mostram que o ensaio de ultra-som pode ser utilizado como ferramenta na classificação estrutural de lotes de madeira.

Carreira et al. (2004), realizou testes com ultra-som e na seqüência testes de flexão estática em 600 peças de dimensões estruturais de *Pinus sp*, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,90 a partir da reta de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de ultra-som, o que comprova a eficiência da técnica de emissão ultra-sônica na medida do módulo de elasticidade.

Estudo realizado por Oliveira (2005), verificou a acuracidade da técnica de ultra-som comparativamente aos valores obtidos em ensaios estáticos, utilizando-se de doze vigas de madeira das espécies *Pinus caribea*, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Goupia glabra* e *Hymenaea spp* de dimensões de 6 cm x 12 cm x 300 cm, e obteve os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Fonte: Oliveira (2005).

<b>Espécie</b>	<b><math>R^2</math></b>
<i>Pinus caribea</i>	0,79
<i>Pinus elliottii</i>	0,73
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,68
<i>Eucalyptus citriodora</i>	0,60
<i>Goupia glabra</i>	0,79
<i>Hymenaea spp</i>	0,77

Observa-se que os coeficientes de determinação obtidos para as espécies *Pinus caribea*, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Goupia glabra* e *Hymenaea spp* são significativos, permitindo verificar que o método não-destrutivo por meio de

ultra-som pode ser utilizado para avaliar as propriedades mecânicas da espécie em questão com dimensões estruturais. Os valores dos coeficientes de determinação obtidos são considerados altamente satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira.

Verificando-se as correlações obtidas pelos autores citados, pode-se notar a eficiência da técnica de ultra-som, que se apresenta como uma técnica de elevada confiabilidade para a avaliação mecânica de peças de madeira.

### **3.1.3 Técnica de vibração transversal**

A técnica de vibração transversal, também referida na literatura internacional como “*resonance method*” foi um dos primeiros métodos não-destrutivos investigados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira.

A relação existente entre o módulo de elasticidade e a frequência de vibração longitudinal de um teste não-destrutivo já é conhecida há quase 150 anos.

O primeiro ensaio empregando a técnica de vibração transversal foi realizado por um cientista francês, para a determinação do módulo de elasticidade de uma barra de ferro. Posteriormente, esses resultados foram comparados com resultados obtidos em ensaios de tração em barras de ferro, sendo uma das primeiras tentativas de comparar valores obtidos de constantes elásticas obtidas em ensaios dinâmicos, com valores obtidos em ensaios estáticos.

Com o passar dos anos, novas pesquisas foram desenvolvidas empregando a técnica de vibração transversal, comprovando a possibilidade do uso de características vibracionais para a estimativa do módulo de elasticidade estático.

Apesar de sua concepção simples, e a despeito dos grandes avanços obtidos nessa área com outros métodos, o método de vibração transversal revela-se como de grande potencial de aplicação, sobretudo pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático associado e pela possibilidade de sua aplicação em peças de dimensões estruturais (“*in-grade testing*”) (BALLARIN et al., 2002).

A técnica de vibração transversal é considerada atualmente um teste que apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade (MURPHY, 2000). Esta técnica utiliza a relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de oscilação de uma viga simplesmente apoiada. Esta relação é bem conhecida e pode ser obtida através de exames rigorosos da mecânica fundamental.

A avaliação não-destrutiva com emprego de vibração transversal consiste em aplicar um impacto em uma peça de madeira bi-apoiada, tendo um apoio em forma de lâmina em uma de suas extremidades e uma célula de carga na outra. A peça de madeira vibra na sua frequência natural até que a vibração cesse em função do amortecimento.

A frequência em que a peça de madeira vibra depende do módulo de elasticidade da madeira, do vão, da densidade e do tipo de apoio. A célula de carga capta a vibração da viga e transfere o sinal a um circuito condicionador que amplifica e filtra o mesmo. O sinal amplificado é digitalizado e enviado a um microcomputador que determina a

freqüência do sinal oscilante. A Figura 3.6 apresenta o equipamento de vibração transversal Transverse Vibration E-Computer da Metriguard.



**Figura 3.6.** Equipamento de vibração transversal.

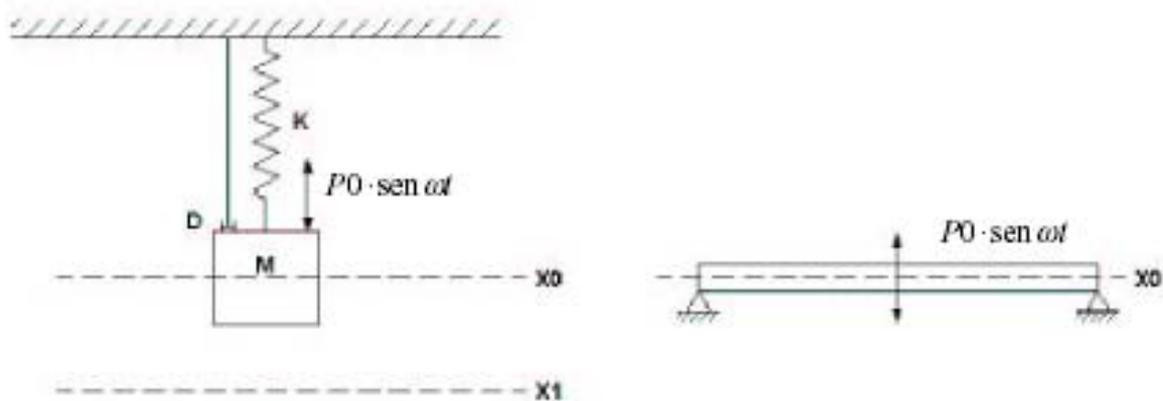
Uma vibração mecânica é uma oscilação mecânica em torno de uma posição de referência, sendo produzida quando um sistema é deslocado de sua situação de equilíbrio estável. Quando inicia a ação de forças restauradoras, o sistema tende a retornar a posição de equilíbrio, mas geralmente atinge a posição original, com certa velocidade, que o leva além desta posição.

Para um sistema ideal e sem a presença de forças dissipativas, este iria permanecer indefinidamente em movimento oscilatório em torno de sua posição de equilíbrio.

Quando o movimento é mantido somente por forças restauradoras, diz-se que a vibração é livre; sendo uma força periódica aplicada ao sistema, o movimento resultante é descrito como vibração forçada e, quando o efeito do atrito pode ser desprezado, diz-se que a vibração é não-amortecida; caso contrário, a vibração é amortecida.

Embora toda vibração seja amortecida, na maioria das estruturas reais a frequência de vibração observada é essencialmente igual à frequência natural de um sistema não amortecido. O grau de amortecimento é determinado pelo coeficiente (ou razão) de amortecimento. Na maioria das estruturas este coeficiente está entre 2 e 20%.

Para ilustrar a técnica de vibração transversal, Ross e Pellerin (1994) realizam uma analogia do comportamento da vibração de uma viga biapoiada com a vibração de um sistema massa-mola amortecido, conforme a Figura 3.7.



**Figura 3.7.** Sistema massa-mola e viga vibrando transversalmente. Fonte: Ross e Pellerin (1994).

Na Figura 3.7 a massa é suportada por uma mola de rigidez  $K$ . A fricção interna ou amortecimento é denotado por  $D$ . Quando a massa  $M$  é colocada em vibração, a equação que rege seu movimento pode ser expressa por:

$$M \cdot \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) + D \cdot \left( \frac{dx}{dt} \right) + K \cdot x = P_0 \cdot \text{sen} \omega t \quad (2)$$

A equação (2) pode ser resolvida em K e D. A solução da equação (2) em K leva a seguinte expressão do MOE para uma viga simplesmente apoiada nas extremidades:

$$MOE = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (3)$$

Onde:

$f_r$  é a frequência de ressonância (Hz);

$W$  é a massa da viga (kg);

$L$  é o vão da peça (m);

$I$  é o momento de inércia da seção transversal (cm<sup>4</sup>);

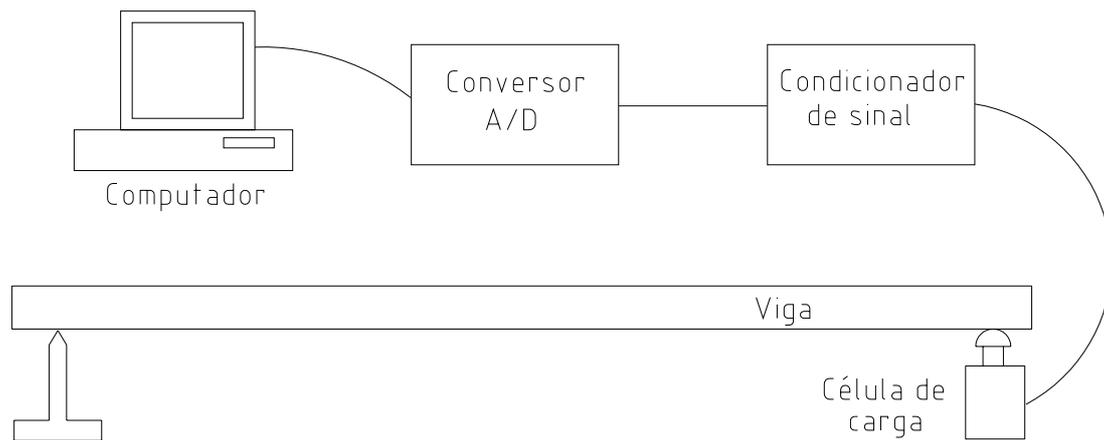
$g$  é a aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>).

Segundo Murphy (2000), a equação (3) consiste em uma equação idealizada, a qual para ser obtida, foram adotadas algumas condições limites. Em um de seus estudos, ele aponta algumas recomendações para aumentar a acuracidade e precisão dos valores de módulos obtidos a partir desta equação.

De acordo com Murphy (2000), devem ser aplicados seis fatores, os quais afetam o cálculo do módulo de elasticidade utilizando a equação (3). Estes são: fator que leva em consideração o balanço da viga além do suporte ( $F_{overhang}$ ), fator que leva em consideração as deformações por cisalhamento ( $F_{shear}$ ), fator empregado quando o suporte não é rígido ( $F_{support}$ ), fator que considera o momento de inércia assumido ( $F_I$ ), fator que leva em consideração a falta de homogeneidade na distribuição do peso ( $F_W$ ) e o fator que leva em consideração a constante K aplicada ( $F_K$ ). A equação com a aplicação dos fatores está apresentada na equação (4).

$$E_{calculated} = E_{true} \cdot F_{overhang} \cdot F_{shear} \cdot F_{support} \cdot F_1 \cdot F_W \cdot F_K \quad (4)$$

A Figura 3.8 ilustra um esquema de um equipamento para a determinação do módulo de elasticidade por meio da vibração transversal.



**Figura 3.8.** Esquema de um equipamento de vibração transversal.

A técnica de vibração transversal permite a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, o qual é obtido através da frequência, da densidade, do comprimento e da altura da peça estrutural. Esse módulo pode ser correlacionado com o módulo de elasticidade à flexão estática.

Essa técnica tem se destacado, sobretudo pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático. Além disso, a dificuldade de mensuração das altas frequências observadas em outros métodos não-destrutivos, faz com que o método de ressonância se torne ainda mais interessante.

Diversos estudos foram desenvolvidos e comprovaram a eficácia da técnica de vibração transversal na avaliação mecânica de peças de madeira.

Bartholomeu et al. (2004) desenvolveram um ensaio simplificado para a determinação do MOE pela técnica da vibração transversal. O sinal da vibração era captado por um microfone ligado à placa de som de um microcomputador e um software para afinação de instrumentos foi utilizado para determinar a frequência de ressonância das peças. Foram empregadas 91 vigas de Angelim Araroba (*Vataireopsis araroba*) com dimensões de 6 cm x 12 cm x 250 cm. Após o ensaio de vibração transversal foi realizado o ensaio de flexão estática, para o qual foi utilizada a Norma ASTM D 198-84 *Standard Methods of Static Test of Timber in Structural Sizes*. O coeficiente de correlação linear (r) obtido foi de 0,73. Os autores concluem que o equipamento utilizado, apesar de simples, mostrou-se confiável para a determinação do MOE.

Burdzik e Nkwera (2002) estudando o comportamento de 50 vigas de *Eucalyptus grandis* de dimensões 3,2 cm x 11,2 cm x 228 cm, na condição secas ao ar, realizaram ensaios de flexão estática por 4 pontos e à vibração transversal, encontrando um coeficiente de correlação  $r = 0,80$  para a correlação entre os módulos estático e dinâmico.

Ballarin et al. (2002) através de ensaios em corpos-de-prova de dimensões de 2 cm x 2 cm x 46 cm das espécies *Pinus taeda* (48 corpos-de-prova), *Eucalyptus citriodora* (69 corpos-de-prova), *Eucalyptus grandis* (57 corpos-de-prova) e *Eucalyptus saligna* (28 corpos-de-prova), os quais foram submetidos ao ensaio de vibração transversal e flexão

estática, obteve coeficientes de determinação ( $R^2$ ) na correlação entre os módulos estático e dinâmico respectivamente de 0,98; 0,87; 0,87 e 0,76.

Calil Jr. e Miná (2003) realizaram estudos com 326 peças estruturais de madeira da espécie *Southern Pine*, para avaliar o grau de relacionamento entre o módulo de elasticidade dinâmico, obtido com a técnica de vibração transversal e o módulo de elasticidade estático, obtido na flexão estática. O coeficiente de correlação linear ( $r$ ) obtido entre  $E$  dinâmico e o  $E$  estático, foi de 0,98, mostrando assim a existência de uma forte correlação linear entre as duas grandezas.

Carreira et al. (2004) por meio de ensaios em 600 peças de dimensões estruturais de *Pinus sp*, verificaram que a técnica de vibração transversal apresentou-se como um método expedito e de elevada confiabilidade para a estimativa do MOE de peças estruturais de madeira, visto que o valor obtido para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,98.

Ross et al. (1991) ao realizar estudos com 30 peças de *Pinus sp* de dimensões de 5 cm x 10 cm x 265 cm, que foram submetidas à flexão estática e a testes de vibração transversal, obteve coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na correlação entre o módulo estático e o módulo de elasticidade dinâmico de 0,99.

Verificando-se as correlações obtidas pelos autores citados, nota-se a eficiência da técnica de vibração transversal, que se apresenta como um método expedito e de elevada confiabilidade para a estimativa do MOE, apresentando boa inferência sobre o módulo de elasticidade da madeira.

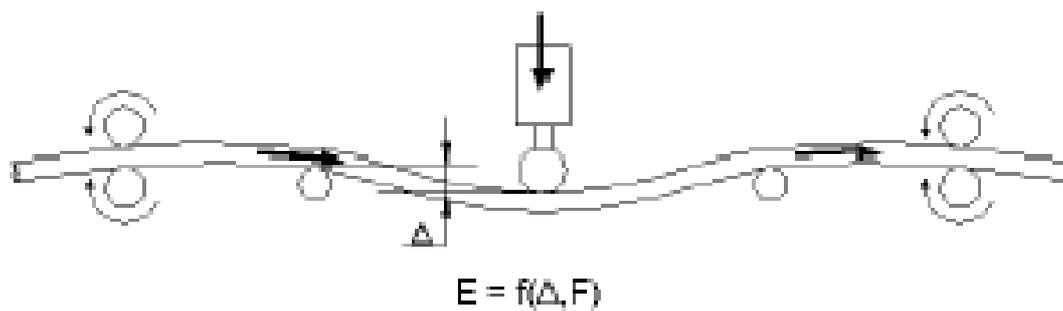
### 3.1.4 Classificação pela máquina MSR (*Machine Stress Rate*)

A avaliação não-destrutiva utilizando a máquina MSR é um processo rápido e totalmente automatizado, sendo considerada uma das melhores técnicas para classificação da madeira. A madeira ao entrar na máquina, passa por uma série de rolos, sendo que neste processo é aplicada uma força perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça, provocando flexão, sendo medido o módulo de elasticidade de cada peça. Na Figura 3.9 é apresentado um ensaio empregando a MSR.



**Figura 3.9.** Ensaio com a MSR. Fonte: Freitas e Calil Jr. (2004).

Esta máquina limita-se a classificação de materiais finos, com espessuras da ordem de 38 mm. O método MSR é baseado na relação existente entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão da madeira. Na Figura 3.10 é apresentado um esquema de funcionamento de uma máquina MSR.



**Figura 3.10.** Esquema de funcionamento de uma máquina MSR. Fonte: Carreira et al. (2004).

Segundo Galligan e McDonald (2000), alguns dispositivos medem o MOE e classificam a madeira, baseados no deslocamento vertical que ocorre para um pequeno vão, inferior ao comprimento da peça de madeira, outros medem em relação a um pequeno vão, mas consideram a média dos resultados obtidos em todo o comprimento da peça. Como consequência, a maneira em que os dados são obtidos e a maneira com que eles são analisados e informados pelo dispositivo influencia a especificação da classe de resistência. Por esta razão, a saída do dispositivo deve ser sempre calibrada com testes estáticos.

No ensaio com a utilização da máquina MSR, as peças ao serem introduzidas na máquina, interrompem um feixe de luz ativando um foto sensor responsável pelo acionamento do pistão a ar comprimido que flexiona as peças em relação ao eixo de menor inércia. Um encoder mede o deslocamento provocado pela força a cada 15 cm de comprimento da peça. A máquina envia os dados para um computador que determina o módulo de elasticidade estático (MOE) de cada seção de 15 cm e por sua vez envia dados para a máquina pintar um código de cores em cada seção analisada. No final a máquina imprime uma faixa correspondente ao  $MOE_{\text{médio}}$  da peça de madeira.

Segundo Freitas e Calil Jr. (2004), as vantagens deste sistema de classificação são:

- Não há destruição das peças estruturais, pois se trata de um ensaio não-destrutivo;
- Elevada produtividade de classificação, podendo ser classificadas todas as peças estruturais, em velocidades de até 300 m/min, em função da máquina utilizada;
- Obtenção da real variabilidade das peças estruturais, considerando que indiretamente avaliam-se os defeitos existentes nas peças.
- No momento da execução, posicionamento adequado das peças estruturais em função da resistência e esforço solicitante.

A classificação mecânica por tensões, conhecida como MSR (*Machine Stress Rate*), embora tenha sido bem acolhida no seu início, há mais de quarenta anos, seu uso foi restringido devido ao desconhecimento, à má utilização da máquina de classificação no mercado e à falta de procedimentos de controle (GALLIGAN e McDONALD, 2000). Tornou-se assim necessário a criação de agências de classificação, as quais criaram procedimentos de controle, sendo estas agências responsáveis pelo controle de qualidade das peças classificadas, assim com a criação desta normalização, os problemas foram superados.

No Brasil, o primeiro estudo realizado sobre este assunto, foi realizado por Melo (1984), onde foram utilizadas seis espécies de madeiras tropicais (andioba, copaíba, mururé, paujacaré, tachi-preto, tauari), obtendo altos coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura à flexão.

Estudo realizado por Carreira et al. (2004), em que foram realizados ensaios com 600 peças de dimensões nominais 3,5 cm x 12,5 cm x 260 cm, da espécie *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, que foram classificadas utilizando a máquina MSR e classificadas através de ensaio de flexão estática, obtiveram uma reta de regressão para os dados transformados do módulo de elasticidade estático e do módulo de elasticidade obtido com a máquina MSR com coeficiente angular ( $\beta$ ) de 0,592 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,925.

Estudos realizados por Freitas e Calil Jr. (2004) em peças estruturais de *Pinus spp*, as quais foram classificadas mecanicamente pela máquina MSR mostram que esta é uma ótima alternativa para a classificação estrutural da madeira.

### **3.1.5 Classificação por ondas de tensão**

Diversos métodos que utilizam a propagação das ondas de tensão têm sido pesquisados para uso como ferramentas de testes não-destrutivos. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos.

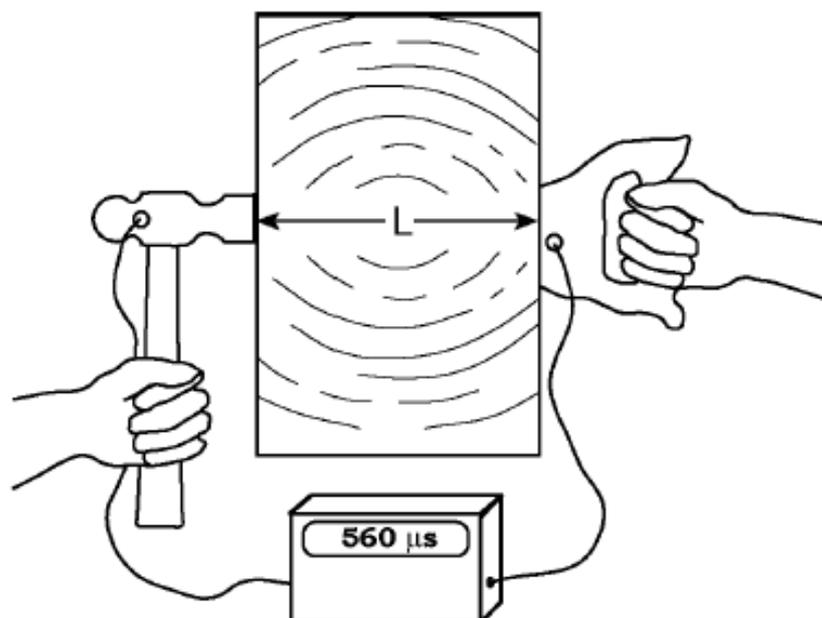
No método de ondas de tensão é analisada a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material. Para explicar o método é possível fazer uso da teoria de propagação de ondas unidirecionais em uma barra homogênea e elástica.

Ao aplicar um impacto em uma de suas extremidades, gera-se uma onda que se movimenta ao longo da barra, excitando as partículas da extremidade que recebeu o

impacto, enquanto as partículas da extremidade livre se encontravam em repouso. A onda caminha a uma velocidade constante ao longo da barra, e logo após caminhar por todo o comprimento, esta é refletida pela extremidade livre da barra, retornando-se ao seu ponto de origem.

Apesar da velocidade continuar sempre constante, o movimento das partículas da barra vai diminuindo a cada passagem da onda pela barra, sendo que após um período de tempo as partículas da barra retornam ao repouso. Verifica-se próximo da extremidade excitada uma série de pulsos igualmente espaçados, com amplitude diminuindo ao longo do tempo.

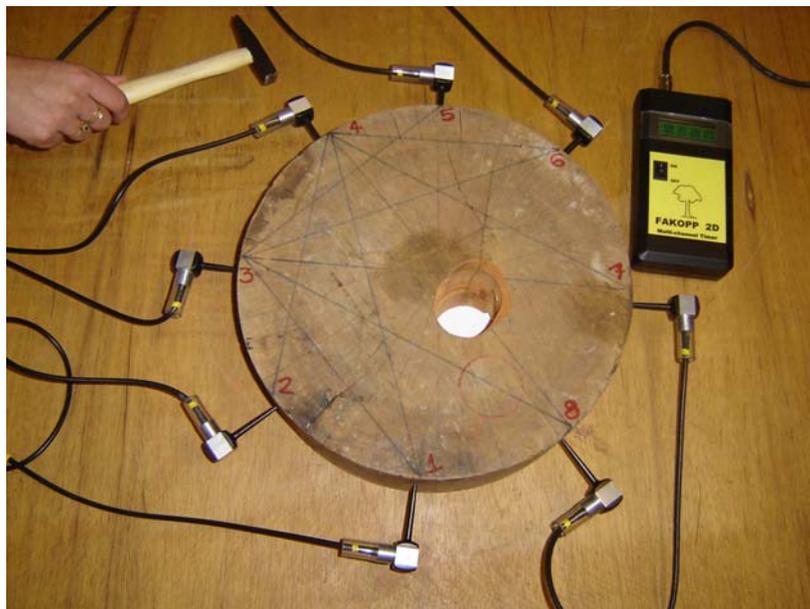
Na Figura 3.11 é apresentado um esquema de um ensaio com a técnica de ondas de tensão.



**Figura 3.11.** Esquema de um ensaio de ondas de tensão. Fonte: Forest Products Laboratory. (2000).

O equacionamento teórico da propagação de onda na vibração longitudinal, para cálculo do módulo de elasticidade foi desenvolvido por Hearmon (1966).

Na Figura 3.12 é apresentado um esquema do ensaio de ondas de tensão, onde é empregado o equipamento Fakopp, o qual foi desenvolvido para aplicação em árvores vivas, podendo ser empregado também para avaliação de toras e peças serradas.



**Figura 3.12.** Ensaio de ondas de tensão.

Estudos realizados por Gabriel e Ballarin (2000) utilizando-se tábuas de *Pinus taeda* permitiram verificar através de análise comparativa de resultados obtidos em ensaio estático (flexão estática) e ensaio não-destrutivo de ondas de tensão, que o método de ondas de tensão tem grande potencialidade e se apresenta como uma ótima ferramenta na classificação estrutural da madeira serrada desta espécie.

Ross e Pellerin (1994) empregaram o método de ondas de tensão para determinar a velocidade da transmissão da onda, detectando indiretamente a presença de organismos xilófagos na madeira. Para alguns tipos de madeira, obtiveram resultados de até 93% de detecção de bactérias presentes na madeira.

Ross et al. (1999) apresentaram a possibilidade de inspeção de pontes de madeira por meio da medição do tempo de propagação da onda de tensão.

### **3.2 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO**

Os coeficientes de modificação, dentro de um modelo de segurança, podem ser definidos como números que regulam a estimativa de uma propriedade do material em função de fenômenos que podem ocorrer permanentemente ou durante certo período da vida útil da construção.

A seguir são apresentadas as especificações da Norma Brasileira NBR 7190:1997 e um comentário em relação aos sistemas de classificação adotados em algumas normas internacionais.

#### **3.2.1 Coeficiente de modificação segundo a Norma Brasileira NBR 7190:1997**

Segundo a NBR 7190:1997, os coeficientes de modificação  $k_{mod}$  afetam os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura, da classe de umidade admitida, e do eventual emprego de madeira de segunda qualidade.

O coeficiente de modificação  $k_{\text{mod}}$  é formado pelo produto:

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \cdot k_{\text{mod},2} \cdot k_{\text{mod},3} \quad (5)$$

O coeficiente parcial de modificação  $k_{\text{mod},1}$  leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado, sendo assim definido em função de diferentes classes de carregamento, possuindo mesmos valores para madeira serrada, madeira laminada colada, e madeira compensada, e valores diferentes para madeira recomposta. A seguir é apresentado na Tabela 3.2 os valores de  $k_{\text{mod},1}$  e na Tabela 3.3 a caracterização das classes de carregamento.

**Tabela 3.2.** Valores de  $k_{\text{mod},1}$ . Fonte: NBR 7190:1997.

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

**Tabela 3.3.** Classes de carregamento. Fonte: NBR 7190:1997.

Classes de carregamento	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
Permanente	-----
Longa duração	Mais de seis meses
Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Muito curta

O coeficiente parcial de modificação  $k_{\text{mod},2}$  leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado. A seguir é apresentado na Tabela 3.4 os valores de  $k_{\text{mod},2}$  e na Tabela 3.5 a caracterização das classes de umidade.

**Tabela 3.4.** Valores de  $k_{\text{mod},2}$ . Fonte: NBR 7190:1997.

<b>Classes de umidade</b>	<b>Madeira serrada, madeira laminada colada e madeira compensada</b>	<b>Madeira recomposta</b>
(1) e (2)	1,00	1,00
(3) e (4)	0,80	0,90

**Tabela 3.5.** Classes de umidade. Fonte: NBR 7190:1997.

<b>Classes de umidade</b>	<b>Umidade relativa do ambiente <math>U_{\text{amb}}</math></b>	<b>Umidade de equilíbrio da madeira</b>
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{\text{amb}} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{\text{amb}} \leq 85\%$	18%
4	$U > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

O coeficiente parcial de modificação  $k_{\text{mod},3}$  leva em conta se a madeira é de primeira ou segunda categoria. No caso de madeira de segunda categoria, admite-se  $k_{\text{mod},3} = 0,80$ , e no caso de primeira categoria,  $k_{\text{mod},3} = 1,00$ .

Segundo a NBR 7190:1997, a madeira somente pode ser considerada de primeira categoria se todas as peças forem classificadas como isentas de defeitos, através de método visual normalizado, além de serem submetidas a uma classificação mecânica que garanta uma homogeneidade da rigidez das peças que compõe o lote de madeira a ser empregado. Não é possível realizar a classificação da madeira como sendo de primeira categoria, sem a realização da classificação mecânica.

Para as coníferas utilizadas como peças estruturais, recomenda-se o emprego do valor de  $k_{\text{mod},3}$  igual a 0,80, para levar em consideração a presença de nós, que não são detectados pela classificação visual.

No caso de madeira laminada colada, o coeficiente parcial de modificação  $k_{\text{mod},3}$  leva em consideração a curvatura da peça, com valor de  $k_{\text{mod},3} = 1,00$  para peça reta e com valor determinado através da expressão a seguir para peças com curvatura.

$$k_{\text{mod},3} = 1 - 2000 \left( \frac{t}{r} \right)^2 \quad (6)$$

Onde:

t é a espessura das lâminas;

r é o menor raio de curvatura das lâminas que compõe a seção transversal resistente.

### 3.2.2 Sistemas de classificação adotados na normalização internacional

De modo geral, a normalização internacional não emprega coeficientes de modificação para a classificação de peças estruturais de madeira considerando a sua qualidade ou tipo de classificação empregada para isto (classificação visual, mecânica e não-destrutiva).

A Norma Britânica, adotada por diversos países, apresenta duas tabelas, que permitem a distribuição de coníferas e folhosas nas classes de resistência, como pode ser verificado nas tabelas 3.6 e 3.7.

**Tabela 3.6.** Distribuição das espécies de coníferas nas classes de resistência. Fonte: British Standards Institution (2000).

<b>Tipo</b>	<b>Espécie</b>	<b>Origem</b>	<b>Classe de qualidade</b>	<b>Classe de resistência</b>
Coníferas importadas	Redwood	Europa	SS	C24
			GS	C16
			Machine	C14 ou C30
	Whitewood	Europa	SS	C24
			GS	C16
			Machine	C14 ou C30
	Hem-fir, S-P-F e DF-L	Canadá e EUA	SS	C24
			GS	C16
			Machine	C14 ou C30
			JP Sel	C24
			JP No. 1	C16
	Sitka spruce	Canadá	JP No. 2	C16
			SS	C18
			GS	C14
			JP Sel	C18
			JP No. 1	C14
	Southern Pine	EUA	JP No. 2	C14
			SS	C24
			GS	C18
			Machine	C14 ou C30
			JP Sel	C30
	Western White woods	EUA	JP No. 1	C22
			JP No. 2	C22
JP No. 3			C16	
SS			C18	
GS			C14	
Western red cedar	Importada	JP Sel	C18	
		JP No. 1	C14	
		JP No. 2	C14	
		SS	C18	
		GS	C14	
Parana pine	Importada	SS	C24	
		GS	C16	
Pitch pine	Caribe	SS	C27	
		GS	C18	
Radiata pine	Nova Zelândia	Machine	C14 ou C30	
Radiata pine	Chile	Machine	C14 ou C30	
S. African pine	África do Sul	Machine	C14 ou C30	
Zimbabwean pine	Zimbábue	Machine	C14 ou C30	
Coníferas britânicas adultas	Spruce	Reino Unido e Irlanda	SS	C18
			Machine	C14 ou C24
	Pine		SS	C22
			GS	C14
			Machine	C14 ou C27
	Larch		SS	C24
			GS	C16
			Machine	C14 ou C27
	Douglas fir		SS	C18
GS			C14	
Machine			C14 ou C24	

**Tabela 3.7.** Distribuição das espécies de folhosas nas classes de resistência. Fonte: British Standards Institution (2000).

<b>Tipo</b>	<b>Espécie</b>	<b>Origem</b>	<b>Classe de qualidade</b>	<b>Classe de resistência</b>
Folhosas tropicais	Kapur	Sudeste da Ásia	HS	D60
	Kempas	Sudeste da Ásia	HS	D60
	Keruing	Sudeste da Ásia	HS	D50
	Ekki	Oeste da Ásia	HS	D60
	Balau	Sudeste da Ásia	HS	D70
	Greenheart	Sudeste da Ásia	HS	D70
	Iroko	África	HS	D40
	Jarrah	Austrália	HS	D40
	Karri	Austrália	HS	D50
	Merbau	Sudeste da Ásia	HS	D60
	Opepe	África	HS	D50
	Teak	Sudeste da Ásia e África	HS	D40

O mesmo procedimento empregado pela Norma Britânica foi estabelecido por outros países como a Austrália, Estados Unidos, Alemanha, Portugal, França, entre outros. A Norma Australiana possui um sistema com 12 classes de resistência considerando: MOR (valor característico), MOE, resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento e massa específica (valores médios). Nesse sistema consideram-se: grupos de espécies nas condições saturadas e com teor de umidade de 12%, e grupos de madeira classificada visual e mecanicamente (STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA, 1994).

Nos Estados Unidos, o sistema de classes de resistência é composto por doze classes de resistência estabelecidas a partir dos mesmos procedimentos utilizados no sistema australiano. São considerados: MOR, MOE, resistência à compressão paralela às fibras, resistência à tração paralela às fibras, resistência ao cisalhamento, resistência à compressão normal às fibras e massa específica, com teor de umidade da madeira de 15%. São utilizados valores característicos para as propriedades de resistência e valores

médios para as propriedades de rigidez e massa específica. Esse sistema possibilita significativa simplificação para a especificação do material, considerando as setecentas e oitenta e sete combinações resultantes da classificação visual e as vinte e oito combinações consideradas para a madeira classificada mecanicamente, conforme descrição da NDS (1991).

Alguns países como Alemanha, Áustria, Espanha, Portugal e França utilizam o sistema de classe de resistência estabelecido no EUROCODE 5. Esta norma apresenta um sistema de classes de resistência composto por nove classes para coníferas e seis classes para folhosas (EUROCODE 5, 1995).

### **3.2.3 Comparação entre a NBR 7190: 1997 e as normas internacionais**

As especificações da Norma Brasileira NBR 7190:1997 em relação aos coeficientes de modificação estabelecem três coeficientes parciais de modificação, os quais levam em consideração as condições de carregamento, de umidade e a qualidade da madeira. Dentre as normas estudadas, apenas a NBR 7190:1997 estabelece um coeficiente a ser aplicado de acordo com a qualidade do material. Salienta-se que no Brasil não existe a cultura da classificação mecânica da madeira nas serrarias, diferente dos países que utilizam madeira estrutural advinda de processos de classificação em MSR.

A especificação de um coeficiente de modificação de acordo com a qualidade da madeira reflete a preocupação com a realização da classificação visual e mecânica, de tal modo, que este material possa ser aplicado com maior confiabilidade e segurança.

Em relação às normas internacionais em estudo, estas apresentam especificações distintas para o coeficiente de modificação, mas é possível verificar que a maior parte destas utiliza-se de tabelas para classificar a qualidade da madeira nas respectivas classes de resistência, de acordo com a espécie a ser utilizada.

A Norma Brasileira não utiliza tabelas de classificação da qualidade da madeira por espécie, sendo que o coeficiente de modificação permite a classificação visual e mecânica de qualquer espécie dentro das classes de resistência estabelecidas pela mesma norma. Este procedimento é necessário para facilitar a utilização estrutural da madeira das centenas de espécies nativas e cultivadas no Brasil.

### **3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O Brasil se caracteriza pela existência de vastas florestas produtoras de madeira de diversas espécies de uso na construção civil. Entretanto, a produção de madeira no Brasil é caracterizada pelo desmatamento indiscriminado, sendo este causado principalmente devido à falta de preparo técnico da indústria, alheios à tecnologia construtiva e sem preocupação em relação ao meio ambiente.

Pode-se constatar também no Brasil um atraso em relação à tecnologia empregada na extração da madeira, na sua transformação e na sua classificação. O consumidor acaba muitas vezes adquirindo a madeira sem ter certeza absoluta da espécie e sem saber a classe de resistência que o lote pertence.

Atualmente a NBR 7190:1997 estabelece coeficiente de modificação ( $k_{mod, 3}$ ) a ser aplicado de acordo com a qualidade da madeira, buscando estimular a classificação visual e mecânica das peças, para que estas possam ser usadas de forma mais racional.

Mas nota-se ainda um atraso em relação à cultura de classificação de madeira no Brasil. Geralmente a madeira não passa pelo processo de classificação, até mesmo pela dificuldade de realização de uma classificação mecânica, que quase sempre é realizada por métodos destrutivos, que possuem um custo mais elevado e uma maior dificuldade de realização.

Torna-se importante modificar esta realidade, de forma que a madeira possa ser vista como um material competitivo para aplicação estrutural. Dessa forma, as técnicas de classificação não-destrutiva de peças de madeira, que se apresentam como uma classificação prática, podendo citar como exemplo, as técnicas de ultra-som e de vibração transversal, podem contribuir de forma significativa na redução de desperdícios, contribuindo para um uso mais racional da madeira. Também permitirá o uso de um material normalizado em projetos, mudando assim a visão dos consumidores em relação à madeira, fazendo com que estes passem a considerá-la como um produto de alta tecnologia e com amplo campo de aplicação.

Este trabalho buscou estabelecer valores de coeficientes de modificação ( $k_{mod, 3}$ ) a serem aplicados quando são realizadas a classificação visual e a classificação mecânica das peças de madeira por métodos não-destrutivos (ultra-som e vibração transversal), que são métodos simples de serem realizados, buscando assim estimular a classificação de

madeira no meio técnico. Também foram estabelecidos coeficientes a serem aplicados quando a classificação mecânica é realizada pelo ensaio destrutivo de flexão estática.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

Serão apresentados a seguir os procedimentos utilizados para a preparação das amostras, os ensaios físicos, mecânicos e não-destrutivos e a metodologia estatística empregada para análise dos resultados obtidos.

### 4.1 ESPÉCIES UTILIZADAS NO ESTUDO

Para obtenção de uma boa representatividade dos dados, foram escolhidas as seguintes espécies de folhosas de reflorestamento: *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*. Além destas duas espécies, optou-se pelo emprego adicional da espécie *Pinus sp*, que é uma espécie de reflorestamento que vêm sendo amplamente empregada na fabricação de madeira laminada colada (MLC) e da espécie de folhosa nativa *Goupia glabra*.

### 4.2 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As vigas ao chegarem ao laboratório foram armazenadas em um local coberto com aberturas apenas na parte frontal, para que estas fossem secas, ficando armazenadas por um período de aproximadamente seis meses.

A Figura 4.1 apresenta o local onde as vigas foram armazenadas para secagem.



**Figura 4.1.** Local onde as peças ficaram armazenadas para secagem.

Para obtenção do controle da umidade, utilizou-se de pequenas amostras retiradas das vigas, das quais se determinou a massa inicial, e posteriormente colocou-as na estufa.

Durante a secagem das amostras, foram feitas medidas a cada 6 horas, até que se obtivesse uma variação inferior a 0,5 % da última medida de massa, sendo assim essa última massa a massa seca ( $m_s$ ). Com os diferentes valores de massa obtidos determinou-se o teor de umidade inicial da madeira utilizando a equação (11).

$$U \% = (m_i - m_s) \times 100 / m_s \quad (11)$$

Onde:

$m_i$  é a massa inicial da amostra (g);

$m_s$  é a massa seca da amostra (g);

U é o teor de umidade (%).

Na Figura 4.2 é possível visualizar a balança e a estufa empregadas para a determinação da massa e para a secagem das amostras retiradas das vigas.



**Figura 4.2.** Balança e estufa.

A cada quinze dias, novas amostras eram retiradas das vigas para a estimativa do teor de umidade. Foram realizados controles de umidade até as peças em estudo atingirem um teor de umidade em torno de 12% (umidade de equilíbrio), valor empregado para a realização da experimentação, não sendo assim necessária a realização de correções nos resultados obtidos.

Após o procedimento de secagem, as vigas foram confeccionadas com dimensões estruturais aproximadas de 5 cm x 11 cm x 300 cm. Para cada espécie foram realizados ensaios com 30 vigas, sendo esta quantidade estabelecida para garantir um elevado nível de confiança para os resultados.

### **4.3 ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E NÃO-DESTRUTIVOS**

Foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ );

- Classificação visual das peças;
- Ensaio de ultra-som ( $E_{d, us}$ );
- Ensaio de vibração transversal ( $E_{d, vt}$ );
- Ensaaios de flexão estática (MOE);

#### 4.3.1 Ensaio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ )

Foram realizados ensaios para a determinação da densidade aparente. A densidade aparente é definida pela NBR 7190:1997, como a razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, sendo dada por:

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

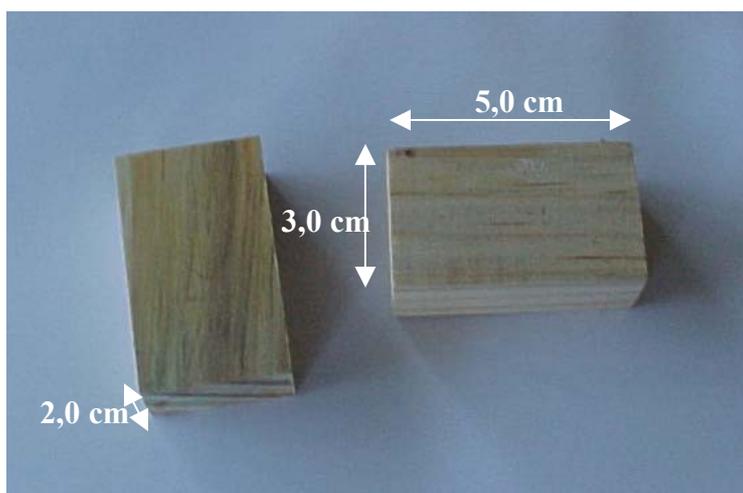
Onde:

$m_{12}$  é a massa da madeira a 12% de umidade (kg);

$V_{12}$  é o volume da madeira a 12% de umidade ( $m^3$ ).

Os corpos-de-prova empregados para a determinação da densidade aparente apresentam dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm. Foram extraídos três corpos-de-prova de cada viga em estudo para a determinação da densidade aparente.

Na Figura 4.3 é apresentado o corpo-de-prova empregado para a determinação da densidade aparente.



**Figura 4.3.** Corpo-de-prova para determinação da densidade básica e aparente.

Para a determinação da densidade aparente, a massa e o volume foram medidos com o corpo-de-prova apresentando umidade de 12%.

Conhecidos os valores de  $m_{12}$  e  $V_{12}$  determinou-se a densidade aparente utilizando-se da equação (12).

Além da densidade aparente determinada pelo emprego de pequenos corpos-de-prova conforme estabelecido pela NBR 7190:1997, procedimento abordado anteriormente, foi determinado também a densidade aparente de cada viga, as quais foram pesadas individualmente e submetidas a medições de suas dimensões para a determinação de seu volume. Este procedimento foi realizado, pois o valor da densidade aparente determinada apenas pelo corpo-de-prova pode não ser representativo da densidade da viga, pois esta pode apresentar descontinuidades não presentes no corpo-de-prova com as dimensões estabelecidas pela norma. Assim, a densidade aparente empregada foi a

densidade da viga, e não a determinada pelos corpos-de-prova estabelecidos pela NBR 7190:1997.

#### **4.3.2 Classificação visual**

Para a classificação da espécie *Pinus sp* foram empregadas as regras de classificação visual propostas para revisão da NBR 7190:1997, as quais serão partes integrantes do Anexo G: Classificação visual de madeira serrada de coníferas (Projeto de revisão NBR 7190:1997 CE-02:126.10, fevereiro de 2006).

Da mesma forma para a classificação visual das espécies: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Goupia glabra* foram empregados os procedimentos propostos para a revisão da NBR 7190:1997, os quais serão partes integrantes do Anexo H: Classificação visual de madeira serrada de folhosas (Projeto de revisão NBR 7190:1997 CE-02:126.10, fevereiro de 2006).

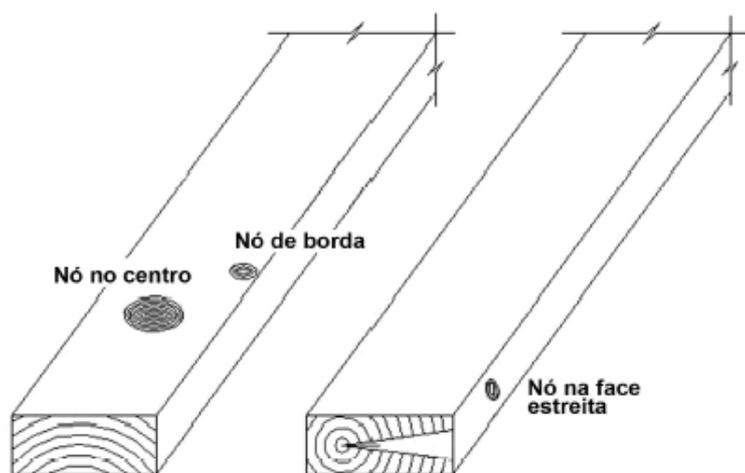
Ambos os anexos classificam as peças em classe estrutural especial (SE), classe estrutural N° 1 (S1), classe estrutural N° 2 (S2) e classe estrutural N° 3 (S3). A classe SE corresponde a melhor condição de classificação de uma peça, na qual a peça apresenta uma melhor qualidade. A classe S3 corresponde a pior condição de classificação, onde há uma qualidade inferior da peça, com presença de defeitos significativos. As demais classes correspondem a condições de qualidade intermediárias entre a classe de melhor e a de pior qualidade.

Para as coníferas são definidos dois níveis de densidade de anéis de crescimento: madeira densa (D) e madeira não-densa (ND).

A seguir são apresentados os procedimentos que foram realizados para avaliar alguns parâmetros para a classificação visual das peças.

- **Nós**

Em cada peça das espécies em estudo foram medidos os três maiores nós posicionados, respectivamente, no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita (Figura 4.4).



**Figura 4.4.** Nós em uma peça de madeira. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).

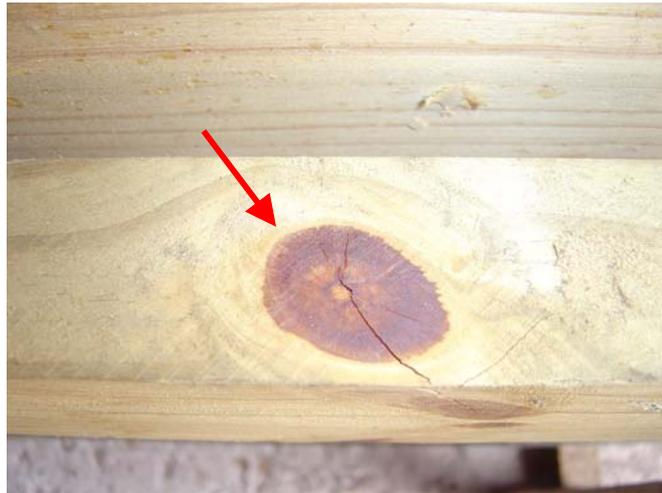
Nas figuras 4.5 a 4.7 a seguir são apresentados nós de centro, de borda e de face estreita encontrados em vigas estudadas.



**Figura 4.5.** Nó de centro.



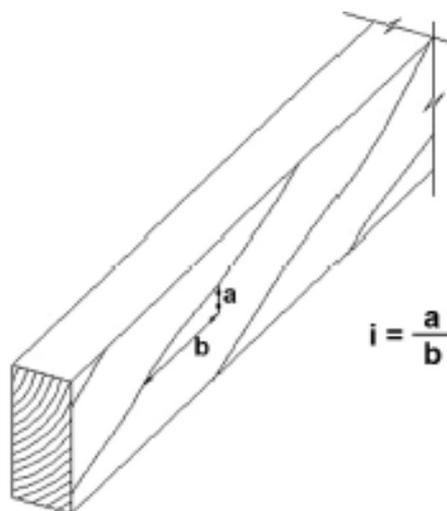
**Figura 4.6.** Nó de borda.



**Figura 4.7.** Nó de face estreita.

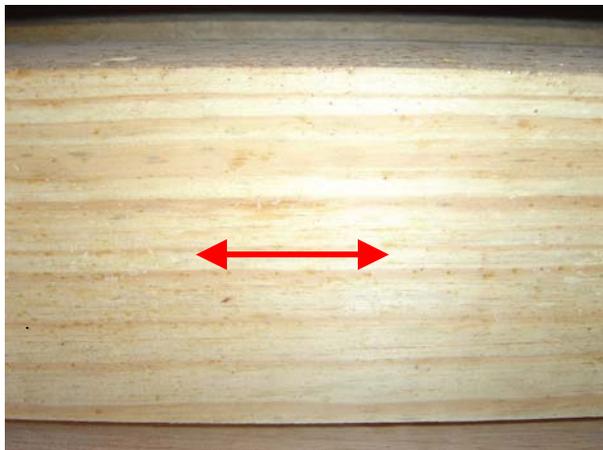
- **Inclinação das fibras**

A inclinação das fibras foi medida em cada viga das espécies em estudo pelo ângulo de inclinação das fibras em relação à extremidade da peça. Na Figura 4.8 é apresentado como deve ser realizada a medição da inclinação das fibras da peça.



**Figura 4.8.** Medição da inclinação das fibras. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).

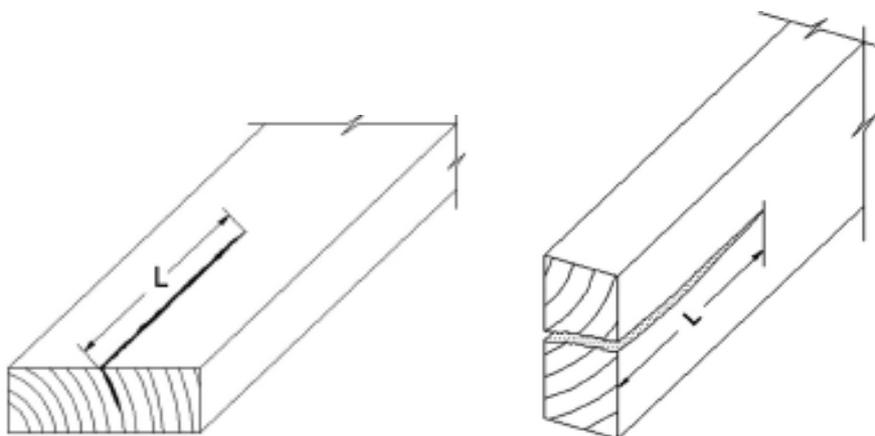
Na Figura 4.9 é possível verificar a inclinação das fibras da madeira de uma viga em estudo.



**Figura 4.9.** Inclinação das fibras da madeira em uma viga.

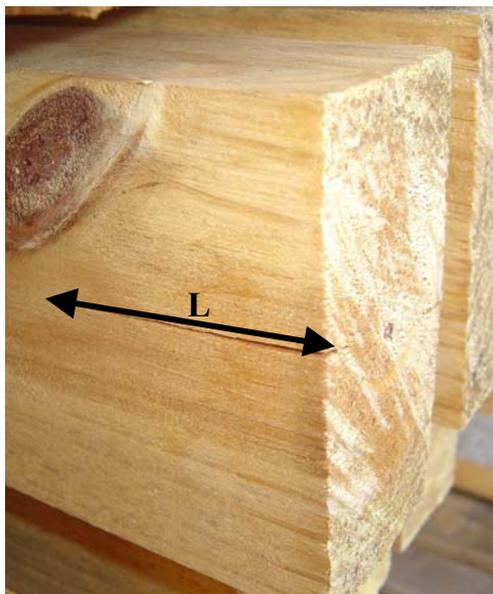
- **Racha anelar e fenda**

Foram verificadas em cada viga das espécies em estudo a presença de rachas entre os anéis de crescimento e a presença de fendas. As rachas e as fendas são medidas pelo seu comprimento paralelo ao comprimento da peça, como pode ser visto na Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Medição de racha linear e fenda respectivamente. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).

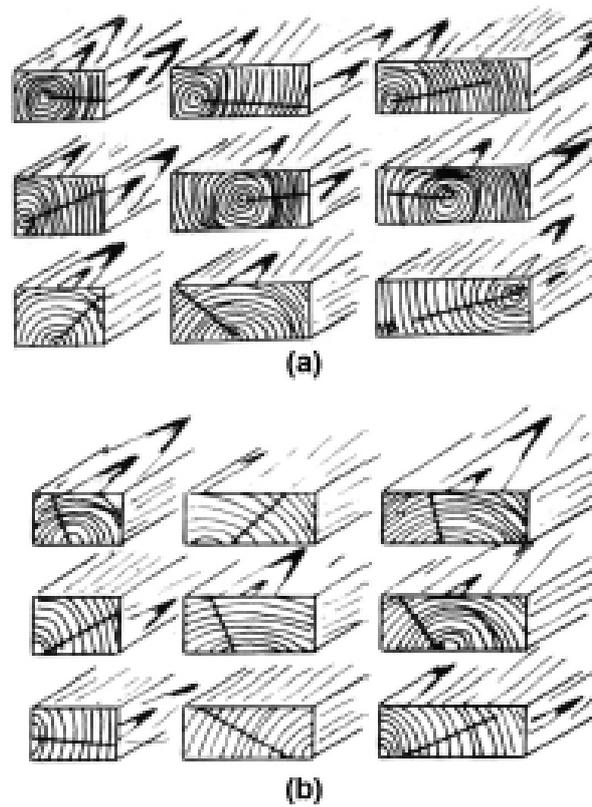
Na Figura 4.11 é apresentada uma fenda encontrada em uma das vigas em estudo.



**Figura 4.11.** Fenda.

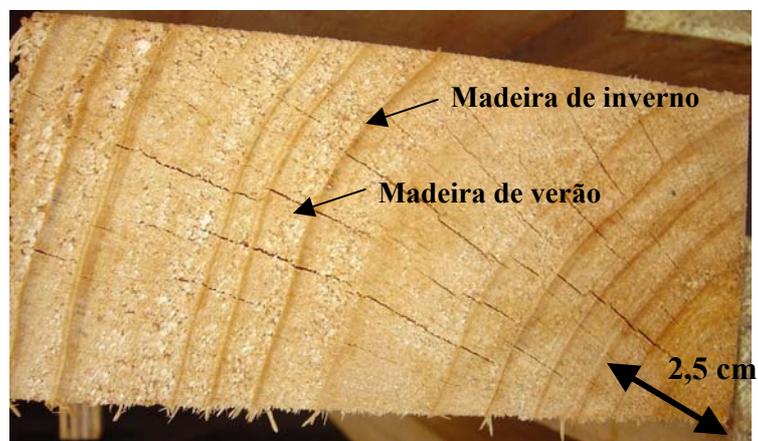
- **Densidade**

Para cada viga determinou-se a quantidade de madeira de inverno presente e o número de anéis de crescimento existentes em uma extensão de 2,5 cm medida na direção radial. A madeira de inverno corresponde a parte mais densa, com células de paredes grossas formadas no segundo ciclo anual de crescimento. Este procedimento foi realizado apenas para a espécie *Pinus sp*, pois este procedimento não se aplica na classificação de folhosas, uma vez que nestas não é possível distinguir a madeira de inverno da madeira de verão. As formas para medição da densidade são apresentadas na Figura 4.12.



**Figura 4.12.** Formas de medir a densidade em peças de madeira. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).

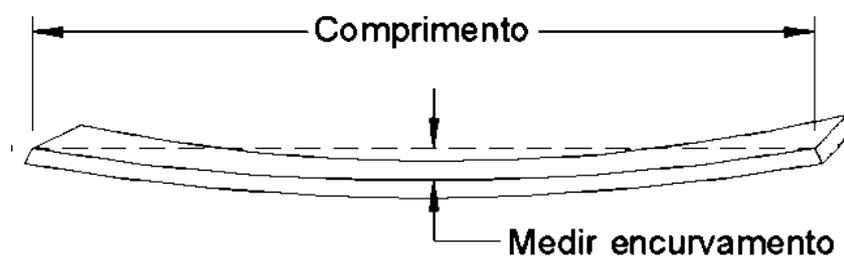
Na Figura 4.13, é apresentada a medição do número de anéis de crescimento existentes em uma extensão de 2,5 cm, medida na direção radial e a quantidade de madeira de inverno presente.



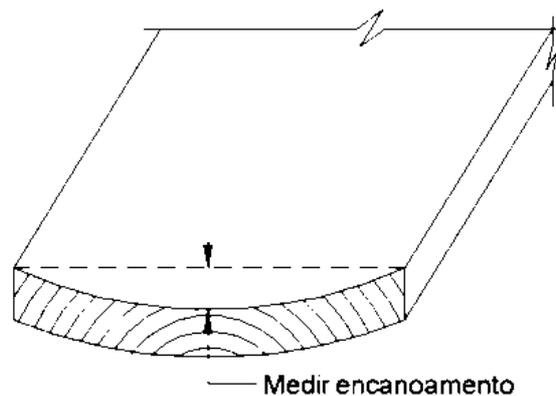
**Figura 4.13.** Anéis de crescimento.

- **Empenamento**

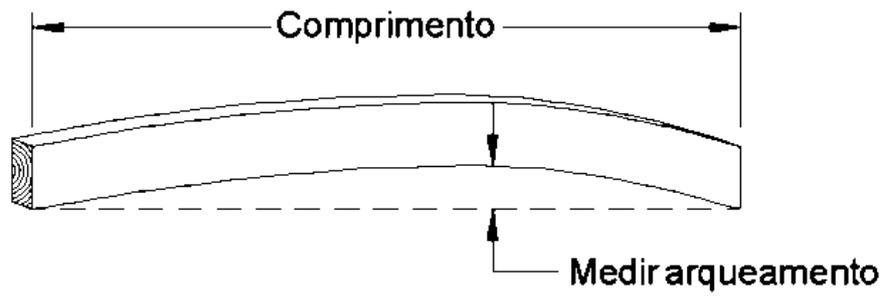
Para as espécies em estudo foram verificados os empenamentos das vigas, que se refere a qualquer desvio na forma geométrica inicial de uma peça de madeira, incluindo encurvamento, encanoamento, arqueamento, e torcimento. As figuras 4.14 a 4.17 mostram como são realizadas as medições destes desvios.



**Figura 4.14.** Medição do encurvamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).



**Figura 4.15.** Medição do encanoamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).



**Figura 4.16.** Medição do arqueamento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).



**Figura 4.17.** Medição do torcimento. Fonte: Southern Pine Inspection Bureau (1994).

Na Figura 4.18 é possível visualizar uma viga empenada (encurvamento).



**Figura 4.18.** Viga empenada (encurvamento).

- **Fissuras de compressão**

Para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Goupia glabra* foram verificadas a presença de fissuras de compressão, que são fraturas da madeira que aparecem na superfície da peça, como linhas quebradas dispostas perpendicularmente ao eixo longitudinal da peça. Em geral, ocorrem em peças provenientes da porção central da tora próximo à medula. Na Figura 4.19, é apresentada uma viga com presença de fissuras de compressão.



**Figura 4.19.** Fissuras de compressão.

#### **4.3.3 Ensaio de ultra-som**

O ensaio, com emprego da técnica de ultra-som foi realizado, utilizando o equipamento Sylvatest com transdutores de 22 kHz, sendo que esse equipamento emprega um método de classificação ultra-sônica desenvolvido e testado pelo Instituto Federal Suíço de Tecnologia em Lausanne (Suíça).

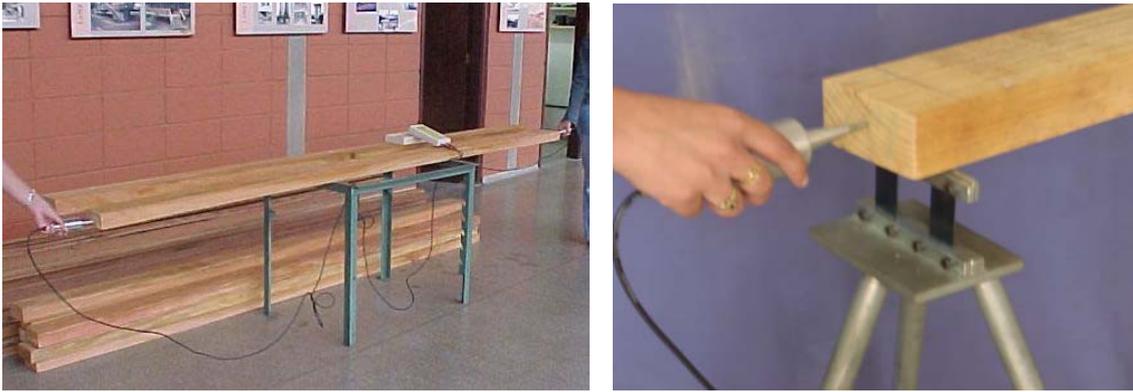
O equipamento possui entrada e saída de dados que possibilitam o armazenamento dos dados por meio da utilização de um notebook. É equipado com dois transdutores piezoelétrônicos, sendo que um gera a onda (transmissor) e o outro recebe a onda (receptor) e ambos trabalham diretamente em contato com a madeira. O equipamento permite registrar o tempo de passagem da onda, em microssegundos, que possibilita o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico. Na Figura 4.20 é apresentado o equipamento de ultra-som empregado.



**Figura 4.20.** Equipamento de ultra-som.

Foram realizadas três leituras de tempo em microssegundos em cada peça, e a partir dessas determinou-se a média das leituras. Com o tempo médio, foi determinada a velocidade que permitiu a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{d, us}$ ) por meio da equação (1) apresentada no item 3.1.2.

A Figura 4.21 ilustra a realização do ensaio de ultra-som.



**Figura 4.21.** Ensaio de ultra-som.

#### 4.3.4 Ensaio de vibração transversal

Para a realização do ensaio de vibração transversal foi empregado o equipamento Transverse Vibration E-Computer, modelo 340 da Metriguard, o qual pode ser visualizado na Figura 4.22.



**Figura 4.22.** Equipamento de vibração transversal.

Foi aplicado um impacto no centro de cada peça biapoiada e a partir dessa vibração foram fornecidos pelo equipamento os valores de frequência e peso da peça. Com os valores de frequência, peso, vão e com as dimensões das peças foi possível determinar a

partir da equação (3), que está apresentado no item 3.1.3, o valor do módulo de elasticidade dinâmico de cada peça em estudo. A Figura 4.23 ilustra o ensaio de vibração transversal.



**Figura 4.23.** Ensaio de vibração transversal.

#### **4.3.5 Ensaio de flexão estática (MOE)**

Segundo a NBR 7190:1997, a resistência da madeira à flexão é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico.

Neste trabalho foram empregados corpos-de-prova com dimensões superiores ao especificado na NBR 7190:1997 para a realização do ensaio de flexão estática. Foram realizados ensaios de flexão estática (MOE) para obtenção de correlações entre os valores do módulo de elasticidade obtidos. As peças com dimensões de 5 cm x 11 cm x 300 cm foram dispostas na posição de menor inércia, e submetidas a um carregamento na região central, sendo realizadas cinco leituras de deslocamento.

O MOE à flexão em relação ao eixo de menor inércia foi determinado utilizando-se a seguinte expressão:

$$MOE = \frac{\Delta F x L^3}{48 x \Delta v x I} \quad (13)$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade estático (MPa);

$\Delta F$  é o incremento de carga (N);

L é o vão da peça (mm);

$\Delta v$  é o incremento de deslocamento (mm);

I é o momento de inércia da seção transversal (mm<sup>4</sup>).

Na Figura 4.24 é apresentado o ensaio de flexão estática.



**Figura 4.24.** Ensaio de flexão estática.

#### **4.4 METODOLOGIA ESTATÍSTICA UTILIZADA PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

Os dados obtidos foram analisados por meio de metodologia estatística que permite assegurar um nível de confiança compatível com a utilização da madeira em estrutura. Para a análise dos dados foram empregados o programa Minitab e planilhas do Microsoft Excel.

Foram realizados testes de normalidade, comparação de médias para amostras de mesmo tamanho, regressão e análise de variância.

O teste de normalidade foi realizado para verificar se os dados experimentais para cada uma das propriedades obtidas separadamente podem ser enquadrados como uma distribuição normal. A partir dessa confirmação, é possível validar estaticamente as relações obtidas e também os valores de  $k_{\text{mod},3}$  ao nível de significância de 5%. O teste de normalidade empregado foi o método de Kolmogorov-Smirnov.

O teste de comparação de médias para amostras de mesmo tamanho foi empregado para verificar se existe diferença significativa entre as técnicas de ultra-som e vibração transversal. Com a confirmação da existência de diferença significativa entre as técnicas é possível mostrar a importância da existência de valores distintos de  $k_{\text{mod},3}$  para as técnicas de ultra-som e vibração transversal.

As análises de regressão e análises de variância foram realizadas para comparação dos dados obtidos de módulo de elasticidade estático (MOE) e dinâmico ( $E_d$ ), e visando a validação dos coeficientes obtidos a partir dos valores experimentais.

## 5. RESULTADOS

---

---

Neste item estão apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios descritos em Materiais e Métodos para as espécies: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*.

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

Nas tabelas 5.1, 5.3, 5.5 e 5.7 são apresentadas as classes de cada viga para as espécies em estudo e nas tabelas 5.2, 5.4, 5.6 e 5.8 são mostradas as quantidades de vigas enquadradas em cada classe. Para a espécie *Pinus sp* é apresentada também a classe de densidade.

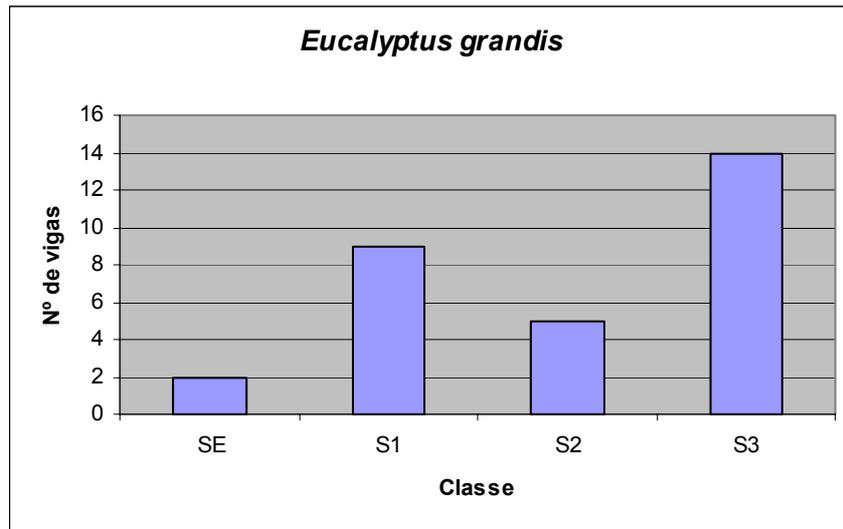
**Tabela 5.1.** Classe das vigas da espécie *Eucalyptus grandis*.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>
1	S1
2	S2
3	SE
4	SE
5	S3
6	S2
7	S3
8	S2
9	S3
10	S3
11	S3
12	S3
13	S3
14	S1
15	S3
16	S3
17	S3
18	S3
19	S1
20	S3
21	S1
22	S1
23	S2
24	S3
25	S1
26	S3
27	S2
28	S1
29	S1
30	S1

**Tabela 5.2.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Eucalyptus grandis*.

<b>Classe</b>	<b>SE</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Quantidades</b>	2	9	5	14	30

Pela Tabela 5.2 e Figura 5.1 é possível observar a predominância da classe S3 para a espécie *Eucalyptus grandis*, havendo assim uma quantidade significativa de peças que se enquadraram na pior condição de classificação.



**Figura 5.1.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Eucalyptus grandis*.

**Tabela 5.3.** Classe das vigas da espécie *Eucalyptus citriodora*.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>
1	S3
2	S3
3	S1
4	S2
5	S3
6	S3
7	S3
8	S2
9	S1
10	SE
11	S3
12	S3
13	S3
14	S3
15	SE
16	S3
17	S2
18	S2
19	S3
20	S2
21	S3
22	S2
23	S3
24	S2
25	S3
26	S3
27	S1
28	S1
29	S3
30	S2

**Tabela 5.4.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Eucalyptus citriodora*.

<b>Classe</b>	<b>SE</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Quantidades</b>	2	4	8	16	30

Pela Tabela 5.4 e Figura 5.2 é possível observar a predominância da classe S3 para a espécie *Eucalyptus citriodora*, havendo assim uma quantidade significativa de peças que se enquadraram na pior condição de classificação.

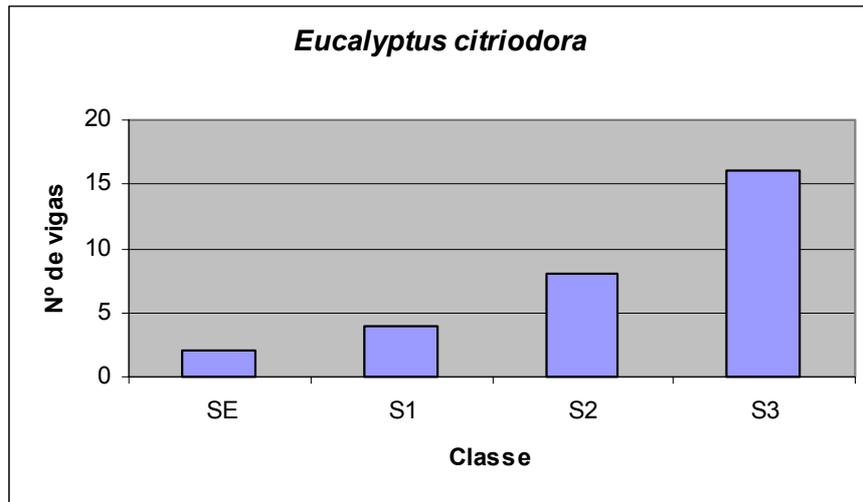


Figura 5.2. Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Eucalyptus citriodora*.

**Tabela 5.5.** Classe das vigas da espécie *Pinus sp.*

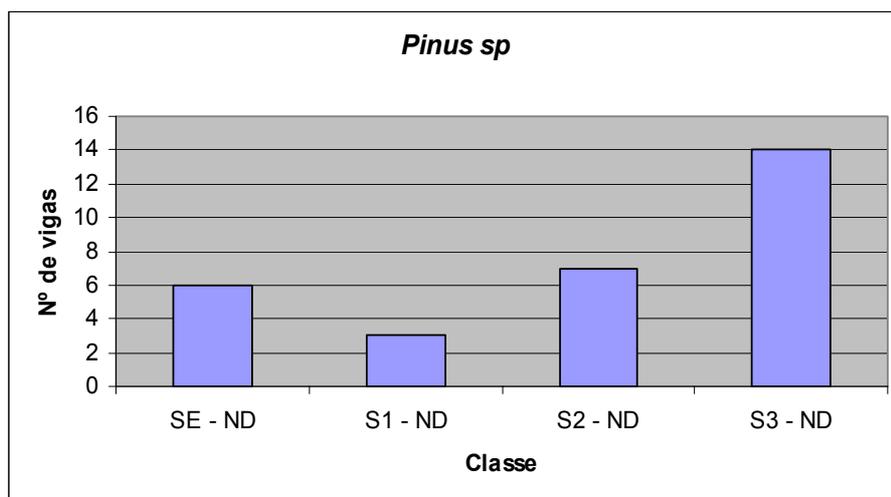
<b>Peça</b>	<b>Classe</b>	<b>Classe (densidade)</b>
1	S2	ND*
2	S3	ND
3	S3	ND
4	S3	ND
5	S2	ND
6	S1	ND
7	SE	ND
8	S1	ND
9	SE	ND
10	S3	ND
11	S2	ND
12	S3	ND
13	S3	ND
14	S2	ND
15	SE	ND
16	S3	ND
17	S2	ND
18	S2	ND
19	S3	ND
20	S3	ND
21	S3	ND
22	SE	ND
23	SE	ND
24	S3	ND
25	S2	ND
26	SE	ND
27	S3	ND
28	S3	ND
29	S1	ND
30	S3	ND

\*ND: Não-densa.

**Tabela 5.6.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Pinus sp.*

<b>Classe</b>	<b>SE - ND</b>	<b>S1 - ND</b>	<b>S2 - ND</b>	<b>S3 - ND</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Quantidades</b>	6	3	7	14	30

Pela Tabela 5.6 e Figura 5.3 é possível observar a predominância da classe S3 para a espécie *Pinus sp.*, havendo assim uma quantidade significativa de peças que se enquadraram na pior condição de classificação. Não houve a presença de vigas que se enquadraram como madeira densa (D).



**Figura 5.3.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Pinus sp.*

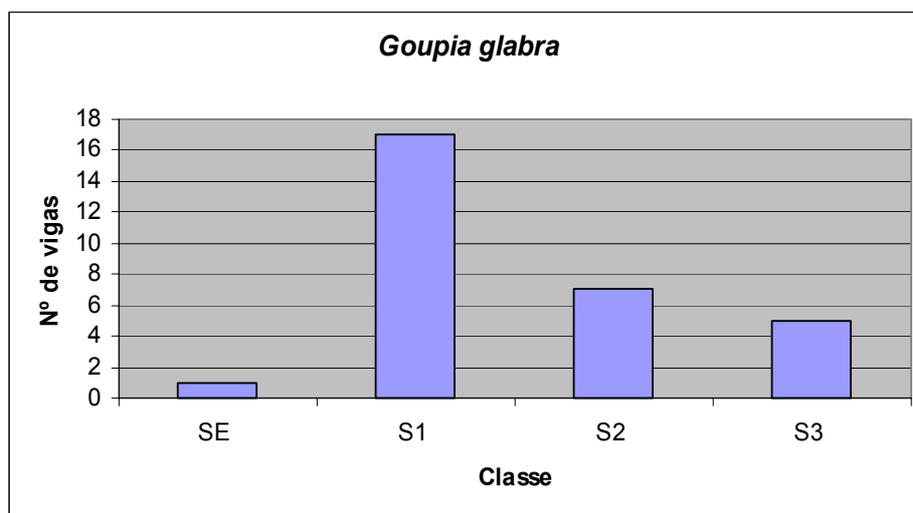
**Tabela 5.7.** Classe das vigas da espécie *Goupia glabra*.

<b>Peça</b>	<b>Classe</b>
1	S1
2	S1
3	SE
4	S1
5	S1
6	S1
7	S2
8	S1
9	S2
10	S1
11	S3
12	S3
13	S1
14	S1
15	S3
16	S2
17	S2
18	S1
19	S2
20	S1
21	S1
22	S1
23	S1
24	S3
25	S3
26	S1
27	S1
28	S2
29	S1
30	S2

**Tabela 5.8.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Goupia glabra*.

<b>Classe</b>	<b>SE</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Quantidades</b>	1	17	7	5	30

Pela Tabela 5.8 e Figura 5.4 é possível observar a predominância da classe S1 para a espécie *Goupia glabra*, havendo assim uma quantidade significativa de peças que se enquadraram em uma classe que apresenta pouco defeito.



**Figura 5.4.** Quantidade de vigas em cada classe para a espécie *Goupia glabra*.

Observa-se que para as espécies estudadas houve a predominância de vigas que se enquadraram na classe S3, sendo que apenas para a espécie *Goupia glabra* houve a predominância da classe S1.

## 5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO PELA TÉCNICA DE ULTRA-SOM

Na Tabela 5.9 são apresentados os valores das dimensões das vigas, a densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ), a velocidade ultra-sônica na direção longitudinal e o módulo de elasticidade dinâmico para a espécie *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra* são apresentados no Anexo A.

Tabela 5.9. Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus grandis* no ensaio de ultra-som.

Viga	Classe	b (cm)	h (cm)	L (cm)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>LL</sub> (m/s)	E <sub>d,us</sub> (MPa)
1	S1	10,4	4,8	300	981,6	4458	19504
2	S2	10,6	5,0	300	978,0	4306	18135
3	SE	10,3	5,0	300	1009,7	4775	23018
4	SE	10,5	5,0	300	901,6	4429	17687
5	S3	10,4	4,9	300	834,0	4754	18851
6	S2	10,7	5,1	300	952,9	4337	17927
7	S3	10,3	5,1	300	974,0	4644	21007
8	S2	10,3	5,0	300	977,3	4724	21814
9	S3	10,6	5,1	300	1066,7	4573	22309
10	S3	10,5	5,0	300	920,6	4854	21695
11	S3	11,0	5,1	300	956,6	4491	19294
12	S3	10,6	5,1	300	949,6	4803	21901
13	S3	10,6	4,8	300	936,8	4940	22859
14	S1	10,6	4,9	300	1004,4	4532	20626
15	S3	11,8	5,0	300	920,9	4606	19537
16	S3	10,5	5,0	300	930,2	4646	20081
17	S3	10,1	4,8	300	969,5	4712	21526
18	S3	10,1	5,0	300	1009,9	4192	17746
19	S1	10,6	5,0	300	1009,4	4673	22042
20	S3	10,6	5,1	300	983,5	4550	20361
21	S1	10,8	4,8	300	1054,5	4803	24322
22	S1	10,8	5,0	300	953,7	4707	21131
23	S2	10,3	5,0	300	899,7	4775	20509
24	S3	10,5	5,0	300	876,2	4707	19414
25	S1	10,6	5,1	300	1029,7	4473	20604
26	S3	10,0	5,0	300	956,7	4764	21716
27	S2	10,8	5,3	300	931,7	4410	18117
28	S1	10,5	5,0	300	965,1	4680	21139
29	S1	10,7	5,0	300	912,8	4373	17456
30	S1	10,4	5,0	300	987,2	4314	18376

### 5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 5.10 são apresentados os seguintes valores: o vão empregado, frequência, a massa das vigas e o módulo de elasticidade dinâmico para a espécie *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra* são apresentados no Anexo B.

**Tabela 5.10.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus grandis* no ensaio de vibração transversal.

Viga	Classe	Vão (m)	f (Hz)	Massa (kg)	$E_{d,vt}$ (MPa)
1	S1	2,9	12,20	12,6	19430
2	S2	2,9	12,43	13,2	18271
3	SE	2,9	13,68	12,2	21063
4	SE	2,9	12,09	12,0	15899
5	S3	2,9	11,80	10,8	14636
6	S2	2,9	13,32	13,4	19913
7	S3	2,9	12,89	12,8	18504
8	S2	2,9	13,34	12,7	20900
9	S3	2,9	13,81	12,9	20848
10	S3	2,9	13,28	11,6	18592
11	S3	2,9	13,08	12,9	17939
12	S3	2,9	13,31	13,0	19546
13	S3	2,9	13,10	12,8	22223
14	S1	2,9	12,63	12,6	19098
15	S3	2,9	13,12	12,9	17855
16	S3	2,9	13,22	12,3	19438
17	S3	2,9	12,61	12,7	21577
18	S3	2,9	11,58	13,4	16882
19	S1	2,9	13,32	13,4	21299
20	S3	2,9	13,35	12,2	18397
21	S1	2,9	13,13	13,5	23199
22	S1	2,9	12,80	13,1	18958
23	S2	2,9	12,63	12,4	18263
24	S3	2,9	13,68	11,8	20085
25	S1	2,9	13,17	12,7	18638
26	S3	2,9	13,61	12,4	21808
27	S2	2,9	13,11	13,4	16978
28	S1	2,9	13,06	13,3	20578
29	S1	2,9	12,20	13,2	17449
30	S1	2,9	10,96	12,5	13785

#### 5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO OBTIDO NA FLEXÃO ESTÁTICA

Na Tabela 5.11 são apresentados os valores do vão empregado, o momento de inércia da seção transversal, o incremento de carga, o incremento de deslocamento e o módulo de elasticidade estático obtido para a espécie *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra* são apresentados no Anexo C.

**Tabela 5.11.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus grandis* no ensaio de flexão estática.

Viga	Classe	Vão	I (mm <sup>4</sup> )	$\Delta F$ (N)	$\Delta v$ (mm)	MOE (MPa)
1	S1	2,9	958464,0	564,8	15,32	19544
2	S2	2,9	1104166,7	564,8	15,88	16367
3	SE	2,9	1072916,7	564,8	12,67	21111
4	SE	2,9	1093750,0	564,8	16,73	15683
5	S3	2,9	1019624,7	564,8	18,84	14939
6	S2	2,9	1182804,8	564,8	12,12	20019
7	S3	2,9	1138587,8	564,8	13,34	18894
8	S2	2,9	1072916,7	564,8	12,65	21144
9	S3	2,9	1171750,5	564,8	11,08	22104
10	S3	2,9	1093750,0	564,8	13,45	19508
11	S3	2,9	1215967,5	564,8	13,07	18057
12	S3	2,9	1171750,5	564,8	12,31	19895
13	S3	2,9	976896,0	564,8	14,16	20746
14	S1	2,9	1039232,8	564,8	14,29	19324
15	S3	2,9	1229166,7	564,8	11,55	20214
16	S3	2,9	1093750,0	564,8	14,16	18530
17	S3	2,9	930816,0	564,8	16,67	18495
18	S3	2,9	1052083,3	564,8	16,69	16343
19	S1	2,9	1104166,7	564,8	12,17	21356
20	S3	2,9	1171750,5	564,8	12,10	20241
21	S1	2,9	995328,0	564,8	12,20	23633
22	S1	2,9	1125000,0	564,8	12,72	20054
23	S2	2,9	1072916,7	564,8	14,82	18048
24	S3	2,9	1093750,0	564,8	13,77	19054
25	S1	2,9	1171750,5	564,8	11,80	20755
26	S3	2,9	1041666,7	564,8	13,27	20761
27	S2	2,9	1339893,0	564,8	13,17	16263
28	S1	2,9	1093750,0	564,8	13,35	19654
29	S1	2,9	1114583,3	564,8	15,59	16515
30	S1	2,9	1083333,3	564,8	19,63	13495

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

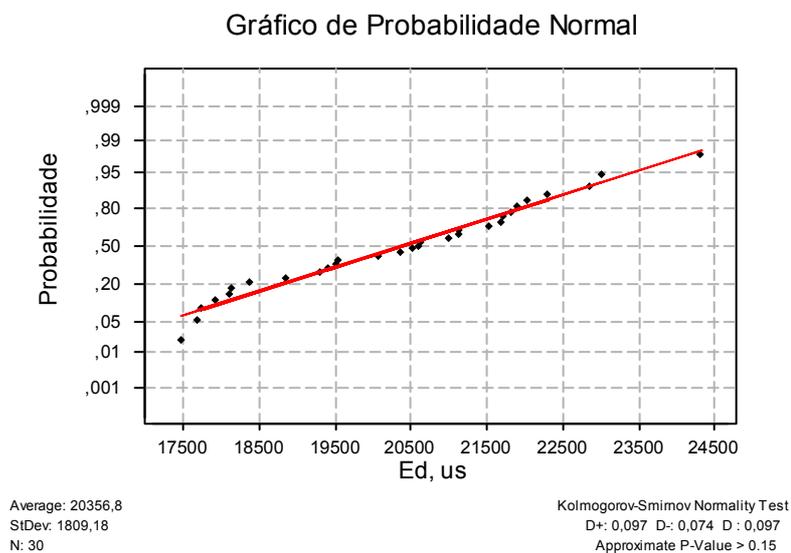
Neste item estão analisados os resultados obtidos na realização dos ensaios para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*, utilizando as técnicas de ultra-som e vibração transversal, os quais foram comparados com resultados obtidos no ensaio de flexão estática para verificação da acuracidade das técnicas não-destrutivas em estudo. Também são apresentados os valores propostos para  $k_{\text{mod}, 3}$  em função da utilização da classificação mecânica empregando as técnicas não-destrutivas em questão.

### 6.1 TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS OBTIDOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ESTÁTICO E DINÂMICO).

Para cada espécie em estudo aplicou-se para os dados obtidos de módulo de elasticidade (estático e dinâmico) o método de Kolmogorov-Smirnov para verificar se estes dados apresentavam uma distribuição normal, permitindo assim validar estatisticamente as relações obtidas e também os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$ .

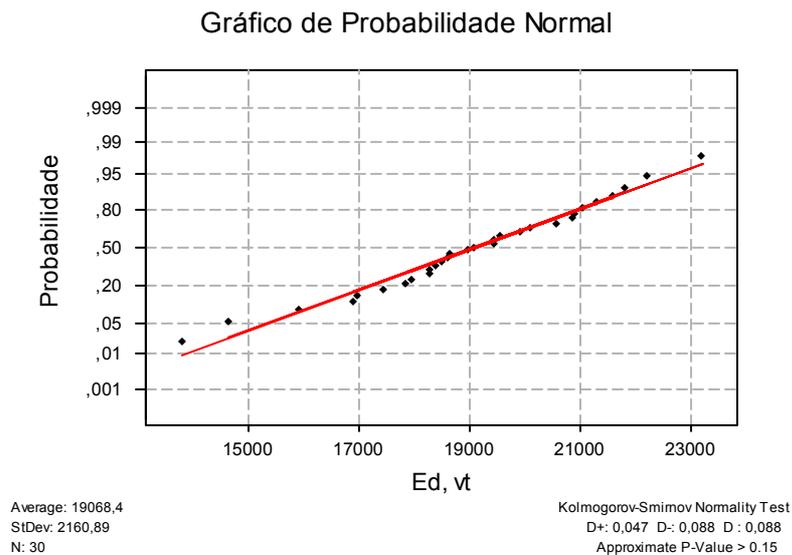
O teste consiste em comparar a variável de teste (D) que corresponde a maior diferença observada entre a função de distribuição acumulada do modelo e da amostra, com o valor de D crítico tabelado.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a técnica de ultra-som, vibração transversal e para a flexão estática para a espécie *Eucalyptus grandis*, sendo que os resultados do teste para as demais espécies em estudo são apresentados no Anexo D.



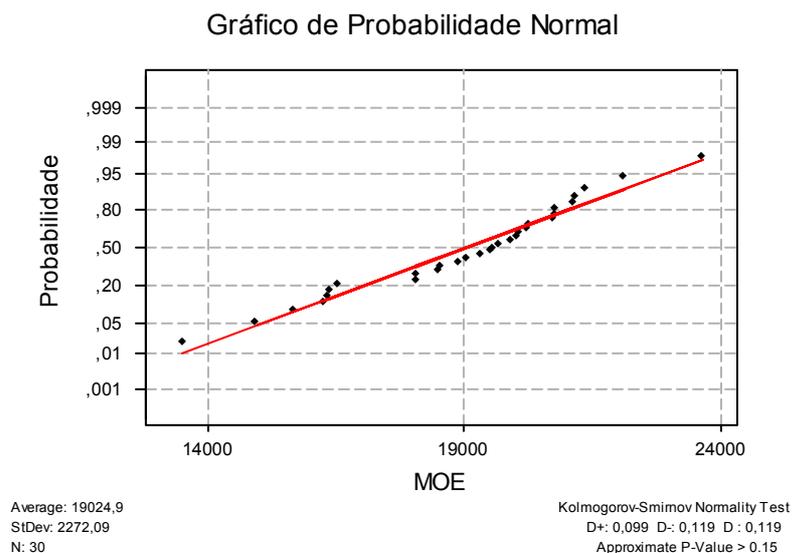
**Figura 6.1.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus grandis* – Ultra-som.

Para os dados obtidos com a técnica de ultra-som verifica-se pela Figura 6.1, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,097. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,097 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



**Figura 6.2.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus grandis* – Vibração transversal.

Para os dados obtidos com a técnica de vibração transversal verifica-se pela Figura 6.2, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,088. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,088 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



**Figura 6.3.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus grandis* – Flexão estática.

Para os dados obtidos com a flexão estática verifica-se pela Figura 6.3, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,119. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,119 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.

Assim nota-se que ocorre distribuição normal para os dados obtidos em cada uma das técnicas empregadas e para todas as espécies em estudo, sendo possível assim validar estatisticamente as relações obtidas e também os valores de  $k_{\text{mod},3}$  ao nível de significância de 5%.

## 6.2 TESTE DE COMPARAÇÃO DE MÉDIAS ENTRE AS TÉCNICAS DE ULTRA-SOM E DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Para mostrar a necessidade da existência de valores distintos de  $k_{\text{mod},3}$ , realizou-se uma comparação de médias, cujos resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1.** Quadro de análise de variância.

Espécie	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	$F_{1,58;5\%}$
<i>Eucalyptus grandis</i>	Entre amostras	24902472	1	24902472	6,27	4,008
	Residual	230337597	58	3971338		
	Total	255240069	59			
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Entre amostras	3363768	1	3363768	0,53	4,008
	Residual	370638008	58	6390310		
	Total	374001776	59			
<i>Pinus sp</i>	Entre amostras	36933766	1	36933766	9,12	4,008
	Residual	234876292	58	4049591		
	Total	271810058	59			
<i>Goupia glabra</i>	Entre amostras	181988373	1	181988373	21,88	4,008
	Residual	482467879	58	8318412		
	Total	664456252	59			

Pela Tabela 6.1 é possível verificar para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Pinus sp* e *Goupia glabra* uma diferença entre as técnicas de ultra-som e vibração transversal, pois para estas espécies F foi superior a  $F_{1,58,5\%}$ . O valor de  $F_{1,58,5\%}$  encontra-se tabelado em Costa Neto (1977).

Apenas a espécie *Eucalyptus citriodora* não apresentou diferença entre as técnicas de ultra-som e vibração transversal, sendo que isto pode ter ocorrido devido à orientação das fibras desta espécie, uma vez que esta apresenta grã espiralada, dificultando a vibração. O equipamento de vibração empregado possui uma célula de carga que não é adequada para esta espécie, sendo que para a obtenção de melhores resultados seria necessário o emprego de uma célula de carga mais sensível.

Isto comprova a necessidade de obter valores distintos de  $k_{mod, 3}$  para as técnicas de ultra-som e de vibração transversal.

### **6.3 CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO COM A TÉCNICA DE ULTRA-SOM**

Na Tabela 6.2 estão apresentados os valores máximos, mínimos, a média e o coeficiente de variação referentes à densidade, à velocidade ultra-sônica na direção longitudinal, ao módulo de elasticidade dinâmico e também ao módulo de elasticidade estático, para as vigas de cada espécie em estudo. Para comparação dos valores obtidos de módulo de elasticidade são apresentados também na Tabela 6.2 os valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico para a técnica de vibração transversal.

Tabela 6.2. Valores máximos, mínimos e médios e coeficientes de variação.

Espécie		$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$E_{d,us}$ (MPa)	MOE (MPa)	$E_{d,vt}$ (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Valor máximo	1066,7	4940	24322	23633	23199
	Valor mínimo	834,0	4192	17457	13495	13785
	Média	962,0	4600	20425	19216	19068
	CV (%)	5,2	4,1	8,8	10,7	11,3
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Valor máximo	815,8	5149	21625	28332	22534
	Valor mínimo	509,9	3804	11041	15294	11267
	Média	755,1	4379	14501	20209	14975
	CV (%)	8,6	7,9	16,3	16,3	17,9
<i>Pinus sp</i>	Valor máximo	751,7	5143	18055	17234	17805
	Valor mínimo	511,8	3833	9364	10642	11193
	Média	616,5	4494	12478	13708	14047
	CV (%)	9,3	7,5	15,8	15,5	14,6
<i>Goupia glabra</i>	Valor máximo	1031,5	5501	28274	24161	22019
	Valor mínimo	816,2	4491	18212	11323	10952
	Média	954,1	4828	22309	16410	15532
	CV (%)	5,0	5,9	13,0	22,0	18,9

Nota-se que o valor médio obtido de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ) para a espécie *Eucalyptus grandis* ( $\rho_{ap,12\%} = 962 \text{ kg/m}^3$ ) foi superior ao valor apresentado na NBR 7190:1997 ( $\rho_{ap,12\%} = 640 \text{ kg/m}^3$ ) e para a espécie *Eucalyptus citriodora*, o valor médio obtido de densidade ( $\rho_{ap,12\%} = 755,1 \text{ kg/m}^3$ ) foi inferior ao valor estabelecido na norma ( $\rho_{ap,12\%} = 999 \text{ kg/m}^3$ ). Como não foi possível comprovar a procedência das peças, diversos fatores podem ter ocasionado esta diferença no valor de densidade, especialmente a região de origem da árvore. As demais espécies em estudo não apresentaram discrepância significativa do valor de densidade apresentado na NBR 7190:1997.

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, obtidos para cada uma das vigas de cada espécie em estudo, realizou-se regressões lineares, apresentadas nas figuras 6.4 a 6.7.

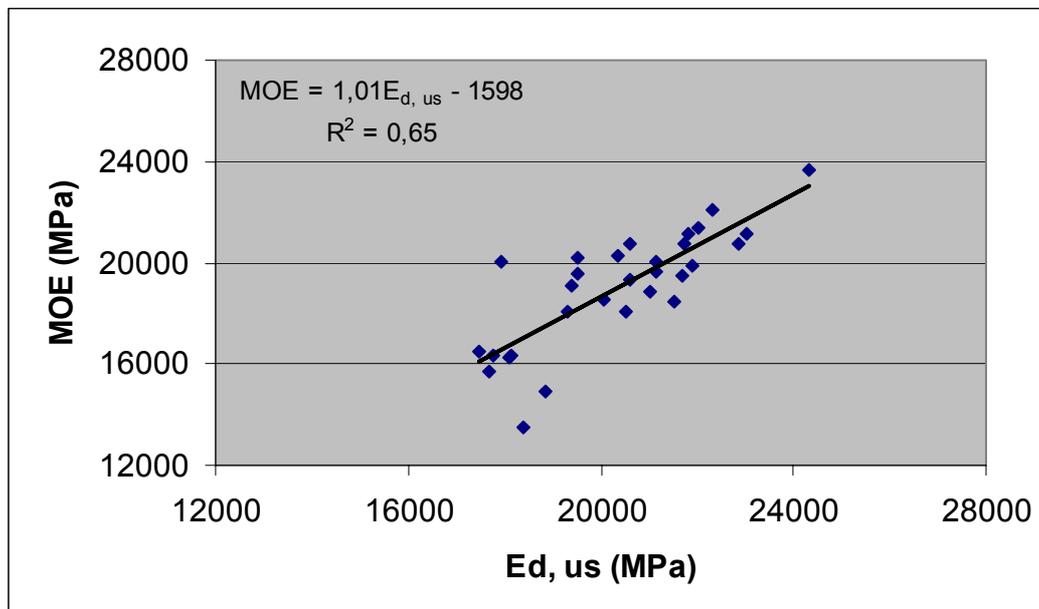


Figura 6.4. MOE versus  $E_{d, us}$  – *Eucalyptus grandis*.

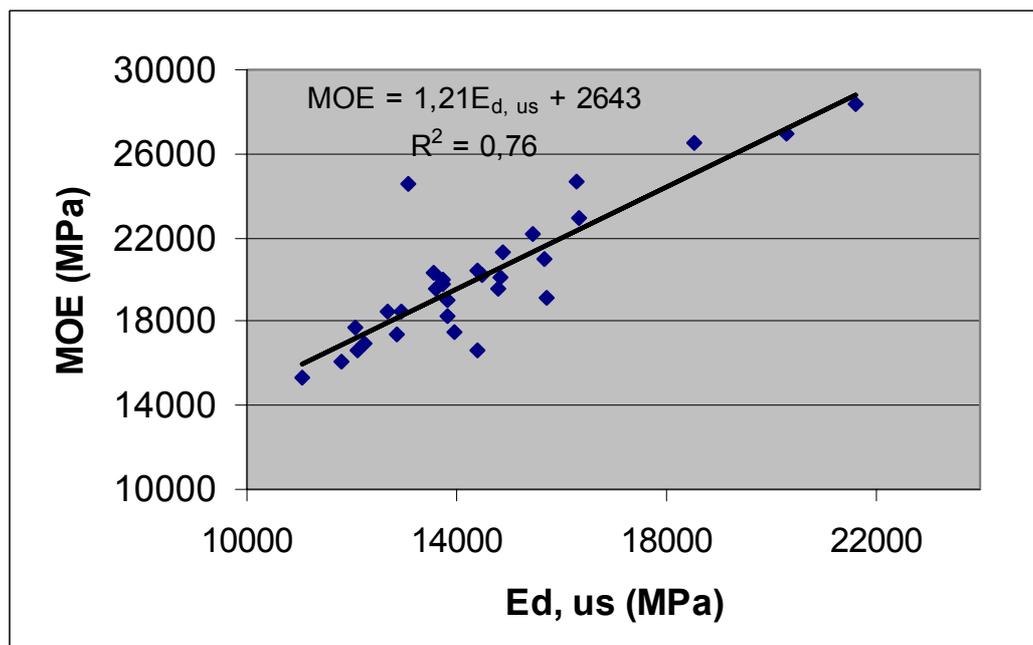


Figura 6.5. MOE versus  $E_{d, us}$  – *Eucalyptus citriodora*.

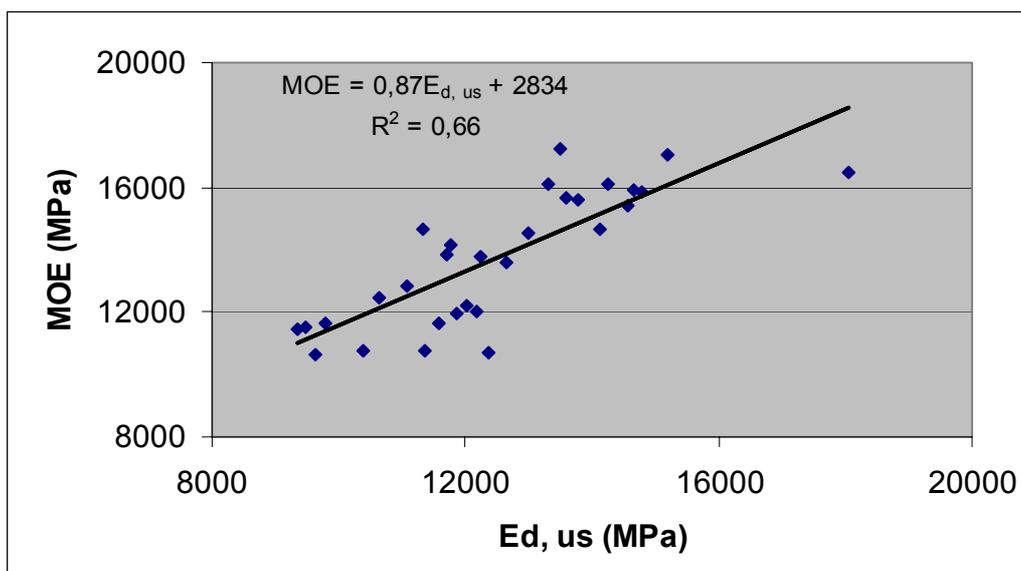


Figura 6.6. MOE versus  $E_{d, us}$  – *Pinus sp.*

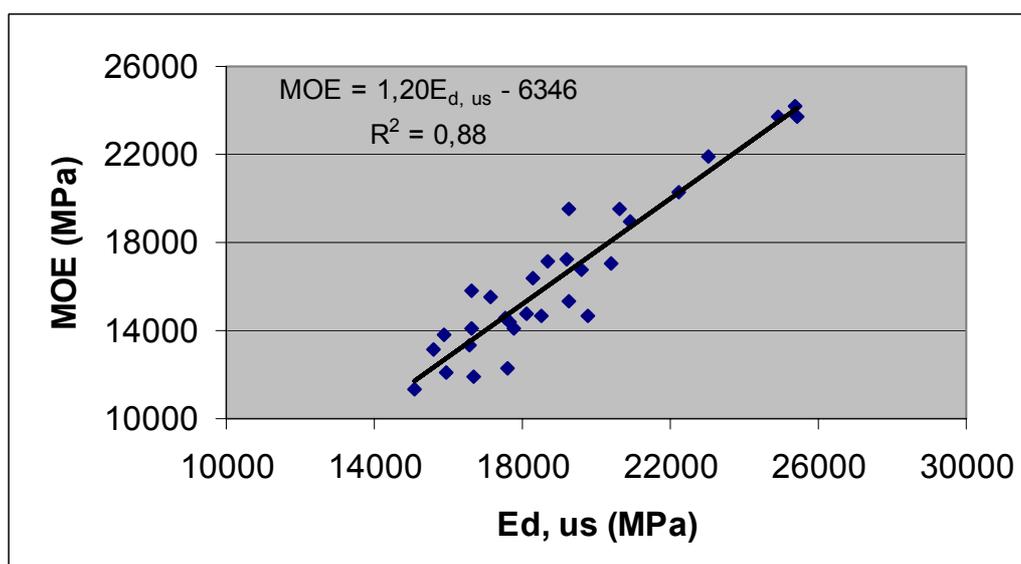


Figura 6.7. MOE versus  $E_{d, us}$  – *Goupia glabra.*

Os coeficientes de determinação  $R^2 = 0,65$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $R^2 = 0,66$  e  $R^2 = 0,88$  obtidos respectivamente para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra* são significativos, estando compatíveis com os valores usualmente encontrados na literatura, permitindo assim afirmar que o método não-destrutivo por

meio de ultra-som pode ser utilizado para avaliar as propriedades mecânicas das espécies em questão com dimensões estruturais.

Diversas pesquisas nacionais e internacionais demonstram a viabilidade do método de ultra-som, por meio de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios destrutivos (compressão paralela às fibras e flexão estática) e em ensaios não-destrutivos com emprego da técnica de ultra-som. Os valores encontrados na literatura indicam valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre 0,57 e 0,89 (ROSS e PELLERIN, 1991), (ROSS e PELLERIN, 1994), (BARTHOLOMEU, 2001), (NOGUEIRA, 2003) e (OLIVEIRA, 2005).

Dando continuidade ao procedimento estatístico, realizaram-se os quadros de análise de variância para as quatro espécies em estudo, para avaliação dos níveis de significância dos parâmetros envolvidos. Assim foi possível construir os quadros de análise de variância, os quais permitem verificar ao nível de significância de 5%, a dependência linear neste nível e o comportamento dos principais indicadores estimados nas análises desenvolvidas: F, t,  $R^2$  e  $t_{\text{dados}}$ .

Assim a partir dos coeficientes, foi possível verificar o quanto da variação de cada uma das variáveis de estudo poderia ser explicado pela variável resposta.

**Tabela 6.3.** Quadro de análise de variância (MOE em função de  $E_{d, us}$ ).

<b>Espécie</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>dados</sub></b>	<b>F<sub>1,28;5%</sub></b>
<i>Eucalyptus grandis</i>	Devido à regressão	97421303	1	97421303	52,17	4,2
	Residual	52287575	28	1867413		
	Total	149708878	29			
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Devido à regressão	238362889	1	238362889	86,6	4,2
	Residual	77069875	28	2752496		
	Total	315432764	29			
<i>Pinus sp</i>	Devido à regressão	85539685	1	85539685	53,45	4,2
	Residual	44813020	28	1600465		
	Total	130352705	29			
<i>Goupia glabra</i>	Devido à regressão	334765829	1	334765829	214,1	4,2
	Residual	43780931	28	1563605		
	Total	378546760	29			

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de MOE e  $E_{d, us}$ , ao nível de 5% de significância. Pela Tabela 6.3 é possível verificar que os valores da variável de teste  $F_{\text{dados}}$  foram superiores aos valores críticos  $F_{1,28;5\%}$  para as quatro espécies em estudo, assim é rejeitada a hipótese nula  $H_0$ , logo é possível afirmar a existência de dependência linear ao nível de  $\alpha = 5\%$ .

Seguindo-se o procedimento estatístico, foi elaborada a Tabela 6.4 que apresenta os coeficientes de regressão para as espécies em estudo.

**Tabela 6.4.** Coeficientes de regressão (MOE em função de  $E_{d, us}$ ).

Espécie	Variável	Coefficiente	$t_{\text{dados}}$	$t_{28,5\%}$
<i>Eucalyptus grandis</i>	Constante	-1598	-0,56	1,701
	$E_{d, us}$	1,0131	7,22	1,701
	n = 29 $R^2 = 65,1\%$			
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Constante	2643	1,38	1,701
	$E_{d, us}$	1,2114	9,31	1,701
	n = 29 $R^2 = 75,6\%$			
<i>Pinus sp</i>	Constante	2834	1,88	1,701
	$E_{d, us}$	0,8715	7,31	1,701
	n = 29 $R^2 = 65,6\%$			
<i>Goupia glabra</i>	Constante	-6346	-4,04	1,701
	$E_{d, us}$	1,19671	14,63	1,701
	n = 29 $R^2 = 88\%$			

Os coeficientes obtidos são significativos e permitem verificar o quanto da variação do MOE pode ser explicada por  $E_{d, us}$ . Com essas duas análises desenvolvidas foi possível a construção da Tabela 6.5 que sintetiza a significância dos modelos.

**Tabela 6.5.** Regressões entre o MOE e  $E_{d, us}$ .

Espécie	Equação de regressão	$R^2$	Significância
<i>Eucalyptus grandis</i>	$MOE=1,01E_{d,us}-1598$	0,65	Significativa
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$MOE=1,21E_{d,us}+2643$	0,76	Significativa
<i>Pinus sp</i>	$MOE=0,87E_{d,us}+2834$	0,66	Significativa
<i>Goupia glabra</i>	$MOE=1,20E_{d,us}-6346$	0,88	Altamente significativa

Todas as relações obtidas podem ser consideradas como significativas, considerando ainda que os modelos obtidos são válidos estatisticamente conforme a verificação da distribuição normal dos dados utilizados nos tratamentos anteriores.

#### 6.4 CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO OBTIDO COM A TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Na Tabela 6.6 estão apresentados os valores máximos, mínimos, a média e o coeficiente de variação referentes ao módulo de elasticidade dinâmico e também ao módulo de

elasticidade estático obtidos para as vigas de cada espécie em estudo. Para comparação dos valores obtidos de módulo de elasticidade são apresentados também na Tabela 6.6 os valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico para a técnica de ultra-som.

**Tabela 6.6.** Valores máximos, mínimos e médios de módulo de elasticidade dinâmico e estático e coeficientes de variação.

Espécie		$E_{d, vt}$ (MPa)	MOE (MPa)	$E_{d, us}$ (MPa)	MOE (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Valor máximo	23199	23633	24322	23633
	Valor mínimo	13785	13495	17457	13495
	Média	19068	19216	20425	19216
	CV (%)	11,3	10,7	8,8	10,7
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Valor máximo	22534	28332	21625	28332
	Valor mínimo	11267	15294	11041	15294
	Média	14975	20209	14501	20209
	CV (%)	17,9	16,3	16,3	16,3
<i>Pinus sp</i>	Valor máximo	17805	17234	18055	17234
	Valor mínimo	11193	10642	9364	10642
	Média	14047	13708	12478	13708
	CV (%)	14,6	15,5	15,8	15,5
<i>Goupia glabra</i>	Valor máximo	22019	24161	28274	24161
	Valor mínimo	10952	11323	18212	11323
	Média	15532	16410	22309	16410
	CV (%)	18,9	22,0	13,0	22,0

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, obtidos para cada uma das vigas de cada espécie em estudo, realizou-se regressões lineares, apresentadas nas figuras 6.8 a 6.11.

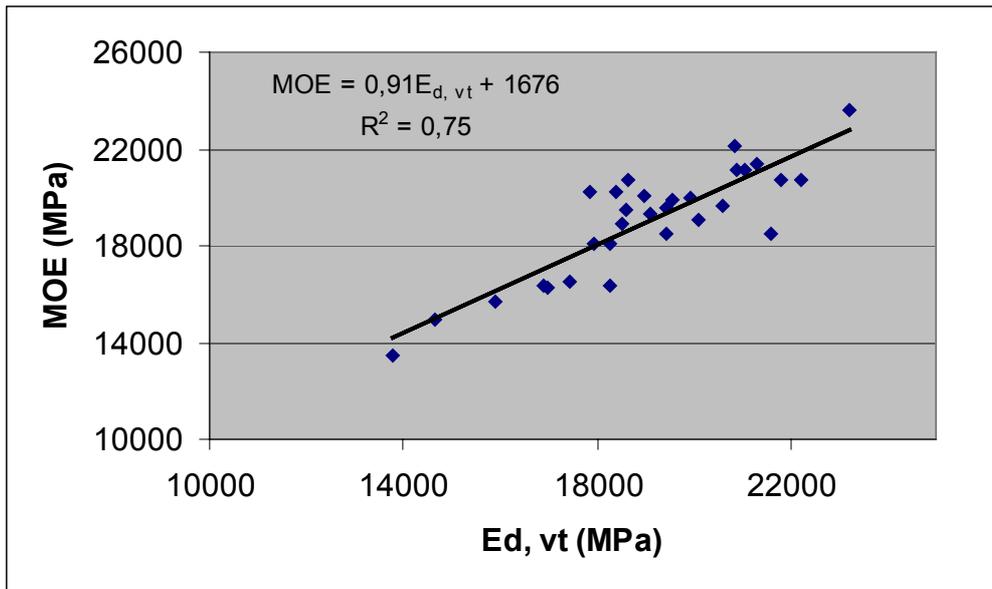


Figura 6.8. MOE versus  $E_{d, vt}$  – *Eucalyptus grandis*.

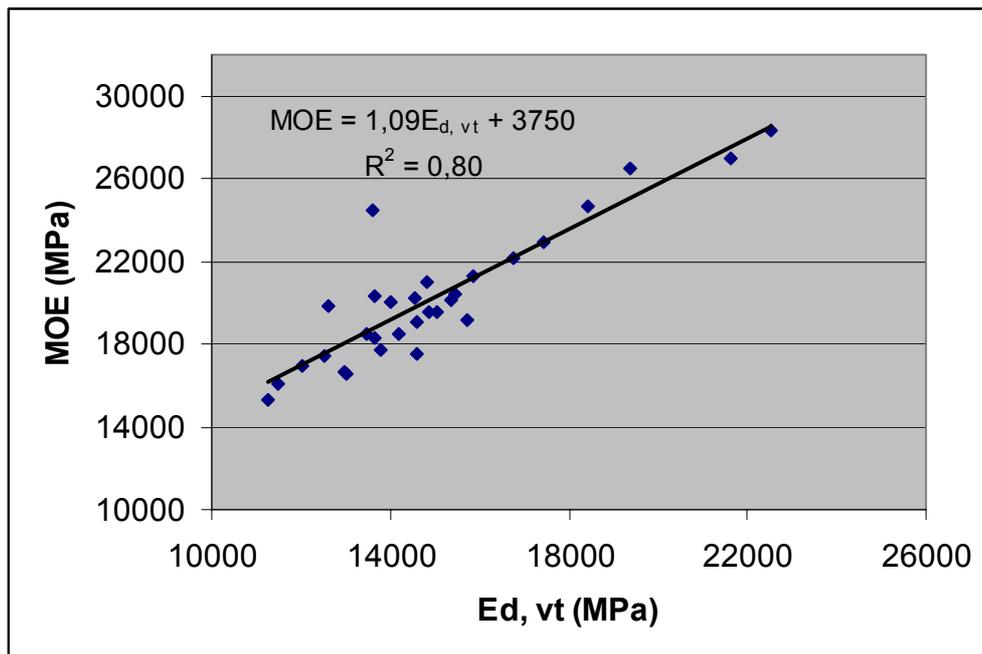


Figura 6.9. MOE versus  $E_{d, vt}$  – *Eucalyptus citriodora*.

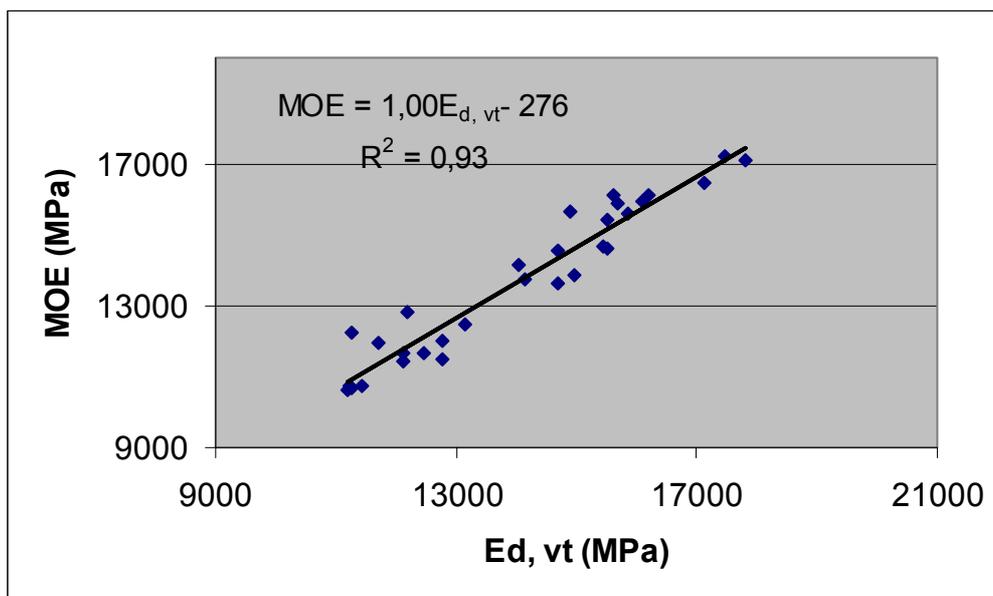


Figura 6.10. MOE versus  $E_{d, vt}$  – *Pinus sp.*

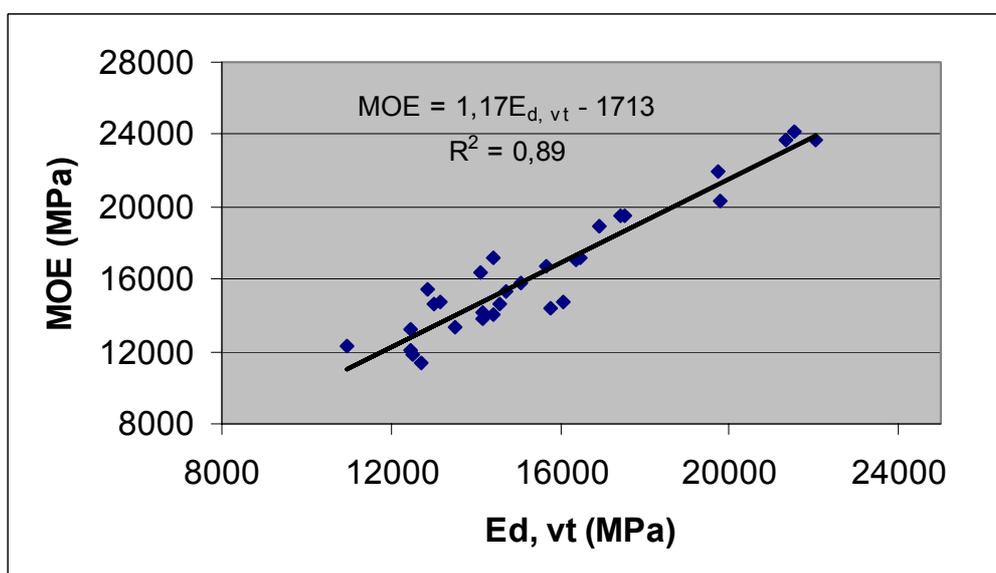


Figura 6.11. MOE versus  $E_{d, vt}$  – *Goupia glabra.*

Os valores de coeficiente de determinação  $R^2 = 0,75$ ,  $R^2 = 0,80$ ,  $R^2 = 0,93$  e  $R^2 = 0,89$  obtidos respectivamente para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*,

*Pinus sp* e *Goupia glabra* estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura, e são considerados satisfatórios, mostrando a validade da técnica de vibração transversal na avaliação das propriedades mecânicas da madeira.

Diversas pesquisas têm demonstrado a viabilidade do método de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade da madeira, por meio de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios destrutivos e em ensaios não-destrutivos com emprego da técnica de vibração transversal. Os valores encontrados na literatura indicam valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre 0,53 e 0,99 (CALIL, JR e MINÁ, 2003), (BURDZIK e NKWERA, 2002), (BALLARIN et al., 2002), (CARREIRA et al., 2004), (ROSS et al., 1991) e (BARTHOLOMEU et al., 2004).

Dando continuidade ao procedimento estatístico, elaborou-se para os dados de MOE e  $E_{d, vt}$  da mesma forma que foi realizado anteriormente para os dados de MOE e  $E_{d, us}$ , os quadros de análise de variância para as quatro espécies em estudo, para avaliação dos níveis de significância dos parâmetros envolvidos. Assim foi possível construir os quadros de análise de variância, os quais permitem verificar o nível de significância, a dependência linear nesse nível e o comportamento dos principais indicadores estimados nas análises desenvolvidas: F, t,  $R^2$  e  $t_{dados}$ .

Assim a partir dos coeficientes, foi possível verificar o quanto da variação de cada uma das variáveis de estudo poderia ser explicado pela variável resposta.

**Tabela 6.7.** Quadro de análise de variância (MOE em função de  $E_d$ ,  $v_t$ ).

<b>Espécie</b>	<b>Fonte de variação</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F<sub>dados</sub></b>	<b>F<sub>1,28;5%</sub></b>
<i>Eucalyptus grandis</i>	Devido à regressão	112099111	1	112099111	83,46	4,2
	Residual	37609766	28	1343206		
	Total	149708877	29			
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Devido à regressão	251514826	1	251514826	110,18	4,2
	Residual	63917938	28	2282784		
	Total	315432764	29			
<i>Pinus sp</i>	Devido à regressão	121155554	1	121155554	368,90	4,2
	Residual	9197151	28	328470		
	Total	130352705	29			
<i>Goupia glabra</i>	Devido à regressão	338590888	1	338590888	237,30	4,2
	Residual	39955873	28	1426995		
	Total	378546761	29			

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de MOE e  $E_d$ ,  $v_t$ , ao nível de 5% de significância. Pela Tabela 6.7 é possível verificar que os valores da variável de teste  $F_{\text{dados}}$  foram superiores aos valores críticos  $F_{1,28;5\%}$  para as quatro espécies em estudo, assim é rejeitada a hipótese nula  $H_0$ , logo é possível afirmar a existência de dependência linear ao nível de  $\alpha = 5\%$ .

Seguindo-se o procedimento estatístico, foi elaborada a Tabela 6.8 que apresenta os coeficientes de regressão para as espécies em estudo.

**Tabela 6.8.** Coeficientes de regressão (MOE em função de  $E_{d, vt}$ ).

Espécie	Variável	Coefficiente	$t_{\text{dados}}$	$t_{28,5\%}$
<i>Eucalyptus grandis</i>	Constante	1676	0,88	1,701
	$E_{d, vt}$	0,90985	9,14	1,701
	$n = 29 \quad R^2 = 74,9\%$			
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Constante	3750	2,36	1,701
	$E_{d, vt}$	1,0991	10,50	1,701
	$n = 29 \quad R^2 = 79,7\%$			
<i>Pinus sp</i>	Constante	-276	-0,37	1,701
	$E_{d, vt}$	0,99551	19,21	1,701
	$n = 29 \quad R^2 = 92,9\%$			
<i>Goupia glabra</i>	Constante	-1713	-1,43	1,701
	$E_{d, vt}$	1,16678	15,4	1,701
	$n = 29 \quad R^2 = 89,4\%$			

Os coeficientes obtidos são significativos e permitem verificar o quanto da variação do MOE pode ser explicado por  $E_{d, vt}$ . Com essas duas análises desenvolvidas foi possível a construção da Tabela 6.9 que sintetiza a significância dos modelos.

**Tabela 6.9.** Regressões entre o MOE e  $E_{d, vt}$ .

Espécie	Equação de regressão	$R^2$	Significância
<i>Eucalyptus grandis</i>	$MOE=0,91E_{d, vt}+1676$	0,75	Significativa
<i>Eucalyptus citriodora</i>	$MOE=1,09E_{d, vt}+3750$	0,80	Altamente Significância
<i>Pinus sp</i>	$MOE=1,00E_{d, vt}-276$	0,93	Altamente significativa
<i>Goupia glabra</i>	$MOE=1,17E_{d, vt}-1713$	0,89	Altamente significativa

As relações obtidas para todas as espécies podem ser consideradas como significativas, considerando ainda que os modelos obtidos são válidos estatisticamente conforme a verificação da distribuição normal dos dados utilizados nos tratamentos anteriores.

## 6.5 VALORES DE $k_{\text{mod}, 3}$ EM FUNÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRA-SOM E DA TÉCNICA DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Após a classificação visual das peças e da realização da classificação mecânica por flexão estática, ultra-som e vibração transversal, foi realizada uma análise para a determinação de valores de coeficiente de modificação ( $k_{\text{mod}, 3}$ ), a qual é apresentada a seguir.

A partir dos resultados obtidos, determinou-se para cada viga de cada espécie em estudo a variação percentual entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico, obtida através da equação (14). Este procedimento foi realizado para os resultados de módulo de elasticidade dinâmico obtido com a técnica de ultra-som e com os valores obtidos com a técnica de vibração transversal.

$$\text{Variação percentual (\%)} = \frac{|MOE - E_d|}{MOE} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade estático (MPa);

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico (MPa).

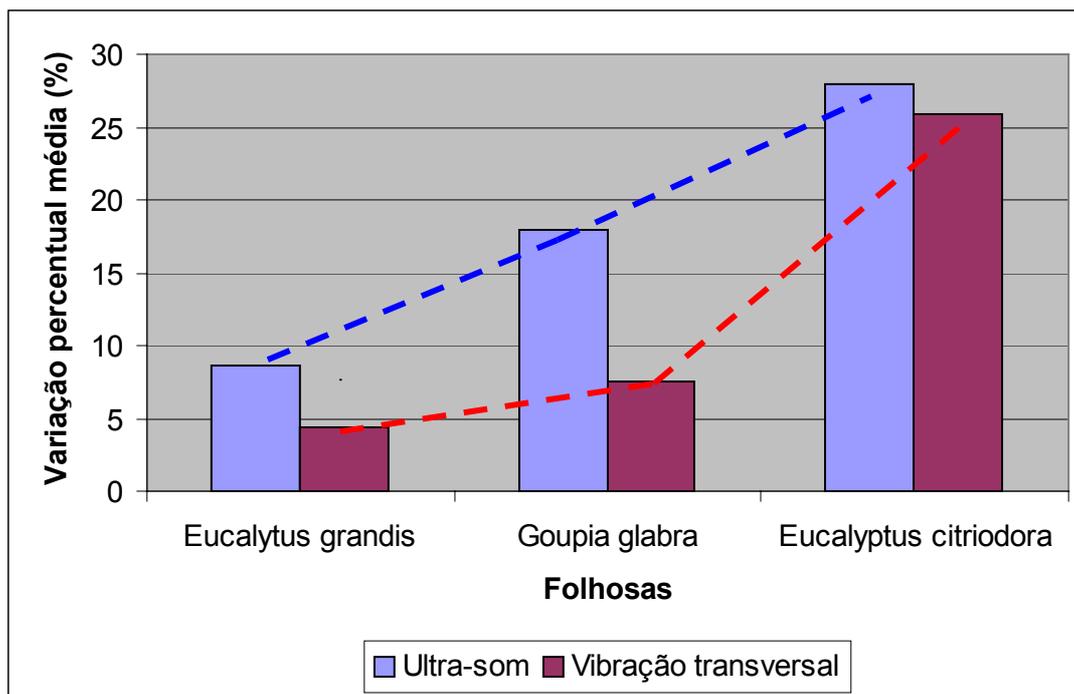
Em seguida determinou-se a variação percentual média para cada técnica não-destrutiva em estudo, sendo este procedimento realizado para todas as espécies em estudo. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.10.

**Tabela 6.10.** Valores de variação percentual média para as espécies em estudo.

<b>Espécie</b>	<b>Técnica não-destrutiva</b>	<b>Variação percentual média (%)</b>
<i>Eucalyptus grandis</i>	Ultra-som	<b>8,68</b>
	Vibração transversal	<b>4,42</b>
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Ultra-som	<b>27,98</b>
	Vibração transversal	<b>25,83</b>
<i>Pinus sp</i>	Ultra-som	<b>10,74</b>
	Vibração transversal	<b>4,33</b>
<i>Goupia glabra</i>	Ultra-som	<b>17,88</b>
	Vibração transversal	<b>7,55</b>

Com os valores obtidos de variação percentual média para as folhosas, realizou-se um histograma, o qual permitiu verificar que o *Eucalyptus citriodora* foi a espécie que apresentou uma maior variação em relação as demais folhosas em estudo, sendo que não houve uma diferença significativa entre a variação obtida pela técnica de ultra-som e vibração transversal para esta espécie.

É possível visualizar pelo histograma apresentado na Figura 6.12, a variação percentual média obtida pela técnica de ultra-som e vibração transversal para as espécies de folhosas em estudo. Nota-se, que a espécie *Eucalyptus citriodora* foi a espécie que apresentou uma maior variação percentual média, sendo que isto pode ter ocorrido devido a problemas nos equipamentos empregados, os quais não foram adequados para ser empregados na avaliação desta espécie.



**Figura 6.12.** Histograma variação percentual média (%) x folhosas.

Após a determinação da variação percentual média para cada técnica de cada uma das espécies em estudo, adotou-se os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  apresentados na Tabela 6.11 para uma peça classificada visualmente e mecanicamente pela flexão estática. Para a classe SE, na qual se enquadram peças sem defeitos, o valor adotado foi 1,00 e para as demais classes foi realizada uma redução de 0,05. Essa redução foi adotada em função de diversas discussões no âmbito da revisão da NBR 7190:1997, durante as reuniões do Comitê CE-02:126.10 Estruturas de Madeira nos anos de 2005 e 2006.

**Tabela 6.11.** Valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  para peças classificadas visualmente e pela flexão estática.

Classe	$k_{\text{mod},3}$
SE	1,00
S1	0,95
S2	0,90
S3	0,85

Após a classificação visual, verificou-se que em todas as espécies houve a ocorrência de vigas que se enquadraram na classe S3, sendo esta a pior condição de classificação de uma peça estrutural. Dentre as quatro espécies em estudo, três (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora* e *Pinus sp*) apresentaram predominância de vigas que se enquadraram na classe S3.

Como cada espécie apresentou pelo menos uma viga que se enquadrou na classe S3, aplicou-se os valores de variação percentual média apresentados na Tabela 6.10, sobre o valor de  $k_{mod,3}$  obtido para a classe S3, quando a classificação mecânica é realizada pela flexão estática ( $k_{mod,3} = 0,85$ ). Com isso reduziu-se o valor de  $k_{mod,3}$ , uma vez que as técnicas de ultra-som e vibração transversal apresentam uma menor confiabilidade se comparado ao ensaio estático. Para as demais classes acrescentou-se o valor de 0,05, chegando aos valores de  $k_{mod,3}$  apresentados nas tabelas 6.12 a 6.15 para cada espécie em estudo.

**Tabela 6.12.** Valores de  $k_{mod,3}$  para a espécie *Eucalyptus grandis*.

Classe	$k_{mod,3}$ (visual + flexão estática)	$k_{mod,3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{mod,3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,96	0,92
S1	0,95	0,91	0,88
S2	0,90	0,86	0,83
S3	0,85	0,81	0,78

0,05

$0,85 \cdot (1 - 0,0442)$        $0,85 \cdot (1 - 0,0868)$

**Tabela 6.13.** Valores de  $k_{mod,3}$  para a espécie *Eucalyptus citriodora*.

Classe	$k_{mod,3}$ (visual + flexão estática)	$k_{mod,3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{mod,3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,78	0,76
S1	0,95	0,73	0,71
S2	0,90	0,68	0,66
S3	0,85	0,63	0,61

**Tabela 6.14.** Valores de  $k_{\text{mod},3}$  para a espécie *Pinus sp.*

Classe	$k_{\text{mod},3}$ (visual + flexão estática)	$k_{\text{mod},3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{\text{mod},3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,96	0,91
S1	0,95	0,91	0,86
S2	0,90	0,86	0,81
S3	0,85	0,81	0,76

**Tabela 6.15.** Valores de  $k_{\text{mod},3}$  para a espécie *Goupia glabra*.

Classe	$k_{\text{mod},3}$ (visual + flexão estática)	$k_{\text{mod},3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{\text{mod},3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,94	0,85
S1	0,95	0,89	0,80
S2	0,90	0,84	0,75
S3	0,85	0,79	0,70

Salienta-se que para a calibração da normalização brasileira deve-se buscar valores de  $k_{\text{mod},3}$  que possam ser aplicados às folhosas e coníferas ao invés de valores de  $k_{\text{mod},3}$  aplicáveis para cada uma das espécies existentes, devido ao elevado número de espécies. Com isso é possível tornar a sua aplicação mais simplificada e de fácil aplicação pelo meio técnico.

## 6.6 VALORES DE $k_{\text{mod},3}$ APLICÁVEIS ÀS FOLHOSAS E CONÍFERAS

Para a determinação de valores de  $k_{\text{mod},3}$  aplicáveis às folhosas e coníferas, o primeiro procedimento foi descartar os resultados obtidos para as espécies *Eucalyptus citriodora* e *Goupia glabra*, pois estas apresentaram variação percentual elevada, sendo que a espécie *Eucalyptus citriodora* apresentou variação acima de 18% (que é o coeficiente de variação permitido em relação à variabilidade da madeira), e a espécie *Goupia glabra* apresentou valor de variação percentual média para a técnica de ultra-som muito próximo de 18%.

Observando a Tabela 6.16 é possível verificar que para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus sp* a variação percentual média para a técnica de ultra-som foi próxima de 10% e para a técnica de vibração transversal em torno de 4%. Deste modo, os valores adotados de variação percentual foram de 10% e 4% para as técnicas de ultra-som e de vibração transversal, respectivamente.

**Tabela 6.16.** Variação percentual adotada para determinação do  $k_{\text{mod}, 3}$ .

Técnica não-destrutiva	Espécie	Variação percentual média (%)	Variação percentual adotada (%)
Ultra-som	<i>Eucalyptus grandis</i>	8,68	10
	<i>Pinus sp</i>	10,74	
Vibração transversal	<i>Eucalyptus grandis</i>	4,42	4
	<i>Pinus sp</i>	4,33	

Para a obtenção de valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  aplicáveis às folhosas, aplicou-se estas variações sobre o valor de  $k_{\text{mod}, 3}$  adotado para a classe S3 quando se realiza a classificação visual e a flexão estática ( $k_{\text{mod}, 3} = 0,85$ ), conforme o procedimento anteriormente adotado (item 6.5). Para as demais classes foi acrescido o valor de 0,05. Na Tabela 6.17 são apresentados os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  aplicáveis às folhosas.

**Tabela 6.17.** Valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  aplicáveis às folhosas.

Classe	$k_{\text{mod}, 3}$ (visual + flexão estática)	$k_{\text{mod}, 3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{\text{mod}, 3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,97	0,92
S1	0,95	0,92	0,87
S2	0,90	0,87	0,82
S3	0,85	0,82	0,77

0,05

$0,85 \cdot (1 - 0,04)$  ← (circled 0,82)      (circled 0,77) →  $0,85 \cdot (1 - 0,10)$

As coníferas, além da classificação em SE, S1, S2 e S3, também é classificada pela classe de densidade, em madeira densa (D) ou madeira não-densa (ND), sendo assim, é

importante que seja estabelecido valores distintos de  $k_{\text{mod}, 3}$  em função do enquadramento da peça nas classes de densidade. Na Tabela 6.18 são apresentados os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  para as coníferas classificadas como densas (D).

**Tabela 6.18.** Valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  para coníferas classificadas como densas (D).

<b>Classe</b>	<b><math>k_{\text{mod}, 3}</math> (visual + flexão estática)</b>	<b><math>k_{\text{mod}, 3}</math> (visual + vibração transversal)</b>	<b><math>k_{\text{mod}, 3}</math> (visual + ultra-som)</b>
SE-D	1,00	0,92*	0,87
S1-D	0,95	0,87	0,82
S2-D	0,90	0,82	0,77
S3-D	0,85	0,77	0,72

Ressalta-se que o valor obtido para o coeficiente de modificação ( $k_{\text{mod}, 3}=0,92^*$ ), onde a classificação mecânica é realizada por vibração transversal e a peça se enquadra na classe SE-D, resultou do decréscimo do valor de  $k_{\text{mod}, 3}$  obtido experimentalmente para folhosa que se enquadra na classe SE ( $k_{\text{mod}, 3}=0,97$  – Tabela 6.17) e que é classificada mecanicamente por vibração transversal. Este decréscimo foi aplicado considerando o risco de presença de nós não detectáveis durante a inspeção visual nas coníferas. Para as demais classes foi realizado um decréscimo de 0,05. Este mesmo procedimento foi realizado quando a classificação mecânica é realizada por ultra-som. Observa-se que os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  obtidos para classificação mecânica por ultra-som são inferiores aos valores obtidos para o emprego da vibração transversal, pois o ultra-som apresenta uma menor confiabilidade em relação à vibração transversal.

Na Tabela 6.19 são apresentados os valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  para as coníferas classificadas como não-densas (ND).

**Tabela 6.19.** Valores de  $k_{mod,3}$  para coníferas classificadas como não-densas (ND).

<b>Classe</b>	<b><math>k_{mod,3}</math> (visual + flexão estática)</b>	<b><math>k_{mod,3}</math> (visual + vibração transversal)</b>	<b><math>k_{mod,3}</math> (visual + ultra-som)</b>
SE-ND	1,00	0,87	0,82
S1-ND	0,95	0,82	0,77
S2-ND	0,90	0,77	0,72
S3-ND	0,85	0,72	0,67

Para a obtenção dos valores da Tabela 6.19 foi utilizado procedimento similar ao aplicado na Tabela 6.18. Deste modo, o valor de  $k_{mod,3}$  para conífera não-densa é resultante do valor de  $k_{mod,3}$  para conífera classificada como densa com um decréscimo de 0,05.

Verificou-se que ao realizar a classificação mecânica empregando a técnica de vibração transversal, os valores de  $k_{mod,3}$  aplicados são superiores em relação aos valores quando a classificação é realizada empregando a técnica de ultra-som. Isto ocorre devido à vibração transversal apresentar uma menor variação percentual em relação ao ultra-som, sendo que os valores obtidos na vibração transversal são mais próximos dos valores obtidos na flexão estática.

É possível notar a existência de valor de  $k_{mod,3}$  inferior a 0,80, o qual é estabelecido pela NBR 7190:1997 quando a peça não é classificada. Ressalta-se que o valor estabelecido de 0,80 na NBR 7190:1997 foi arbitrado sem nenhum estudo experimental. A partir dos resultados obtidos no presente estudo sugere-se que na revisão desta norma o valor de  $k_{mod,3}$  a ser empregado quando não se realiza a classificação seja reduzido, buscando assim estimular a realização dos procedimentos de classificação.

Com isso será possível obter um melhor aproveitamento da madeira como material estrutural, além de permitir o aumento da confiabilidade das estruturas de madeira projetadas no país.

## 6.7 PROPOSIÇÃO DE VALORES DE $k_{mod,3}$ PARA A NBR 7190:1997

Com base nos resultados obtidos foi possível propor valores de  $k_{mod,3}$  para as folhosas (Tabela 6.20), para as coníferas classificadas como densas (Tabela 6.21) e para as coníferas classificadas como não-densas (Tabela 6.22), para serem inseridos na NBR 7190.

**Tabela 6.20.** Valores propostos de  $k_{mod,3}$  para folhosas.

Classe	$k_{mod,3}$ (visual + flexão estática)	$k_{mod,3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{mod,3}$ (visual + ultra-som)
SE	1,00	0,95	0,90
S1	0,95	0,90	0,85
S2	0,90	0,85	0,80
S3	0,85	0,80	0,75

**Tabela 6.21.** Valores propostos de  $k_{mod,3}$  para coníferas classificadas como densas (D).

Classe	$k_{mod,3}$ (visual + flexão estática)	$k_{mod,3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{mod,3}$ (visual + ultra-som)
SE-D	1,00	0,90	0,85
S1-D	0,95	0,85	0,80
S2-D	0,90	0,80	0,75
S3-D	0,85	0,75	0,70

**Tabela 6.22.** Valores propostos de  $k_{mod,3}$  para coníferas classificadas como não-densas (ND).

Classe	$k_{mod,3}$ (visual + flexão estática)	$k_{mod,3}$ (visual + vibração transversal)	$k_{mod,3}$ (visual + ultra-som)
SE-ND	1,00	0,85	0,80
S1-ND	0,95	0,80	0,75
S2-ND	0,90	0,75	0,70
S3-ND	0,85	0,70	0,65

Ressalta-se que os valores sugeridos para a NBR 7190 foram aproximados para frações de 0,05, visando facilitar a sua utilização pelo meio técnico.

A partir da proposição apresentada, considera-se importante sugerir o valor de  $k_{\text{mod}, 3}$  para madeira não classificada. Na NBR 7190:1997 vigente este valor corresponde a 0,80. Sugere-se a adoção dos seguintes valores de  $k_{\text{mod}, 3}$  para madeira não classificada:

- Madeira de folhosa não classificada:  $k_{\text{mod}, 3} = 0,70$ ;
- Madeira de conífera não classificada:  $k_{\text{mod}, 3} = 0,60$ .

## 7. CONCLUSÕES

---

---

A partir dos resultados obtidos e discussões realizadas foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os valores obtidos de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as todas as espécies permitiram verificar a acuracidade das técnicas de ultra-som e vibração transversal, mostrando que ambas são ferramentas válidas para inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira;
- Os coeficientes de determinação ( $R^2= 0,75$ ,  $R^2= 0,80$ ,  $R^2= 0,93$  e  $R^2= 0,89$ ) obtidos com a técnica de vibração transversal, respectivamente para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*, foram superiores aos valores obtidos com a técnica de ultra-som ( $R^2 = 0,65$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $R^2 = 0,66$  e  $R^2 = 0,88$ ), mostrando assim que a técnica de vibração transversal apresenta maior confiabilidade para estimar o módulo de elasticidade comparativamente à técnica de ultra-som, pois apresenta uma melhor aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático associado.
- Foram obtidos valores experimentais do coeficiente de modificação ( $k_{mod,3}$ ) e propostos valores que poderão ser utilizados na revisão da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, no caso de se utilizar o ultra-som para a

classificação de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas. Estes valores estão concatenados nas tabelas 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22. Os valores de  $k_{\text{mod},3}$  experimentais estão no intervalo de 0,67 a 0,92 e os valores propostos no intervalo de 0,65 a 0,90.

- Foram obtidos valores experimentais do coeficiente de modificação ( $k_{\text{mod},3}$ ) e propostos valores que poderão ser utilizados na revisão da NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, no caso de se utilizar a vibração transversal para a classificação de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas. Estes valores estão concatenados nas tabelas 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22. Os valores de  $k_{\text{mod},3}$  experimentais estão no intervalo de 0,72 a 0,97 e os valores propostos no intervalo de 0,70 a 0,95.
- Quando a classificação mecânica utilizou a técnica de vibração transversal, os valores de  $k_{\text{mod},3}$  foram superiores em relação à classificação pela técnica de ultra-som. Isso ocorreu, pois a técnica de vibração transversal permitiu uma classificação mais próxima dos valores obtidos no ensaio de flexão estática. Ambas as técnicas podem ser utilizadas no recebimento e classificação de peças estruturais de madeira, com a vantagem adicional de permitir o exame individual das peças.
- Houve a ocorrência de valor de  $k_{\text{mod},3}$  inferior a 0,80. O valor de 0,80 encontra-se especificado na NBR 7190:1997 para peças não classificadas, consideradas de segunda categoria. Desse modo, o presente trabalho sugere uma redução deste

valor, sendo empregado o valor de  $k_{\text{mod}, 3} = 0,70$  para madeira de folhosa não classificada e  $k_{\text{mod}, 3} = 0,60$  para madeira de conífera não classificada.

Com a proposição de valores de  $k_{\text{mod}, 3}$ , o meio técnico terá importante contribuição no sentido de especificar e dimensionar projetos de estruturas de madeira com maior confiabilidade. Além disso, esses valores representam importante contribuição para a revisão da NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

ABENDE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS.

Disponível em: < [http://www.abende.org.br/ensaios\\_ao\\_destrutivos.html](http://www.abende.org.br/ensaios_ao_destrutivos.html)> Acesso em: 12 julho, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245 – Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber.** West Conshohoken; ASTM, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro, 1997.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. **Ensaio não-destrutivo de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento.** In: VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia, 2002.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L.; ROCHA, R. R. **Estimativa da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira com uso de ensaios de ultra-som.** In: Cimad'04 – A madeira na construção civil, 1º Congresso Ibérico, Universidade do Minho, Guimarães - Portugal, 2004, p.317-324, 2004.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som.** Campinas, 73 p. Tese (Doutorado) – UNICAMP, 2001.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; GUIMARÃES, I., CAMARGO, J. I. **Metodologia simplificada para o ensaio de vibração transversal em vigas**

- estruturais de Angelim aroba.** IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Cuiabá, 2004.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS-5268 - Structural use of timber:** part 2, code of practice for permissible stress design, materials and workmanship. London, BSI, 2000.
- BUCUR, V.; BÖHNKE, I. **Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood.** Ultrasonics, v. 32, n. 5, p.385-390, 1994.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood.** New York, CRC Press Inc, 1995.
- BURDZIK, Walter M.G.; NKWERA, Primus D. **Transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size *Eucaliptus grandis*.** Forest Products Journal, vol. 52, no. 6, 63-67, 2002.
- CALIL JR., C.; MINÁ, A. J. S. **Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira.** In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.335-338, 2003.
- CANDIAN, M. **Estudo da propagação de ondas ultra-sônicas em madeira de dicotiledôneas: influência da geometria.** Relatório de iniciação científica. Universidade Federal de São Carlos. Agência financiadora: Fapesp. São Carlos, 2004.
- CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JR., A. P. **Avaliação não destrutiva de madeiras através da técnica de ultra-sonografia.** III Semana de Pós-Graduação da UFMG. Belo Horizonte – MG, 2001.
- CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JR., A. P. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeira através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais.** Cerne, Lavras, MG, v.11, n.2, p. 23-71, 2004.

- CARREIRA, M. R.; DIAS, A.A.; CHEUNG, A. B.; CALIL Jr, C. **Classificação estrutural de *Pinus sp* por vibração transversal**. IX Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Cuiabá, 2004.
- CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. **Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus sp* plantadas no Brasil**. Scientias Forestalis, n.67, p.78-87, 2005.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1977.
- EUROCODE 5. **Design of timber structures**. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, 1995.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspection historic structures – A guide for use and interpretation**. Gen. Tech. Rep. FLP-GTR-119. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 15 p., 2000.
- FREITAS, R. R., CALIL JR., C. **Classificação de peças estruturais de *Pinus spp.* pela MSR (Machine Stress Rate)**. X Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Cuiabá, 2004.
- GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira de *P. Taeda* com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão (Stress Wave Method)**. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. São Carlos – SP, 2000.
- GALLIGAN, L. W.; McDONALD, K. A **Machine grading of lumber: practical concerns for lumber producers**. USDA. Forest Service. FPL General technology report, n.7, 2000.

- GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. **Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, p. 269-274, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 2000.
- GORNIAC, E.; DE MATOS, J. L. M. **Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira.** VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA. Anais do VII Encontro Brasileiro em Estrutura de Madeira, São Carlos, 2000.
- HEARMON, R. F. S. **Theory of the vibration testing of wood.** Forest Prod. J., Madison, v.16, n.8, p.29-40, 1966.
- MADSEN, B. **Structural behaviour of timber.** Vancouver: Timber Engineering, 1992.
- MELO, J. E. **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira.** São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo, 1984.
- MURPHY, J. F. **Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation.** Research Note FPL-RN-0276. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 4 p., 2000.
- NATIONAL DESIGN SPECIFICATION FOR WOOD CONSTRUCTION. **NDS - Structural lumber, glued laminated timber, timber piles, connections.** Washington, National Forest Products Association, NFOPA, 1991.
- NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão de madeira de Pinus taeda L. com o uso de ultra-som.** Botucatu, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, 2003.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som.** São Carlos, Dissertação (Mestrado) – EESC, USP, 2001.

- OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som.** São Carlos, Tese (Doutorado) – EESC, USP, 2005.
- ROSS, R. J.; GESKE, E. A.; LARSON, G. H.; MURPHY, J. F. **Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer.** Forest Products Laboratory Research Paper. Departamento de Agricultura, Estados Unidos, 1991.
- ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. **NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber.** Forest Products Journal. v. 41, n. 6, p. 57-59, 1991.
- ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures.** Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (General Technical Report FPL-GTR 70), 1994.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. **Nondestructive evaluation of wood.** Forest Products Journal. v. 48, n.1, p. 14-19, 1998.
- ROSS, R.J., PELLERIN, R.F., VOLNY, N., SALSIG, W.W., FALK, R.H. **Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools – A Guide for Use and Interpretation.** Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (General Technical Report FPL-GTR 114), 1999.
- SANDOZ, J. L. **Grading of Construction timber by ultrasound.** Wood Science and Technology, 23(2), 95-108, 1989.
- SANDOZ, J. L. **Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading.** Wood Science and Technology. v. 27. p.373-380, 1993.
- SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. **SPIB Standard grading rules for Southern Pine lumber.** Pensacola, 1994.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Timber Structures code**. SAA, 1994.

TEREZO, R. F.; VALLE, A.; PADARATZ, I. J. **Estudo sobre a influência do posicionamento de transdutores na medida da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras**. IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Anais do IX Encontro Brasileiro em Estrutura de Madeira, Cuiabá, 2004.

# ANEXO A

Nas tabelas 01 a 03 são apresentados os valores das dimensões das vigas, a densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ ), a velocidade ultra-sônica na direção longitudinal e o módulo de elasticidade dinâmico para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*.

**Tabela 01.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus citriodora* no ensaio de ultra-som.

Viga	Classe	b (cm)	h (cm)	L (cm)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>LL</sub> (m/s)	E <sub>d.us</sub> (MPa)
1	S3	11,0	5,0	300	800,6	4121	13596
2	S3	11,0	5,0	300	793,9	5059	20320
3	S1	11,0	5,3	300	759,3	4545	15688
4	S2	11,0	5,0	300	791,5	4545	16354
5	S3	11,0	5,0	300	729,7	5042	18550
6	S3	11,0	5,0	300	801,8	4155	13843
7	S3	11,0	5,0	300	665,5	4516	13570
8	S2	11,0	5,0	300	795,8	4032	12938
9	S1	11,0	5,0	300	764,2	4414	14890
10	SE	11,0	5,0	300	815,8	5149	21625
11	S3	10,5	5,0	300	810,2	4407	15738
12	S3	11,0	5,2	300	749,4	4444	14803
13	S3	11,0	5,3	300	756,4	4367	14424
14	S3	11,0	5,3	300	694,7	4302	12857
15	SE	11,0	5,0	300	806,7	4163	13979
16	S3	11,0	5,3	300	725,0	4034	11798
17	S2	11,0	5,0	300	807,9	3868	12085
18	S2	11,0	5,0	300	812,7	4271	14829
19	S3	11,0	5,0	300	709,1	4401	13734
20	S2	11,0	5,0	300	743,0	4128	12664
21	S3	10,7	5,2	300	799,8	3893	12119
22	S2	11,0	5,0	300	805,5	4384	15479
23	S3	11,0	5,0	300	726,7	4453	14411
24	S2	11,0	5,2	300	664,9	4288	12224
25	S3	11,0	5,0	300	763,0	3804	11041
26	S3	11,0	5,0	300	799,4	4516	16302
27	S1	11,0	5,2	300	509,9	5065	13080
28	S1	11,0	5,3	300	690,1	4464	13754
29	S3	11,0	5,0	300	806,7	4142	13838
30	S2	11,0	5,0	300	755,1	4382	14501

**Tabela 02.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Pinus sp* no ensaio de ultra-som.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>b (cm)</b>	<b>h (cm)</b>	<b>L (cm)</b>	<b><math>\rho_{ap,12\%}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>LL</sub> (m/s)</b>	<b>E<sub>d,us</sub> (MPa)</b>
1	S2-ND	11,0	5,0	300	641,0	4157	11078
2	S3-ND	11,0	5,0	300	624,8	3925	9625
3	S3-ND	11,0	5,2	300	592,9	4534	12188
4	S3-ND	11,0	5,0	300	554,9	4777	12664
5	S2-ND	11,0	5,0	300	589,6	4697	13010
6	S1-ND	11,3	5,0	300	597,8	4484	12021
7	SE-ND	11,2	5,0	300	602,8	4915	14563
8	S1-ND	11,0	5,2	300	648,6	4668	14134
9	SE-ND	11,0	5,2	300	751,7	3927	11590
10	S3-ND	11,0	5,0	300	641,0	4715	14248
11	S2-ND	11,4	5,3	300	666,4	4221	11876
12	S3-ND	11,0	5,0	300	559,7	4575	11717
13	S3-ND	11,0	5,0	300	649,4	4749	14647
14	S2-ND	11,0	5,0	300	604,6	4727	13508
15	SE-ND	11,2	5,0	300	622,0	4875	14785
16	S3-ND	11,4	5,0	300	524,4	4249	9469
17	S2-ND	11,0	5,0	300	546,1	4642	11766
18	S2-ND	11,0	5,0	300	553,4	4527	11341
19	S3-ND	11,2	5,0	300	573,5	4622	12255
20	S3-ND	11,2	5,0	300	641,5	4074	10649
21	S3-ND	11,0	5,0	300	596,4	4775	13595
22	SE-ND	11,0	5,0	300	585,4	4767	13302
23	SE-ND	11,2	5,2	300	638,2	4221	11372
24	S3-ND	11,0	5,0	300	636,7	3922	9791
25	S2-ND	11,0	5,0	300	618,0	4722	13778
26	SE-ND	11,2	5,0	300	706,7	3833	10383
27	S3-ND	11,2	5,4	300	589,1	4582	12370
28	S3-ND	11,0	5,3	300	682,6	5143	18055
29	S1-ND	11,0	5,0	300	742,9	4523	15194
30	S3-ND	11,2	5,0	300	511,8	4278	9364

**Tabela 03.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Goupia glabra* no ensaio de ultra-som.

Viga	Classe	b (cm)	h (cm)	L (cm)	$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>LL</sub> (m/s)	E <sub>d,us</sub> (MPa)
1	S1	11,0	5,0	300	901,9	4198	15892
2	S1	10,4	4,8	300	952,2	4188	16701
3	SE	10,6	5,0	300	952,4	4045	15582
4	S1	10,3	5,0	300	845,6	4427	16572
5	S1	10,5	5,0	300	959,4	5149	25434
6	S1	10,4	4,9	300	958,1	4543	19775
7	S2	10,7	5,1	300	947,8	4104	15964
8	S1	10,3	5,1	300	908,1	4950	22254
9	S2	10,3	5,0	300	980,0	4473	19609
10	S1	10,6	5,1	300	975,2	4573	20395
11	S3	10,5	5,0	300	928,0	4348	17542
12	S3	11,0	5,1	300	970,9	4369	18532
13	S1	10,6	5,1	300	975,5	4442	19250
14	S1	10,6	4,8	300	967,7	4212	17164
15	S3	10,6	4,9	300	959,4	5093	24890
16	S2	11,8	5,0	300	816,2	4298	15077
17	S2	10,5	5,0	300	931,7	4221	16603
18	S1	10,1	4,8	300	924,2	4994	23053
19	S2	10,1	5,0	300	950,1	4386	18277
20	S1	10,6	5,0	300	954,5	4317	17784
21	S1	10,6	5,1	300	987,9	5068	25369
22	S1	10,8	4,8	300	962,3	4663	20925
23	S1	10,8	5,0	300	1047,9	4436	20617
24	S3	10,3	5,0	300	965,9	4271	17623
25	S3	10,5	5,0	300	917,1	4390	17677
26	S1	10,6	5,1	300	938,9	4395	18131
27	S1	10,0	5,0	300	987,7	4414	19242
28	S2	10,8	5,3	300	994,5	4089	16629
29	S1	10,5	5,0	300	1031,5	4259	18713
30	S2	10,7	5,0	300	1030,0	4317	19191

## ANEXO B

---

Nas tabelas 01 a 03 são apresentados os seguintes valores: o vão empregado, frequência, a massa das vigas e o módulo de elasticidade dinâmico para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*.

**Tabela 01.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus citriodora* no ensaio de vibração transversal.

Viga	Classe	Vão (m)	f (Hz)	Massa (kg)	E <sub>d,vt</sub> (MPa)
1	S3	2,9	11,41	13,2	14880
2	S3	2,9	13,81	13,1	21617
3	S1	2,9	12,4	13,3	14834
4	S2	2,9	12,42	13,1	17431
5	S3	2,9	13,63	12,0	19353
6	S3	2,9	10,92	13,2	13650
7	S3	2,9	11,99	11,0	13658
8	S2	2,9	11,18	13,1	14200
9	S1	2,9	12,05	12,6	15843
10	SE	2,9	13,91	13,5	22534
11	S3	2,9	11,66	12,8	15725
12	S3	2,9	12,33	12,9	15039
13	S3	2,9	11,62	13,2	12978
14	S3	2,9	11,92	12,2	12541
15	SE	2,9	11,26	13,3	14601
16	S3	2,9	11,16	12,7	11473
17	S2	2,9	10,93	13,3	13779
18	S2	2,9	11,51	13,4	15372
19	S3	2,9	11,76	11,7	14000
20	S2	2,9	11,27	12,3	13473
21	S3	2,9	11,11	13,4	13030
22	S2	2,9	12,07	13,3	16752
23	S3	2,9	12,2	12,0	15441
24	S2	2,9	11,7	11,4	12014
25	S3	2,9	10,17	12,6	11267
26	S3	2,9	12,7	13,2	18407
27	S1	2,9	11,8	12,7	13602
28	S1	2,9	12	12,1	12627
29	S3	2,9	11,25	13,3	14575
30	S2	2,9	11,55	12,6	14844

**Tabela 02.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Pinus sp* no ensaio de vibração transversal.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>Vão (m)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>E<sub>d,vt</sub> (MPa)</b>
1	S2-ND	2,9	11,64	10,4	12204
2	S3-ND	2,9	10,97	10,8	11193
3	S3-ND	2,9	12,84	10,1	12770
4	S3-ND	2,9	13,18	9,8	14685
5	S2-ND	2,9	12,94	10,1	14676
6	S1-ND	2,9	12,23	8,9	11263
7	SE-ND	2,9	13,51	10,0	15510
8	S1-ND	2,9	13,28	11,4	15437
9	SE-ND	2,9	11,16	12,7	12128
10	S3-ND	2,9	13,04	10,6	15610
11	S2-ND	2,9	12,46	10,8	11721
12	S3-ND	2,9	13,25	9,9	14978
13	S3-ND	2,9	13,34	10,5	16090
14	S2-ND	2,9	13,84	10,5	17452
15	SE-ND	2,9	13,67	9,9	15674
16	S3-ND	2,9	12,4	10,0	12773
17	S2-ND	2,9	13,2	9,3	14051
18	S2-ND	2,9	13,4	10,0	15521
19	S3-ND	2,9	12,98	9,9	14160
20	S3-ND	2,9	11,95	10,8	13155
21	S3-ND	2,9	13,34	9,7	14889
22	SE-ND	2,9	13,8	9,8	16198
23	SE-ND	2,9	11,88	10,5	11238
24	S3-ND	2,9	11,6	10,7	12458
25	S2-ND	2,9	13,44	10,2	15864
26	SE-ND	2,9	10,68	11,8	11418
27	S3-ND	2,9	12,9	10,0	11260
28	S3-ND	2,9	14,34	11,5	17120
29	S1-ND	2,9	13,2	11,8	17805
30	S3-ND	2,9	12,25	9,5	12115

**Tabela 03.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Goupiia glabra* no ensaio de vibração transversal.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>Vão (m)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>E<sub>d,vt</sub> (MPa)</b>
1	S1	2,9	9,49	11,8	14171
2	S1	2,9	8,99	12,1	12530
3	SE	2,9	10,58	12,3	12450
4	S1	2,9	10,52	11,1	13499
5	S1	2,9	12,48	11,4	22019
6	S1	2,9	10,8	11,3	13190
7	S2	2,9	9,72	12,3	12476
8	S1	2,9	12,04	12,7	19763
9	S2	2,9	10,39	12,5	15670
10	S1	2,9	10,92	12,5	16397
11	S3	2,9	10,57	12,2	14573
12	S3	2,9	10,45	10,7	12999
13	S1	2,9	10,06	12,4	14701
14	S1	2,9	10,38	11,2	12877
15	S3	2,9	12,18	11,6	21324
16	S2	2,9	10,83	12,2	12707
17	S2	2,9	10,21	11,7	14149
18	S1	2,9	12,28	10,5	19744
19	S2	2,9	10,86	11,1	14139
20	S1	2,9	10,26	12,8	14441
21	S1	2,9	12,41	11,1	21538
22	S1	2,9	11,25	11,0	16925
23	S1	2,9	10,41	12,4	17511
24	S3	2,9	9,68	10,7	10952
25	S3	2,9	10,21	12,2	15774
26	S1	2,9	10,86	12,5	16089
27	S1	2,9	11,05	11,5	17429
28	S2	2,9	10,09	12,2	15052
29	S1	2,9	10,27	12,8	16473
30	S2	2,9	10,46	10,6	14407

## ANEXO C

---

---

Nas tabelas 01 a 03 são apresentados os valores do vão empregado, o momento de inércia da seção transversal, o incremento de carga, o incremento de deslocamento e o módulo de elasticidade estático obtido para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*.

**Tabela 01.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Eucalyptus citriodora* no ensaio de flexão estática.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>Vão</b>	<b>I (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>ΔF (N)</b>	<b>Δv (mm)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
1	S3	2,9	1145833,3	706	13,95	19579
2	S3	2,9	1145833,3	706	15,60	26988
3	S1	2,9	1364705,8	706	12,50	21029
4	S2	2,9	1145833,3	706	13,65	22935
5	S3	2,9	1145833,3	706	11,80	26531
6	S3	2,9	1145833,3	706	17,10	18308
7	S3	2,9	1145833,3	706	12,80	20303
8	S2	2,9	1145833,3	706	7,64	18492
9	S1	2,9	1145833,3	706	14,73	21254
10	SE	2,9	1145833,3	706	11,05	28332
11	S3	2,9	1093750,0	706	10,62	19135
12	S3	2,9	1288906,7	706	14,22	19572
13	S3	2,9	1364705,8	706	11,06	16636
14	S3	2,9	1364705,8	706	10,00	17442
15	SE	2,9	1145833,3	706	17,90	17490
16	S3	2,9	1364705,8	706	16,35	16077
17	S2	2,9	1145833,3	706	11,94	17737
18	S2	2,9	1145833,3	706	15,55	20133
19	S3	2,9	1145833,3	706	9,55	20030
20	S2	2,9	1145833,3	706	11,01	18525
21	S3	2,9	1253754,7	706	17,25	16587
22	S2	2,9	1145833,3	706	14,10	22203
23	S3	2,9	1145833,3	706	15,35	20395
24	S2	2,9	1288906,7	706	12,88	16970
25	S3	2,9	1145833,3	706	12,49	15294
26	S3	2,9	1145833,3	706	10,72	24690
27	S1	2,9	1288906,7	706	9,23	24521
28	S1	2,9	1364705,8	706	11,10	19823
29	S3	2,9	1145833,3	706	10,30	19055
30	S2	2,9	1145833,3	706	15,49	20209

**Tabela 02.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Pinus sp* no ensaio de flexão estática.

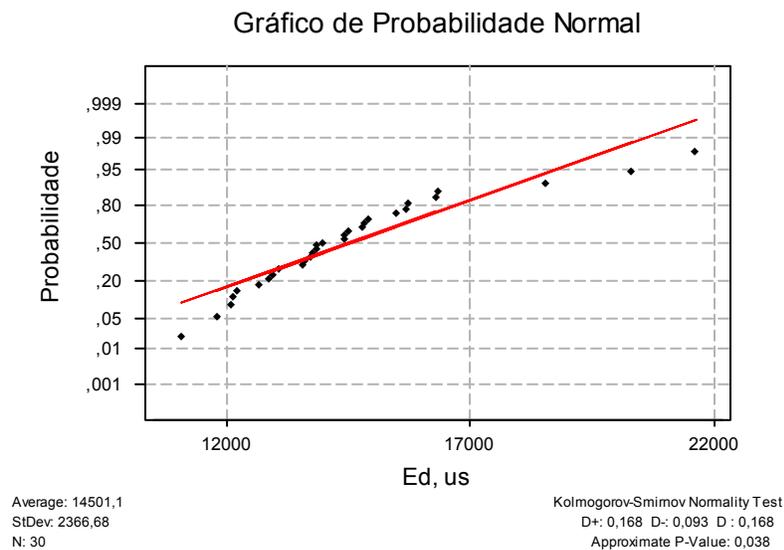
<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>Vão</b>	<b>I (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>ΔF (N)</b>	<b>Δv (mm)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
1	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	14,66	12813
2	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	17,65	10642
3	S3-ND	2,9	1288906,7	423,6	13,90	12014
4	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	13,80	13612
5	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	12,90	14561
6	S1-ND	2,9	1177083,3	423,6	14,95	12231
7	SE-ND	2,9	1166666,7	423,6	11,95	15438
8	S1-ND	2,9	1288906,7	423,6	11,40	14648
9	SE-ND	2,9	1288906,7	423,6	14,35	11637
10	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	11,65	16124
11	S2-ND	2,9	1414331,5	423,6	12,75	11936
12	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	13,57	13842
13	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	11,80	15919
14	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	10,90	17233
15	SE-ND	2,9	1166666,7	423,6	11,62	15877
16	S3-ND	2,9	1187500,0	423,6	15,75	11508
17	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	13,28	14145
18	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	12,83	14641
19	S3-ND	2,9	1166666,7	423,6	13,40	13768
20	S3-ND	2,9	1166666,7	423,6	14,81	12457
21	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	12,00	15653
22	SE-ND	2,9	1145833,3	423,6	11,67	16096
23	SE-ND	2,9	1312341,3	423,6	15,25	10755
24	S3-ND	2,9	1145833,3	423,6	16,10	11667
25	S2-ND	2,9	1145833,3	423,6	12,05	15588
26	SE-ND	2,9	1166666,7	423,6	17,15	10757
27	S3-ND	2,9	1469664,0	423,6	13,70	10690
28	S3-ND	2,9	1364705,8	423,6	9,58	16463
29	S1-ND	2,9	1145833,3	423,6	11,00	17076
30	S3-ND	2,9	1166666,7	423,6	16,10	11459

**Tabela 03.** Valores obtidos para as vigas da espécie *Goupia glabra* no ensaio de flexão estática.

<b>Viga</b>	<b>Classe</b>	<b>Vão</b>	<b>I (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>ΔF (N)</b>	<b>Δv (mm)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
1	S1	2,9	745360,0	282,4	13,95	13800
2	S1	2,9	773754,7	282,4	15,60	11887
3	SE	2,9	1093750,0	282,4	9,95	13185
4	S1	2,9	899799,3	282,4	11,92	13378
5	S1	2,9	797343,8	282,4	7,58	23741
6	S1	2,9	986318,5	282,4	9,90	14695
7	S2	2,9	925755,1	282,4	12,80	12109
8	S1	2,9	925755,1	282,4	7,64	20287
9	S2	2,9	851690,0	282,4	10,05	16764
10	S1	2,9	899799,3	282,4	9,35	17055
11	S3	2,9	925755,1	282,4	10,62	14595
12	S3	2,9	891147,4	282,4	11,00	14638
13	S1	2,9	843578,7	282,4	11,06	15379
14	S1	2,9	925755,1	282,4	10,00	15500
15	S3	2,9	797343,8	282,4	7,58	23741
16	S2	2,9	1114583,3	282,4	11,37	11323
17	S2	2,9	851690,0	282,4	11,94	14110
18	S1	2,9	797343,8	282,4	8,20	21946
19	S2	2,9	917103,2	282,4	9,55	16383
20	S1	2,9	925755,1	282,4	11,01	14078
21	S1	2,9	789750,0	282,4	7,52	24161
22	S1	2,9	812531,3	282,4	9,32	18948
23	S1	2,9	759557,3	282,4	9,66	19556
24	S3	2,9	908451,3	282,4	12,88	12263
25	S3	2,9	797343,8	282,4	12,49	14408
26	S1	2,9	908451,3	282,4	10,72	14734
27	S1	2,9	797343,8	282,4	9,23	19497
28	S2	2,9	820125,0	282,4	11,10	15762
29	S1	2,9	812531,3	282,4	10,30	17145
30	S2	2,9	797343,8	282,4	10,44	17237

# ANEXO D

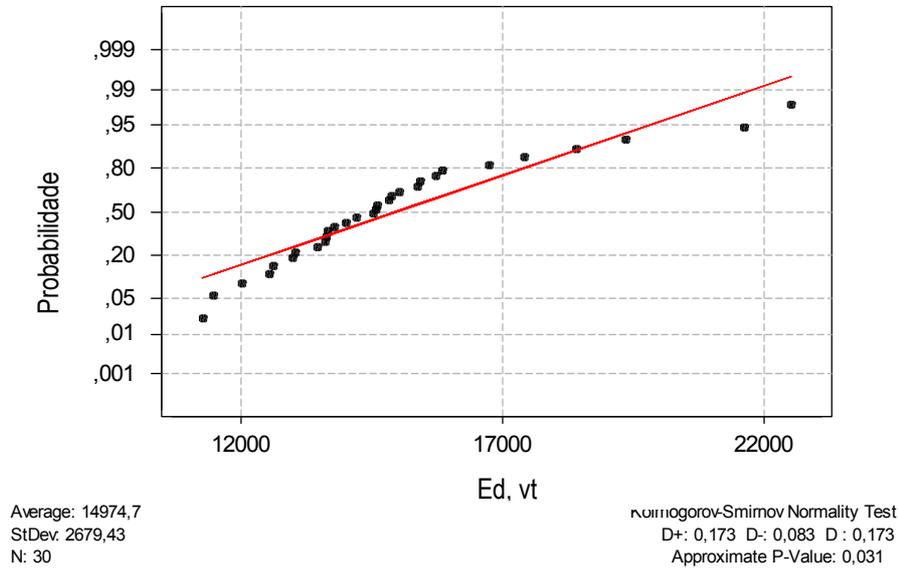
A seguir são apresentados os resultados do teste de normalidade empregando o Método de Kolmogorov-Smirnov para as espécies *Eucalyptus citriodora*, *Pinus sp* e *Goupia glabra*.



**Figura 01.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus citriodora* – Ultra-som.

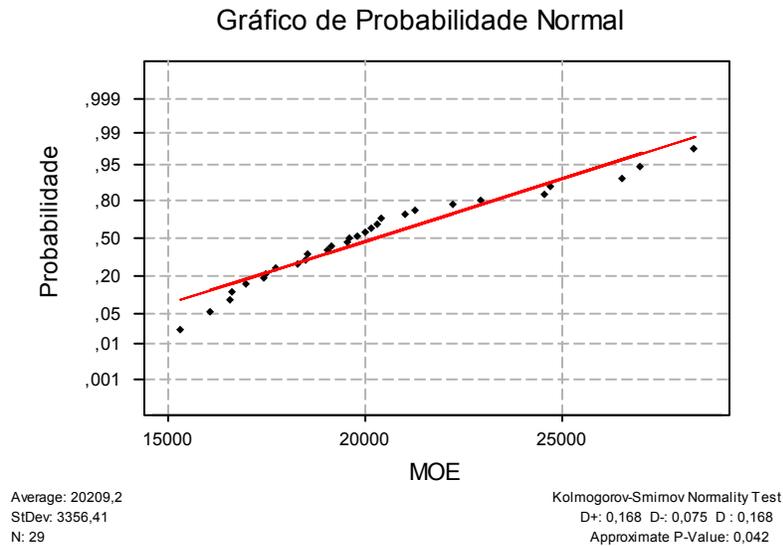
Para os dados obtidos com a técnica de ultra-som verifica-se pela Figura 01, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,168. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,168 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.

Gráfico de Probabilidade Normal



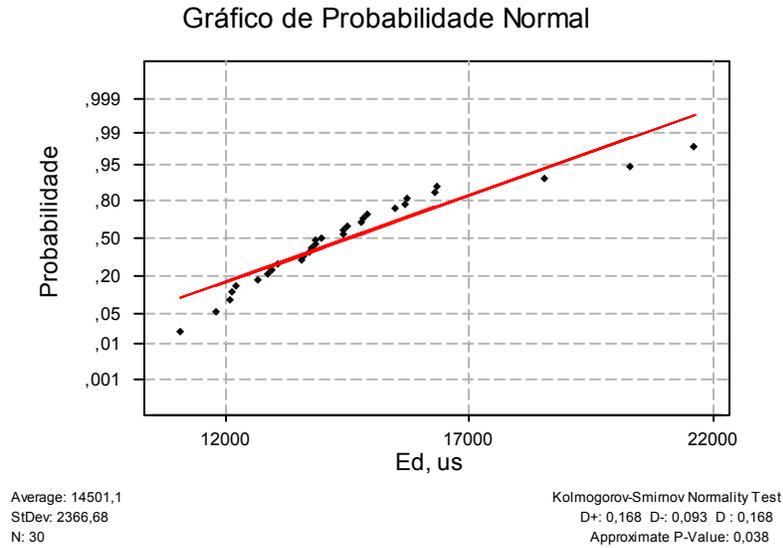
**Figura 02.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus citriodora* – Vibração transversal.

Para os dados obtidos com a técnica de vibração transversal verifica-se pela Figura 02, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,173. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,173 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



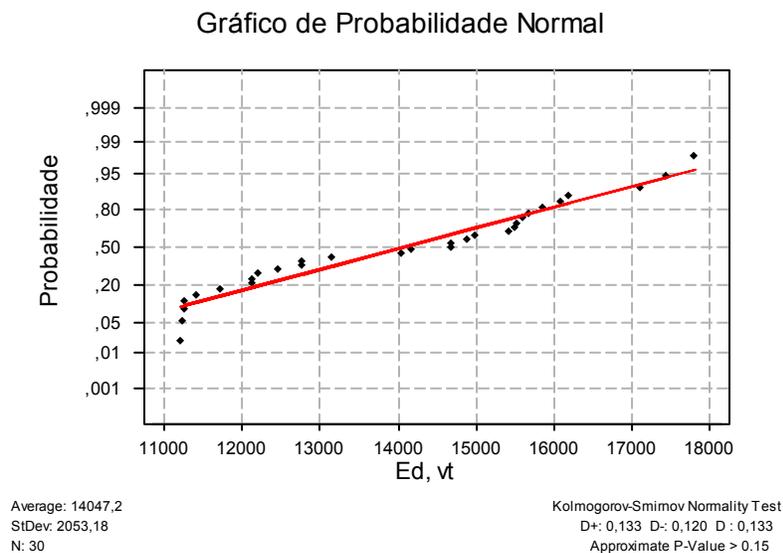
**Figura 03.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Eucalyptus citriodora* – Flexão estática.

Para os dados obtidos com a flexão estática verifica-se pela Figura 03, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,168. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,168 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



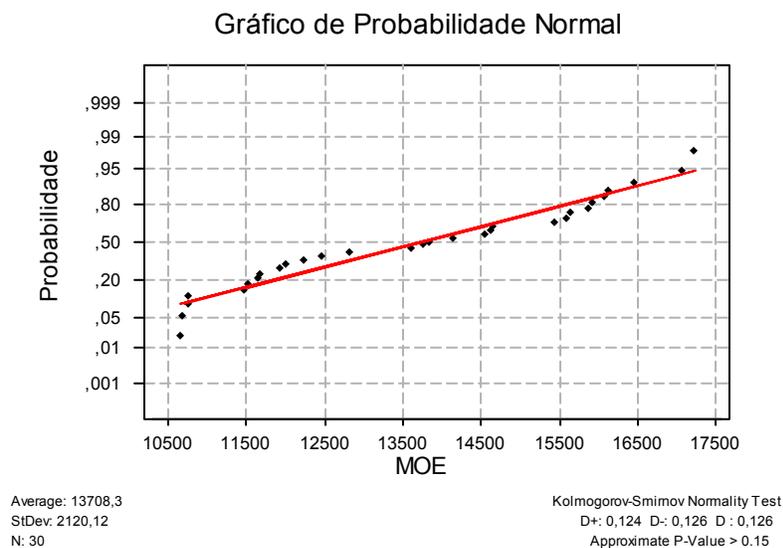
**Figura 04.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Pinus sp* – Ultra-som.

Para os dados obtidos com a técnica de ultra-som verifica-se pela Figura 04, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,168. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,168 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



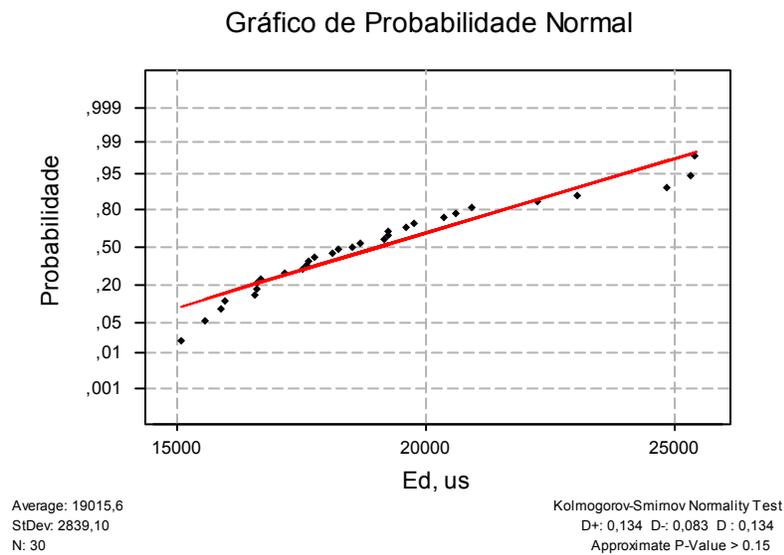
**Figura 05.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Pinus sp* – Vibração transversal.

Para os dados obtidos com a técnica de vibração transversal verifica-se pela Figura 05, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,133. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,133 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



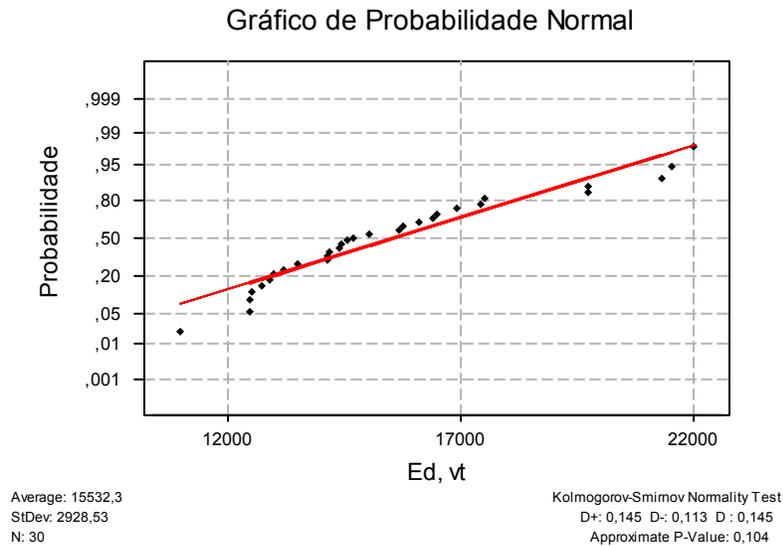
**Figura 06.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Pinus sp* – Flexão estática.

Para os dados obtidos com a flexão estática verifica-se pela Figura 06, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,126. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,126 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



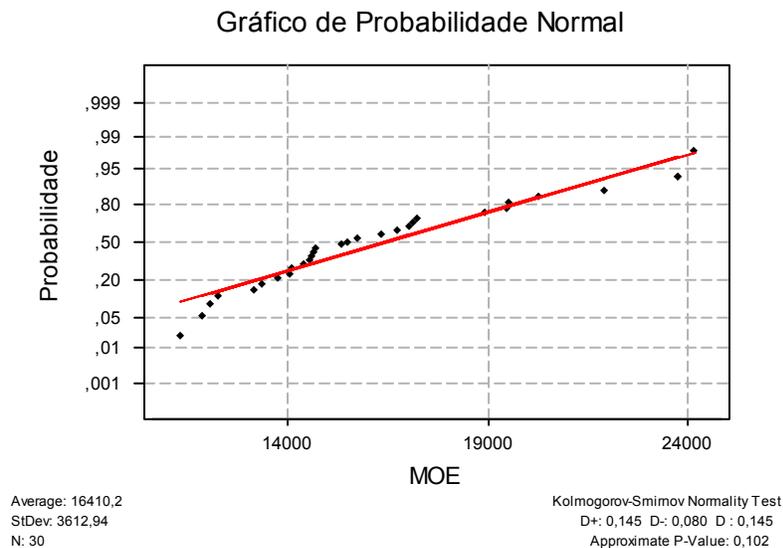
**Figura 07.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Goupia glabra* – Ultra-som.

Para os dados obtidos com a técnica de ultra-som verifica-se pela Figura 07, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,134. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,134 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



**Figura 08.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Goupia glabra* – Vibração transversal.

Para os dados obtidos com a técnica de vibração verifica-se pela Figura 08, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,145. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,145 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.



**Figura 09.** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov para a espécie *Goupia glabra* – Flexão estática.

Para os dados obtidos com a flexão estática verifica-se pela Figura 09, que o valor obtido para a variável de teste D corresponde a 0,145. Para 30 vigas ( $n = 30$ ), o valor crítico ao nível  $\alpha = 5\%$  de significância é 0,242. Nota-se que 0,145 é inferior a 0,242, logo pode-se aceitar a hipótese de normalidade.