

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

---

**CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE  
MADEIRA ATRAVÉS DO ULTRA-SOM**

**ANDRÉ BARTHOLOMEU**

CAMPINAS  
NOVEMBRO DE 2001

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

**UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS DE  
MADEIRA ATRAVÉS DO ULTRA-SOM**

Tese submetida à banca examinadora para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Agrícola na área de concentração de  
Construções Rurais

**ANDRÉ BARTHOLOMEU**

**ORIENTADOR : PROF<sup>A</sup>. DR<sup>A</sup>. RAQUEL GONÇALVES**

CAMPINAS  
NOVEMBRO DE 2001

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA T/UNICAMP	B283c
V	
TOMBO	48079
PROJ	16.837/02
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/04/02
Nº CPD	

CM00165801-6

ID 235879

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B283c      Bartholomeu, André  
Classificação de peças estruturais de madeira através  
do ultra-som. / André Bartholomeu. --Campinas, SP:  
[s.n.], 2001.

Orientador: Raquel Gonçalves.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Madeira – Propriedades mecânicas. 2. Testes não-  
destrutivos. 3. Ultra-som. I. Gonçalves, Raquel. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Agrícola. III. Título.

“Se depender de mim, nunca ficarei plenamente maduro, nem das idéias, nem no estilo, mas sempre verde, incompleto, experimental”.

(Gilberto Freyre, **Tempo Morto e Outros Tempos**, 1975)

“... Após os comentários, um colega da faculdade (cientista, mas não físico atômico) comentou: “Bem, claro que você sabe que a ciência na verdade não explica as coisas, somente as descreve”.

... Há também limitações na certeza de nossas explicações. Não creio que jamais teremos certeza de nenhuma delas.

... Finalmente, parece claro que nunca seremos capazes de explicar nossos mais fundamentais princípios científicos”.

(Steven Weinberg, Prêmio Nobel de Física. Os limites da explicação científica. **Caderno Mais!**, **Jornal Folha de São Paulo**. São Paulo, 24 de Junho de 2001, p.7-12, 2001)

Antonio é meu querido companheiro  
André Bortoluzzi a utilizar o texto  
desta página para a sua tese de bon-  
fardo. Itatiba, 20 fev. 2001

## A madeira *Thiago de Mello*

**E**u só vou louvar algumas da minha predileção. Ou do meu respeito. E vou dizendo logo o nome da itaúba preta, a preferida de quem gosta do que é bom e que nunca se acaba. Para esteio, assoalho, cumeeira, fundo de barco, casco de canoa, arpão (tem pescador de zagaia que prefere arpão de maçaranduba, por mais pesado), pernamanca de telhado, tacaniça, viga de sustentação — a itaúba é pau para toda obra. Mas desde que seja a parte do âmago. Não tem água, nem terra, nem cupim que dê com ela. Já a carne branca, a parte logo abaixo da casca, mestre carpinteiro que se preza não lida com ela.

Vou dar os nomes de algumas árvores nossas, que dão madeira de primeiríssima ordem. São tão lindos os seus nomes, originários quase todos do tupi indígena, que até merecem versos decassílabos:

*Maçaranduba, mogno, mungubeira,  
sucupira, pau d'arco, preciosa,  
sumaumeira, açacu, jacarandá,  
acariquara, louro, cumaru.  
Do cedreiro altaneiro não me esqueço,  
sobretudo do roxo, tão esquivo.  
Nem do lenho-milato, pau de trava,  
muito menos da linda lombrigueira.*

Você pode achar o nome dela meio sem graça: lombrigueira. Mas vou lhe contar que é uma das árvores mais lindas da floresta. Solenemente esgalhada, de frente avantajada, chega a ser majestosa. Só não digo que é a mais bonita mesmo, porque em matéria de beleza ninguém ganha aqui na mata das palmeiras, do açaí e da bacaba. Esguias, altas, sensuais. Palmeira não é bem árvore, é encantamento puro. Basta vê-la dançando com o vento de tardinha, como ela se curva toda. O vento que conte o resto das virtudes da palmeira.

Madeireiro sábio não abate suas árvores (porque dela precisa para o seu barco, a sua casa) em noite de lua cheia. Ela cai rachada de alto a baixo por um "caminho de vento". Já ouvi muita história de árvore que conversa, que prediz, que sofre. De uma castanheira, caiu um ouriço na cabeça de uma menina, que morreu na horinha. Pois a árvore, esbelta e verdoia, no mesmo dia começou a murchar, foi murchando, acabou puros galhos secos. De tristeza, de mágoa.

**Thiago de Mello, Amazonas Águas,  
Pássaros, Seres e Milagres.  
São Paulo: Salamandra, 1998.**

---

Duas famílias.

Uma – a primeira –  
Foi útero, infância  
Casa e direção.  
Forma cabal, fôrma vazia  
Às quais me amoldei.

Outra – a de agora -  
É lide, trajeto, dever  
Benedição!  
Flecha voante de um arco  
Que fremi, que estirei.

Às duas, esta lavra.

## Agradecimentos

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Raquel Gonçalves, pela dedicação e o incentivo durante todo o tempo em que este trabalho esteve sendo executado. Sem seu apoio, certamente o objetivo não teria sido alcançado plenamente.

Aos professores e funcionários da FEAGRI-UNICAMP, pela dedicação e pela ajuda nos diversos momentos nos quais foram solicitados.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Voichita Bucur, da Université Henri Poincaré - Nancy, França, pela atenção dispensada à esta pesquisa, pelo entusiasmo que certamente contagiou sua elaboração e pelas críticas e apoio demonstrados em sua manifestação, presentes no Anexo III.

Ao Prof. Dr. Ing. Georg Steinkamp pela indicação precisa e pelo acolhimento demonstrado nas visitas a Bremen (Anexo III).

Aos professores da Faculté de Foresterie et de Géomatique (Département des Sciences du Bois et de la Forêt) de l'Université Laval, de Québec, Canadá, pelo incentivo.

À USF - Universidade São Francisco, Câmpus de Itatiba, pela ajuda material na utilização de equipamentos e cessão de funcionários na execução de ensaios.

Aos ex-alunos de graduação de Engenharia Civil da USF que\* colaboraram na execução de ensaios.

Ao LaMEM/EESC-USP, pela dedicação de seus professores e funcionários.

E, por fim, à minha família, pelo suporte, compreensão e, principalmente, pelo amor dedicado à esta causa.

## **SUMÁRIO**

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
RESUMO	xxii
ABSTRACT	xxiv
1 – INTRODUÇÃO	01
<hr/>	
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1. Comportamento elástico da madeira	04
2.2. Propagação da onda ultra-sônica em um meio elástico	08
2.3. O uso do ultra-som para determinação de constantes elásticas da madeira	10
2.4. Fatores que afetam a propagação do ultra-som na madeira	12
2.4.1 – Teor de Umidade	13
2.4.2 – Dimensões da seção transversal e comprimento do corpo-de-prova ou peça	15
2.4.3 – Frequência	18
2.4.4 – Densidade aparente	19
2.4.5 – Classificação de peças estruturais de madeira utilizando o ultra-som	20

2.4.5.1 – WAUBKE	20
2.4.5.2 – SANDOZ	23
2.4.5.3 – STEIGER	26
<b>3 - MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
3.1. Material e Equipamentos	29
<hr/>	
3.1.1 Material	29
3.1.2 Equipamentos	29
3.2. Métodos	30
3.2.1 Retirada das vigas e dos corpos-de-prova	30
3.2.1.1 Cupiúba	30
3.2.1.2 Eucalipto Citriodora	32
3.2.1.3 Pinus elliottii	34
3.2.2 Ensaio Mecânicos	35
3.2.2.1 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras	35
3.2.2.2 Ensaio de Flexão Estática	35

3.2.3	Ensaio Não-Destrutivo Utilizando Equipamento de Ultra-som	38
3.2.4	Condicionamento dos corpos-de-prova e das vigas nas condições saturada e seca ao ar	41
3.3	Análise Estatística	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>44</b>
4.1	Regressão Linear – Correlações entre variáveis de importância	46
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES</b>	<b>50</b>
5.1	Modelos obtidos com os resultados de ensaio em corpos-de-prova de dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 0,15 m	54
5.2	Modelos obtidos com os resultados de ensaio em vigas de dimensões nominais 0,06 x 0,12 x 2,00 m	56
5.3	Classificação de vigas estruturais das espécies Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii segundo classes de rigidez, utilizando o ultra-som como ferramenta de análise	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>
	<b>DEMAIS BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS</b>	<b>73</b>

<b>ANEXO I</b>	76
<b>ANEXO II</b>	93
<b>ANEXO III</b>	102

---

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema da ortotropia da madeira com seus três eixos principais	04
Figura 2.2 – Representação esquemática da propagação de uma onda longitudinal de compressão numa barra	09
Figura 2.3 – Variação da velocidade longitudinal de ultra-som (m/s) em corpos-de-prova da espécie <i>Metasequoia</i> em função do teor de umidade	13
Figura 2.4 – Variação da constante elástica $C_{LL}$ em função do teor de umidade para várias espécies	15
Figura 2.5 – Variação da velocidade de propagação (m/s) de ondas longitudinais em função da relação base/altura em corpos-de-prova de <i>Sapin Douglas</i>	16
Figura 2.6 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação $L/\lambda$ em corpos-de-prova de <i>Hêtre</i>	17
Figura 2.7 – Curva de correlação entre a velocidade longitudinal do ultra-som e a tensão de ruptura MOR para as vigas das espécies <i>Sapin e Epicéa</i>	25
Figura 2.8 – Correlação entre velocidade do ultra-som e módulo de elasticidade estático à Flexão ( $E_M$ ) para vigas estruturais da espécie <i>Fichte</i> , com teor de umidade de 12%	27
Figura 3.1 – Representação esquemática da retirada das pranchas de Cupiúba	30
Figura 3.2 – Esquema indicando o posicionamento das vigas na tora de origem	31

Figura 3.3 – Esquema de retirada dos corpos-de-prova e das vigas de Cupiúba, de Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii	32
Figura 3.4 – Representação esquemática do desdobro da tora de Eucalipto Citriodora	33
Figura 3.5 - Esquema de ensaio de flexão estática segundo a Norma ASTM D 198-84	36
Figura 3.6 – Ensaio à flexão estática	38
Figura 3.7 – O equipamento de ultra-som Steinkamp BP5	39
<hr/>	
Figura 3.8 – Representação da localização dos pontos de medição do tempo de propagação da onda de ultra-som nas vigas	40
Figura 3.9 – Ensaio da viga utilizando equipamento de ultra-som	41
Figura 5.1 – Quadro comparativo entre os valores médios de $C_{LLc}$ e $E_{c0}$ nas condições saturada e seca ao ar para os corpos-de-prova das três espécies estudadas	52
Figura 5.2 – Quadro comparativo entre valores médios de $C_{LLv}$ e $E_M$ nas condições saturada e seca ao ar, para as vigas das três espécies estudadas	53
Figura 5.3 – Quadro demonstrativo das velocidades longitudinais médias $V_{LLc}$ e $V_{LLv}$	54
Figura 5.4 – Pontos obtidos na correlação $V_{vsat}$ x $E_M$ em vigas das espécies Cupiúba Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii	57

Figura 5.5 – Modelos que relacionam a velocidade longitudinal de ultra-som nas vigas estruturais das espécies Cupiúba, Euc. Citriodora e Pinus elliottii na condição saturada, e o módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_M$ ) na condição seca ao ar	58
Figura 5.6 – Correlação entre $E_M$ e $f_{c0}$ , na condição seca ao ar, para as espécies Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii	59
Figura 5.7 – Correlação entre a velocidade do ultra-som nas vigas saturadas e $E_M$ na condição seca ao ar para a espécie Cupiúba	62
<hr/>	
Figura 5.8 – Correlação entre a velocidade do ultra-som nas vigas saturadas e $E_M$ na condição seca ao ar para a espécie Eucalipto Citriodora	63
Figura 5.9 – Correlação entre a velocidade do ultra-som e $E_M$ , ambos na condição seca ao ar para as vigas da espécie Cupiúba	65
Figura 5.10– Correlação entre a velocidade do ultra-som e $E_M$ , ambos na condição seca ao ar para vigas da espécie Eucalipto Citriodora	66
Figura 5.11 – Correlação entre a velocidade do ultra-som e $E_M$ na condição seca ao ar para vigas da espécie Pinus elliottii	67
Figura A1 – Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	93
Figura A2 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	93
Figura A3 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	93

Figura A4 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	93
Figura A5 - Curva de correlação $V_{LLv} \times E_M$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	94
Figura A6 - Curva de correlação $C_{LLv} \times E_M$ para a espécie Cupiúba na condição saturada	94
Figura A7 - Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	94
Figura A8 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	94
Figura A9 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	95
Figura A10 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	95
Figura A11 - Curva de correlação $V_{LLv} \times E_M$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	95
Figura A12 - Curva de correlação $C_{LLv} \times E_M$ para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar	95
Figura A13 - Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	96
Figura A14 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	96

Figura A15 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	96
Figura A16 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	96
Figura A17 - Curva de correlação $V_{LLv} \times E_M$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	97
Figura A18 - Curva de correlação $C_{LLv} \times E_M$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição saturada	97
Figura A19 - Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	97
Figura A20 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	97
Figura A21 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	98
Figura A22 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	98
Figura A23 - Curva de correlação $V_{LLv} \times E_M$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	98
Figura A24 - Curva de correlação $C_{LLv} \times E_M$ para a espécie Eucalipto Citriodora na condição seca ao ar	98

Figura A25 - Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	99
Figura A26 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	99
Figura A27 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	99
Figura A28 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	99
Figura A29 - Curva de correlação $V_{LLv} \times E_M$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	100
Figura A30 - Curva de correlação $C_{LLv} \times E_M$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição saturada	100
Figura A31 - Curva de correlação $V_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição seca ao ar	100
Figura A32 - Curva de correlação $V_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição seca ao ar	100
Figura A33 - Curva de correlação $C_{LLc} \times f_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição seca ao ar	101
Figura A34 - Curva de correlação $C_{LLc} \times E_{c0}$ para a espécie <i>Pinus elliottii</i> na condição seca ao ar	101

Figura A35 - Curva de correlação  $V_{LLV} \times E_M$  para a espécie *Pinus elliottii* na condição  
seca ao ar 101

Figura A36 - Curva de correlação  $C_{LLV} \times E_M$  para a espécie *Pinus elliottii* na condição  
seca ao ar 101

---

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Coeficientes de Poisson médios para Coníferas e Dicotiledôneas	07
Tabela 2.2 – Valores dos coeficientes de correlação $r$ encontrados por Waubke em 138 vigas de <i>Fichte</i>	21
Tabela 2.3 – Valores dos coeficientes de correlação $r$ encontrados por Waubke em 134 vigas de <i>Fichte</i>	22
Tabela 2.4 – Classes de resistência da norma SIA 164	24
Tabela 2.5 – Faixas de velocidades para classificação de peças estruturais das espécies <i>Sapin e Epicéa</i> com teor de umidade de 12%, de acordo com as classes de resistência da norma SIA 164, segundo Sandoz	26
Tabela 2.6 – Valores de $E_M$ médios para as classes de resistência na norma EN 338 – teor de umidade 12%	28
Tabela 2.7 – Faixas de velocidades para classificação de peças estruturais da espécie <i>Fichte</i> , com 12% de umidade, de acordo com a Norma EN 338, segundo Steiger	28
Tabela 3.1 – Idade aproximada das toras de <i>Pinus elliottii</i> por contagem dos anéis de crescimento e quantidade de vigas retiradas de cada tora	34
Tabela 4.1 – Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em corpos-de-prova na condição saturada	44
Tabela 4.2 – Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em corpos-de-prova na condição seca ao ar	45

Tabela 4.3 – Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em vigas estruturais na condição saturada	45
Tabela 4.4 – Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em vigas estruturais na condição seca ao ar	46
Tabela 4.5 – Modelos de regressão linear – Cupiúba – condição saturada	47
Tabela 4.6 – Modelos de regressão linear – Cupiúba – condição seca ao ar	48
Tabela 4.7 – Modelos de regressão linear – Eucalipto Citriodora – condição saturada	48
Tabela 4.8 – Modelos de regressão linear – Eucalipto Citriodora – condição seca ao ar	48
Tabela 4.9 – Modelos de regressão linear – Pinus elliottii – condição saturada	49
Tabela 4.10 – Modelos de regressão linear – Pinus elliottii – condição seca ao ar	49
Tabela 5.1 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira das espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vsat}$	61
Tabela 5.2 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliottii utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vsat}$	61
Tabela 5.3 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vsat}$	63

Tabela 5.4 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vsat}$	64
Tabela 5.5 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vse}$	65
Tabela 5.6 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vse}$	66
<hr/>	
Tabela 5.7 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliottii utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som $V_{vse}$	67
Tabela A1 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Cupiúba – condição saturada	76
Tabela A2 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Eucalipto Citriodora – condição saturada	77
Tabela A3 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Pinus elliottii – condição saturada	78
Tabela A4 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Cupiúba – condição seca ao ar	80
Tabela A5 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Eucalipto Citriodora – condição seca ao ar	81

Tabela A6 – Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-som em corpos-de-prova - Espécie Pinus elliottii – condição seca ao ar	83
Tabela A7 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Cupiúba – condição saturada	84
Tabela A8 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Eucalipto Citriodora – condição saturada	85
Tabela A9 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Pinus elliottii – condição saturada	87
Tabela A10 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Cupiúba – condição seca ao ar	88
Tabela A11 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Eucalipto Citriodora – condição seca ao ar	90
Tabela A12 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Pinus elliottii – condição seca ao ar	91

## Lista de Símbolos

$C_{LL}$  - constante elástica segundo o eixo longitudinal

$C_{LLc}$  – constante elástica segundo o eixo longitudinal obtida no ensaio de ultra-som em corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m, em  $\text{kN/cm}^2$

$C_{LLv}$  – constante elástica segundo o eixo longitudinal obtida no ensaio de ultra-som em vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m, em  $\text{kN/cm}^2$

---

$E_{c0}$  – módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras, em  $\text{kN/cm}^2$

$E_L$  - módulo de elasticidade longitudinal

$E_M$ - módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio à flexão estática (4 pontos), em  $\text{kN/cm}^2$

$f$  – frequência da onda de ultra-som, em kHz

$f_{c0}$  – resistência à compressão paralela às fibras, em  $\text{kN/cm}^2$

$I$  – vão livre da viga

$L$  – comprimento de corpo-de-prova ou peça estrutural

$V$  – velocidade de propagação da onda de ultra-som

$V_{LLc}$  – velocidade de propagação do ultra-som na direção longitudinal nos corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m, em m/s

$V_{LLv}$  - velocidade de propagação do ultra-som na direção longitudinal nas vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m, em m/s

$V_{vsat}$  – velocidade de propagação do ultra-som na direção longitudinal nas vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m na condição saturada, em m/s

$V_{vse}$  – velocidade de propagação do ultra-som na direção longitudinal nas vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m na condição seca ao ar, em m/s

$\lambda$  - comprimento de onda

---

$\rho$  - densidade do material

$\rho_{apa}$  – densidade aparente da madeira obtida conforme item B.6 da Norma NBR 7190/97

## Resumo

No Brasil, país que detém uma das maiores reservas florestais do planeta, a madeira é um material de construção cuja utilização ainda requer muita tecnologia, tanto no que se refere aos procedimentos de processamento quanto na aplicação. Um dos problemas enfrentados pela indústria madeireira é que o material madeira não é submetido à classificação e, portanto, não há certificação de qualidade nem tampouco de segurança quanto às suas propriedades mecânicas. Sendo assim, não se conhece, de maneira segura, as características da madeira e, portanto, seu emprego fica à mercê do empirismo. A Norma brasileira “Projeto de Estruturas de Madeira” - NBR 7190/97 prevê a caracterização de lotes de madeira através do ensaio de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m e classifica as peças segundo classes de resistência. Entretanto, a execução de tais ensaios nem sempre é possível, para o consumidor final ou para a indústria madeireira de transformação, perpetuando o problema do desconhecimento efetivo das características mecânicas da madeira produzida e/ou adquirida. O objetivo deste trabalho foi avaliar a existência de correlação entre resultados obtidos utilizando um método de ensaio não-destrutivo (END) - ultra-som - com aqueles obtidos por métodos tradicionais de obtenção de valores de resistência e rigidez em peças de madeira de dimensões normatizadas e de dimensões estruturais (ensaios estáticos destrutivos). Após ser verificada a correlação, em uma segunda etapa buscou-se propor um método de classificação de peças estruturais de madeira, através da velocidade de propagação de ondas longitudinais. Para atingir os objetivos citados, foram realizados ensaios estáticos de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova normatizados pela NBR 7190/97; ensaios à flexão estática em vigas de dimensões estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m, normatizados pela ASTM, e, também, ensaios utilizando equipamento de ultra-som. Os ensaios utilizando equipamento de ultra-som foram sempre realizados nas mesmas peças submetidas ao ensaio destrutivo, para que se pudesse correlacionar os resultados de maneira mais precisa, uma vez que a madeira, até mesmo dentro da mesma árvore, apresenta grande variabilidade de características. Três espécies foram utilizadas no trabalho: duas dicotiledôneas, Cupiúba (*Goupia glabra*) e Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e uma conífera, Pinus elliotii (*Pinus elliotii*). Tanto os corpos-de-prova de dimensões normatizadas, quanto as vigas de dimensões estruturais, foram ensaiadas em dois teores de umidade:

saturadas e secas ao ar (aproximadamente 12%). Os resultados obtidos demonstraram, estatisticamente, que o ultra-som pode ser utilizado como ferramenta para avaliar as propriedades mecânicas da madeira das três espécies estudadas, nos dois teores de umidade, bem como nos dois tipos de peça (vigas e corpos-de-prova) avaliados. Particularmente para as vigas de dimensões estruturais, as correlações entre a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal e o módulo de elasticidade à flexão estática foram altamente significativas, o que permitiu a proposição de faixas de velocidade associadas à classificação de peças estruturais que, na prática, permite que se associe a velocidade de propagação em peças recém-desdobradas e com alto teor de umidade, às propriedades mecânicas na condição seca ao ar. Dessa maneira, ficou evidenciado que o ensaio por ultra-som, por ser de fácil execução, de baixo custo e não-destrutivo, constitui-se numa tecnologia que pode ser transferida à indústria madeireira podendo ser, portanto, um instrumento imprescindível para o futuro da utilização da madeira no Brasil.

Palavras-chave : madeira; propriedades mecânicas; ensaio não-destrutivo; ultra-som

## Abstract

In Brazil, a country that retains one of the biggest forest reserves in the planet, wood is a building material whose utilization still requires a lot of technology, considering the processing procedures or application. One important problem that wood industry faces is that this material has not grading and there is neither quality certification nor safety on mechanical properties of the pieces. Thus, its characteristics are not surely known and their use are based on empiricism. The Brazilian Standard for Wood Structures Design NBR 7190/97 foresees the characterization of wood lots through compression tests parallel to grain in specimens with dimensions 0,05 x 0,05 x 0,15 m and the grading method of pieces by strength classes. However to realize these tests is not an easy task to the final costumer or to the wood industry, perpetuating the ignorance problem of the actual mechanical characteristics of the produced/acquired wood. The purpose of this research was to evaluate the existence of correlation between the results of a nondestructive test (ultrasound) and the results of traditional static methods used to obtain strength and rigidity values in normalized size and structural size pieces of wood. After that, this research proposed a grading method for structural size pieces of wood through the longitudinal ultrasound wave velocity. To reach the proposals, static tests of compression parallel to grain in specimens normalized by NBR 7190/97 were realized; bending tests in structural size beams according to ASTM and, ultrasound tests as well. To correlate the results with more accuracy, the ultrasound tests were realized in the same pieces used in the destructive tests because wood presents large variability of characteristics inside the same piece. Three species were studied in this research : two hardwoods – Cupiúba (*Goupia glabra*) and Eucalyptus Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) and one softwood – Pinus elliottii (*Pinus elliottii*). All the pieces, in normalized size and structural size, were tested in two moisture contents: saturated and air-dried. The results show, statistically, that ultrasound can be used as a good tool to evaluate the mechanical properties of wood in two sizes (beams and specimens) and the two moisture contents utilized. Specially for structural size beams, the correlations were highly significant between the longitudinal ultrasound wave velocity and the bending static Young's modulus and they waited for the opportunity to create velocity bands associated to structural size beams grading. For practical purposes, these bands permit the association of wave velocities in newly-sawed beams of

saturated wood with air-dried mechanical properties in these pieces. Thus, it is evident that, through a simple, low cost and nondestructive test, this technology can be transferred to wood industry and become an indispensable tool to the future of wood use in Brazil.

Keywords : wood; mechanical properties; nondestructive test; ultrasound.

## 1 – Introdução

A madeira é, ainda, um dos materiais de construção mais utilizados no Brasil.

Devido às suas dimensões continentais, o país ainda oferece recursos extrativos que até há algumas décadas pareciam inesgotáveis. Atualmente, sabe-se que espécies nativas muito utilizadas no passado estão hoje ameaçadas de extinção. Para preencher essa lacuna, buscou-se a utilização de espécies alternativas, que hoje suprem o mercado, embora o façam de forma desordenada.

Na construção civil a madeira é utilizada em forma de tábuas, vigas, caibros, sarrafos, ripas e laminados compensados. Seus principais empregos são fôrmas para concreto armado e estruturas para telhados. Para estes dois exemplos pode-se afirmar que o uso da madeira é intenso e sua utilização não perdeu espaço, mesmo com o advento de novas tecnologias e novos materiais.

Entretanto, no Brasil, a madeira é um material tratado tecnicamente com descaso. Apesar de ter um uso muito difundido, a madeira é pouco conhecida quando se trata da identificação anatômica e propriedades mecânicas.

Na maior parte das lojas de materiais de construção ou madeireiras, se desconhece as espécies comercializadas e, por conseqüência, suas propriedades.

O profissional que aplica a madeira em estruturas, via de regra, não tem controle sobre o material que emprega por não conhecê-lo adequadamente e, assim, o subestima.

A norma 7190/97 – “Projeto de Estruturas de Madeira” prevê a classificação de peças estruturais de madeira, dividindo-as em classes de resistência, conforme sejam as madeiras coníferas ou dicotiledôneas. No entanto, essa classificação deve ser realizada em laboratório especializado, utilizando-se de corpos-de-prova pequenos e isentos de defeitos obtidos conforme amostragem adequada. Ainda assim, a inclusão da avaliação das propriedades mecânicas da madeira por classes de resistência foi um grande avanço pois, embora seja ainda utópica em nossa realidade, ela aponta para a possibilidade de se projetar estruturas de madeira, não mais utilizando propriedades ligadas à espécie mas sim a padrões de resistência e rigidez. Fica o desafio ao meio científico brasileiro de encontrar maneiras de implantá-la e difundi-la, tornando a madeira um material de construção de uso simples e confiável como o

são o concreto e o aço.

O concreto e o aço são materiais normatizados, classificados por resistência e amplamente conhecidos do público consumidor. Todos aqueles que trabalham em obras conhecem o significado do termo “fck”, utilizado para o concreto, bem como a nomenclatura que caracteriza a resistência característica dos aços para concreto armado. Isto se dá, por serem esses materiais produzidos com controle tecnológico e, no caso do concreto, os traços determinantes da resistência são de domínio público há quase um século. Sabe-se que, para uma determinada quantidade de concreto fornecida pela usina, são retirados corpos-de-prova para o ensaio comprobatório de sua resistência. Isso confere ao fornecedor e ao consumidor uma garantia de qualidade e de controle de resistência do concreto empregado, aspecto cada dia mais importante para a sociedade.

Com o aço, a comprovação é mais direta. Em cada vergalhão acha-se inscrita sua resistência, certificada por um selo de garantia impresso pelo fabricante.

Com a madeira, a realidade é muito diferente, e existe um total desconhecimento das reais propriedades do material. Tanto fornecedores quanto consumidores ignoram as propriedades mecânicas da madeira comercializada e utilizada, tornando-a um material de terceira categoria em nossa sociedade.

A norma 7190/97, em seu item 6.4.8, prevê ensaios destrutivos para a caracterização de lotes de madeira para uso estrutural, utilizando ensaios de compressão paralela às fibras em, pelo menos, seis corpos-de-prova normatizados de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m.

Entretanto, apesar de existir a possibilidade de classificação de lotes por ensaios destrutivos, essa classificação, na prática, não existe. Um dos fatores que perpetuam a não existência dessa prática na construção civil está ligado, certamente, ao grau de dificuldade em implementá-lo. No Brasil existem poucos laboratórios especializados neste tipo de ensaio e, desmotivado pela complexidade em realizá-los, o consumidor despreza a importância da classificação das peças estruturais.

Há décadas, no hemisfério norte, tem-se pesquisado e implantado técnicas mais simples e de fácil aplicação para a determinação de propriedades físicas e mecânicas em diversos materiais. São os chamados Ensaio Não-Destrutivo (END). Dentre eles, os mais utilizados atualmente em peças estruturais de madeira, são: métodos de vibração - método de

ondas acústicas (acoustic emission – AE) e ultra-sônicos. Utilizando leis da Física é possível determinar-se valores de resistência e rigidez de um material sem destruí-lo ou afetá-lo.

Neste trabalho será demonstrada a viabilidade da utilização do ultra-som na determinação de propriedades de resistência e rigidez da madeira.

Por último, é importante salientar que a inserção de um método não-destrutivo para a avaliação de propriedades da madeira no Brasil é hoje, no mínimo, uma possibilidade ecologicamente necessária.

Diante das motivações expostas, o desenvolvimento deste trabalho buscou os objetivos:

- 
- a) Avaliar o comportamento e a possibilidade de aplicação do método do ultra-som em espécies de madeira crescidas no Brasil;
  - b) Verificar a existência de correlação entre os resultados obtidos utilizando o ultra-som (velocidade e constante dinâmica) com os resultados obtidos nos ensaios estáticos normatizados - resistência à compressão paralela ( $f_{c0}$ ) e módulo de elasticidade à compressão paralela e à flexão estática ( $E_{c0}$  e  $E_M$ ), em corpos-de-prova normatizados e em peças de dimensões estruturais de madeira das espécies Cupiúba (*Goupia glabra*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e Pinus elliotii (*Pinus elliotii*);
  - c) Propor, para as espécies estudadas, classes de rigidez utilizando a velocidade de propagação das ondas de ultra-som.

## 2 – Revisão Bibliográfica

### 2.1- Comportamento elástico da madeira

A madeira é um material anisotrópico e visco-elástico. Pode ser considerado homogêneo admitindo-se uma simetria segundo três eixos principais : longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T). A Figura 2.1 esquematiza esta ortotropia.

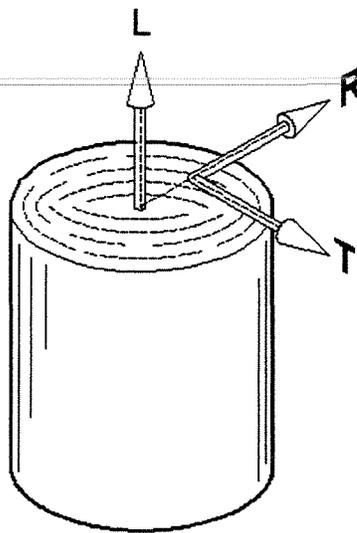


Figura 2.1 – Esquema da ortotropia da madeira com seus três eixos principais.

A Lei de Hooke, que explicita a relação entre tensões e deformações, aplicada em um corpo elástico, é escrita, na forma geral, por

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.1)$$

onde :

$\sigma_{ij}$  = Tensor de tensões;

$\epsilon_{ij}$  = Tensor de deformações específicas;

$C_{ijkl}$  = Matriz de rigidez do material, formada por trinta e seis constantes elásticas.

90 A 5 10 U

20 20 20 20 20 20

20 20 20 20 20 20

Para a madeira, um material ortotrópico, a presença de três planos de simetria reduz o número de constantes independentes de sua matriz de rigidez para nove constantes, pois pode-se considerar  $C_{RL} = C_{LR}$ ,  $C_{TL} = C_{LT}$  e  $C_{TR} = C_{RT}$ .

Assim, essa matriz pode ser escrita na forma :

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{LL} & C_{LR} & C_{LT} & 0 & 0 & 0 \\ C_{RL} & C_{RR} & C_{RT} & 0 & 0 & 0 \\ C_{TL} & C_{TR} & C_{TT} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LR} \end{pmatrix}$$

A equação (2.1) toma, então, o seguinte formato :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{LL} & C_{LR} & C_{LT} & 0 & 0 & 0 \\ C_{RL} & C_{RR} & C_{RT} & 0 & 0 & 0 \\ C_{TL} & C_{TR} & C_{TT} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{LL} \\ \epsilon_{RR} \\ \epsilon_{TT} \\ \epsilon_{RT} \\ \epsilon_{LT} \\ \epsilon_{LR} \end{pmatrix}$$

Seis módulos elásticos caracterizam um material ortotrópico, dos quais três ( $E_L$ ,  $E_R$  e  $E_T$ ), chamados módulos de Young, são a relação entre uma tensão normal e sua respectiva deformação, segundo os eixos principais, e três ( $G_{RL}$ ,  $G_{LT}$  e  $G_{TR}$ ) são a relação entre tensões de cisalhamento e suas respectivas deformações.

Esses seis módulos podem ser definidos como :

$$E_L = \sigma_L / \epsilon_L \quad ; \quad E_R = \sigma_R / \epsilon_R \quad ; \quad E_T = \sigma_T / \epsilon_T$$

$$G_{LR} = \sigma_{LR} / \epsilon_{LR} \quad ; \quad G_{LT} = \sigma_{LT} / \epsilon_{LT} \quad ; \quad G_{RT} = \sigma_{RT} / \epsilon_{RT}$$


---

São conhecidas como coeficientes de Poisson as relações :

$$\nu_{ij} = -\epsilon_j / \epsilon_i$$

onde  $\epsilon_j$  : deformação transversal em relação à carga aplicada;

$\epsilon_i$  : deformação axial em relação à carga aplicada.

Com isso, e partindo-se da outra forma na qual se pode exprimir a Lei de Hooke

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

na qual os termos  $S_{ijkl}$  são componentes da matriz de flexibilidade do material, chega-se a um conjunto de relações envolvendo os termos da matriz de rigidez  $C_{ij}$  e os termos da matriz de flexibilidade  $S_{ij}$ . São elas :

$$C_{LL} = (1 - \nu_{RT} \nu_{TR}) / E_R E_T S$$

$$C_{RR} = (1 - \nu_{TL} \nu_{LT}) / E_L E_T S$$

$$C_{TT} = (1 - \nu_{RL} \nu_{LR}) / E_L E_R S$$

$$C_{LR} = (v_{RL} + v_{RT} v_{TL}) / E_R E_T S$$

$$C_{RT} = (v_{TR} + v_{TL} v_{LR}) / E_T E_L S$$

$$C_{LT} = (v_{LT} + v_{LR} v_{RT}) / E_L E_R S$$

$$S = (1 - v_{LR} v_{RL} - v_{RT} v_{TR} - v_{LT} v_{TL} - 2v_{RL} v_{TR} v_{LT}) / E_L E_R E_T$$

De onde se pode obter a expressão completa para  $C_{LL}$  :

$$C_{LL} = E_L [ (1 - v_{RT} v_{TR}) / (1 - v_{LR} v_{RL} - v_{RT} v_{TR} - v_{LT} v_{TL} - 2v_{RL} v_{TR} v_{LT}) ] \quad (2.2)$$

BODIG e JAYNE, citados por GOULET e LAFOREST (1987), obtiveram coeficientes de Poisson médios para coníferas e dicotiledôneas (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1 – Coeficientes de Poisson Médios para Coníferas e Dicotiledôneas (BODIG e JAYNE, 1982)**

Coeficiente de Poisson	Coníferas	Dicotiledôneas
$v_{LR}$	0,37	0,37
$v_{LT}$	0,42	0,50
$v_{RT}$	0,47	0,67
$v_{TR}$	0,35	0,33
$v_{RL}$	0,041	0,044
$v_{TL}$	0,033	0,027

Substituindo-se os valores da Tabela 2.1 na Equação (2.2) podem ser obtidas as seguintes relações :

Para as dicotiledôneas :  $C_{LL} \approx 1,06 E_L$

Para as coníferas :  $C_{LL} \approx 1,05 E_L$

Particularmente, no caso deste trabalho, torna-se interessante a dedução de  $C_{LL}$ , visto que este termo pode ser obtido com a aplicação, em peças de madeira, do ultra-som na direção longitudinal.

A equação fundamental para a determinação da constante elástica  $C_{LL}$  por meio do ultra-som, dada pela segunda lei de Newton, é :

$$C_{LL} = \rho V^2 \quad (2.3)$$

Segundo BUCUR (1984), em peças com comprimento longitudinal muitas vezes superior às dimensões de sua seção transversal, negligencia-se os efeitos dos coeficientes de Poisson ( $\nu$ ), chegando-se à:

$$C_{LL} \approx E_L$$

Segundo HERZIG (1992), o módulo dinâmico  $C_{LL}$  traduz as características elásticas das fibras pois utiliza-se da propagação de energia entre elas, enquanto que o módulo estático  $E_L$  é mais função das propriedades elásticas tridimensionais do corpo-de-prova por inteiro (efeito de Poisson), razão pela qual  $E_L$  é quase sempre menor que  $C_{LL}$ .

## 2.2 – Propagação da onda ultra-sônica em um meio elástico

A dedução precisa da segunda lei de Newton exige cálculo infinitesimal, mas ela também pode ser demonstrada de uma maneira mais simples.

Seja uma barra prismática e homogênea de seção transversal  $A$ , densidade  $\rho$  e módulo de elasticidade  $E$ .

Percutindo-se a barra longitudinalmente em uma de suas extremidades, produz-se uma compressão que se propaga ao longo da barra, constituindo uma onda longitudinal.

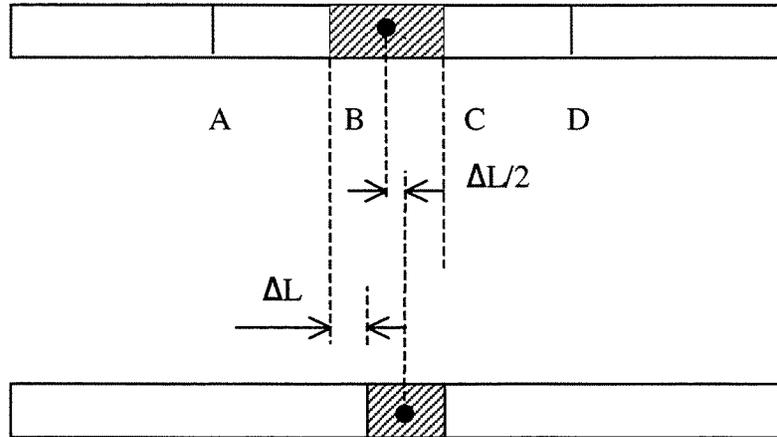


Figura 2.2 – Representação esquemática da propagação de uma onda longitudinal de compressão numa barra.

Considere-se, da barra da Figura 2.2, três elementos contíguos AB, BC e CD, de comprimentos  $L$  iguais. Seja  $t$  o instante em que a compressão atinge a seção B e seja  $\Delta t$  o intervalo de tempo durante o qual a compressão se propaga da seção B para a seção C.

No intervalo de tempo  $\Delta t$ , a força  $F$  que o elemento AB exerce no elemento BC, produz no mesmo o deslocamento  $\Delta L$ , que obedece a Lei de Hooke :

$$\Delta L = FL / EA \quad (2.4)$$

No mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ , a onda de compressão se propaga de B a C com a velocidade  $V$ , tendo-se :

$$\Delta t = L / V \quad (2.5)$$

A massa do elemento BC é  $m = AL\rho$ , que sob a ação da força  $F$  experimenta a aceleração  $\alpha$ , dada por:

$$\alpha = F / m = F / AL\rho \quad (2.6)$$

Com essa aceleração, o centro de massa do elemento BC, ocupando sempre o centro geométrico desse elemento, faz no intervalo de tempo  $\Delta t$  o percurso  $\Delta L/2$ . Assim, tem-se:

$$\Delta L/2 = (\alpha / 2) (\Delta t)^2$$

$$\therefore \Delta L = \alpha (\Delta t)^2 \quad (2.7)$$

Aplicando-se (2.4), (2.5) e (2.6) em (2.7) resulta a equação:

---

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.8)$$

O elemento BC age de igual modo sobre o elemento CD e este, reagindo sobre BC, reconduz o centro de massa à sua posição primitiva.

FREDERICK (1965) indicou que, para que a equação (2.8) não seja afetada, o meio no qual a onda se propaga deve ser infinito. Na prática, diz o autor, quando a barra possuir comprimento muitas vezes superior ao comprimento da onda que a perturba, a influência das condições de contorno são negligenciadas. Isso não acontece, por exemplo, numa barra circular, cujo diâmetro tenha mesma ordem de grandeza do comprimento da onda.

Segundo este mesmo autor, para que a equação (2.8) seja, então, válida, é necessário que a barra tenha comprimento infinito, ou muitas vezes superior ao comprimento de onda, e diâmetro da ordem de 1/10 do comprimento da onda que nela se propaga.

### **2.3 – O uso do ultra-som para determinação de constantes elásticas da madeira**

O ultra-som tem demonstrado ser, em várias partes do mundo, um valioso instrumento para avaliação e determinação de propriedades de muitas espécies de madeira.

Tem-se relatado o emprego do ultra-som tanto em avaliações da qualidade de peças industrializadas, quanto em determinações de propriedades físicas e mecânicas, seja na madeira serrada, em produtos à base de madeira ou ainda em árvores em pé.

O manuseio dos equipamentos de ultra-som é simples e seu custo não é excessivo, o que tem possibilitado seu uso, notadamente na Europa.

Paralelamente a isso, cresce o interesse mundial em torno de ensaios não- destrutivos para determinação de propriedades físicas e mecânicas de toda sorte de materiais, o que se coaduna com a visão deste novo século, que será pautado pelos cuidados com a preservação ambiental.

A hipótese fundamental de utilização de ensaios não-destrutivos na madeira foi elaborada por JAYNE em 1959, citado por ROSS e PELLERIN (1994). Sua proposta foi de que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia, na utilização de métodos não-destrutivos em determinado material, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático desse material.

Como consequência, relações matemáticas entre essas propriedades e o comportamento estático, de rigidez e de resistência, podem ser alcançadas através da análise estatística de regressão.

Vários autores, desde então, vêm estudando o método de ultra-som na determinação de constantes elásticas da madeira. BUCUR (1984), além de propor a base teórica de utilização do ultra-som para determinação de constantes elásticas da madeira, através de “*carottes de sondage*” (pequenos corpos-de-prova cilíndricos), citou LEE (1958), BURMESTER (1965) e Mc DONALD (1978), como pesquisadores que se utilizaram da velocidade de propagação da onda de ultra-som na madeira para determinação de constantes elásticas.

WAUBKE (1981), na Alemanha, foi o primeiro a obter resultados de classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som.

Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos à compressão foram comparados por CHUDNOFF et al., citados por HERZIG (1992), utilizando corpos-de-prova provenientes de postes de 26 espécies de madeira diferentes, entre coníferas e dicotiledôneas, com teores de umidade variando entre 35 e 95%. Na média, o módulo dinâmico foi 39,2% superior ao módulo estático para as coníferas, e 57% superior para as dicotiledôneas.

SANDOZ (1990) propôs, na Suíça, um método de classificação de peças estruturais, de acordo com a Norma SIA 164, utilizando faixas de velocidade de ultra-som.

HERZIG (1992) estudou a avaliação do módulo de Young da espécie *Épinette*, do Canadá, através do ultra-som, utilizando também *carottes de sondage*.

STEIGER (1996) propôs a classificação de peças estruturais de espécies suíças (pinhos) através de faixas de velocidades de ultra-som, segundo as classes de resistência da Norma EN 338.

BARTHOLOMEU, GONÇALVES e HERNÁNDEZ (1998) estudaram as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos à compressão paralela às fibras em corpos-de-prova das espécies Angico-preto (*Anadenanthera macrocarpa*), Peroba-rosa (*Aspidosperma polineuron*) e *Pinus elliottii* (*Pinus elliottii*) na condição seca ao ar, utilizando um equipamento experimental de ultra-som operando na frequência de 1 MHz.

GONÇALVES e BARTHOLOMEU (2000) estudaram as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmico e à flexão estática por 04 pontos em vigas de dimensões estruturais na condição saturada das espécies Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e *Pinus elliottii*, utilizando um equipamento de ultra-som de frequência de 45 kHz.

OLIVEIRA (2001) estudou as correlações entre os módulos de elasticidade dinâmico e estáticos à compressão paralela e à flexão, e também as correlações entre o módulo de elasticidade dinâmico e as tensões de ruptura (MOR) e  $f_{c0}$  em corpos-de-prova e vigas de dimensões estruturais. As espécies analisadas foram Cupiúba (*Goupia glabra*), Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e Eucalipto Citriodora com teor de umidade de 12%. Para este trabalho a autora utilizou, para os corpos-de-prova, um equipamento de ultra-som operando à uma frequência de 45 kHz.

#### **2.4 – Fatores que afetam a propagação do ultra-som na madeira**

A madeira é um material biológico e anisotrópico, possuidor de características físicas que tornam peculiar a propagação das ondas ultra-sônicas.

Utilizando a madeira como meio nas mais variadas situações, vários autores estudaram os efeitos desta propagação. A seguir, serão citados os fatores mais significativos para o embasamento do presente trabalho.

### 2.4.1 – Teor de Umidade

Da mesma forma que o teor de umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira nos ensaios estáticos, ele o faz nas propriedades mecânicas via ensaios dinâmicos.

A velocidade de propagação da onda ultra-sônica decresce consideravelmente com o aumento do teor de umidade do corpo-de-prova, até o ponto de saturação das fibras.

A partir deste valor, a velocidade tende a estabilizar-se e tornar-se praticamente constante.

SAKAI et al., citados por BUCUR (1995), estudaram a variação da velocidade longitudinal do ultra-som em função de vários teores de umidade, em corpos-de-prova da espécie *Metasequoia* (*Metasequoia glyptostroboides*), originando a Figura 2.3.

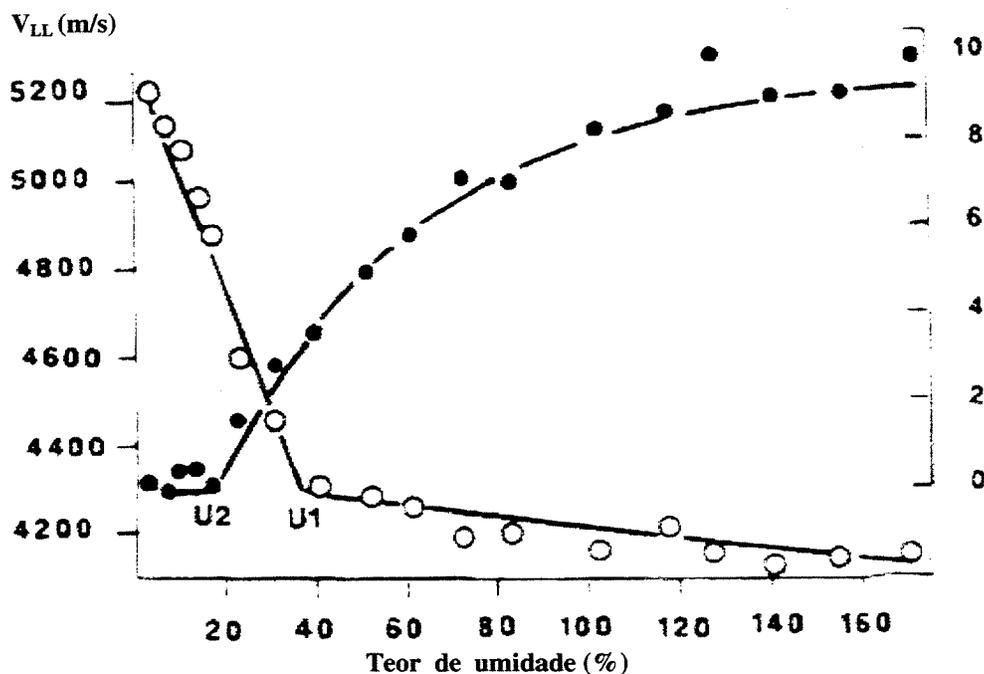


Fig. 2.3 – Variação da velocidade longitudinal de ultra-som (m/s) em corpos-de-prova da espécie *Metasequoia*, em função do teor de umidade (Curva U1). Variação dos valores de atenuação das ondas ultra-sônicas (em dB), em função do teor de umidade (Curva U2) (SAKAI et al., apud BUCUR, (1995)).

Observando-se a Figura 2.3, nota-se claramente que, para a espécie adotada, a

velocidade do ultra-som decresceu 21%, indo de 5200 para 4300 m/s, entre os teores de 0% e 38%.

Nessa faixa de teor de umidade, há uma quantidade variável de água de impregnação presente na madeira, até um valor chamado de ponto de saturação das fibras (PSF), que, nesse caso, correspondeu a um teor de umidade de 38%. A partir do PSF, as células da madeira preenchem-se com água livre, e a velocidade do ultra-som tende a estabilizar-se pois a presença da água em excesso aumenta a atenuação das ondas ultra-sonoras.

De 0% de umidade até o PSF, a água de impregnação presente confere baixa atenuação às ondas e não prejudica substancialmente a transferência de energia ultra-sônica de célula à célula, conferindo à velocidade uma condição não perturbada.

---

GERHARDS, apud HERZIG (1992), estudou a variação da velocidade de propagação, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático na flexão, de 05 peças de *Sweetgum (Liquidambar styraciflua)*, de seção nominal 0,051 x 0,102 e 2,438 m de comprimento, com teores de umidade variando entre 15 e 150%. O autor constatou uma diminuição da velocidade de 14% entre os teores de umidade de 15 e 50%, e uma diminuição de 6% entre os teores de 50 a 150%.

No cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, dado pela Equação (2.3), utiliza-se a densidade aparente ( $\rho$ ). Quando a peça de madeira possui teor de umidade acima do PSF, a água livre influi consideravelmente na densidade aparente, superestimando o valor de  $C_{LL}$ .

Esse fenômeno ficou evidenciado pelo estudo de SAKAI et al.(1990), apud BUCUR (1995), no qual nota-se claramente a ascensão das curvas de  $C_{LL}$  após o PSF (Figura 2.4).

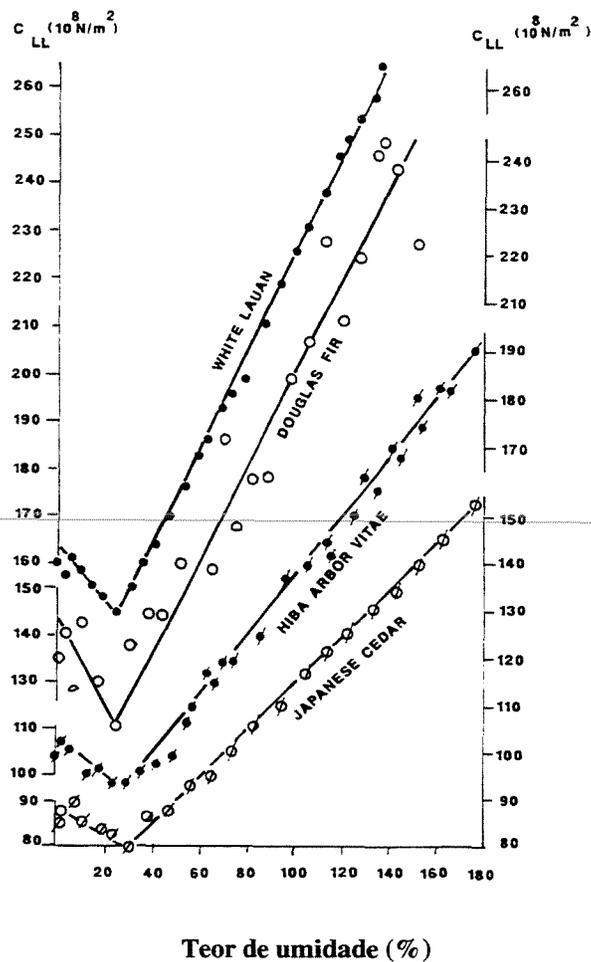


Figura 2.4 – Variação da constante elástica  $C_{LL}$  em função do teor de umidade, para várias espécies, (SAKAI et al.(1990), apud BUCUR (1995)).

Considerando o efeito da densidade aparente sobre  $C_{LL}$ , pode-se supor que uma variação de 5% no teor de umidade, próximo do teor seco ao ar, acarretará uma variação de aproximadamente 5,3% na velocidade e de 4,9% em  $C_{LL}$  (HERZIG,1992).

#### 2.4.2 – Dimensões da seção transversal e comprimento do corpo-de-prova ou peça

Em virtude de a madeira constituir-se num material visco-elástico, o pulso ultrassônico que se propaga em seu interior é decomposto em componentes frequenciais, que

se propagam em velocidades que lhe são próprias (HERZIG,1992).

As equações gerais apresentadas nos estudos sobre propagação de ondas em meio sólido partem do princípio ideal de que o comprimento da onda é muito superior às dimensões da seção transversal do corpo pelo qual essa onda atravessa. Esse aspecto está demonstrado no item 2.2.

Na prática, quando não se tem uma situação ideal, tais princípios são aplicados em peças de madeira de seção comercial fazendo-se uma aproximação da teoria.

BUCUR (1984) estudou a variação da velocidade de propagação da onda de ultrassom, em função da variação da seção transversal, em corpos-de-prova de *Sapin Douglas* (*Abies alba*) de 0,30 m de comprimento e com relação base/altura da seção transversal variando entre 1 e 14.

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 2.5.

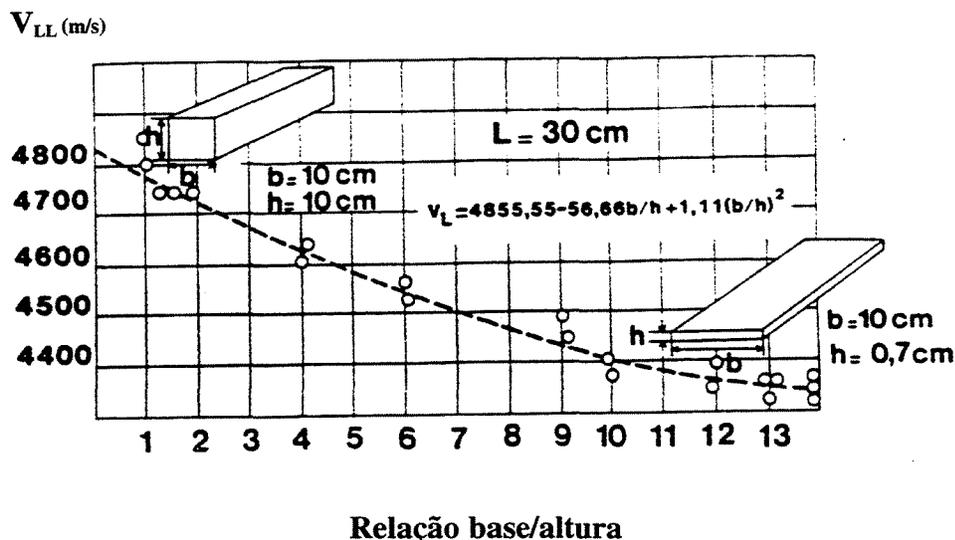


Figura 2.5 – Variação da velocidade de propagação (m/s) de ondas longitudinais em função da relação base/altura em corpos-de-prova de *Sapin Douglas* (BUCUR,1984)

Através da curva apresentada observa-se, nas velocidades, uma diferença de 12% entre a relação  $b/h=1$  e a relação  $b/h=14$ . Baseado nesses resultados, para as relações  $b/h=1$  e  $b/h=2$ , utilizadas nesta Tese, nos corpos-de-prova e nas vigas estruturais respectivamente, a diferença de velocidades deveria situar-se entre 1 e 2%.

Um segundo fator preponderante na variação da velocidade longitudinal é a relação  $L/\lambda$ , onde

$L$  = comprimento do corpo-de-prova ou peça estrutural;

$\lambda$  = comprimento de onda.

O comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = V / f \quad (2.9)$$

onde  $V$  = velocidade de propagação da onda de ultra-som;

$f$  = frequência da onda de ultra-som.

BUCUR (1984) analisou a variação de velocidade de ondas longitudinais em função da relação  $L/\lambda$ , em corpos-de-prova de *Hêtre* (*Fagus sylvatica*), obtendo os resultados apresentados na Figura. 2.6.

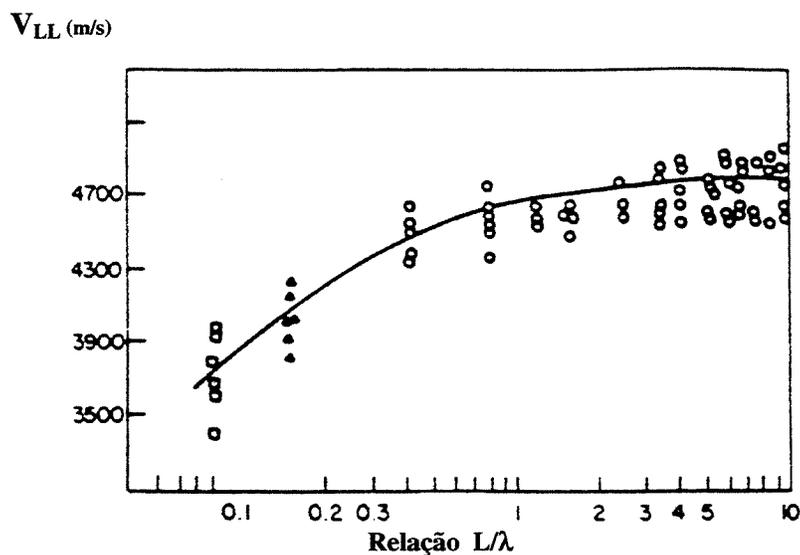


Fig. 2.6 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação  $L/\lambda$  em corpos-de-prova de *Hêtre* (BUCUR, 1984)

Pela Figura 2.6, nota-se que a taxa mais acentuada de variação da velocidade longitudinal ocorre entre as relações  $L/\lambda = 0,1$  e  $L/\lambda = 1$ , ou seja, uma variação de

aproximadamente 30%, enquanto que entre as relações  $L/\lambda = 1$  e  $L/\lambda = 10$ , a variação fica em 2,6%.

Nesta Tese, a relação  $L/\lambda$ , para os corpos-de-prova, ficou aproximadamente em 1,36 e, para as vigas estruturais, em aproximadamente 18.

### 2.4.3 – Freqüência

A influência da freqüência na propagação de ondas ultra-sônicas em peças de madeira é dependente, sobretudo, das dimensões dos corpos-de-prova.

Alguns autores estudaram os efeitos das variações de freqüência, chegando a resultados aparentemente contraditórios.

HERZIG (1992) ensaiou corpos-de-prova de seção transversal de 0,025 x 0,025 m e de comprimento de 0,005; 0,01; 0,015; 0,025; 0,05; 0,075 e 0,100 m, da espécie *Épinette* (*Picea spp.*). Para o desenvolvimento do trabalho utilizou freqüências de 1 e 5 MHz, em ondas longitudinais.

Seus resultados demonstraram que, até um comprimento de 0,05 m, a velocidade aumenta com o aumento da freqüência, confirmando o fato da madeira constituir-se num material visco-elástico. Segundo KOLSKY, apud HERZIG (1992), no caso dos sólidos visco-elásticos - a madeira, por exemplo- as freqüências elevadas se propagam mais rapidamente que as baixas freqüências.

A partir do comprimento de 0,05 m as velocidades obtidas na freqüência de 5 MHz foram inferiores àquelas obtidas na freqüência de 1 MHz, o que pode ser explicado pelo fenômeno da atenuação, que perturba a transmissão dos sinais e provoca uma diminuição da velocidade.

Ensaando “*carottes de sondage*” de 0,005 m de diâmetro, HERZIG (1992) verificou que a velocidade aumenta com o aumento da freqüência.

BUCUR (1984) estudou a variação da velocidade de propagação do ultra-som em “*carottes de sondage*” da espécie *Hêtre*, de 0,005m de diâmetro, utilizando as freqüências de 80 kHz e 2 MHz.

Os resultados encontrados pela autora mostraram que houve um aumento da velocidade longitudinal decorrente do aumento da freqüência. Para 80 kHz, a

velocidade foi de 4150 m/s e à 2 MHz, foi de 4665 m/s, constituindo-se num aumento de 12%.

Em contrapartida, MISHIRO e MIWA (1994), ensaiando corpos-de-prova de 0,10 m de comprimento, das espécies *Spruce (Picea)* e *Katsura (Cercidiphyllum japonicum)*, não encontraram variação de velocidade numa faixa de freqüências entre 50 kHz e 5 MHz.

Nesta Tese utilizou-se um equipamento de emissão de ondas de ultra-som de freqüência fixa de 45 kHz.

#### 2.4.4 – Densidade aparente

O fenômeno de transferência de energia por meio de uma onda ultra-sônica está mais associado à estrutura celular da madeira do que à sua densidade aparente.

MISHIRO (1996) estudou os efeitos da densidade na velocidade longitudinal de ondas ultra-sônicas, em 7 espécies de coníferas e 12 de dicotiledôneas, utilizando cubos de 0,03 m de aresta e um equipamento com freqüência de 2,5 MHz.

Os resultados mostraram que, em alguns casos, as velocidades aumentaram ou diminuíram com o aumento da densidade aparente. Em outros casos, as velocidades eram independentes da densidade.

Esse autor relatou que BURMESTER apresentou resultados para a espécie *Limba (Terminalia superba)*, mostrando que a velocidade longitudinal diminuiu com o aumento da densidade, mas o módulo dinâmico ( $C_{LL}$ ) aumentou com o aumento de densidade.

Na mesma referência há o relato de BARDUCCI e PASQUALINI de ensaios relacionando velocidade do som e densidade aparente. Para as coníferas estes autores mostraram resultados em que as velocidades decresceram com o aumento da densidade, enquanto que as dicotiledôneas apresentaram independência entre essas duas variáveis.

De uma maneira geral, para todas as espécies analisadas,  $C_{LL}$  cresceu com o aumento da densidade mas, quando tomadas isoladamente, as coníferas apresentaram independência entre  $C_{LL}$  e densidade.

Nesta Tese utilizaram-se duas espécies de dicotiledôneas (densidades aparentes de 1,04 g/cm<sup>3</sup> e 0,86 g/cm<sup>3</sup> na condição seca ao ar) e uma espécie de conífera (densidade aparente de 0,51 g/cm<sup>3</sup>, na condição seca ao ar) e os resultados mostraram pequeno aumento

da velocidade com o aumento da densidade aparente.

#### **2.4.5 - Classificação de peças estruturais de madeira utilizando o ultra-som**

Como já citado anteriormente, a utilização do ultra-som tem sido crescente em pesquisas realizadas sobre o comportamento elástico da madeira.

Alguns autores utilizaram essa técnica visando implementar um método de classificação de peças estruturais de madeira, segundo classes de resistência.

De acordo com estes trabalhos, a madeira passaria a ser classificada a partir de seu desdobro em serraria, de maneira semelhante à procedida para o concreto e o aço.

Os principais trabalhos nessa linha foram apresentados por:

##### **2.4.5.1 - WAUBKE (1981)**

Esse autor apresentou resultados de uma pesquisa desenvolvida na Hochschule der Bundeswehr München, Alemanha, sobre as correlações entre velocidade do ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico, módulo de elasticidade estático à flexão em 4 pontos e tensão de ruptura à flexão, utilizando 138 vigas da espécie *Fichte (Picea abies)*, de dimensões 0,08 x 0,08 x 4,50 m.

Os teores de umidade utilizados foram: saturado, 20% e seco ao ar (aproximadamente 13%).

A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos resultados dos coeficientes de correlação obtidos pelo autor.

Tabela 2.2 – Valores dos coeficientes de correlação  $r$  encontrados por Waubke analisando 138 vigas de *Fichte* (1981)

Correlação	Condição saturada	Teor de um:20%	Teor de um:13%	Qualquer teor
$V_d \times E_s$	0,52	0,77	0,63	0,71
$V_d \times \sigma_R$	0,71	0,58	0,33	0,67
$V_d \times E_s$	0,78	0,78	0,63	0,77
$V_d \times \sigma_R$	0,78	0,60	0,32	0,67
$E_s \times E_d$	0,88	0,80	0,68	0,83
$E_d \times \sigma_R$	0,83	0,58	0,33	-

onde  $V_d^*$  = Velocidade longitudinal do ultra-som à uma frequência de 42 kHz;  
 $E_s$  = Módulo de elasticidade na flexão estática utilizando ensaio de 4 pontos;  
 $\sigma_R$  = Tensão de ruptura na flexão estática;  
 $E_d$  = Módulo de elasticidade dinâmico, calculado conforme Equação (2.8).

Em 1988, o mesmo autor publicou um novo trabalho no qual utilizou 134 vigas da mesma espécie, *Fichte*, sendo:

68 peças de seção nominal 0,14 x 0,16 m e comprimento 4,50 m;

66 peças de seção nominal 0,10 x 0,12 m e comprimento 4,50 m.

As vigas foram retiradas de duas regiões da Alemanha, uma montanhosa e outra plana e baixa. Os teores de umidade utilizados foram: saturado (recém-cortadas), 20% e 10%.

Para obter as correlações, o autor ensaiou as vigas com teores de umidade de 20% e 10% na flexão estática utilizando ensaio de 4 pontos, com distância entre apoios de 4,00 m, sem atingir a ruptura. Posteriormente, ensaiou as vigas com teor de umidade de 10% pelo mesmo processo, levando-as à ruptura. Paralelamente, ensaiou as mesmas vigas utilizando o ultra-som, obtendo as velocidades longitudinais de propagação das ondas.

Foram feitas, também, 16 medidas de velocidades superficiais de ultra-som em cada viga, a cada 0,20 m, com o objetivo de se detectar possíveis defeitos nas mesmas.

O resumo dos coeficientes de correlação obtidos pode ser visto na Tabela 2.3.

\*  $V_d$  é a velocidade do ultra-som na direção longitudinal, equivalente à  $V_{LL}$ .

Tabela 2.3 – Valores dos coeficientes de correlação  $r$  encontrados por Waubke no estudo de 134 vigas de *Fichte* (1988).

Correlação	Seção 0,14 x 0,16 m	Seção 0,10 x 0,12 m
$*Vd^2 \times **E_s$	0,60	0,66
$*Vd^2 \times ***E_s$	0,54	0,63
$*Vd^2 \times ***\sigma_R$	0,41	0,38
$*E_d \times **E_s$	0,83	0,66
$*E_d \times ***E_s$	0,76	0,63
$*E_d \times ***\sigma_R$	0,56	0,37
$**Vd^2 \times **E_s$	0,60	0,66
$**Vd^2 \times ***E_s$	0,58	0,64
$**Vd^2 \times ***\sigma_R$	0,43	0,29
$**E_d \times **E_s$	0,84	0,78
$**E_d \times ***E_s$	0,82	0,77
$**E_d \times ***\sigma_R$	0,65	0,43
$***Vd^2 \times ***E_s$	0,68	0,73
$***Vd^2 \times ***\sigma_R$	0,47	0,45
$***E_d \times ***E_s$	0,82	0,76
$***E_d \times ***\sigma_R$	0,53	0,46

onde :  $Vd$  = Velocidade longitudinal do ultra-som à frequência de 42 kHz;

$E_s$  = Módulo de elasticidade na flexão estática por 4 pontos;

$\sigma_R$  = Tensão de ruptura na flexão estática por 4 pontos;

$E_d$  = Módulo de elasticidade dinâmico, calculado conforme Equação 2.8.

\*  $\sigma_R$  e MOR são denominações para a tensão de ruptura à flexão estática, equivalentes à  $f_m$  da Norma NBR 7190/97.

- \* Madeira saturada
- \*\* Teor de umidade 20%
- \*\*\* Teor de umidade 10%

O autor salientou que os valores de  $r$  nas correlações entre  $V^2$  e  $E_s$  não foram tão altos quanto se desejaria, porém estiveram dentro de níveis de confiabilidade estatística, e na mesma ordem de grandeza daqueles obtidos através de outros métodos de classificação.

Os resultados foram obtidos para uma única espécie de madeira, utilizando-se seções maciças e retangulares e, segundo o autor, necessitam de comprovação para outras espécies e outras seções transversais.

Apesar disso, os resultados demonstraram que :

- A classificação de peças estruturais por ultra-som é muito rápida e segura. Ainda é possível utilizar o Método quando se tem teores de umidade diferentes e pode-se correlacionar os resultados dinâmicos com estáticos.
- A tecnologia do uso do ultra-som na classificação da madeira ainda pode ser muito desenvolvida, pois o ultra-som é baseado num fenômeno físico. Até mesmo antes do corte é possível selecionar as toras, o que economicamente é muito bom. O método de classificação por ultra-som pode ser uma alternativa aos métodos de classificação tradicionais.

#### 2.4.5.2 – SANDOZ (1990)

Em Tese apresentada à École Polytechnique Fédérale de Lausanne, para obtenção do título de Doutor em Ciências Técnicas, o autor utilizou o método de ultra-som para classificação de peças estruturais das espécies *Sapin (Abies alba)* e *Epicéa (Picea abies)*.

Foram ensaiadas 192 vigas da espécie *Sapin* e 391 vigas da espécie *Epicéa*, todas com um teor de umidade de 12%.

Dessas vigas, 192 possuíam seção transversal de 0,10 x 0,14 m; 109 seção 0,10 x 0,18 m e 282 seção 0,10 x 0,22 m.

As vigas foram ensaiadas à flexão estática por 4 pontos, segundo a Norma ISO 8375 - "Solid Timber in Structural Sizes", com vão de 18 vezes a altura da seção transversal,

obtendo-se o módulo de elasticidade (MOE) e, posteriormente, levadas à ruptura, obtendo-se a tensão de ruptura (MOR).

Paralelamente o autor ensaiou as vigas com o ultra-som, determinando as velocidades de propagação das ondas longitudinais. Para isso, utilizou-se de um equipamento operando à frequência de 40 kHz.

O objetivo dos experimentos deste autor foi correlacionar velocidades longitudinais nas vigas com as respectivas tensões de ruptura (MOR) e, dessa forma, construir faixas de velocidades compatíveis com as classes de resistência da norma suíça SIA 164 (1982/1992).

As classes de resistência dessa norma são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. – Classes de resistência da norma SIA 164

<b>Classe de resistência</b>	<b>Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura à Compressão (MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura à Tração (MPa)</b>
<b>FK I</b>	12,0	10,0	10,0
<b>FK II</b>	10,0	8,5	8,5
<b>FK III</b>	7,0	6,0	-

Com os resultados obtidos, o autor construiu um gráfico correlacionando a velocidade longitudinal do ultra-som nas vigas com o MOR. Este gráfico (Figura 2.7) foi a base utilizada para a delimitação das faixas de velocidade correspondentes às classes de resistência da norma SIA 164.

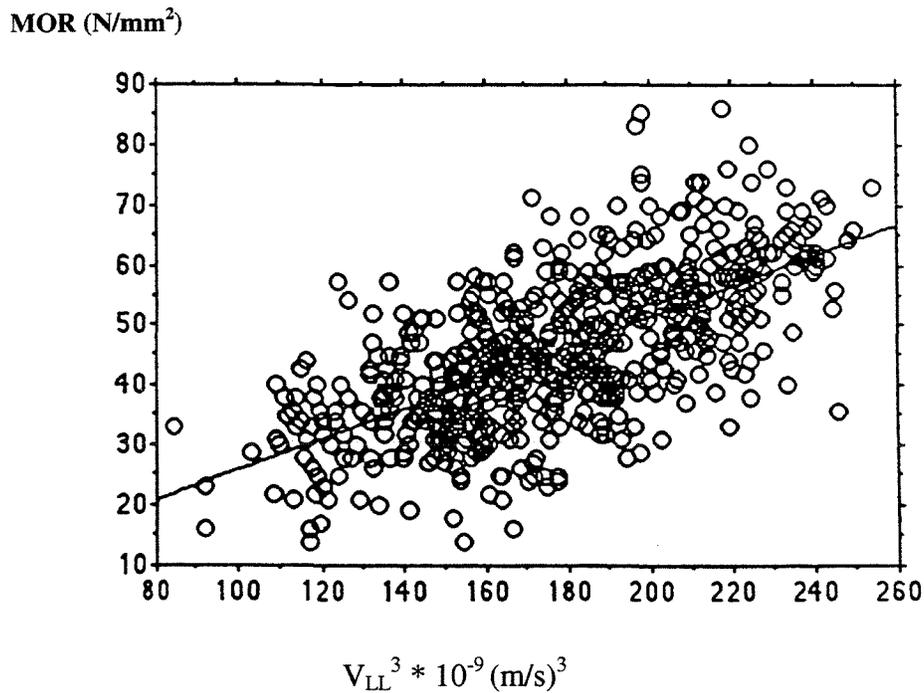


Figura 2.7 – Curva de correlação entre a velocidade longitudinal do ultra-som e a tensão de ruptura MOR para vigas das espécies *Sapin* e *Epicéa* (SANDOZ, 1990)

Utilizando a equação correspondente à curva característica, rebaixada

$$\text{MOR} = 0,2544 V_{LL}^3 10^{-9} - 15,1 \quad (2.10)$$

que é a curva obtida na regressão linear dos pontos representados na Figura 2.7, subtraída de um produto estatístico, o autor definiu, então, as faixas de velocidade com as quais se pôde classificar as vigas estruturais das espécies estudadas (Tabela 2.5). A curva característica representa o limite inferior para o qual há 95% de probabilidade das peças analisadas atingirem resistência igual ou superior à especificada para determinada classe.

Tabela 2.5 – Faixa de velocidades para classificação de peças estruturais das espécies *Sapin* e *Epicéa* com teor de umidade de 12%, de acordo com as classes de resistência da norma SIA 164, segundo SANDOZ(1990).

Classe	Faixa de velocidades (m/s)
Classe 0	$V_{LL} \geq 5800$
Classe I	$5600 \leq V_{LL} < 5800$
Classe II	$5350 \leq V_{LL} < 5600$
Classe III	$V_{LL} < 5350$

Comparando-se as Tabelas 2.4 e 2.5 nota-se a criação de uma nova classe (Classe 0). Até então, ela não era contemplada na norma SIA 164, que preconizava a classificação visual das peças. A criação da Classe 0 foi viabilizada pela utilização do método de ultra-som, claramente de maior acuidade que o método visual.

#### 2.4.5.3 – STEIGER (1996)

Em 1991 passou a vigorar, em toda a Europa, o Eurocode, conjunto de normas técnicas lançado com o objetivo de padronizar os procedimentos de utilização de materiais utilizados em estrutura, nas construções europeias.

Desse modo, a norma da qual se utilizou Sandoz, em seu trabalho de 1990 passou a não mais vigorar. Em seu lugar veio a Euronorm EN 338 (março de 1994).

Em maio de 1996, STEIGER apresentou seu trabalho “Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege, Zug, Druck un kombinierter M/N-Beanspruchung”, junto à Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, para obtenção do título de Doutor em Ciências Técnicas.

Esse trabalho, a exemplo dos trabalhos de WAUBKE e SANDOZ, utilizou o método de ultra-som para classificação de peças estruturais da espécie *Fichte* (*Picea abies*).

Foram ensaiadas à flexão estática por 4 pontos, e levadas à ruptura, 334 vigas com teor de umidade de 12% e com seção transversal 0,06 x 0,12 m e 0,08 x 0,16 m, tendo como vão entre apoios o equivalente a 18 vezes a altura da seção transversal.

Foram obtidos resultados do módulo de elasticidade à flexão ( $E_M$ ), tensão de

ruptura ( $f_M$ ) e, através do ensaio de ultra-som, obteve-se a velocidade de propagação longitudinal.

O objetivo do trabalho foi correlacionar esses resultados, com vistas ao enquadramento de faixas de velocidades do ultra-som nas classes de resistência da norma EN 338.

A correlação utilizada pelo autor para determinar as faixas de velocidades, correspondentes aos módulos de elasticidade da norma EN 338, foi entre a velocidade longitudinal  $V_\sigma$  e o módulo de elasticidade à flexão ( $E_M$ ).

Do gráfico da Figura 2.8 foi extraída a equação utilizada para a classificação

$$E_M = 6,16 V_\sigma - 22984 \quad (2.11)$$

$E_M$  (N/mm<sup>2</sup>)

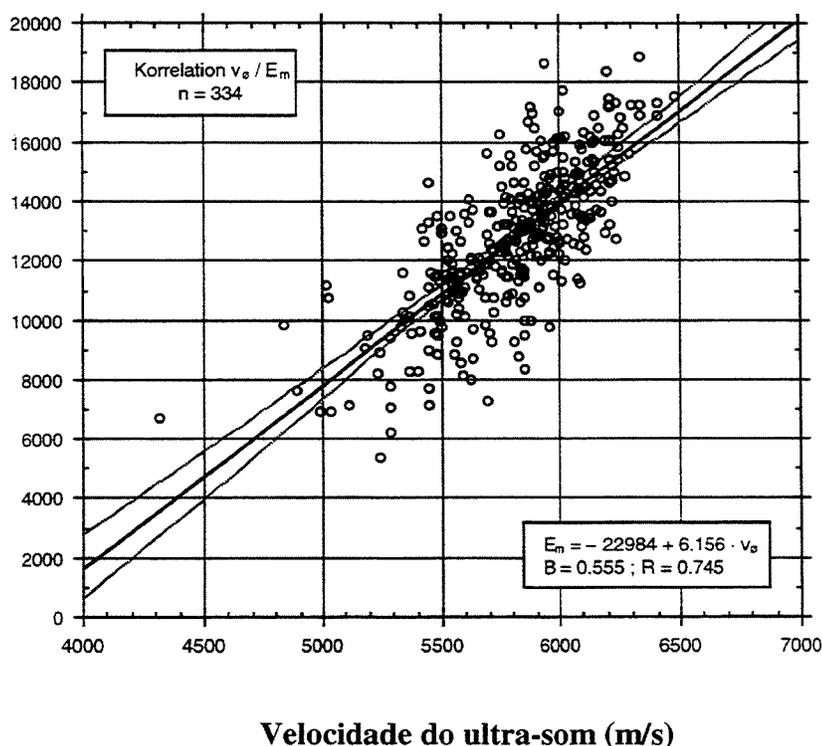


Figura 2.8 – Correlação entre velocidade do ultra-som e módulo de elasticidade estático à flexão ( $E_M$ ) para vigas estruturais da espécie *fichte*, com teor de umidade de 12%, segundo STEIGER (1996).

As classes de resistência da norma EN 338 preconizam os módulos de elasticidade à flexão conforme a Tabela 2.6.

Tabela 2.6.- Valores de  $E_M$  médios para as classes de resistência da norma EN 338 – teor de umidade 12%.

<b>Classe</b>	<b>C18</b>	<b>C22</b>	<b>C27</b>	<b>C35</b>	<b>C40</b>
<b><math>E_{M,médio}(MPa)</math></b>	9000	10000	12000	13000	14000

Utilizando-se os valores da Tabela 2.6 e a equação (2.11), o autor encontrou as seguintes faixas de velocidades, utilizadas para classificação de peças estruturais da espécie *Fichte* (Tabela 2.7):

Tabela 2.7 – Faixas de velocidades para classificação de peças estruturais da espécie *Fichte*, com 12% de umidade, de acordo com a norma EN 338, segundo STEIGER(1996).

<b>Classe</b>	<b>Faixa de velocidades (m/s)</b>
<b>HC (Hors Classe)</b>	$V\emptyset < 5100$
<b>C18</b>	$5100 \leq V\emptyset < 5250$
<b>C22</b>	$5250 \leq V\emptyset < 5500$
<b>C27</b>	$5500 \leq V\emptyset < 5750$
<b>C35</b>	$5750 \leq V\emptyset < 5900$
<b>C40</b>	$V\emptyset \geq 5900$

---

\*  $V\emptyset$  é a velocidade do ultra-som na direção longitudinal, equivalente à  $V_{LL}$ .

### **3. Material e Métodos**

#### 3.1- Material e Equipamentos

##### 3.1.1 Material

As espécies adotadas neste trabalho foram o Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*), a Cupiúba (*Goupia glabra*) e o Pinus elliottii (*Pinus elliottii*). As espécies citadas possuíam densidade aparente média, na condição seca ao ar (teor de umidade de aproximadamente 12%), de 1,04 g/cm<sup>3</sup>; 0,86 g/cm<sup>3</sup> e 0,51 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A adoção dessas espécies foi feita visando a obtenção de intervalo de densidade que caracterizasse espécies pertencentes a diferentes Classes de Resistência, definidas pela NBR 7190/97: Projeto de Estruturas de Madeira.

Os ensaios foram realizados utilizando-se corpos-de-prova de seção nominal (0,05 x 0,05) m e comprimento 0,15 m e vigas de seção nominal (0,06 x 0,12) m e comprimento 2,50 m, nas condições verde e seca ao ar, para as três espécies adotadas.

Para as espécies Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii foram ensaiados 100 corpos-de-prova e 50 vigas, e para a espécie Cupiúba foram ensaiados 108 corpos-de-prova e 54 vigas.

##### 3.1.2 Equipamentos

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Estufa de secagem e esterilização marca FANEM modelo 315-SE;
- Balança eletrônica de precisão marca MARTE modelo AS 1000, sensibilidade de 0,01 g;
- Máquina Universal de Ensaio marca Amsler capacidade 250 kN;
- Relógios comparadores de sensibilidade de 0,001mm e 0,01 mm;
- Máquina Universal de Ensaio marca EMIC capacidade 100 kN;
- Equipamento emissor de ultra-som marca Steinkamp BP-5;
- Transdutores de 45 kHz de frequência, com faces planas.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Retirada das vigas e dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova e as vigas foram retirados de toras obtidas em duas serrarias localizadas no município de Itatiba, Estado de S. Paulo.

#### 3.2.1.1 Cupiúba

Uma tora de Cupiúba de, aproximadamente, 0,90 m de diâmetro e 6 m de comprimento, foi selecionada para a retirada das vigas e dos corpos-de-prova.

A árvore, da qual a tora foi retirada, foi abatida na floresta em agosto de 1999, na cidade de Sinop, Estado de Mato Grosso, tendo chegado à Serraria Flaiban, município de Itatiba/SP, em 13 de agosto de 1999, na forma de pranchas de 0,06 m de espessura. A obtenção das pranchas foi realizada conforme mostra a Figura 3.1.

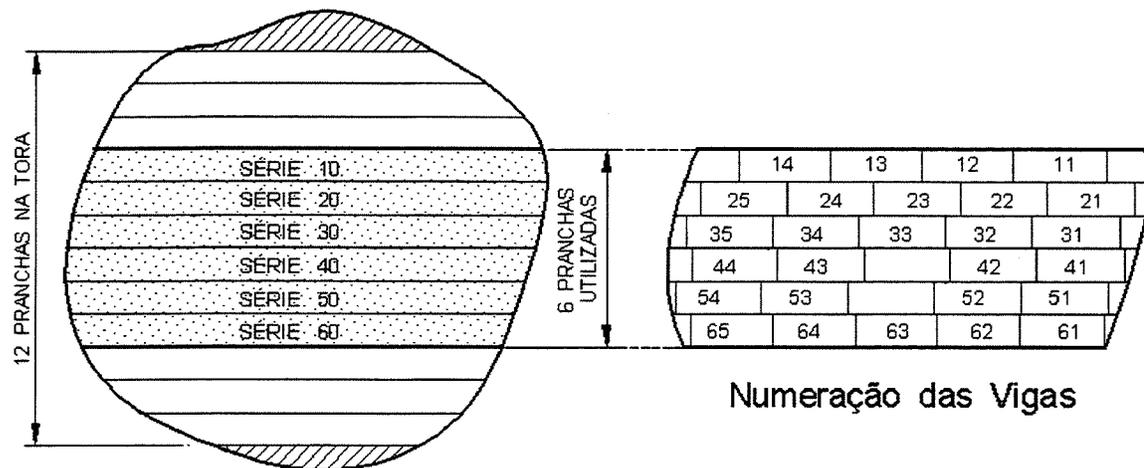


Figura 3.1 – Representação esquemática da retirada das pranchas de Cupiúba

O desdobro das pranchas em vigas de dimensões nominais de (0,06 x 0,12) m e 5 m de comprimento, ocorreu no dia 18 de agosto de 1999, aproximadamente 15 dias após o

abate da árvore na floresta. A madeira, portanto, apresentava teor de umidade acima do ponto de saturação.

As vigas foram então cortadas ao meio, em seu comprimento, dando origem a duas vigas de dimensões nominais (0,06 x 0,12) m e 2,5 m de comprimento totalizando 54 vigas, às quais foram atribuídas identificações para facilitar a visualização do posicionamento das peças na tora de origem. Essas identificações foram constituídas por números (de 11 a 65) seguidos das letras A ou B. A letra A referia-se a viga retirada da base e a letra B à viga retirada do topo da árvore, conforme ilustra a Figura 3.2.

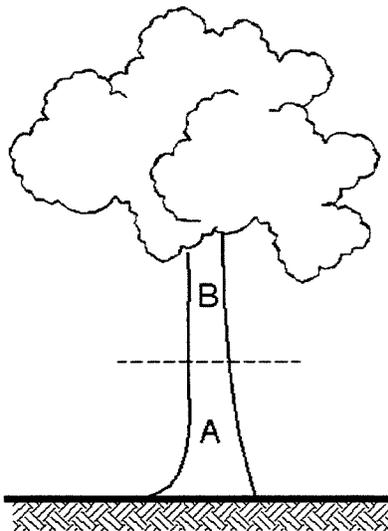


Figura 3.2 – Esquema indicando o posicionamento das vigas na tora de origem.

De cada uma das vigas foram retirados dois corpos-de-prova de dimensões nominais de 0,05 x 0,05 x 0,15 m, para os ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e corpos-de-prova de dimensões 0,02 x 0,03 x 0,05 m para a determinação do teor de umidade (Figura 3.3).

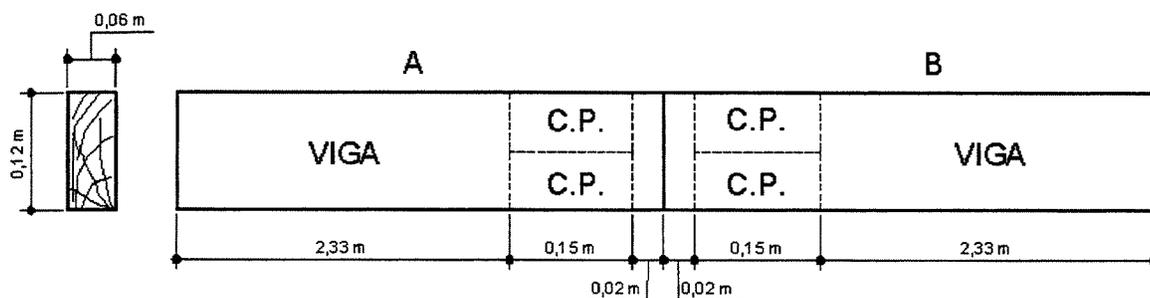


Figura 3.3 - Esquema de retirada dos corpos-de-prova e das vigas de Cupiúba, de Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii.

### 3.2.1.2 – Eucalipto Citriodora

A tora de Eucalipto Citriodora, selecionada para a retirada das vigas, foi adquirida na Serraria Flaiban, na cidade de Itatiba/SP. Essa tora estava estocada no depósito dessa empresa, em secagem ao ar livre, há aproximadamente 3 anos. A tora era procedente da região do Loteamento Alphaville, em Campinas/SP, e possuía um diâmetro aproximado de 0,85 m e comprimento de 5,00 m. O desdobro dessa tora em 25 vigas de seção nominal (0,06 x 0,12) m e comprimento de 5,00 m se deu conforme ilustra a Figura 3.4, e notou-se claramente que as vigas apresentavam um teor de umidade acima do ponto de saturação.

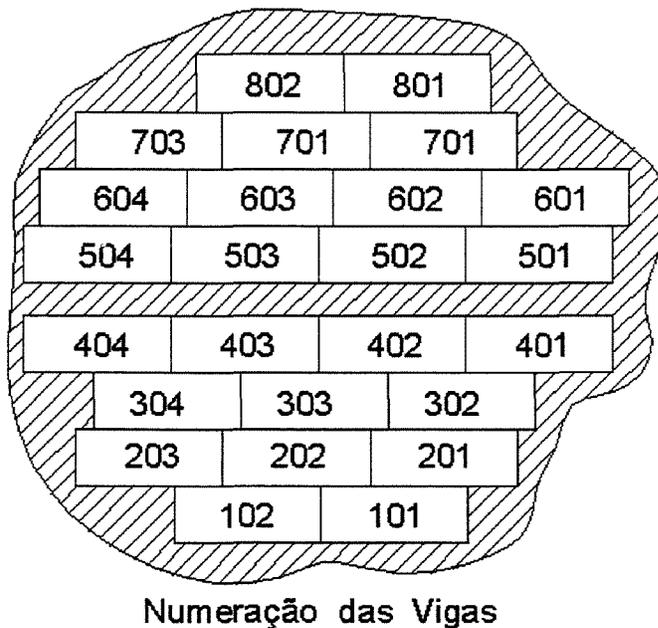


Figura 3.4 - Representação esquemática do desdobro da tora de Eucalipto Citriodora

Após o desdobro, as vigas foram divididas ao meio, em seu comprimento, originando 50 vigas com seção nominal (0,06 x 0,12) m e comprimento de 2,5 m, as quais foram identificadas por numeração (de 101 a 802) seguida das letras A e B. A numeração indica a posição da peça na tora e as letras indicam a posição da peça na base e no fuste da árvore, respectivamente.

Da parte interna de cada uma das vigas foram retirados dois corpos-de-prova de dimensões nominais de 0,05 x 0,05 x 0,15 m para os ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e corpos-de-prova de dimensões nominais de 0,02 x 0,03 x 0,05 m para a determinação do teor de umidade (Figura 3.3).

### 3.2.1.3 – Pinus elliottii

Para a obtenção das vigas de Pinus elliottii foram utilizadas onze (11) toras. As toras foram originadas do abate de árvores localizadas no Bairro Maracanã, município de Jarinú, Estado de S.Paulo, em 20 de abril de 1999, chegando à Serraria Fagundes, cidade de Itatiba/SP, em 04 de maio de 1999. O desdobro das toras, visando a obtenção de vigas de seção nominal (0,06 x 0,12) m e comprimento de 5,00 m, foi realizado após alguns dias. Desta maneira, todas as vigas apresentaram teor de umidade acima do ponto de saturação.

Analisando-se os anéis de crescimento das toras foi possível avaliar a idade das árvores. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dessas observações.

Tabela 3.1 – Idade aproximada das toras de Pinus elliottii, por contagem dos anéis de crescimento, e quantidade de vigas retiradas de cada tora

<b>Tora</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>Quantidade de Vigas</b>
10	15	2
20	15	2
30	13	3
40	17	3
50	13	3
60	15	2
70	20	2
80	14	2
90	17	2
100	17	2
110	16	2

As 25 vigas iniciais foram cortadas ao meio, em seu comprimento, para a obtenção de peças com comprimento de 2,50 m. Essas vigas receberam uma identificação composta por um número seguido da letra A ou B. O decimal indica a tora utilizada, a unidade a viga originada dentro da tora e a letra a posição da viga na árvore, sendo a letra A indicativa da base da árvore e a letra B indicativa de seu topo.

De cada uma das 50 vigas de seção nominal (0,06 x 0,12)m e de comprimento aproximado 2,5 m, foram retirados 2 corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m para os ensaios mecânico de compressão paralela às fibras e corpos-de-prova de dimensões 0,02 x 0,03 x 0,05 m para a determinação do teor de umidade (Figura 3.3).

### **3.2.2 - Ensaio mecânicos**

#### **3.2.2.1 - Ensaio de Compressão Paralela às Fibras**

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado para a determinação da resistência à compressão paralela ( $f_{c0}$ ) e do módulo de elasticidade à compressão paralela ( $E_{c0}$ ). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras do Departamento de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (LaMEM/SET/EESC- USP), seguindo a metodologia da NBR 7190/97, anexo B-8.

Nessa etapa foram ensaiados 108 corpos-de-prova de Cupiúba (54 na condição saturada e 54 na condição seca ao ar); 100 corpos-de-prova de Eucalipto Citriodora (50 na condição saturada e 50 na condição seca ao ar) e 100 corpos-de-prova de Pinus elliottii (50 na condição saturada e 50 na condição seca ao ar). Os corpos-de-prova possuíam dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 0,15 m, conforme especificado na NBR 7190/97.

#### **3.2.2.2 - Ensaio de Flexão Estática**

A Norma Brasileira NBR 7190/97 não contempla o ensaio de flexão estática em peças estruturais. Em sua seção B.14, a Norma regulamenta apenas ensaios utilizando corpos-de-prova de dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 1,15 m. Tendo em vista que o

propósito do trabalho era a obtenção de parâmetros em peças comerciais, optou-se por se seguir, nessa etapa, as recomendações da Norma ASTM D 198 – 84 “Standard Methods of Static Tests of Timber in Structural Sizes”, que normatiza esse tipo de ensaio em peças estruturais.

Visando adequar as condições do Laboratório de Estruturas da Universidade S. Francisco, em Itatiba, Estado de São Paulo, para a execução dos ensaios, as vigas foram ensaiadas na posição de menor inércia. Isso permitiu a obtenção da relação vão- livre (l) / altura da viga (h) maior que 21, ou seja, as vigas foram ensaiadas com vão de 144 cm, o que corresponde a 24 vezes a altura (h).

A carga aplicada pelo pistão da máquina de ensaio foi suportada por uma peça metálica de grande rigidez (configurando rigidez infinita), a qual, por sua vez, transmitia o carregamento à viga de madeira, de forma que o carregamento fosse aplicado nos terços do vão (Figura 3.5).

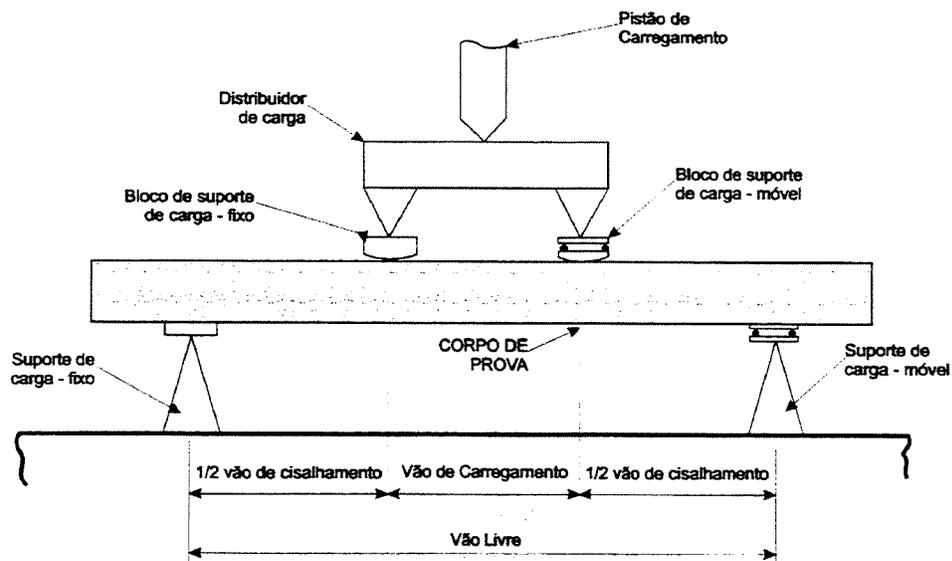


Figura 3.5 - Esquema de ensaio de flexão estática segundo a Norma ASTM D 198 – 84.

Para cada viga foram realizadas 3 (três) repetições do ensaio. Em cada repetição um mínimo de 6 (seis) leituras de carga x deformação foram realizadas, conforme recomenda a Norma. As cargas foram aplicadas dentro dos limites de 10% e 50% das tensões admitidas

como de ruptura para as espécies adotadas e teores de umidade utilizados, garantindo-se deformações dentro do limite elástico das peças.

A medição dos deslocamentos, no centro da vão das vigas, foi realizada utilizando-se relógio comparador de sensibilidade de 0,01 mm.

O cálculo do módulo de elasticidade à flexão ( $E_M$ ) foi realizado utilizando-se a equação:

$$E_M = \frac{Pa(3l^2 - 4a^2)}{4bh^3 f} \quad (3.1)$$

Onde: P = carga aplicada pelo pistão da máquina de ensaio;

a = 1/3 do vão da viga ;

l = vão da viga ;

b = base da seção transversal da viga;

h = altura da seção transversal da viga;

f = deslocamento vertical em L/2.

A Figura 3.6 ilustra a realização dos ensaios à flexão estática.

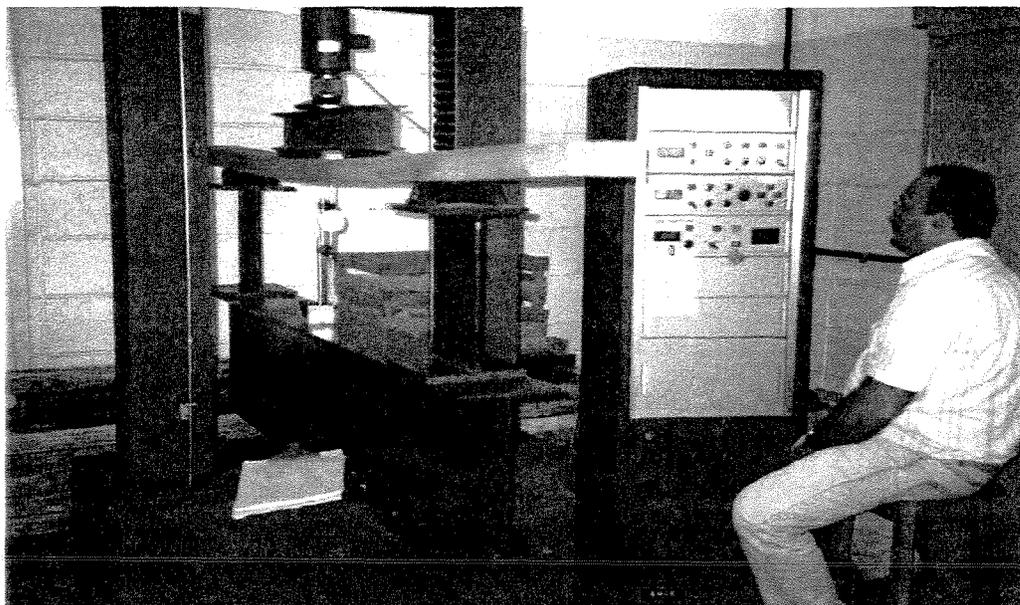


Figura 3.6 – Ensaio à flexão estática (4 pontos)

### 3.2.3 Ensaaios Não-Destrutivos Utilizando Equipamento de Ultra-Som

O equipamento utilizado neste trabalho foi o Steinkamp BP-5, de fabricação alemã (Figura 3.7). A frequência de trabalho desse equipamento é de 45 kHz. O equipamento utiliza dois transdutores piezelétricos ajustados nesta frequência. Sua precisão, segundo o fabricante, é de 0,001%. Isto significa que, nas faixas de velocidades utilizadas neste trabalho (3.000 a 5.000 m/s), a incerteza foi de, aproximadamente, 3 a 5 cm/s.

Os transdutores que se acoplam ao equipamento funcionam tanto como emissor quanto como receptor das ondas ultra-sônicas.

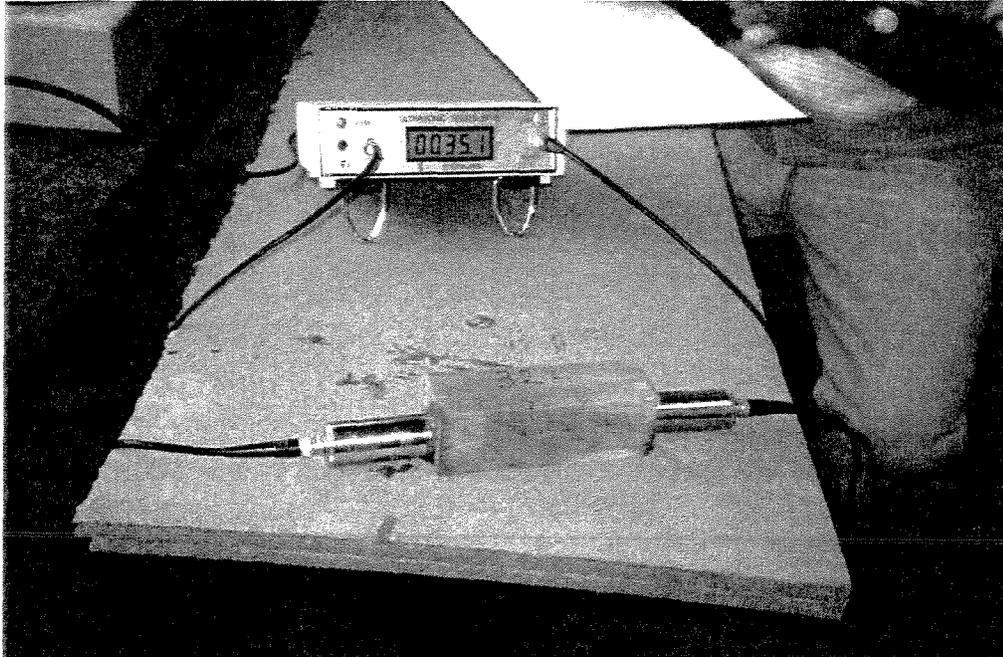


Figura 3.7 – O equipamento de ultra-som Steinkamp BP5

Imediatamente antes da realização do ensaio, aplicou-se uma fina camada de gel medicinal às faces dos transdutores de faces planas, evitando-se o problema ocasionado na interface corpo-de-prova transdutor, conforme menciona a literatura. Uma leve pressão foi exercida para o acoplamento do transdutor ao corpo-de-prova. O equipamento fez, então, a leitura do tempo (t), em microssegundos, necessário para que a onda ultra-sônica atravessasse a peça de madeira e fosse recebida pelo transdutor de recepção. Com o comprimento (L) percorrido pela onda a velocidade de propagação foi calculada por:

$$V = L/t \quad (\text{m/s}) \quad (3.2)$$

As medições do tempo de propagação das ondas, nas vigas, foram realizadas em três pontos da seção transversal, conforme indicado na Figura 3.8. O tempo final considerado foi, para todos os ensaios, o valor intermediário (entre o maior e o menor valor). No caso dos corpos-de-prova de 0,05 x 0,05 x 0,15 m, a leitura do tempo de propagação da onda foi realizada apenas no centro da seção transversal, visto que os transdutores possuem diâmetro de 0,03 m. A Figura 3.9 apresenta uma foto obtida durante o ensaio da viga.

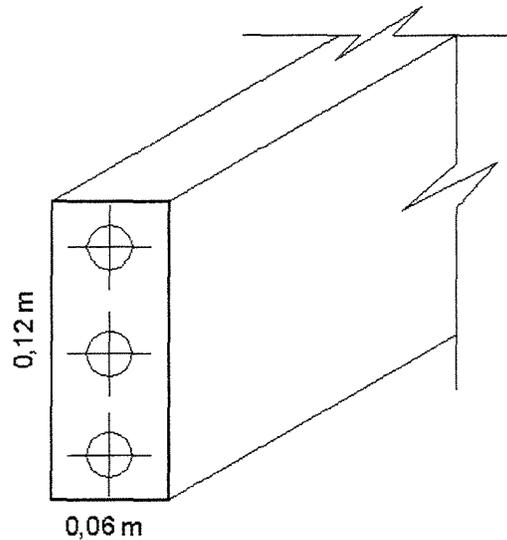


Figura 3.8- Representação da localização dos pontos de medição do tempo de propagação da onda de ultra-som nas vigas.

Após a realização dos ensaios, foi calculada, para cada viga, a constante dinâmica  $C_{LLV}$ , e, para cada corpo-de-prova, a constante dinâmica  $C_{LLc}$ , utilizando-se a equação:

$$C_{LLV,c} = \rho V_{LLV,c}^2 10^{-4} \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (3.3)$$

onde:  $\rho$  = densidade aparente da madeira em  $\text{g/cm}^3$  ;

$V_{LLV}$  = velocidade de propagação da onda na direção longitudinal (paralela às fibras) nas vigas de dimensões estruturais, em m/s;

$V_{LLc}$  = velocidade de propagação da onda na direção longitudinal (paralela às fibras), em corpos-de-prova de  $0,05 \times 0,05 \times 0,15$  m, em m/s.

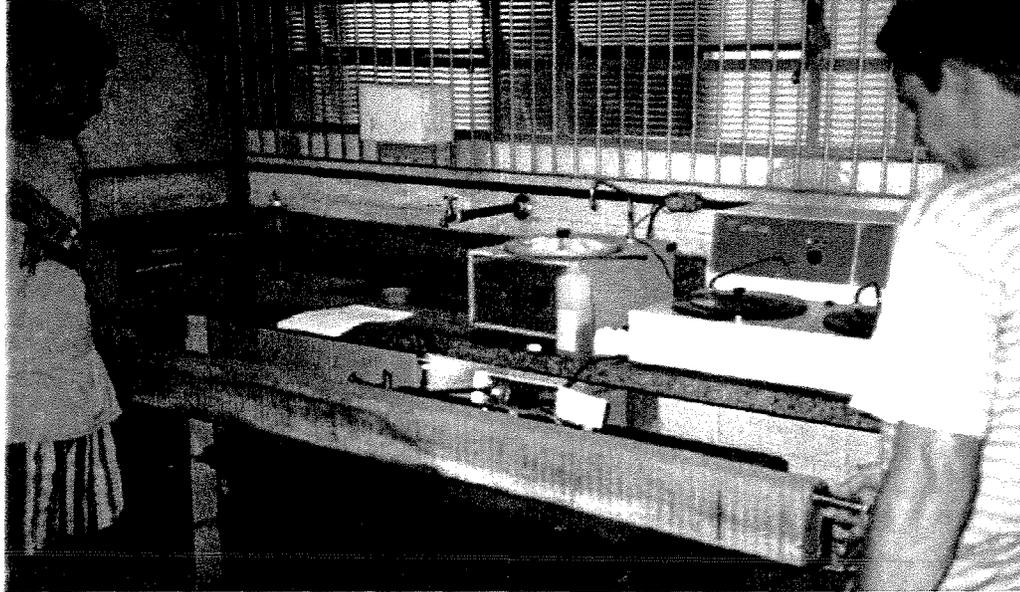


Figura 3.9 - Ensaio da viga utilizando equipamento de ultra-som

De acordo com conceitos apresentados na Revisão Bibliográfica, a constante dinâmica  $C_{LL}$  pode ser assumida, para fins práticos, como sendo o Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_d$ ). Esse módulo, por sua vez, pode ser correlacionado com o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela ( $E_{c0}$ ) e com o Módulo de Elasticidade à Flexão Estática ( $E_M$ ).

3.2.4 Condicionamento dos corpos-de-prova e das vigas nas condições saturada e seca ao ar

Conforme a descrição contida no item 3.2.1, as vigas e corpos-de-prova das espécies Cupiúba, *Pinus elliottii* e Eucalipto *Citriodora* estavam na condição saturada, visto que haviam sido recém-desdobradas das toras.

Imediatamente após os desdobros das toras em vigas, e destas em vigas menores e corpos-de-prova nas dimensões apropriadas para os ensaios, procedeu-se à determinação de seus teores de umidade (condição saturada). As vigas e corpos-de-prova foram mantidos nessa condição e imediatamente ensaiados.

Após a etapa de realização dos ensaios na condição saturada, os corpos-de-prova e as vigas passaram, durante o tempo necessário, por um processo de secagem natural, em ambiente coberto e bem ventilado, até atingirem a umidade de equilíbrio de 12%. Durante a secagem foram tomados cuidados especiais no armazenamento das peças, através de um empilhamento adequado, de maneira que fossem evitados defeitos de secagem. O acompanhamento da secagem foi realizado utilizando-se amostras de controle, de dimensões 0,02 x 0,03 x 0,05 m, para a verificação da umidade das peças.

De acordo com os procedimentos do Anexo B5 da NBR 7190/97 foi determinada a umidade inicial das amostras de controle. Com a umidade inicial das amostras de controle e a massa inicial (saturada) de cada viga e de cada corpo-de-prova, foram estimadas as massas secas previstas de cada viga e de cada corpo-de-prova, na umidade de 12%. Pesagens sucessivas foram sendo realizadas até que as vigas e os corpos-de-prova atingissem a massa estimada.

### 3.3 – Análise Estatística

Para a análise dos resultados obtidos nos ensaios e para a avaliação das correlações entre os ensaios destrutivos e não-destrutivos, foi adotada uma seqüência de análise estatística.

O primeiro passo foi a análise dos modelos de regressão, para a escolha das variáveis de maior interesse para o estudo. Após essa etapa, buscou-se correlacionar essas variáveis, visando a proposição de intervalos de velocidade para a classificação de peças estruturais de madeira, das três espécies utilizadas.

A análise das correlações foi realizada com o objetivo de se obter um modelo estatístico que melhor descrevesse a relação entre as variáveis. Para isso, os modelos de regressão linear passaram por etapas de avaliação buscando-se:

- 1- Valor de coeficiente de correlação ( $r$ ) significativa. No caso das amostras utilizadas nesse trabalho,  $r > 0,2875$  para um nível de significância de 5% e  $r > 0,3721$  para um nível de significância de 1%, segundo MILLS (1952);
- 2- Distribuição de resíduos aleatória (sem tendência);

- 3- Valor de  $F$  superior ao valor crítico (no caso das amostras utilizadas neste trabalho,  $F_{crit} = 7,35$  ao nível de significância de 1%);
- 4- Coeficiente de variação da regressão inferior a 15%;
- 5- Distribuição normal das variáveis.

As variáveis adotadas foram aquelas que permitiam correlacionar os resultados dos ensaios utilizando o ultra-som, com os resultados dos ensaios estáticos tradicionais, ou seja, a velocidade de propagação do ultra-som com  $f_{c0}$  e  $E_{c0}$  nos corpos-de-prova, e a velocidade de propagação do ultra-som com  $E_M$  nas vigas de tamanho estrutural.

Procurou-se, também, correlacionar as constantes dinâmicas  $C_{LLc}$  ou  $C_{LLv}$  com os módulos de elasticidade estáticos  $E_{c0}$  e  $E_M$ , visto que as constantes dinâmicas envolvem a densidade do material, o que pôde contribuir para uma melhor adequação do modelo.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o Programa Estatístico Minitab13, que possibilitou realizar todas as verificações citadas.

#### 4.- Resultados

Utilizando-se a metodologia detalhada no Capítulo 3, foram obtidos os resultados de densidade aparente ( $\rho_{\text{apa}}$ ), velocidade de propagação da onda na direção longitudinal em corpos-de-prova ( $V_{\text{LLc}}$ ), velocidade de propagação da onda na direção longitudinal em vigas ( $V_{\text{LLv}}$ ), constante dinâmica para o ensaio não destrutivo no corpo-de-prova ( $C_{\text{LLc}}$ ), constante dinâmica para o ensaio não-destrutivo na viga ( $C_{\text{LLv}}$ ), módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_{\text{c0}}$ ), resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{\text{c0}}$ ) e módulo de elasticidade à flexão estática por 04 pontos ( $E_{\text{M}}$ ).

Os resultados obtidos em todos os ensaios são apresentados no Anexo I. Para facilidade de visualização do conjunto de resultados esses valores são apresentados em tabelas nas quais são apresentados os valores da média e do coeficiente de variação (Tabelas 4.1 a 4.4).

Tabela 4.1 Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em corpos-de-prova na condição saturada.

<b>Espécie</b>		$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLc}}$ (m/s)	$C_{\text{LLc}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Cupiúba (n=54)	<b>Média</b>	1,025	4421	2003	1361	3,69
	<b>CV</b>	2,41	3,05	8,26	22,9	13,0
Eucalipto Citriodora (n = 50)	<b>Média</b>	1,208	4511	2453	1805	5,48
	<b>CV</b>	3,13	2,33	4,1	16,7	9,91
Pinus elliottii (n=50)	<b>Média</b>	0,954	4143	1687	658	1,99
	<b>CV</b>	9,87	14,1	31,3	32,7	16,3

Tabela 4.2 Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em corpos-de-prova na condição seca ao ar.

<b>Espécie</b>		$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLc}}$ (m/s)	$C_{\text{LLc}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Cupiúba (n=54)	<b>Média</b>	0,859	5010	2159	1644	5,29
	<b>CV</b>	3,02	3,00	7,50	21,30	11,00
Eucalipto Citriodora (n = 47)	<b>Média</b>	1,04	5053	2661	2501	7,06
	<b>CV</b>	4,12	3,13	5,80	19,0	7,20
Pinus elliottii (n=50)	<b>Média</b>	0,510	4919	1255	908	2,91
	<b>CV</b>	11,35	12,0	27,0	42,0	19,9

Tabela 4.3 Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em vigas estruturais na condição saturada.

<b>Espécie</b>		$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLv}}$ (m/s)	$C_{\text{LLv}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{M}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Cupiúba (n=54)	<b>Média</b>	1,136	3867	1693	1130
	<b>CV</b>	4,26	8,49	16,20	16,30
Eucalipto Citriodora (n = 50)	<b>Média</b>	1,249	4432	2440	1762
	<b>CV</b>	2,86	3,00	5,68	12,39
Pinus elliottii (n=50)	<b>Média</b>	0,95	3475	1178	630
	<b>CV</b>	8,0	11,5	29,1	27,8

Tabela 4.4 Valores da média e do coeficiente de variação dos resultados de ensaio em vigas estruturais na condição seca ao ar.

Espécie		$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLv}}$ (m/s)	$C_{\text{LLv}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{M}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
Cupiúba (n=54)	<b>Média</b>	0,858	4863	2028	1397
	<b>CV</b>	3,49	3,42	8,47	13,8
Eucalipto Citriodora (n = 50)	<b>Média</b>	1,046	4882	2491	2023
	<b>CV</b>	4,97	3,06	7,28	15,62
Pinus elliottii (n=50)	<b>Média</b>	0,510	4550	1065	750
	<b>CV</b>	9,67	9,50	21,2	23,0

#### 4.1 - Modelos de Regressão Linear – Correlações entre variáveis de importância

Após a obtenção dos resultados procedeu-se à escolha das variáveis de maior importância que pudessem ser correlacionadas na obtenção dos modelos.

Estas variáveis foram:

$V_{\text{LLc}}$  = velocidade longitudinal de propagação da onda de ultra-som nos corpos-de-prova de dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 0,15 m, em m/s;

$V_{\text{LLv}}$  = velocidade longitudinal de propagação da onda de ultra-som nas vigas de dimensões nominais 0,06 x 0,12 x 2,00 m, em m/s;

$f_{\text{c0}}$  = resistência à compressão paralela às fibras obtida no ensaio estático, em kN/cm<sup>2</sup>;

$E_{\text{c0}}$  = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio estático de compressão paralela às fibras, em kN/cm<sup>2</sup>;

$E_M$  = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio estático de flexão (4 pontos), conforme descrito no item 3.2.2.2, em  $\text{kN/cm}^2$ ;

$C_{LLc}$  = constante dinâmica obtida por meio do ensaio de ultra-som utilizando ondas longitudinais em corpos-de-prova de dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 0,15 m, conforme o item 3.2.3, em  $\text{kN/cm}^2$ ;

$C_{LLv}$  = constante dinâmica obtida por meio do ensaio de ultra-som utilizando ondas longitudinais em vigas de dimensões nominais 0,06 x 0,12 x 2 m, conforme o item 3.2.3, em  $\text{kN/cm}^2$ .

Diversos modelos foram testados, levando-se em consideração, na análise de cada um deles, os critérios descritos no Capítulo 3. Após essa análise criteriosa foram finalmente adotados os modelos estatísticos apresentados nas Tabelas 4.5 a 4.10.

Tabela 4.5 - Modelos de regressão linear - **Cupiúba** – condição saturada

Variáveis	MODELO	r	CV(%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = -7,96 V_{LLc}^2 + 0,719 V_{LLc} - 158,5$	0,60	10,5	14,05
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp ( 0,00092 V_{LLc} + 3,12 )$	0,49	3,2	15,67
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = 1 / [2,74E-14 C_{LLc}^4 - 0,00111 C_{LLc} + 2,04]$	0,90	9,5	106,42
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp ( 9,82 E-7 C_{LLc}^2 + 0,0051 C_{LLc} + 0,89 )$	0,83	2,0	53,70
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = \exp ( 1,77 + 0,0025 V_{LLv} - 2,8 E-7 V_{LLv}^2 )$	0,85	1,5	61,20
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = \exp ( 5,19 + 0,0018 C_{LLv} - 4,1 E-7 C_{LLv}^2 )$	0,85	1,4	65,70

Tabela 4.6 - Modelos de regressão linear - **Cupiúba** – condição seca ao ar

Variáveis	MODELO	r	CV(%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp(-2,4E-11V_{LLc}^4 + 4,93E-7V_{LLc}^3 - 0,0037V_{LLc}^2 + 12,7V_{LLc} - 16037)$	0,72	5,4	12,50
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = 12,6E-5 \exp(5,5E-7 V_{LLc}^2) + 1464$	0,48	18,9	15,40
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = 2,13 E-8 C_{LLc}^3 - 13,8E-5C_{LLc}^2 + 0,3 C_{LLc} - 211,4$	0,60	9,0	9,01
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = 0,0035 C_{LLc}^2 - 13,96 C_{LLc} + 15546$	0,56	18,2	11,13
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = \ln (0,0025 V_{LLv} - 7,84) \times 10^3$	0,57	14,9	24,50
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = 0,71 C_{LLv} - 44,5$	0,63	10,8	34,48

Tabela 4.7 - Modelos de regressão linear –**Eucalipto Citriodora** – Condição saturada

Variáveis	MODELO	r	CV(%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = (8,6E-8 V_{LLc}^2 - 0,000787 V_{LLc} + 1,8) \times 10^3$	0,78	9,1	36,20
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp ( 2,32E-6 V_{LLc}^2 - 0,02 V_{LLc} + 51,1)$	0,50	2,0	7,65
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = 0,0028 C_{LLc} - 1,30$	0,52	8,6	17,14
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp [9,35E-7 ( \exp 0,005C_{LLc}) + 7,26]$	0,67	2,0	39,35
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = 1,31 V_{LLv} - 4041,7$	0,80	7,5	84,48
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = 1,29 C_{LLv} - 1377,3$	0,85	6,6	122,51

Tabela 4.8- Modelos de regressão linear – **Eucalipto Citriodora**  
-condição seca ao ar

Variáveis	MODELO	r	CV(%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp (0,00017 V_{LLc} + 1,094)$	0,36	3,5	7,44
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp ( 0,000508 V_{LLc} + 5,236)$	0,42	2,2	9,75
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp (1,017 + 0,000351 C_{LLc})$	0,73	2,6	52,30
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = (39,68 + 7,331E-17 C_{LLc}^5)^2$	0,62	7,6	27,00
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = 1,094 V_{LLv} - 3320$	0,52	13,5	17,70
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = 1,524 C_{LLv} - 1773,7$	0,87	7,6	155,97

Tabela 4.9 - Modelos de Regressão linear – *Pinus elliottii* – condição saturada

Variáveis	MODELO	r	CV (%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp (1,3E-10V_{LLc}^3 - 1,54E-6V_{LLc}^2 + 0,006V_{LLc} - 7,4)$	0,60	20,0	8,17
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp (5,27E-4 V_{LLc} + 4,25)$	0,90	2,5	188,40
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp ( 1,83E-4C_{LLc} + 0,37)$	0,58	19,8	23,99
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp (-1,95E-7 C_{LLc}^2 + 0,0012 C_{LLc} + 4,95)$	0,92	2,2	115,75
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = 9,72E-9 V_{LLv}^3 + 205,6$	0,86	14,2	138,10
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = 0,45 C_{LLv} + 99,76$	0,88	13,2	167,02

Tabela 4.10- Modelos de regressão linear - *Pinus elliottii* – condição seca ao ar

Variáveis	MODELO	r	CV(%)	F
$V_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = 0,98 \exp (0,0002 V_{LLc})$	0,65	14,3	34,60
$V_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp (6,05E-8 V_{LLc}^2 + 5,24)$	0,84	3,3	111,22
$C_{LLc} \times f_{c0}$	$f_{c0} = \exp (1,83E-7 C_{LLc}^2 + 0,738)$	0,80	11,0	85,70
$C_{LLc} \times E_{c0}$	$E_{c0} = \exp [9,55 (\exp 0,0001 C_{LLc})-4,10]$	0,90	2,5	214,00
$V_{LLv} \times E_M$	$E_M = 0,0002 V_{LLv}^2 - 1,44 V_{LLv} + 3273$	0,74	15,7	28,63
$C_{LLv} \times E_M$	$E_M = 0,65 C_{LLv} + 57,9$	0,85	12,2	126,18

Uma melhor visualização desses modelos está demonstrada no Anexo II, onde são apresentados os gráficos representativos das correlações. Esses gráficos permitem observar o comportamento dos resultados obtidos por meio dos ensaios destrutivos e não-destrutivos e o comportamento do modelo, que representa a relação existente entre esses resultados.

## 5.- Discussões

A proposta inicial deste trabalho foi a de verificar a possibilidade de se obter resultados seguros e confiáveis, na determinação da resistência e da rigidez de peças de madeira de espécies utilizadas no Brasil, por meio de ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.4 permitem avaliar o comportamento geral dos ensaios. Verifica-se, por exemplo, pelos valores obtidos para o coeficiente de variação da densidade aparente a 12%, que existe coerência com a amostragem de cada espécie. Para a Cupiúba e o Eucalipto Citriodora os corpos-de-prova foram retirados de uma só árvore, enquanto que para o Pinus, de 11 diferentes árvores. É lógico, portanto, que se tenha uma maior variabilidade natural na madeira de Pinus. Essa variabilidade pode ser confirmada pelos coeficientes de variação, sempre mais elevados para todos os resultados (destrutivos e não-destrutivos) obtidos para essa espécie.

Os resultados gerais apresentados permitem, ainda, verificar a coerência com resultados obtidos por outros pesquisadores, ou seja, a velocidade de propagação das ondas na madeira seca ao ar é maior do que na madeira saturada conforme pode ser visto na Figura 5.3. Neste trabalho, os resultados mostraram que a velocidade na madeira seca ao ar foi 13% maior que na madeira saturada para a Cupiúba, 12% maior para o Eucalipto e 19% maior para o Pinus, considerando-se os corpos-de-prova. Para as vigas estruturais, a velocidade foi 26% maior para a Cupiúba, 10% para o Eucalipto e 31% maior para o Pinus. A constante  $C_{LLc}$  foi 8% maior para a Cupiúba e Eucalipto secos, quando comparados aos valores saturados, e 34% menor para o Pinus seco, quando comparado ao saturado, como mostra a Figura 5.1. Essa diferença deve-se ao fato de o Pinus, por ser uma madeira de maior permeabilidade que a Cupiúba e o Eucalipto, estar com teor de saturação mais elevado, ou seja, enquanto essas duas espécies apresentaram teores de umidade de 59,5% e 50,7% respectivamente, o Pinus apresentava teor em torno de 117%. No cálculo da constante  $C_{LL}$ , o valor da densidade aparente é considerado, e, portanto, a massa da água livre interfere no cálculo. Resultados apresentados por SAKAI et al, citados por BUCUR (1995), mostraram que, em corpos-de-prova,  $C_{LL}$  decresce com a presença de umidade até teores que variam entre 30 e 35%, dependendo da espécie. Segundo os autores, esse ponto crítico está relacionado ao ponto de

saturação das fibras (PSF). Os resultados do presente trabalho foram obtidos considerando-se apenas dois teores de umidade, saturado e seco ao ar, não permitindo a construção de uma curva de variação que permitisse determinar o ponto crítico no qual  $C_{LL}$  passaria a crescer com o acréscimo de umidade, conforme mostra a Fig. 2.4. Para o caso da Cupiúba e do Eucalipto, os valores médios de  $C_{LL}$  na condição saturada, foram menores do que os da condição seca ao ar indicando que, apesar desses teores nessas espécies estarem altos (em torno de 50-60%), o acréscimo na densidade aparente não foi suficiente para que  $C_{LL}$  crescesse ao ponto de superar  $C_{LL}$  na condição seca ao ar.

Para o caso das peças de dimensões estruturais,  $C_{LLv}$  na condição seca ao ar foi 20% maior do que para a condição saturada para a Cupiúba, 2% maior para o Eucalipto e 11% menor para o Pinus conforme pode ser visto na Figura 5.2. Tendo em vista que, para o caso das peças estruturais, outros fatores (defeitos, inclinação de fibras, etc) afetaram de maneira significativa a velocidade de propagação das ondas longitudinais de ultra-som, a avaliação da variação de  $C_{LLv}$  com a umidade se torna menos evidente.

Os resultados dos ensaios estáticos destrutivos podem ser avaliados, também, nas Tabelas 4.1 a 4.4, por meio dos coeficientes de variação. De maneira geral, esses coeficientes se apresentaram dentro do esperado para esse tipo de ensaio, ou seja, valores abaixo de 18% para ensaios de resistência e um pouco superiores para o caso de elasticidade. Os resultados tabelados para os corpos-de-prova mostram que, apenas para o caso do Pinus seco, o coeficiente de variação foi superior a 18% para a resistência e superior a 23% para o módulo de elasticidade. Esse resultado é, provavelmente, consequência da amostragem, tendo em vista que, propositadamente, os corpos-de-prova não eram isentos de defeitos e a madeira de Pinus apresenta maior quantidade de nós e desvio da grã.

Um último ponto a destacar, em relação aos resultados médios apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.4, é a variação, esperada e coerente, da velocidade e da constante  $C_{LL}$  em relação aos resultados obtidos nos ensaios estáticos destrutivos. Observa-se que, para uma mesma condição de umidade, a velocidade é sempre maior nas espécies com maior valor de resistência e módulo de elasticidade. O mesmo se pode comentar em relação ao coeficiente  $C_{LL}$ , ou seja, valores crescentes de  $C_{LL}$  são coincidentes com valores crescentes de resistência e módulo de elasticidade. Pode-se verificar, também, que os valores de  $C_{LL}$  são sempre mais elevados do que os valores do módulo de elasticidade, conforme também pode ser observado

na Figura 5.1, confirmando os resultados obtidos por outros autores e os aspectos teóricos abordados no item 2.1. Os resultados deste trabalho mostram, para os corpos-de-prova na condição seca ao ar, que  $C_{LLc}$  foi 31% maior do que o módulo de elasticidade à compressão paralela  $E_{c0}$  para a Cupiúba, 6% maior para o Eucalipto e 38% maior para o Pinus.

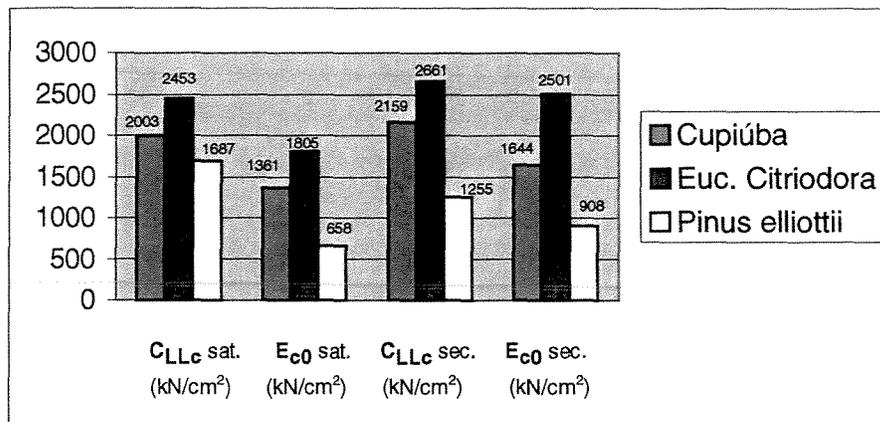


Figura 5.1 – Quadro comparativo entre os valores médios de  $C_{LLc}$  e  $E_{c0}$  nas condições saturada e seca ao ar para os corpos-de-prova das três espécies estudadas.

Como pode ser notado na Figura 5.2, para as vigas, na condição seca ao ar, os valores de  $C_{LLv}$  foram 45% maiores do que o módulo de elasticidade à flexão  $E_M$  para a Cupiúba, 23% maiores para o Eucalipto Citriodora e 42% maiores para o Pinus elliottii. Observe-se que estes valores superaram os obtidos por BODIG e JAYNE (item 2.1), pois estes autores trabalharam com a equação completa para  $C_{LL}$  (Equação 2.2), que é corrigida pelos coeficientes de Poisson.

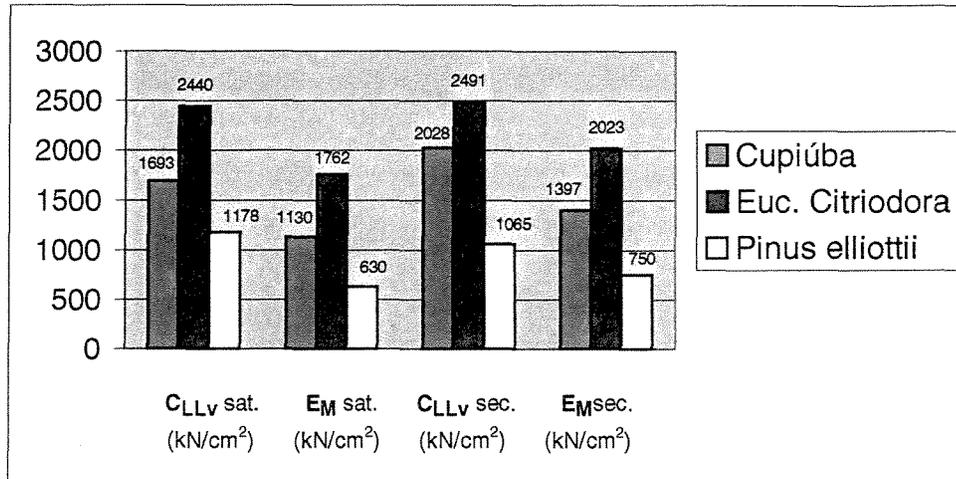


Figura 5.2 – Quadro comparativo entre valores médios de  $C_{LLv}$  e  $E_M$  nas condições saturada e seca ao ar, para as vigas das três espécies estudadas.

Cabe ainda mencionar que a velocidade de propagação da onda no corpo-de-prova foi sempre maior do que na viga de dimensão estrutural, conforme pode ser observado na Figura 5.3. Esse resultado era esperado, tendo em vista a geometria e a ocorrência de defeitos nas peças de tamanho estrutural, maior do que nos corpos-de-prova pequenos. De acordo com os resultados médios obtidos nesse trabalho, as velocidades para a madeira saturada foram 14% maiores no corpo-de-prova, em relação à viga, para a Cupiúba, 2% maior para o Eucalipto e 19% maior para o Pinus. Na condição seca ao ar essas porcentagens passaram a 3% para a Cupiúba, 4% para o Eucalipto e 8% para o Pinus. Esses resultados são bastante coerentes e indicam o grau de homogeneidade (em termos de defeitos) da madeira, ou seja, as peças de Eucalipto eram bastante homogêneas enquanto que as de Pinus apresentavam nós e desvio da grã. Esse aspecto se refletiu na diferença encontrada para a velocidade no corpo-de-prova e na viga.

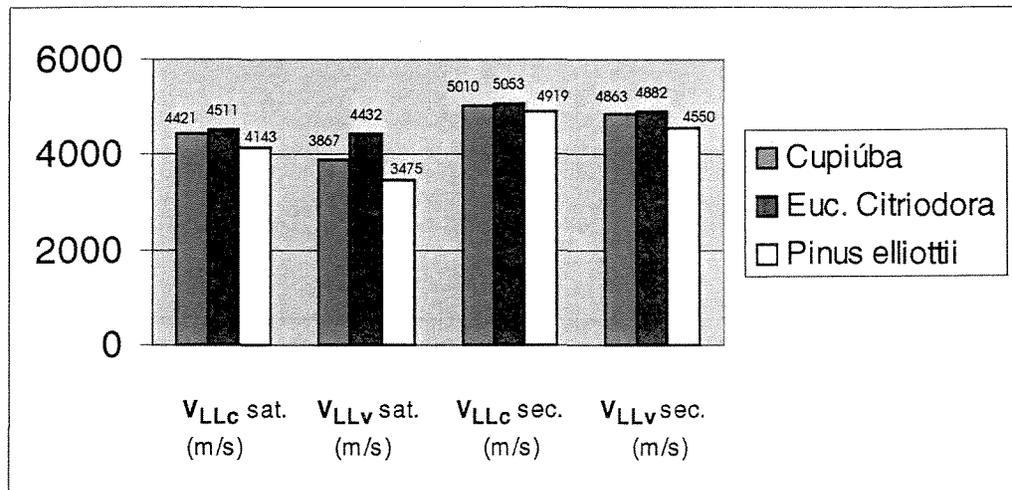


Figura 5.3 – Quadro demonstrativo das velocidades longitudinais médias do ultrassom em corpos-de-prova ( $V_{LLc}$ ) e em vigas estruturais ( $V_{LLv}$ ), nas condições saturada e seca ao ar, para as três espécies estudadas.

Fez-se, em seguida, a avaliação dos modelos obtidos para cada situação estudada. Visando facilidade de apresentação, esta discussão será realizada por itens.

### 5.1 – Modelos obtidos com os resultados de ensaio em corpos-de-prova de dimensões nominais 0,05 x 0,05 x 0,15 m

A princípio, nota-se que as correlações envolvendo as variáveis obtidas nos ensaios em corpos-de-prova são mais fracas do que as correlações envolvendo as variáveis obtidas nos ensaios com as vigas de dimensões estruturais. Embora estatisticamente todos os modelos tenham sido significativos a um nível de 5% (item 3.3), evidenciando a existência de dependência entre as variáveis envolvidas, é importante avaliar cada um deles, pois isso possibilita entender melhor o significado físico dos resultados.

Os modelos mostram, que o comportamento das espécies foi diferenciado em termos de representatividade. Para a Cupiúba, a melhor correlação foi obtida entre  $C_{LLc}$  e  $f_{c0}$  na condição saturada ( $r = 0,90$ ) e a pior foi a obtida entre  $V_{LLc}$  e  $E_{c0}$ , para ambas condições de umidade ( $r = 0,48$ ).

Para os corpos-de-prova, a condição saturada produziu melhores correlações do que a condição seca ao ar, para as espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora. Para o *Pinus elliottii* a situação se inverteu, ou seja, para a condição seca ao ar os valores de “r” foram ligeiramente maiores que os valores de “r” para as correlações da condição saturada.

A possível hipótese para o fato de, nas dicotiledôneas, a velocidade do ultra-som ser uma variável mais confiável na condição saturada, pode vir do argumento de que o corpo-de-prova saturado oferece mais “obstáculos” à passagem da onda de ultra-som, visto que, nas dicotiledôneas, há uma maior homogeneidade, em termos de defeitos, do que nas coníferas. Ou seja, quanto maior for a presença de defeitos em um corpo-de-prova, mais perceptíveis serão as variações da velocidade que nele ocorrerem. Para um corpo-de-prova de dimensões reduzidas e isento de defeitos, a velocidade do ultra-som tende a ser constante.

Para o caso das coníferas, tanto na condição saturada quanto na condição seca ao ar, boas correlações puderam ser obtidas, mesmo utilizando-se somente a velocidade como variável independente.

É importante que se discuta, também, a influência do comprimento de onda, nos resultados de velocidade nos corpos-de-prova.

Para uma velocidade de 5000 m/s, à uma frequência de 45 kHz ( frequência do equipamento utilizado neste trabalho), o comprimento de onda é da ordem de 0,11 m.

Os corpos-de-prova possuem um comprimento longitudinal de 0,15 m. Isto significa que, nesse ensaio, a leitura do tempo foi realizada com menos de 2 ondas se propagando no corpo-de-prova.

BUCUR (1984) demonstrou que a velocidade do ultra-som começa a tornar-se constante a partir de uma relação  $L/\lambda > 5$ , conforme a Fig. 2.6, embora as maiores variações ocorram para  $L/\lambda$  entre 0,1 e 1. Para que aquela relação fosse alcançada utilizando-se corpos-

de-prova de dimensões normatizadas, seria necessário um equipamento que operasse com uma emissão de frequência maior, ou seja, no mínimo de 150 kHz.

Dessa maneira, para o caso das dicotiledôneas, além do fato da homogeneidade já citada anteriormente, deparou-se com a dificuldade do reduzido número de ondas se propagando no corpo-de-prova.

Quando se utiliza, como variável independente, a constante elástica  $C_{LLc}$ , adiciona-se a densidade aparente nos modelos, e as correlações obtidas se tornam mais confiáveis nas predições de  $f_{c0}$  e  $E_{c0}$ . Para o caso das coníferas, cuja presença de defeitos produz maior variação da velocidade de propagação das ondas, tanto a velocidade  $V_{LLc}$ , quanto a constante elástica  $C_{LLc}$ , são variáveis que, se presentes no modelo, proporcionam correlações significativas nas predições de  $f_{c0}$  e  $E_{c0}$ .

## 5.2 - Modelos obtidos com os resultados de ensaio em vigas de dimensões nominais 0,06 x 0,12 x 2,00 m

No caso das vigas, a geometria e o comprimento das peças, ou seja, sua forma alongada, faz com que a relação  $L/\lambda$  esteja dentro de limites nos quais a velocidade não é afetada pelo comprimento de onda (meio infinito). A propagação das ondas de ultra-som, nesse caso, reproduz mais claramente a rigidez da viga como um todo.

Os valores de “r” encontrados, tanto para as dicotiledôneas quanto para o Pinus, foram significativos, se comparados com a literatura, o que possibilita o uso da velocidade, como variável de predição da rigidez em vigas estruturais.

## 5.3 – Classificação de vigas estruturais das espécies Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii segundo classes de rigidez, utilizando o ultra-som como ferramenta de análise

Tendo em vista as correlações obtidas entre os resultados dos ensaios estático e dinâmico (ultra-som), a última etapa do trabalho foi a elaboração de uma proposta de método

de classificação de peças estruturais baseado em classes de rigidez utilizando como parâmetro a velocidade de propagação da onda de ultra-som. Esse método foi proposto visando assegurar a facilidade de execução e a segurança dos resultados. As classes propostas (Tabelas 5.1 e 5.2) apresentam os valores de  $E_{M,k}$ ;  $E_{c0,k}$ ;  $f_{c0,k}$  e a faixa de velocidade correspondente a cada classe. A seguir são apresentados os passos para a obtenção das classes e dos valores representativos de cada uma delas.

1. Avaliação da tendência do gráfico, onde foram alocados os pontos referentes aos resultados da velocidade do ultra-som na viga saturada ( $V_{vsat}$ ) e do módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_M$ ) (Figura 5.4). A observação da Figura 5.4 evidencia a existência de dois blocos distintos de pontos, ou seja, uma seqüência que define a tendência de comportamento das dicotiledôneas (Eucalipto Citriodora e Cupiúba), nitidamente com valores superiores de velocidades e módulos, e uma seqüência que define a tendência da conífera (Pinus elliottii). Dessa maneira, separou-se o grupo das dicotiledôneas e da conífera para a obtenção do modelo de correlação.

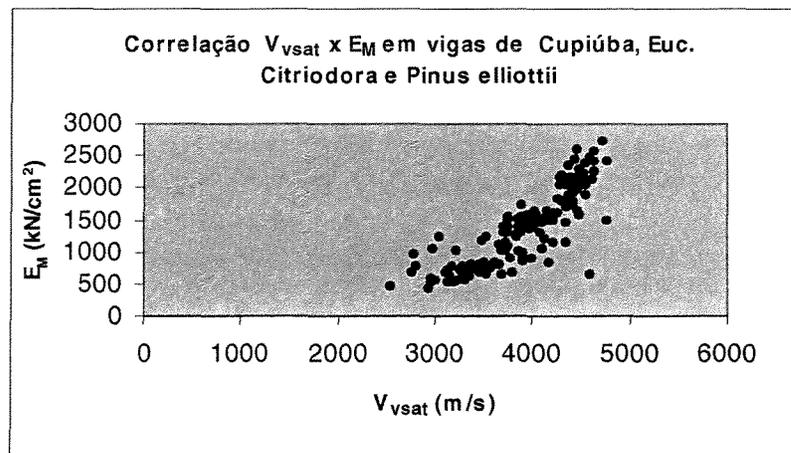


Figura 5.4 - Pontos obtidos na correlação  $V_{vsat}$  x  $E_M$  em vigas das espécies Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii.

2. Obtenção dos modelos de correlação entre a velocidade na viga saturada ( $V_{vsat}$ ) e o módulo de elasticidade à flexão estática, utilizando-se os resultados já separados em dicotiledôneas e conífera. Esses modelos estão representados na Figura 5.5 onde a curva representada em azul abrange as dicotiledôneas e a representada em verde a conífera.

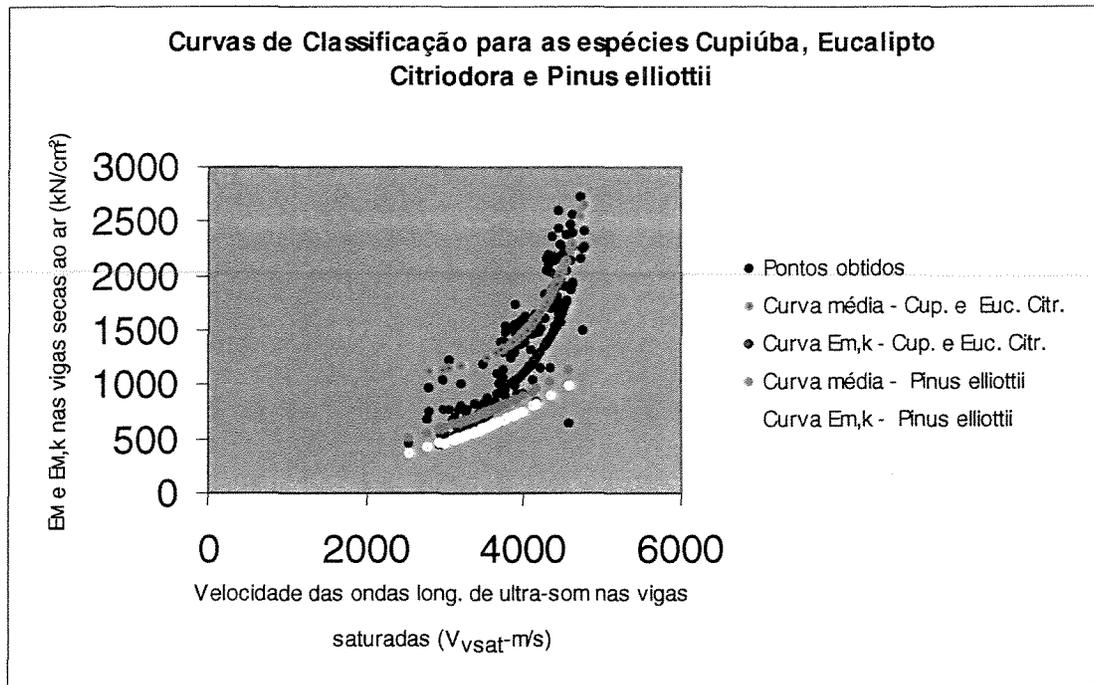


Figura 5.5 – Modelos que relacionam a velocidade longitudinal do ultra-som nas vigas estruturais, das espécies Cupiúba, E. Citriodora e P. elliottii, na condição saturada, e o módulo de elasticidade à flexão estática ( $E_M$ ) na condição seca ao ar.

3. Obtenção da curva de correlação dos valores característicos inferiores, que representa os valores de  $E_{M,k}$ , ou seja, o módulo de elasticidade que apresenta 95% de probabilidade de ser ultrapassado. Os modelos que representam o comportamento de  $E_{M,k}$ , em função da velocidade de propagação da onda na viga saturada  $V_{vsat}$ , são apresentados a seguir (curva vermelha, Cupiúba e Eucalipto Citriodora e curva amarela, Pinus elliottii). Essas equações permitem o cálculo de  $E_{M,k}$  na condição seca ao ar, utilizando-se apenas da velocidade de propagação das ondas de ultra-som na viga, na condição saturada.

### Cupiúba e Eucalipto Citriodora

$$E_{M,k} = 693,3 + 0,37466 [ \exp (0,00175 V_{vsat}) ]$$

$$(r^2 = 0,69; cv = 13\%; F = 229,7 \text{ e } n = 104)$$

### Pinus elliottii

$$E_{M,k} = 185,94 [ \exp (0,000394 V_{vsat}) ] - 140,56$$

$$(r^2 = 0,48; cv = 2,5\%; F = 42,8 \text{ e } n = 50)$$

4. Determinação das faixas de velocidade para cada classe de rigidez, propostas a partir de valores característicos  $E_{M,k}$ , utilizando-se a curva de correlação (Figura 5.5) ou os modelos descritos no passo 3.

5. Elaboração de curva de correlação de valores de  $f_{c0}$ , obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova, e valores de  $E_M$ , obtidos no ensaio de flexão das vigas estruturais, na condição seca ao ar, para as três espécies estudadas (Figura 5.6).

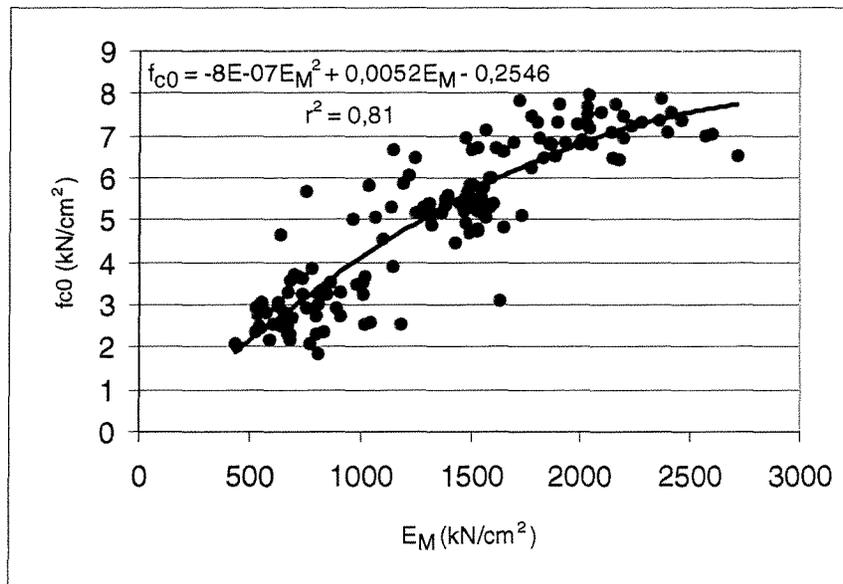


Figura 5.6 – Correlação entre  $E_M$  e  $f_{c0}$ , na condição seca ao ar, para as espécies Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliottii. CV = 15% , F = 307,9 e n = 151.

6. Obtenção de valores de  $f_{c0,k}$ , na condição seca ao ar, utilizando o modelo apresentado na Figura 5.6 (passo 5). Utilizando-se esse modelo é possível obter o valor da resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0}$ ) a partir de  $E_M$ . Por consequência, é possível obter-se, através do mesmo modelo, os valores de  $f_{c0,k}$ , a partir de  $E_{M,k}$ .

7. Obtenção da relação entre os valores médios dos módulos de elasticidade à flexão estática e dos módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E_M/E_{c0}$ ) para cada uma das espécies estudadas. Esses valores foram obtidos utilizando-se os resultados dos ensaios estáticos de flexão e compressão paralela às fibras, na condição seca ao ar. Essas relações foram:

**Cupiúba = 0,85**

**Eucalipto Citriodora = 0,81**

**Pinus elliottii = 0,83.**

Essas relações permitem determinar os valores característicos  $E_{c0,k}$  a partir de  $E_{M,k}$ . Dado o alto valor do coeficiente de variação nos ensaios para obtenção de  $E_{c0}$  da espécie Pinus elliottii (Anexo I) igualou-se  $E_{c0,k}$  a  $E_{M,k}$  para a construção de classes de rigidez da conífera (Tabela 5.2). Esse procedimento foi necessário para que fosse possível obter-se o valor característico do módulo de elasticidade  $E_{c0,k}$ , ou seja, o valor cuja probabilidade de ser ultrapassado é de 95%.

8. Obtenção de  $E_{c0,k}$  utilizando os valores de  $E_{M,k}$  de cada classe de rigidez e a relação  $E_M/E_{c0}$  de cada espécie (passo 7).

Com os procedimentos estabelecidos nos passos 1 a 8, propõem-se duas tabelas de classificação de peças estruturais, para as três espécies estudadas. Uma tabela englobando as espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora (dicotiledôneas) e a outra o Pinus elliottii (conífera).

O objetivo dessas tabelas é facilitar a classificação das peças, já no instante em que as mesmas são desdobradas em serraria e quando ainda apresentam teor de umidade elevado (madeira saturada). Através da medição da velocidade de propagação do ultra-som na viga recém-cortada, verifica-se a faixa de velocidade a que a viga pertence e, conseqüentemente, obtêm-se sua classe de rigidez.

As classes de rigidez utilizadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 diferem daquelas utilizadas pela norma NBR 7190/97, pois foram construídas a partir de  $E_{M,k}$  e não de  $f_{c0,k}$ , como preconiza a referida norma.

**Tabela 5.1 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira das espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vsat}$ )**

<b>Classe</b>	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{c0,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{c0,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	Faixa de velocidade (Madeira saturada) (m/s)
<b>7500</b>	<b>750</b>	<b>904</b>	<b>3,80</b>	<b><math>2850 \leq V_{vsat} \leq 3800</math></b>
<b>10000</b>	<b>1000</b>	<b>1205</b>	<b>4,60</b>	<b><math>3800 &lt; V_{vsat} \leq 4150</math></b>
<b>12500</b>	<b>1250</b>	<b>1506</b>	<b>5,30</b>	<b><math>4150 &lt; V_{vsat} \leq 4380</math></b>
<b>15000</b>	<b>1500</b>	<b>1807</b>	<b>5,90</b>	<b><math>4380 &lt; V_{vsat} \leq 4550</math></b>
<b>17500</b>	<b>1750</b>	<b>2108</b>	<b>6,35</b>	<b><math>V_{vsat} &gt; 4550</math></b>

**Tabela 5.2- Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliottii utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vsat}$ )**

<b>Classe</b>	$E_{M,k} = E_{c0,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{c0,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	Faixa de velocidade (Madeira saturada) (m/s)
<b>4000</b>	<b>400</b>	<b>1,50</b>	<b><math>2700 \leq V_{vsat} \leq 3150</math></b>
<b>5000</b>	<b>500</b>	<b>1,90</b>	<b><math>3150 &lt; V_{vsat} \leq 3500</math></b>
<b>6000</b>	<b>600</b>	<b>2,20</b>	<b><math>3500 &lt; V_{vsat} \leq 3850</math></b>
<b>7000</b>	<b>700</b>	<b>2,45</b>	<b><math>V_{vsat} &gt; 3850</math></b>

Para a confirmação e teste das faixas de velocidades propostas nas Tabelas 5.1 e 5.2, foi executada uma confrontação entre os dados de todas as vigas ensaiadas e os valores característicos propostos nessas Tabelas, onde verificou-se perfeita validade do método.

De maneira isolada, para cada espécie de dicotiledônea, as correlações e as tabelas foram obtidas da mesma maneira.

Para a **Cupiúba** estas correlações podem ser vistas na Figura 5.7 e as classes de rigidez na Tabela 5.3. Para o **Eucalipto Citriodora** na Figura 5.8 e Tabela 5.4.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 a curva vermelha representa os valores médios para a correlação entre  $V_{vsat}$  e  $E_M$ , e a curva amarela, mais abaixo, representa a curva dos valores característicos de  $E_M$ .

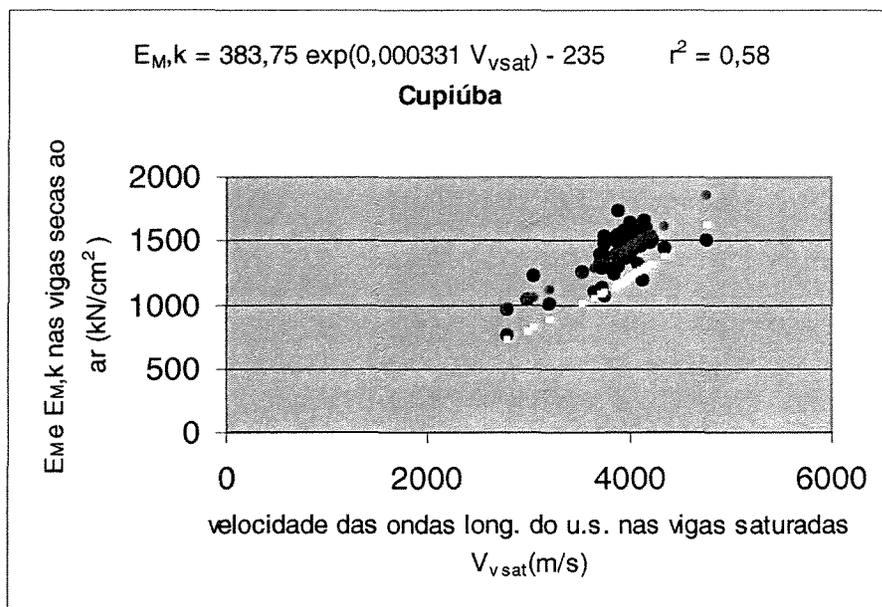


Figura 5.7 – Correlação entre a velocidade do ultra-som nas vigas saturadas e  $E_M$  na condição seca ao ar para a espécie Cupiúba (c.v. = 1,4% , F = 70,4 e n = 54)

**Tabela 5.3 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vsat}$ )**

<b>Classe</b>	<b><math>E_{M,k}</math></b> (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	<b>Faixa de velocidades</b> (Madeira saturada) (m/s)
<b>7500</b>	<b>750</b>	<b><math>2850 \leq V_{vsat} \leq 3600</math></b>
<b>10000</b>	<b>1000</b>	<b><math>3600 &lt; V_{vsat} \leq 4100</math></b>
<b>12500</b>	<b>1250</b>	<b><math>V_{vsat} &gt; 4100</math></b>

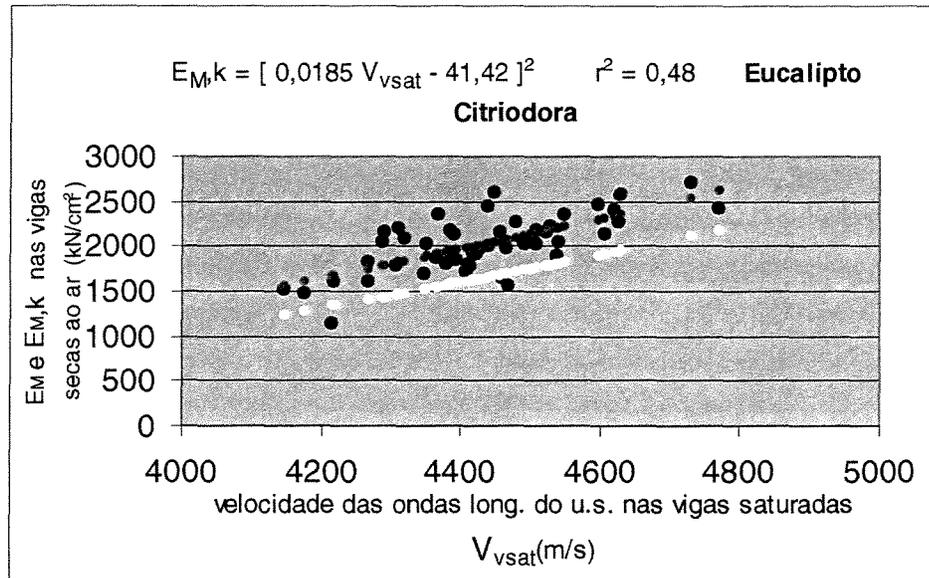


Figura 5.8 – Correlação entre a velocidade do ultra-som nas vigas saturadas e o  $E_M$  na condição seca ao ar para a espécie Eucalipto Citriodora (c.v.= 6,3% ,  $F = 42,95$  e  $n=50$ )

**Tabela 5.4 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vsat}$ )**

<b>Classe</b>	<b><math>E_{M,k}</math> (condição seca ao ar) (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Faixa de velocidades (Madeira saturada) (m/s)</b>
<b>10000</b>	<b>1000</b>	<b><math>3900 \leq V_{vsat} \leq 4150</math></b>
<b>12500</b>	<b>1250</b>	<b><math>4150 &lt; V_{vsat} \leq 4350</math></b>
<b>15000</b>	<b>1500</b>	<b><math>4350 &lt; V_{vsat} \leq 4510</math></b>
<b>17500</b>	<b>1750</b>	<b><math>V_{vsat} &gt; 4510</math></b>

Observe-se que há pouca discrepância entre as faixas de velocidades, quando se consideram as duas dicotiledôneas juntas ou separadas.

As correlações utilizando vigas na condição seca ao ar não foram tão significativas, se comparadas com as vigas no estado saturado. Ainda assim, foi possível estabelecer correlações estatisticamente significativas para velocidades de propagação das ondas e  $E_M$ , ambos na condição seca ao ar, e enquadrar essas velocidades nas classes de rigidez apresentadas nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, cujos valores característicos  $f_{c0,k}$  e  $E_{c0,k}$  obedecem aqueles mencionados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Para maior clareza, nas figuras e tabelas, se utilizou a denominação  $V_{vse}$  para identificar a velocidade longitudinal de propagação das ondas de ultra-som, em vigas de dimensões estruturais, na condição seca ao ar.

Para as espécies consideradas separadamente foram obtidas as correlações apresentadas nas Figuras 5.9 a 5.11 onde a curva vermelha representa os valores médios da correlação  $V_{vse} \times E_M$ , e a curva amarela representa os valores característicos de  $E_M$ .

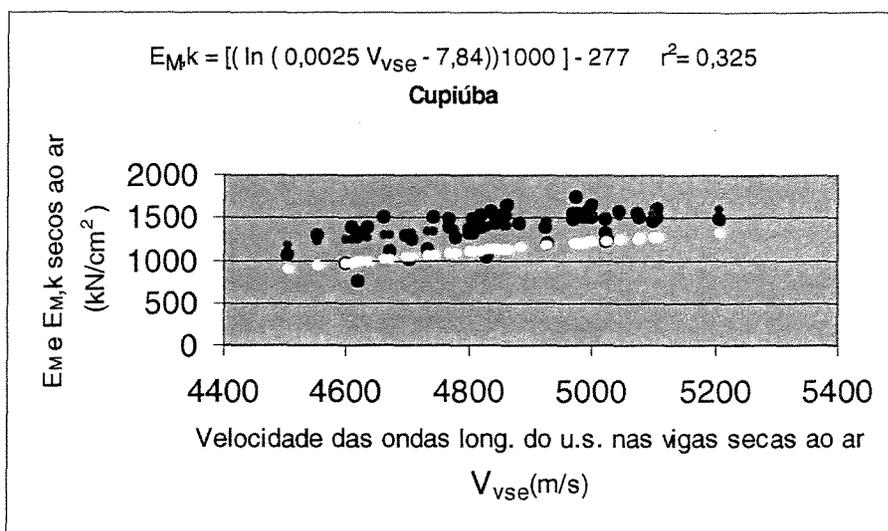


Figura 5.9 – Correlação entre a velocidade do ultra-som e  $E_M$ , ambos na condição seca ao ar para vigas da espécie Cupiúba (c.v. = 14,8% ,  $F = 24,46$  e  $n = 54$ )

**Tabela 5.5 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vse}$ )**

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) ( $\text{kN/cm}^2$ )	Faixa de velocidades Madeira na condição seca ao ar (m/s)
7500	750	$4320 \leq V_{vse} \leq 4650$
10000	1000	$4650 < V_{vse} \leq 5025$
12500	1250	$5025 < V_{vse} \leq 5600$
15000	1500	$V_{vse} > 5600$

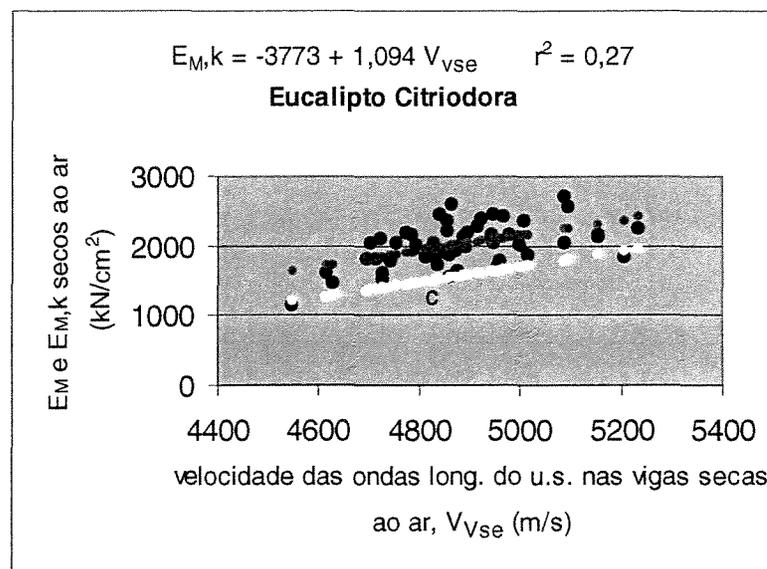


Figura 5.10 – Correlação entre a velocidade do ultra-som e  $E_M$ , ambos na condição seca ao ar para vigas da espécie Eucalipto Citriodora (c.v.= 13,5%,  $F = 17,66$  e  $n = 50$ )

**Tabela 5.6 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vse}$ )**

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) ( $kN/cm^2$ )	Faixa de velocidades Madeira na condição seca ao ar (m/s)
10000	1000	$4360 \leq V_{Vse} \leq 4590$
12500	1250	$4590 < V_{Vse} \leq 4820$
15000	1500	$4820 < V_{Vse} \leq 5050$
17500	1750	$V_{Vse} > 5050$

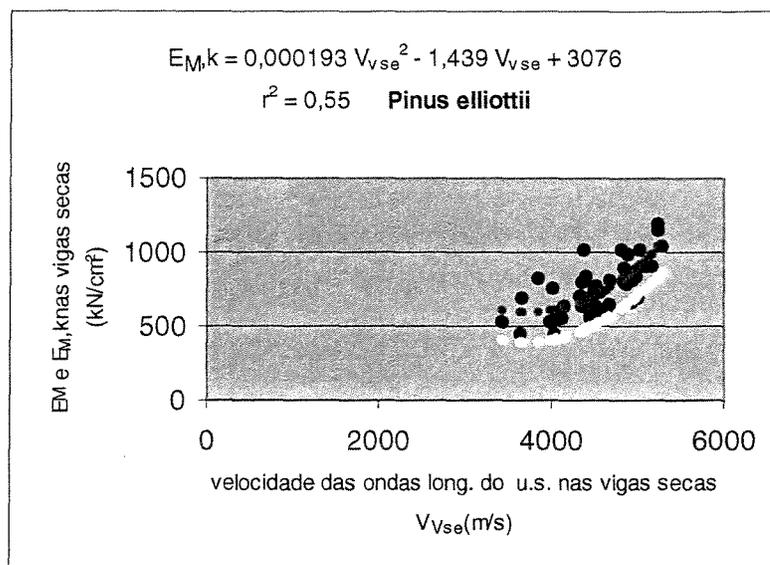


Figura 5.11 – Correlação entre a velocidade do ultra-som e  $E_M$ , ambos na condição seca ao ar para vigas da espécie *Pinus elliottii* (c.v. = 15,7% ,  $F = 28,63$  e  $n = 50$ )

**Tabela 5.7 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie *Pinus elliottii* utilizando a velocidade de propagação da onda de ultra-som ( $V_{vse}$ )**

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) (kN/cm <sup>2</sup> )	Faixa de velocidades Madeira na condição seca ao ar (m/s)
4000	400	$3900 \leq V_{vse} \leq 4500$
5000	500	$4500 < V_{vse} \leq 4750$
6000	600	$4750 < V_{vse} \leq 5000$
7000	700	$V_{vse} > 5000$

## 6 – Conclusões

A análise detalhada dos resultados e os aspectos destacados na Revisão Bibliográfica permitem distinguir alguns pontos considerados de maior importância para este trabalho.

Algumas destas conclusões eram, de certa forma, esperadas, enquanto outras demonstram que é necessário, ainda, um aprofundamento na investigação do uso do ultra-som para a determinação de propriedades mecânicas de espécies de madeira utilizadas no Brasil.

Selecionando as peças estruturais por classes de rigidez, este trabalho pretendeu avançar na busca da utilização mais racional da madeira, com o objetivo de incutir o merecido respeito a esse material de construção tão importante em nosso País.

Alguns fatores influíram nos resultados dos ensaios e, portanto, levaram à conclusões que podem nortear posturas, metas e futuras pesquisas. Dentre esses fatores podem ser destacados:

1- O teor de umidade apresenta influência considerável na velocidade de propagação do ultra-som em peças de madeira. Os resultados desse trabalho confirmaram dados obtidos na literatura, citados no item 2.4.1, e indicam a necessidade de que sejam obtidos modelos de variação para as espécies crescidas no Brasil.

2- A velocidade de propagação do ultra-som foi maior nos corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m do que nas vigas estruturais de dimensões 0,06 x 0,12 x 2,00 m. Uma das hipóteses para explicar esse fenômeno é a influência da geometria da seção transversal das peças, na propagação das ondas de ultra-som, conforme mencionado no capítulo 2, item 2.4.2. Para os corpos-de-prova a relação  $b/h$  foi igual a 1, e para as vigas estruturais essa relação foi igual a 2. A relação  $L/\lambda$  foi de 1,36 para os corpos-de-prova e maior que 20 para as vigas de dimensões estruturais. Uma outra hipótese para esta diferença de velocidades é a maior homogeneidade dos corpos-de-prova em relação às vigas, o que faz com que haja naqueles menos obstáculos à passagem das ondas de ultra-som.

3- A espécie *Pinus elliottii* foi a que apresentou melhores correlações entre as variáveis, tanto para corpos-de-prova, quanto para vigas. A provável hipótese para este fenômeno pode ser o fato de que esta espécie possui nós e desvios da grã que, de certa forma, perturbam a propagação da onda de ultra-som, afetando de maneira mais significativa as velocidades, tornando-as mais perceptíveis.

4- As espécies Cupiúba e Eucalipto *Citriodora*, pertencentes às dicotiledôneas, e de estrutura mais homogênea, apresentaram menor perturbação na propagação da onda de ultra-som. Esse fenômeno faz com que haja menor diferenciação nos valores obtidos para as velocidades e, portanto, dificulta a avaliação de suas propriedades mecânicas quando se utiliza somente a velocidade do ultra-som como variável independente.

5- Para os corpos-de-prova de dimensões 0,05 x 0,05 x 0,15 m, das espécies Eucalipto *Citriodora* e *Pinus elliottii*, na condição seca ao ar, as correlações envolvendo a constante dinâmica  $C_{LLc}$  foram melhores do que aquelas envolvendo apenas a velocidade  $V_{LLc}$ . Esse fato repetiu-se, na condição saturada, para a Cupiúba. Uma hipótese para esse fato é de que, na equação de  $C_{LLc}$ , a densidade aparente da espécie é a segunda variável envolvida, melhorando a correlação. Essa constatação não implica em dificuldade para a utilização prática do  $C_{LLc}$ , visto que tanto a velocidade do ultra-som quanto a densidade aparente do material são dados extraídos com facilidade dos corpos-de-prova.

6 – O equipamento de ultra-som utilizado neste trabalho mostrou-se eficiente para uso em peças estruturais, ou seja, vigas com comprimento mínimo de 2,00 m. Para corpos-de-prova de dimensões reduzidas este equipamento de baixa frequência (45 kHz) não é o mais indicado, já que o número reduzido de ondas que se propagam no interior da peça interfere na medição exata da velocidade. Para corpos-de-prova de 0,15 m de comprimento seria ideal a utilização de equipamentos com frequência igual ou superior a 150 kHz.

7 – O método do ultra-som mostrou-se eficiente como classificador de vigas de dimensões estruturais, tanto na condição saturada como na condição seca ao ar. Em virtude de

apresentar-se como um método seguro, econômico e rápido, ele pode ser utilizado como uma boa alternativa aos métodos tradicionais de classificação.

8 – Foi possível propor-se Tabelas de classificação de rigidez de peças estruturais de madeira em função da velocidade de propagação das ondas longitudinais de ultra-som, na peça saturada. Essas classes de rigidez estão apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

## Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira**. 107p. Rio de Janeiro (RJ), 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 198-84 Static Tests of Timbers in Structural Sizes**. Philadelphia, Pa, USA, 1984.

BARTHOLOMEU, André; GONÇALVES, Raquel; HERNÁNDEZ, Roger E. Montagem de equipamento para ensaios não destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, VI, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis (SC) : Imprensa Universitária da UFSC, v.4, p.345-354, 1998.

BUCUR, Voichita. **Ondes ultrasonores dans le bois. Caracterisation mécanique et qualité de certaines essences de bois**. 188p. Thèse (Doctorat en Génie Mécanique) – Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France, 1984.

BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press,Inc., 1995.

CEN. **Norm EN 338: Structural Timber – Strength Classes – Final Draft**. March 1994.

FREDERICK, Julian R. **Ultrasonic Engineering**. New York, USA : John Wiley & Sons,Inc.,1965.

GONÇALVES, Raquel; BARTHOLOMEU, André. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande (PB), v.4, n.2, p.269 274, 2000.

GOULET, Marcel; LAFOREST, Pierre. **Notes de cours sur la mécanique des bois SOB 17187**. 133p. Faculté de Foresterie et de Géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 1987.

HERZIG, L. **Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage**. 290p., M.Sc. Thesis (Génie Forestière), Faculté de Foresterie et de Géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 1992.

ISO 8375. **Solid timber in structural sizes – Determination of some physical and mechanical properties**. Ed. Int. Org. for Standardization.

MILLS, Frederick Cecil. **Métodos Estatísticos aplicados à Economia e aos negócios**. Rio de Janeiro. IBGE, 1952.

MISHIRO, Akiyoshi; MIWA, Yushiro. Some factors influencing on ultrasonic velocity in wood. **Research Bulletin of the Niigata University Forests**, Niigata, Japan, v.27,p.49-56, 1994.

MISHIRO, Akiyoshi. Effect of density on ultrasonic velocity in wood. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokio, Japan, v.42, n.9, p.887-894,1996.

OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa de. **Caracterização de propriedades físicas de dicotiledôneas por meio de técnicas de ultra-som**. 105p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2001.

ROSS, Robert J.; PELLERIN, Roy F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures : A review**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI :U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 40p.,May 1994.

SANDOZ, Jean Luc. **Triage et fiabilité des bois de construction**. 186p. Thèse (Doctorat en Sciences Techniques) – Departement de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1990.

SIA 164. Constructions en bois. Ed. SIA. Zürich, 1981.

STEIGER, René. **Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N Beanspruchung**. 168p. Doktorarbeit in Technischen Wissenschaften – Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, Schweiz, 1996.

WAUBKE, Nils Valerian. **Grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen als vereinfachte und genauere Methode zur Klassifikation von Bauhölzern**. 56p. Institut für Baustoffkunde und Bauphysik der Hochschule der Bundeswehr München, München, Deutschland, 1981.

WAUBKE, Nils Valerian. Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung für die Sortierung von Bauhölzern. **Holzbauforschung**, Deutschland, p.152-154, 03/1988.

### **Demais Bibliografias Consultadas**

ANTONUCCI, R.; GIACCHETTI, R.; MORSIANI, R. Indagini sperimentali per l'individuazione di correlazioni fra le caratteristiche elasto-meccaniche e la velocità degli ultrasuoni nel legno. **Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica**. 2/1995.

ANTONUCCI, RODOLFO; GIACCHETTI, ROBERTO; MUNAFÒ, PLACIDO. Nondestructive Evaluation of Structural Parameters in Wooden Beams. In International Wood Engineering Conference. **Proceedings...**, v.3, p.218-225, 1996.

BUCUR, Voichita. La vitesse des ultrasons et la qualité du bois. In: Colloque du Groupe Français de Rhéologie, 19, 15p., 1984, Paris (France).

BUCUR, Voichita. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, p.116-126, may 1983.

CHARNET, R.; FREIRE, C. A. DE LUNA; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. **Análise de Modelos de Regressão Linear**. Campinas (SP): Editora da Unicamp, 1999.

HAINES, D.W.; LEBAN, J.M.; HERBÉ, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, v.30, p.253-263, 1996.

MELO, JULIO E. DE. **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira**. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

MISHIRO, Akiyoshi. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I . *Mokusai Gakkaishi*, Tokio, Japan, v.41, n.12, p.1086-1092, 1995.

REBIC, M.; SRPCIC, J. Correlation between static and dynamic MOE of softwood at various moisture conditions. In: Colloque Scientifique Européen, 1988, Bordeaux (France) *Actes...* Bordeaux (France), p.81-90, 1988.

ROYER, D.; DIEULESAINT, E. **Ondes élastiques dans les solides**. Paris, France: Masson S.A., 1996.

SANDOZ, Jean Luc. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*. v.27, p.373-380, 1993.

SINCLAIR, A. N.; FARSHAD, M. A Comparison of three Methods for Determining Elastic Constants of Wood. **Journal of Testing and Evaluation**. Philadelphia (USA), v.15, n.2, p.77-86, 1987.

STEINKAMP, Georg. User Handbook for the Ultrasonic Test Instrument. 59p. Bremen, Germany, (sem data).

VINH, TUONG. **Mise au point de la methode non destructive ultrasonore (Mesure de constantes élastiques du bois)**. 191p. Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique, Saint-Ouen, France, 1982.

# **ANEXO I**

## Anexo I

**Tabela A1- Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova – Espécie Cupiúba - condição saturada**

Identificação do CP	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{LLc}$ (m/s)	$C_{LLc}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{c0}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{c0}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11 A	1,009	4230	1805	1352	2,97
11B	0,973	4421	1901	1350	3,87
12A	0,978	4505	1985	1100	3,00
12B	1,037	4305	1922	1102	3,84
13A	1,010	4618	2154	1501	4,07
13B	1,045	4402	2025	1312	4,03
14A	1,042	4288	1918	1371	3,20
14B	1,016	4467	2282	1860	4,09
21A	1,006	4415	1961	1233	3,65
21B	1,000	4447	1977	1059	3,98
22A	1,004	4469	2005	1487	3,88
22B	1,045	4606	2217	1935	4,30
23A	1,010	4368	1927	1250	3,44
23B	1,046	4295	1929	1529	3,84
24A	1,029	4345	2456	2200	4,00
24B	1,033	4289	1900	1029	3,59
25A	1,048	4301	1938	1597	3,83
25B	1,038	4441	2047	1544	3,78
31A	0,996	4434	1958	1311	3,87
31B	0,978	4351	1852	1300	3,66
32A	1,028	4701	2272	1610	3,37
32B	1,024	4543	2114	1781	3,95
33A	1,009	4580	2098	1397	3,25
33B	0,988	4568	2061	1543	3,63
34A	1,003	4691	2207	1328	3,57
34B	1,033	4502	2094	1558	4,03
35A	1,045	4300	1932	1353	3,94
35B	1,040	4317	1938	1342	4,00
41A	1,030	4410	2003	1239	4,01
41B	1,058	4330	1984	1316	3,56
42A	1,024	4498	2172	1921	3,62
42B	1,054	4414	2053	1564	3,70
43A	1,006	4464	2005	1437	4,02
43B	1,052	4274	1921	1036	3,82
44A	1,048	4157	1811	1152	3,64
44B	1,029	4191	1408	432	1,63

51A	1,014	4440	1999	1664	3,97
51B	1,007	4434	1979	1250	4,07
52A	1,052	4414	2049	1446	3,91
52B	1,030	4301	1906	851	3,45
53A	1,012	4685	2223	2003	4,17
53B	1,011	4474	2024	1536	3,97
54A	1,037	4460	2063	1354	3,94
54B	1,031	4070	1708	866	2,45
61A	0,993	4379	1904	987	3,57
61B	0,952	4271	1736	1140	2,54
62A	1,054	4504	2138	1430	4,11
62B	1,042	4597	1922	1078	3,80
63A	1,060	4672	2314	1363	3,61
63B	1,072	4448	2121	1266	3,79
64A	1,038	4454	2058	1405	4,14
64B	1,026	4365	1955	1134	3,81
65A	1,046	4357	1986	1446	3,78
65B	1,038	4450	1855	848	2,96
<b>Média</b>	<b>1,025</b>	<b>4421</b>	<b>2003</b>	<b>1361</b>	<b>3,69</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>2,41</b>	<b>3,05</b>	<b>8,26</b>	<b>22,9</b>	<b>13,0</b>

**Tabela A2- Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova – Espécie Eucalipto Citriodora - condição saturada**

<b>Identificação do CP</b>	<b><math>\rho_{\text{papa}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>V_{\text{LLc}}</math> (m/s)</b>	<b><math>C_{\text{LLc}}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>E_{\text{c0}}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>f_{\text{c0}}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>
101A	1,24	4613	2539	1607	5,55
101B	1,206	4456	2394	1491	5,53
102A	1,26	4495	2545	1689	6,18
102B	1,25	4569	2607	1993	6,02
201A	1,193	4591	2514	1780	6,15
201B	1,211	4536	2493	1686	5,10
202A	1,196	4677	2617	2207	6,35
202B	1,24	4577	2596	1907	5,224
203A	1,238	4577	2594	2068	5,68
203B	1,226	4555	2543	1918	5,204
302A	1,243	4570	2596	2491	6,39
302B	1,223	4464	2438	1655	5,62
303A	1,174	4464	2339	1342	5,065
303B	1,239	4629	2556	2020	5,15
304A	1,252	4550	2507	1576	6,422
304B	1,198	4570	2501	1721	6,322
401A	1,224	4467	2442	1793	5,37

401B	1,227	4440	2419	1729	6,03
402A	1,163	4632	2495	1789	5,23
402B	1,06	4637	2279	1460	5,25
403A	1,139	4698	2515	2075	6,18
403B	1,186	4528	2432	2137	5,73
404A	1,202	4673	2625	2336	5,55
404B	1,172	4573	2452	1887	5,936
501A	1,213	4385	2333	1707	4,74
501B	1,217	4404	2362	1422	4,84
502A	1,196	4409	2324	1800	5,84
502B	1,147	4461	2282	1473	5,03
503A	1,214	4570	2535	1881	5,17
503B	1,164	4415	2270	1565	4,57
504A	1,204	4543	2485	2080	5,12
504B	1,227	4441	2420	1499	5,15
601A	1,21	4439	2386	1773	5,43
601B	1,159	4173	2319	1987	3,52
602A	1,236	4583	2597	2872	5,7
602B	1,254	4417	2446	1635	5,52
603A	1,272	4599	2490	1964	6,00
603B	1,20	4507	2439	1718	4,86
604A	1,225	4487	2467	2273	5,16
604B	1,202	4473	2406	1916	5,58
701A	1,18	4591	2483	1671	5,98
701B	1,182	4461	2352	1456	5,34
702A	1,178	4614	2509	1947	5,91
702B	1,173	4509	2385	1568	5,40
703A	1,239	4469	2474	1686	5,48
703B	1,212	4380	2325	1900	4,86
801 <sup>A</sup>	1,244	4298	2298	1465	5,05
801B	1,196	4418	2333	1555	5,77
802 <sup>A</sup>	1,238	4312	2303	1326	5,52
802B	1,254	4634	2494	1767	5,4
<b>Média</b>	<b>1,208</b>	<b>4511</b>	<b>2453</b>	<b>1805</b>	<b>5,48</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>3,13</b>	<b>2,33</b>	<b>4,10</b>	<b>16,7</b>	<b>9,91</b>

**Tabela A3- Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às Fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova – Espécie Pinus elliottii - condição saturada**

Identificação do CP	$\rho_{\text{papa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLc}}$ (m/s)	$C_{\text{LLc}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	1,036	3274	1110	476	2,3
11B	0,991	4360	1884	795	2,28

12A	0,881	2692	638	244	1,3
12B	0,832	3489	1013	455	1,43
21A	0,999	4454	1982	704	2,26
21B	0,997	4674	2178	896	2,37
22A	0,663	3447	788	382	2,04
22B	1,005	4658	2180	658	2,2
31A	0,995	3788	1427	623	1,89
31B	1,048	4194	1843	672	1,91
32A	0,715	3772	1017	465	2,08
32B	0,758	4155	1314	560	2,01
33A	0,995	4298	1838	810	2,28
33B	0,963	4390	1856	874	2,03
41A	0,975	3621	1278	611	2,00
41B	0,999	4976	2473	1270	2,53
42A	0,844	3839	1243	446	1,68
42B	0,986	3712	1358	473	1,65
43A	0,963	3352	1082	400	1,50
43B	0,983	4411	1912	681	1,72
51A	1,054	4721	2349	1137	2,00
51B	1,022	4261	1855	793	2,05
52A	0,876	3896	1329	469	1,52
52B	0,939	3713	1294	442	1,73
53A	1,034	4918	2500	697	2,04
53B	1,00	4918	2419	904	2,11
61A	0,907	4612	1929	836	2,22
61B	0,883	4373	1688	764	2,07
62A	1,024	3896	1554	693	2,41
62B	1,082	3735	1509	487	2,55
71A	1,015	4466	2024	681	2,27
71B	0,939	3135	924	351	1,60
72A	0,734	3253	777	338	1,88
72B	0,837	4411	1628	677	1,87
81A	0,916	4398	1772	714	1,85
81B	1,023	4823	2379	976	2,28
82A	0,97	3832	1424	511	1,52
82B	0,952	4479	1910	680	1,82
91A	1,021	3762	1445	724	2,28
91B	0,947	4732	2120	710	1,78
92A	1,00	4441	1988	604	1,90
92B	0,849	3992	1353	398	1,58
101A	1,042	3906	1589	623	2,44
101B	1,075	5171	2874	1022	2,83
102A	1,031	2691	746	310	1,59
102B	0,922	4347	1742	644	1,74

111A	0,959	4547	1982	830	2,10
111B	1,029	4717	2289	776	1,85
112A	1,041	4547	2152	725	2,19
112B	0,997	4918	2411	905	2,25
<b>Média</b>	<b>0,954</b>	<b>4143</b>	<b>1687</b>	<b>658</b>	<b>1,99</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>9,87</b>	<b>14,1</b>	<b>31,3</b>	<b>32,7</b>	<b>16,3</b>

**Tabela A4 - Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova - Espécie Cupiúba - condição seca ao ar**

<b>Identificação do CP</b>	$\rho_{\text{papa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLc}}$ (m/s)	$C_{\text{LLc}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	0,80	4951	1961	1482	4,75
11B	0,80	4830	1866	1688	5,40
12A	0,855	4935	2082	1626	5,04
12B	0,858	5081	2215	1913	5,53
13A	0,848	4936	2066	1818	5,50
13B	0,858	5016	2159	1772	5,82
14A	0,849	5148	2250	1296	5,53
14B	0,872	5016	2194	2007	5,69
21A	0,807	4904	1941	1310	4,43
21B	0,806	4847	1893	1467	5,17
22A	0,877	5115	2295	2233	5,82
22B	0,844	5097	2192	1320	4,67
23A	0,870	5184	2338	1647	5,98
23B	0,878	5146	2325	1695	6,05
24A	0,849	4984	2109	1697	5,38
24B	0,850	4984	2111	1314	5,03
25A	0,863	4904	2075	1303	5,16
25B	0,876	4968	2162	1671	5,14
31A	0,818	4797	1882	1895	5,20
31B	0,822	4816	1906	1815	4,55
32A	0,870	5256	2404	1866	5,39
32B	0,885	5115	2315	1975	5,25
33A	0,878	5236	2407	2419	5,61
33B	0,846	5320	2394	1602	6,46
34A	0,897	5326	2545	2788	6,67
34B	0,882	5080	2276	860	3,53
35A	0,888	4859	2096	1743	5,20
35B	0,925	4775	2109	1528	5,47
41A	0,833	4936	2030	1451	4,76
41B	0,841	4937	2050	1537	5,32
42A	0,867	5296	2432	1926	5,68

42B	0,877	4984	2178	1625	4,88
43A	0,865	5184	2325	2461	5,86
43B	0,876	4968	2162	1333	4,94
44A	0,830	4842	1946	1512	5,31
44B	0,877	4875	2084	1464	5,35
51A	0,828	4952	2030	1527	5,16
51B	0,830	4891	1985	1476	5,38
52A	0,843	5100	2193	1775	4,82
52B	0,86	5163	2293	1630	5,22
53A	0,874	5168	2335	1705	5,98
53B	0,874	5064	2241	1232	5,24
54A	0,870	4936	2120	1518	5,33
54B	0,899	4831	2098	1542	5,32
61A	0,860	5065	2206	1488	5,48
61B	0,829	4832	1935	989	5,07
62A	0,861	4638	1852	1170	3,10
62B	0,856	5081	2210	1431	5,32
63A	0,879	5082	2270	2069	5,13
63B	0,868	5200	2347	1400	5,55
64A	0,874	5099	2273	1700	5,77
64B	0,905	4772	2061	1487	5,10
65A	0,858	5016	2159	2166	5,83
65B	0,880	4984	2186	1406	5,6
<b>Média</b>	<b>0,859</b>	<b>5010</b>	<b>2159</b>	<b>1644</b>	<b>5,29</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>3,02</b>	<b>3,00</b>	<b>7,50</b>	<b>21,30</b>	<b>11,00</b>

**Tabela A5 - Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova - Espécie Eucalipto Citriodora - condição seca ao ar**

<b>Identificação do CP</b>	<b><math>\rho_{\text{papa}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>V_{LLc}</math> (m/s)</b>	<b><math>C_{LLc}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>E_{c0}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>f_{c0}</math> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>
101A	1,10	4947	2692	2892	7,12
101B	1,06	5250	2921	3307	7,32
102A	1,12	4983	2781	2783	7,84
102B	1,08	4942	2638	2149	7,33
201A	1,09	5095	2830	2761	7,98
201B	1,09	5023	2750	3134	7,49
202A	1,05	5190	2829	1952	7,75
202B	1,06	5036	2689	2037	6,94
203A	1,08	5000	2700	2381	7,01
203B	1,03	5134	2715	2083	6,86
302A	1,06	5017	2668	2318	7,34
302B	1,01	5075	2600	2300	6,43

303A	1,01	5000	2525	2353	6,97
303B	1,06	5068	2730	3041	7,34
304A	1,03	5278	2869	3088	7,45
304B	1,02	5056	2607	1890	6,78
401A	1,10	4870	2609	2555	7,45
401B	1,11	4936	2698	2163	7,57
402A	C/ defeito				
402B	0,93	5407	2719	2242	7,75
403A	C/ defeito				
403B	0,98	5188	2650	2242	6,52
404A	1,05	5192	2830	3096	7,57
404B	1,04	5063	2666	2283	7,10
501A	1,09	4833	2546	2203	7,25
501B	1,08	4776	2463	2318	6,93
502A	1,02	4844	2394	2711	6,84
502B	0,97	5207	2630	2371	6,50
503A	0,99	5343	2826	2389	7,08
503B	0,95	5155	2524	2616	6,45
504A	1,05	5106	2738	3277	7,68
504B	1,02	5140	2695	2775	6,90
601A	1,00	5051	2551	2341	6,72
601B	0,95	4839	2224	1376	5,37
602A	1,06	5196	2862	2569	7,33
602B	1,05	4919	2529	2262	6,45
603A	1,05	5051	2674	1952	7,22
603B	C/ defeito				
604A	1,06	5455	2826	3621	7,88
604B	1,03	5098	2677	2044	6,82
701A	1,02	5017	2552	3018	6,92
701B	0,98	5007	2457	2080	6,23
702A	1,05	5364	3032	3699	7,26
702B	1,02	5085	2630	2533	6,78
703A	1,02	4903	2442	2289	6,79
703B	1,06	4884	2528	2255	6,62
801A	1,06	4907	2552	2451	7,16
801B	1,03	5068	2646	2069	6,69
802A	1,05	4857	2468	2294	6,65
802B	1,07	5198	2894	2975	7,73
<b>Média</b>	<b>1,04</b>	<b>5063</b>	<b>2661</b>	<b>2501</b>	<b>7,06</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>4,12</b>	<b>3,13</b>	<b>5,80</b>	<b>19,0</b>	<b>7,20</b>

**Tabela A6 - Resultados dos Ensaios de Compressão Paralela às fibras e Ultra-Som em corpos-de-prova - Espécie Pinus elliottii - condição seca ao ar**

Identificação do CP	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{\text{LLc}}$ (m/s)	$C_{\text{LLc}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{\text{c0}}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	0,465	4794	1068	807	2,32
11B	0,446	5229	1219	890	2,33
12A	0,610	5576	1897	1745	3,68
12B	0,525	5785	1757	1216	2,96
21A	0,565	4615	1203	558	2,51
21B	0,487	4076	810	593	2,32
22A	0,465	4900	1116	651	2,29
22B	0,497	4286	913	517	2,48
31A	0,666	4950	1632	1280	3,22
31B	0,610	3501	748	446	2,48
32A	0,493	4248	890	588	2,36
32B	0,540	5034	1368	1019	2,91
33A	0,474	5655	1516	1044	2,91
33B	0,455	5401	1327	1017	2,70
41A	0,540	5516	1643	727	3,24
41B	0,468	5140	1236	756	2,58
42A	0,523	5476	1568	1234	3,05
42B	0,431	4838	1009	685	2,16
43A	0,470	4003	753	463	1,82
43B	0,519	5263	1437	1098	3,25
51A	0,495	5000	1238	784	2,67
51B	0,534	5396	1555	1118	3,07
52A	0,415	5085	1072	867	2,49
52B	0,452	5263	1252	883	2,82
53A	0,458	5300	1287	886	2,72
53B	0,526	5182	1412	1016	3,28
61A	0,586	5687	1895	1460	3,90
61B	0,598	5515	1818	1804	3,46
62A	0,528	5016	1328	656	3,26
62B	0,530	5474	1588	996	3,65
71A	0,510	5597	1598	1118	3,58
71B	0,467	4604	990	640	2,08
72A	0,397	4426	778	403	2,00
72B	0,507	4918	1226	798	3,27
81A	0,523	4144	898	589	3,24
81B	0,492	5494	1485	907	3,50
82A	0,537	4016	866	622	2,05
82B	0,456	4545	942	725	2,93
91A	0,464	4883	1106	746	2,82

91B	0,510	3978	807	517	2,53
92A	0,445	5280	1240	889	2,78
92B	0,523	5450	1553	1581	3,64
101A	0,447	4099	751	502	2,55
101B	0,617	5496	1864	2040	4,62
102A	0,595	3472	717	310	2,16
102B	0,572	5172	1530	1594	3,60
111A	0,465	5319	1315	939	3,22
111B	0,497	4399	962	748	3,00
112A	0,582	5193	1570	1253	3,84
112B	0,558	4266	1015	667	2,91
<b>Média</b>	<b>0,510</b>	<b>4919</b>	<b>1255</b>	<b>908</b>	<b>2,91</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>11,35</b>	<b>12,00</b>	<b>27,00</b>	<b>42,00</b>	<b>19,90</b>

**Tabela A7 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Cupiúba - condição saturada**

<b>Viga</b>	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$C_{LLv}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_M$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	1,088	3986	1729	1177
11B	1,090	3745	1531	1120
12A	1,160	3995	1851	1175
12B	1,156	3963	1816	1167
13A	1,160	4073	1922	1037
13B	1,160	2982	1032	720
14A	1,220	3905	1860	1209
14B	1,140	2791	888	633
21A	1,075	4017	1735	1208
21B	1,087	3843	1605	1073
22A	1,177	4112	1989	1248
22B	1,140	4062	1881	1151
23A	1,212	4165	2102	1074
23B	1,132	3041	1047	779
24A	1,156	3946	1800	1013
24B	1,150	2787	893	673
25A	1,170	3840	1725	1065
25B	1,100	3887	1662	1098
31A	1,070	4110	1807	1229
31B	1,094	3657	1463	1119
32A	1,148	4220	2044	1265
32B	1,178	4008	1892	1332
33A	1,140	4203	2014	1152
33B	1,167	3530	1454	896

34A	1,142	4161	1977	1065
34B	1,167	3216	1207	757
35A	1,123	3875	1686	1051
35B	1,175	3750	1653	1181
41A	1,090	4080	1814	1296
41B	1,145	3728	1591	1146
42A	1,200	4127	2044	1493
42B	1,170	3885	1766	1157
43A	1,090	4130	1860	962
43B	1,157	3751	1628	891
44A	1,160	3733	1616	1124
44B	1,000	3941	1553	1178
51A	1,086	3973	1714	1244
51B	1,045	3708	1437	1093
52A	1,158	4153	1997	1383
52B	1,180	4082	1966	1443
53A	1,192	4041	1946	1313
53B	1,116	3757	1575	906
54A	1,139	3862	1699	1198
54B	1,070	3890	1619	1161
61A	1,064	4015	1715	1162
61B	1,120	3743	1571	1180
62A	1,170	4008	1879	1354
62B	1,195	3955	1869	1298
63A	1,135	3892	1719	1367
63B	1,207	3893	1829	1288
64A	1,153	4036	1878	1311
64B	1,197	3707	1645	1107
65A	1,126	3907	1718	1201
65B	1,022	3863	1525	1100
<b>Média</b>	<b>1,136</b>	<b>3867</b>	<b>1693</b>	<b>1130</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>4,26</b>	<b>8,49</b>	<b>16,20</b>	<b>16,30</b>

**Tabela A8 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Eucalipto Citriodora - condição saturada**

Viga	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$C_{LLv}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_M$ (kN/cm <sup>2</sup> )
101A	1,155	4467	2306	1557
101B	1,245	4412	2424	1561
102A	1,195	4407	2320	1585
102B	1,267	4538	2610	1822
201A	1,237	4539	2498	1803

201B	1,259	4508	2460	1823
202A	1,289	4524	2639	2030
202B	1,276	4510	2596	1936
203A	1,239	4447	2541	1788
203B	1,273	4418	2485	1754
302A	1,245	4598	2633	1888
302B	1,227	4386	2423	1589
303A	1,222	4630	2620	1892
303B	1,236	4369	2466	1585
304A	1,219	4415	2376	1564
304B	1,215	4500	2462	1761
401A	1,260	4311	2343	1710
401B	1,289	4320	2406	1777
402A	1,231	4626	2636	1965
402B	1,196	4457	2376	1733
403A	1,265	4607	2685	2023
403B	1,308	4729	2590	2211
404A	1,337	4771	2755	2337
404B	1,338	4622	2645	2349
501A	1,245	4352	2359	1782
501B	1,263	4174	2312	1553
502A	1,242	4348	2348	1420
502B	1,233	4365	2348	1719
503A	1,199	4392	2420	1469
503B	1,248	4267	2272	1718
504A	1,261	4491	2542	1805
504B	1,226	4440	2416	1675
601A	1,241	4266	2258	1680
601B	1,278	4218	2273	1630
602A	1,269	4481	2550	1935
602B	1,249	4289	2300	1634
603A	1,309	4528	2508	2052
603B	1,256	4440	2476	1741
604A	1,237	4550	2561	2001
604B	1,272	4427	2494	1891
701A	1,267	4379	2429	1699
701B	1,225	4307	2272	1529
702A	1,303	4466	2599	1989
702B	1,249	4389	2408	1769
703A	1,211	4395	2341	1628
703B	1,247	4460	2481	1787
801A	1,226	4287	2253	1565
801B	1,223	4146	2101	1265
802A	1,282	4216	2279	1593

802B	1,193	4422	2334	1529
<b>Média</b>	<b>1,249</b>	<b>4432</b>	<b>2440</b>	<b>1762</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>2,86</b>	<b>3,00</b>	<b>5,68</b>	<b>12,39</b>

**Tabela A9 – Resultados dos Ensaios à flexão estática e Ultra-Som em vigas estruturais – Espécie Pinus elliottii - condição saturada**

Viga	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>LL</sub> (m/s)	C <sub>LLv</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )	E <sub>M</sub> (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	0,942	3465	1131	603
11B	0,999	4179	1746	792
12A	0,928	3136	913	571
12B	0,859	3155	855	508
21A	0,867	3278	932	452
21B	0,965	3454	1152	696
22A	0,876	3281	943	553
22B	0,925	3360	1044	575
31A	0,978	3371	1111	638
31B	0,987	3678	1335	436
32A	0,774	2950	674	474
32B	0,790	3134	776	408
33A	0,926	3290	1002	601
33B	0,939	3504	1152	654
41A	0,995	3571	1268	599
41B	1,023	4110	1728	889
42A	0,960	2995	862	499
42B	0,850	2958	744	498
43A	1,004	3632	1324	688
43B	1,067	3625	1403	738
51A	1,020	3790	1465	694
51B	1,003	3351	1126	510
52A	0,842	3244	886	485
52B	0,887	3306	970	480
53A	1,002	3994	1598	765
53B	0,997	3908	1522	760
61A	0,962	4353	1823	909
61B	0,930	3898	1413	857
62A	1,009	3517	1248	737
62B	1,024	3865	1530	989
71A	0,958	3106	924	494

71B	0,794	2934	683	367
72A	0,759	2532	487	325
72B	0,900	3311	986	478
81A	1,029	3614	1344	707
81B	1,015	3914	1555	752
82A	0,986	3168	989	694
82B	0,997	3202	1022	516
91A	0,994	3533	1240	542
91B	0,976	3494	1191	504
92A	0,900	3160	899	384
92B	0,916	3275	987	445
101A	1,036	3717	1431	836
101B	1,104	4583	2319	1186
102A	0,934	2765	714	519
102B	0,941	3422	1102	646
111A	0,973	3679	1317	818
111B	1,005	3665	1350	727
112A	0,985	3581	1263	648
112B	0,995	3766	1411	840
<b>Média</b>	<b>0,950</b>	<b>3475</b>	<b>1178</b>	<b>630</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>8,00</b>	<b>11,50</b>	<b>29,10</b>	<b>27,80</b>

**Tabela A10 – Resultados dos Ensaios à Flexão Estática e Ultra-Som em vigas estruturais  
- Espécie Cupiúba – condição seca ao ar**

Viga	$\rho_{\text{papa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$C_{LLv}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_M$ (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	0,848	4819	1969	1532
11B	0,810	4806	1871	1312
12A	0,843	5044	2145	1571
12B	0,850	4970	2100	1480
13A	0,870	5079	2244	1513
13B	0,875	4829	2040	1040
14A	0,895	4971	2212	1549
14B	0,842	4617	1575	759
21A	0,825	4883	1967	1430
21B	0,812	4707	1800	1247
22A	0,858	4970	2120	1514
22B	0,876	5000	2190	1498
23A	0,903	5106	2354	1599
23B	0,876	5022	2209	1226
24A	0,844	5101	2196	1448
24B	0,904	4599	1912	965

25A	0,857	4777	1956	1279
25B	0,855	4695	1885	1300
31A	0,839	4846	1970	1464
31B	0,811	4670	1769	1102
32A	0,855	5076	2203	1510
32B	0,855	4985	2125	1525
33A	0,872	5207	2365	1488
33B	0,888	5026	2243	1249
34A	0,875	5106	2281	1507
34B	0,873	4702	1930	1013
35A	0,920	4860	2173	1531
35B	0,886	4608	1881	1384
41A	0,855	4843	2005	1528
41B	0,862	4554	1787	1290
42A	0,864	5022	2179	1487
42B	0,865	4802	1995	1324
43A	0,847	4929	2058	1197
43B	0,900	4808	2080	1473
44A	0,825	4732	1847	1136
44B	0,800	4821	1860	1390
51A	0,820	4800	1889	1370
51B	0,845	4634	1815	1389
52A	0,857	4999	2141	1653
52B	0,790	5023	1993	1312
53A	0,890	4993	2219	1588
53B	0,890	4855	2097	1534
54A	0,868	4743	1953	1514
54B	0,826	4767	1877	1485
61A	0,780	4925	1892	1382
61B	0,863	4503	1750	1068
62A	0,890	4862	2104	1636
62B	0,878	4837	2054	1588
63A	0,890	4973	2200	1733
63B	0,86	4976	2130	1550
64A	0,870	5075	2241	1559
64B	0,870	4623	1859	1312
65A	0,890	4661	1933	1499
65B	0,82	4767	1864	1393
<b>Média</b>	<b>0,858</b>	<b>4863</b>	<b>2028</b>	<b>1397</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>3,49</b>	<b>3,42</b>	<b>8,47</b>	<b>13,80</b>

**Tabela A11 – Resultados dos Ensaios à Flexão Estática e Ultra-Som em vigas estruturais  
- Espécie Eucalipto Citriodora – condição seca ao ar**

Viga	$\rho_{\text{apa}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_{LL}$ (m/s)	$C_{LLv}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$E_M$ (kN/cm <sup>2</sup> )
101A	0,970	4860	2291	1567
101B	1,060	4713	2354	1805
102A	1,030	4836	2409	1726
102B	1,080	4832	2521	1894
201A	1,100	4830	2567	2046
201B	1,090	4792	2503	2029
202A	1,070	4978	2651	2162
202B	1,080	4898	2591	2194
203A	1,170	4866	2771	2601
203B	1,030	4874	2446	1937
302A	1,110	4949	2720	2465
302B	1,090	4942	2662	2177
303A	1,100	5095	2856	2570
303B	1,100	4855	2593	2359
304A	1,030	4958	2532	1778
304B	1,047	4949	2565	2054
401A	1,130	4772	2573	2198
401B	1,110	4721	2474	2095
402A	0,980	5235	2686	2263
402B	0,95	5154	2523	2157
403A	0,997	5152	2646	2137
403B	1,060	5085	2740	2718
404A	1,100	4968	2715	2417
404B	1,100	4925	2668	2402
501A	1,060	4755	2397	2037
501B	0,940	4627	2013	1473
502A	1,020	4954	2503	1700
502B	0,970	5017	2442	1886
503A	1,090	4890	2606	2139
503B	0,950	5206	2477	1835
504A	1,040	5088	2692	2036
504B	0,996	4998	2488	2006
601A	1,000	4727	2234	1618
601B	1,012	4616	2167	1607
602A	1,090	4917	2635	2280
602B	1,056	4786	2419	2152
603A	1,060	4856	2500	2234
603B	1,110	4841	2601	2439
604A	1,100	5007	2758	2371

604B	1,020	4871	2421	1993
701A	1,040	4692	2290	1816
701B	1,010	4740	2270	1782
702A	1,030	4892	2465	1984
702B	0,990	4859	2337	1869
703A	1,020	4814	2364	1860
703B	0,970	4877	2307	1646
801A	1,040	4703	2300	2045
801B	1,000	4725	2233	1528
802A	1,030	4547	2129	1152
802B	1,050	4842	2462	1909
<b>Média</b>	<b>1,046</b>	<b>4882</b>	<b>2491</b>	<b>2023</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>4,97</b>	<b>3,06</b>	<b>7,28</b>	<b>15,62</b>

**Tabela A12 – Resultados dos Ensaios à Flexão Estática e Ultra-Som em vigas estruturais  
- Espécie Pinus elliottii – condição seca ao ar**

<b>Viga</b>	<b><math>\rho_{\text{papa}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>LL</sub></b> (m/s)	<b>C<sub>LLv</sub></b> (kN/cm <sup>2</sup> )	<b>E<sub>M</sub></b> (kN/cm <sup>2</sup> )
11A	0,519	4363	988	675
11B	0,540	4947	1321	837
12A	0,494	4323	923	702
12B	0,474	4145	815	630
21A	0,510	4530	1047	610
21B	0,493	4834	1152	800
22A	0,496	4379	951	687
22B	0,489	4419	955	674
31A	0,558	3850	827	818
31B	0,580	4681	1271	649
32A	0,620	3421	726	533
32B	0,504	3977	797	525
33A	0,550	4000	880	760
33B	0,550	4363	1047	802
41A	0,540	4552	1119	740
41B	0,528	5280	1472	1045
42A	0,455	4130	776	555
42B	0,463	4626	991	597
43A	0,490	4865	1160	809
43B	0,475	4979	1178	844
51A	0,500	5014	1257	694
51B	0,517	4636	1111	632
52A	0,430	4456	854	550
52B	0,467	4455	927	571

53A	0,484	5172	1295	912
53B	0,484	5090	1254	908
61A	0,570	5230	1558	1150
61B	0,558	4898	1339	983
62A	0,543	4404	1053	841
62B	0,543	4817	1260	1020
71A	0,502	4359	955	680
71B	0,430	4022	696	442
72A	0,434	3631	572	451
72B	0,475	4470	949	672
81A	0,497	4923	1204	810
81B	0,483	4959	1188	870
82A	0,464	4514	945	772
82B	0,460	4512	936	540
91A	0,470	4923	1139	659
91B	0,630	5245	1733	1187
92A	0,485	4051	795	540
92B	0,540	4574	1130	724
101A	0,650	4388	1251	1018
101B	0,470	4517	959	638
102A	0,599	3663	804	685
102B	0,520	4490	1048	739
111A	0,496	5036	1258	1014
111B	0,480	4678	1051	810
112A	0,500	4856	1179	787
112B	0,500	4837	1170	898
<b>Média</b>	<b>0,510</b>	<b>4550</b>	<b>1065</b>	<b>750</b>
<b>C.V.(%)</b>	<b>9,67</b>	<b>9,50</b>	<b>21,2</b>	<b>23,0</b>

# **ANEXO II**

## Anexo II

Seguem-se os 36 gráficos dos modelos de correlação elencados nas Tabelas 4.5 a 4.10 do Capítulo 4.

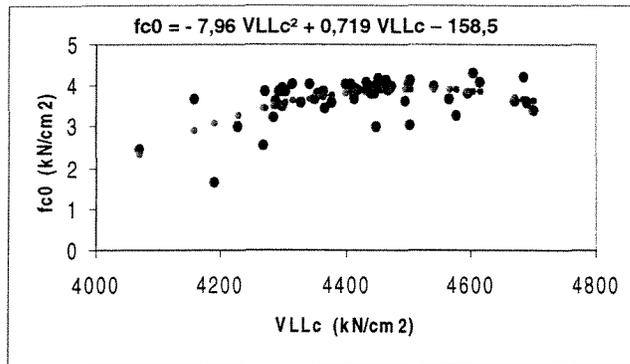


Figura A1 – Curva de correlação VLLc x fc0 para a espécie Cupiúba na condição saturada

Figura A2 – Curva de correlação VLLc x Ec0 para a espécie Cupiúba na condição saturada

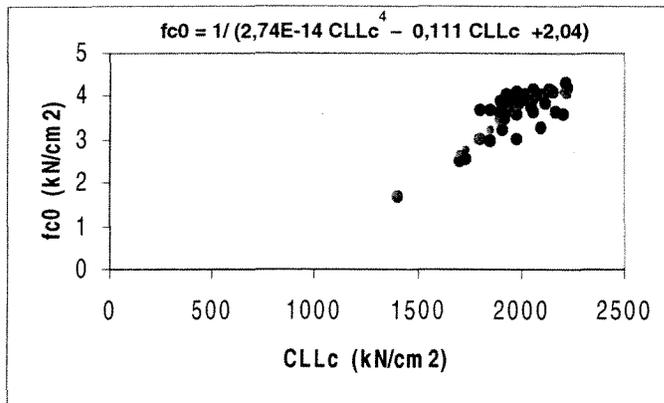
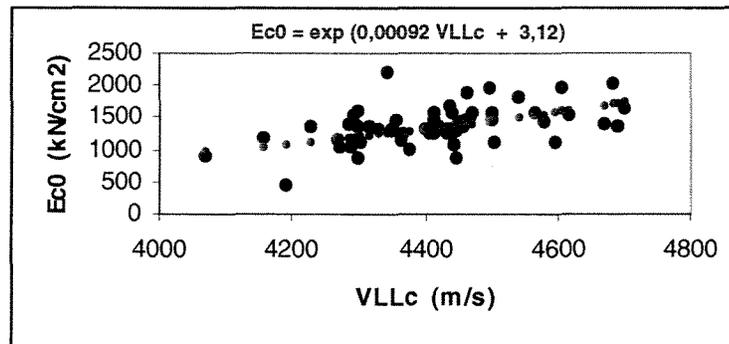
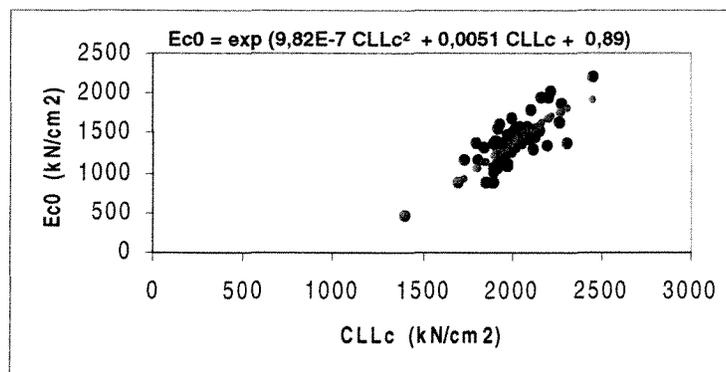


Figura A3 – Curva de correlação CLLc x fc0 para a espécie Cupiúba na condição saturada

Figura A4 – Curva de correlação CLLc x Ec0 para a espécie Cupiúba na condição saturada



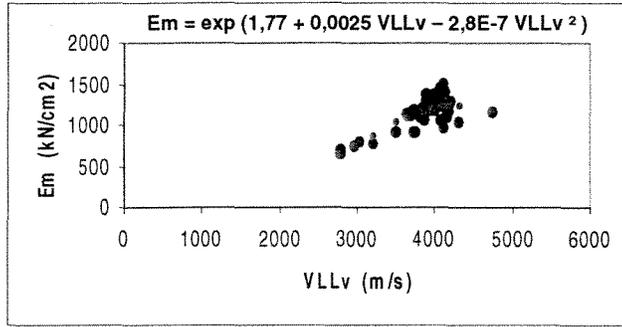


Figura A5 – Curva de correlação VLLv x Em para a espécie Cupiúba na condição saturada

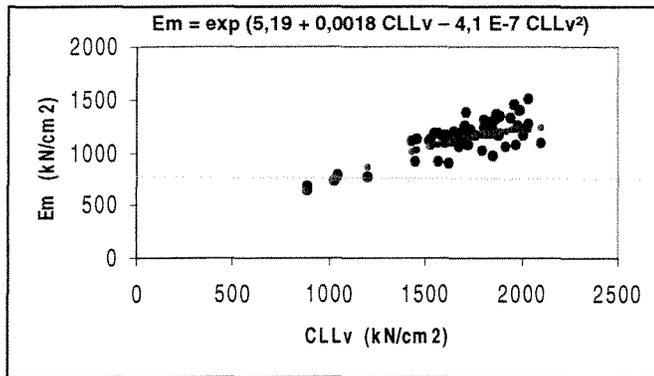


Figura A6 – Curva de correlação CLLv x Em para a espécie Cupiúba na condição saturada

Figura A7 – Curva de correlação VLLc x fc0 para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar

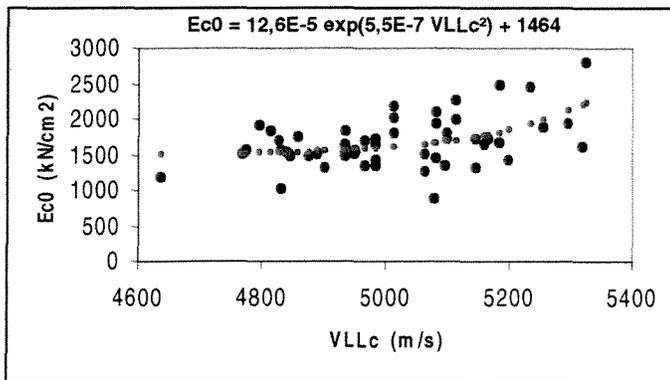
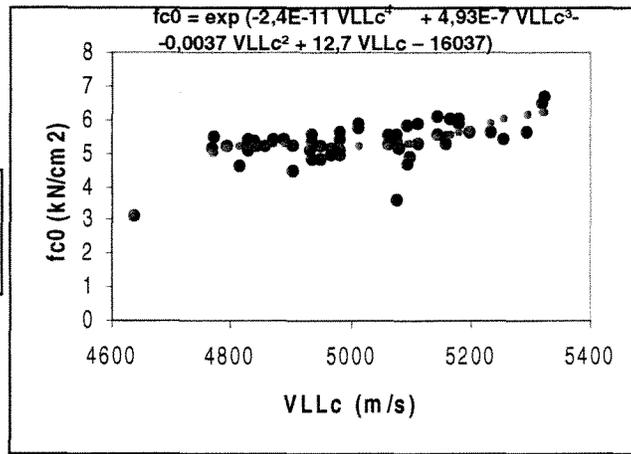


Figura A8 – Curva de correlação VLLv x Ec0 para a espécie Cupiúba na condição seca ao ar

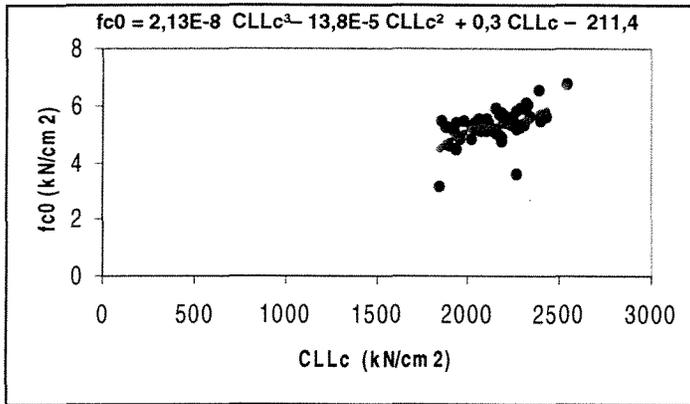


Figura A9 – Curva de correlação  
CLLc x fc0 para a espécie  
Cupiúba na condição seca ao ar

Figura A10 – Curva de correlação  
CLLc x Ec0 para a espécie Cupiúba  
na condição seca ao ar

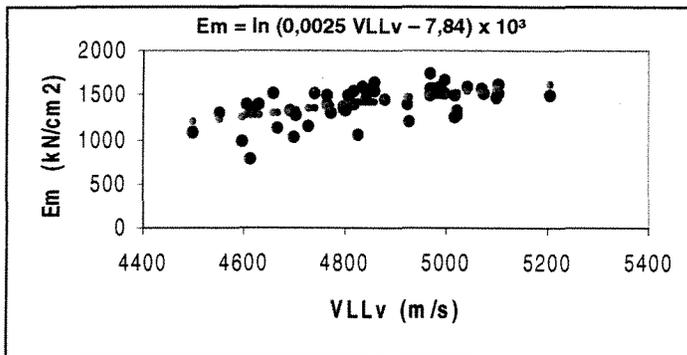
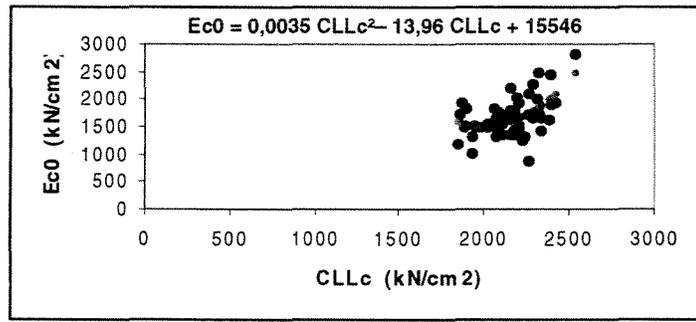
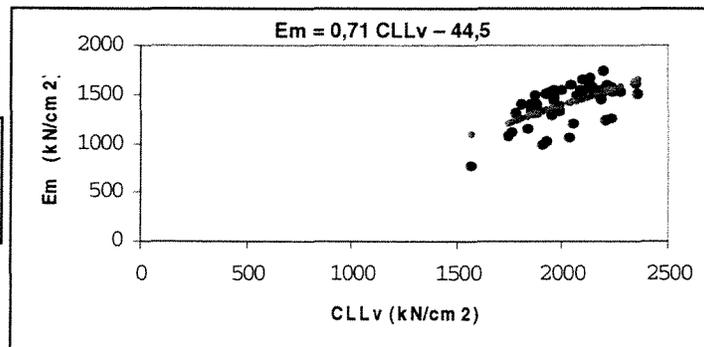


Figura A11 – Curva de correlação  
VLLv x Em para a espécie Cupiúba  
na condição seca ao ar

Figura A12 – Curva de correlação  
CLLv x Em para a espécie Cupiúba  
na condição seca ao ar



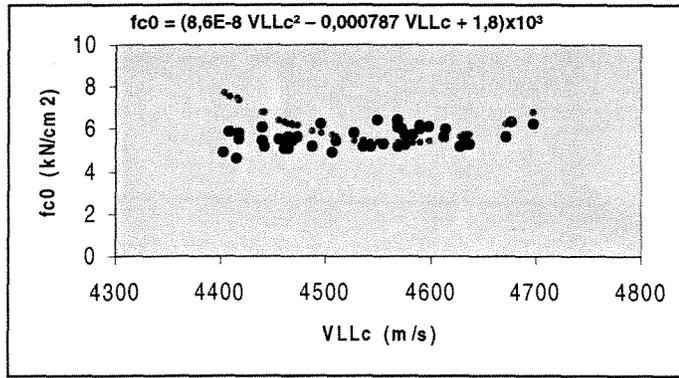
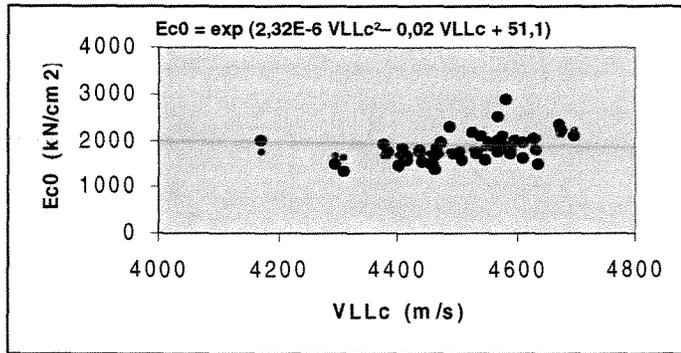


Figura A13 – Curva de correlação VLLc x  $f_{c0}$  para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada

Figura A14 – Curva de correlação VLLc x  $E_{c0}$  para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada



4

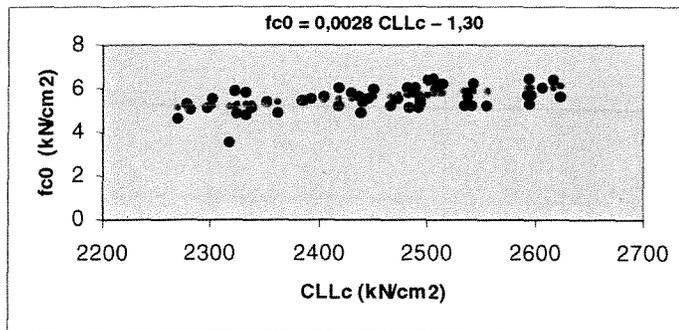
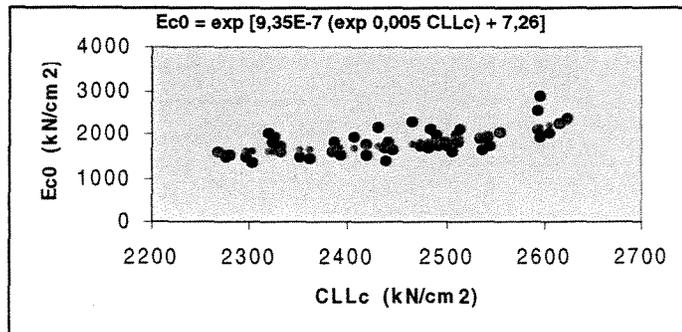


Figura A15 – Curva de correlação CLLc x  $f_{c0}$  para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada

Figura A16 – Curva de correlação CLLc x  $E_{c0}$  para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada



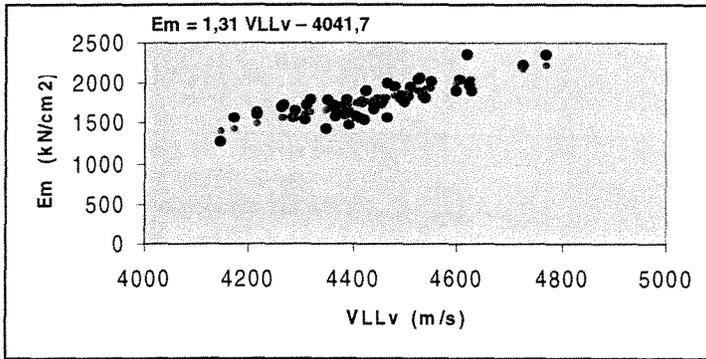


Figura A17 – Curva de correlação VLLv x Em para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada

Figura A18 – Curva de correlação CLLv x Em para a espécie Euc. Citriodora na condição saturada

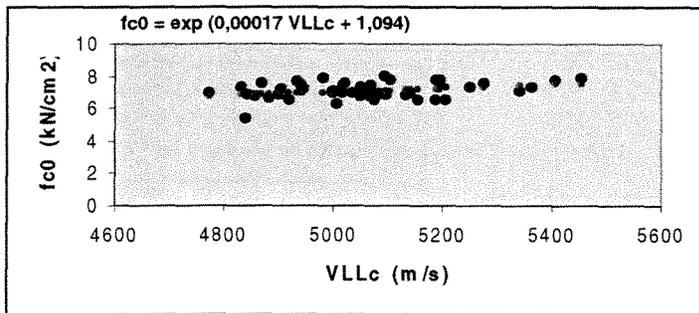
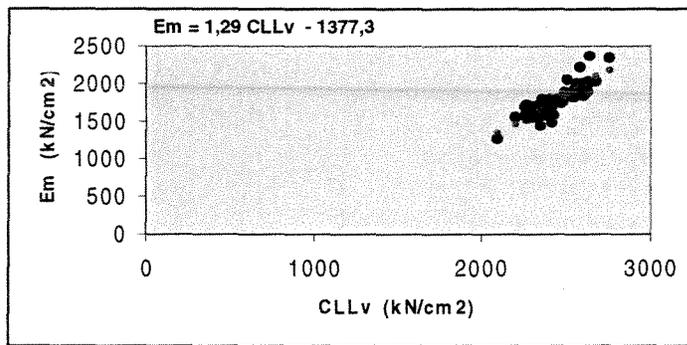
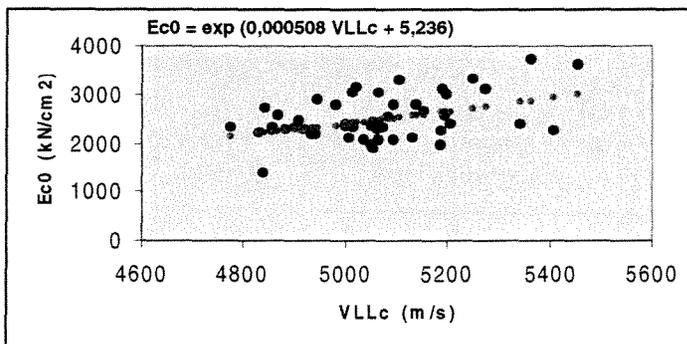


Figura A19 – Curva de correlação VLLc x fc0 para a espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar

Figura A20 – Curva de correlação VLLc x Ec0 para a espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar



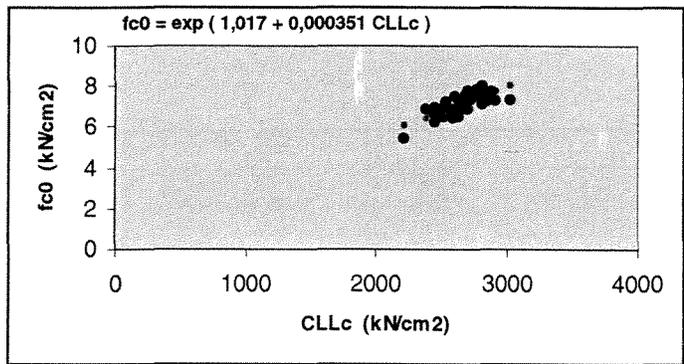


Figura A21 – Curva de correlação CLLc x fc0 para a espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar

Figura A22 – Curva de correlação CLLc x Ec0 para a espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar

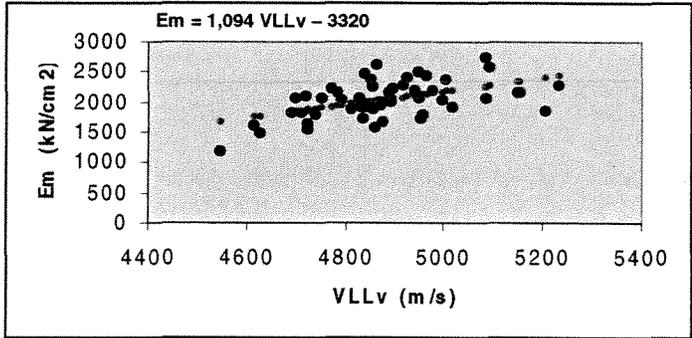
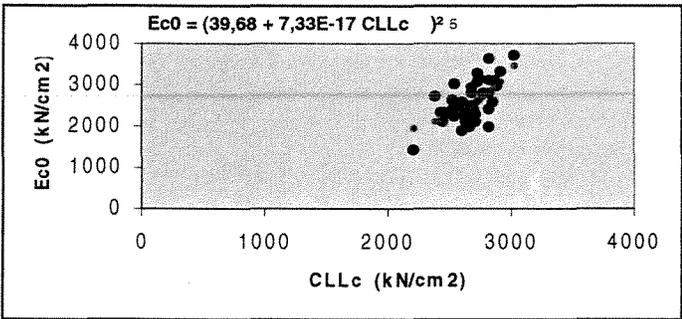
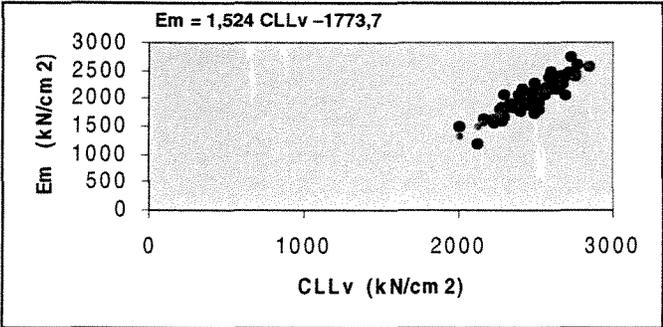


Figura A23 – Curva de correlação VLLv x Em para a espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar

Figura A24 – Curva de correlação CLLv x Em para a Espécie Euc. Citriodora na condição seca ao ar



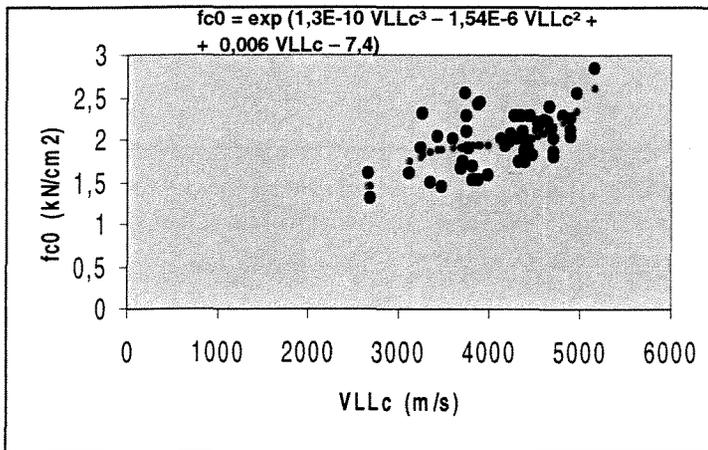


Figura A25 – Curva de correlação VLLc x  $f_{c0}$  para a espécie Pinus eliottii na condição saturada

Figura A26 – Curva de correlação VLLc x  $E_{c0}$  para a espécie Pinus eliottii na condição saturada

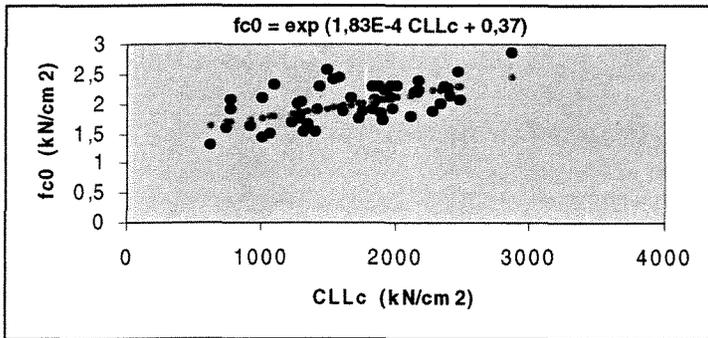
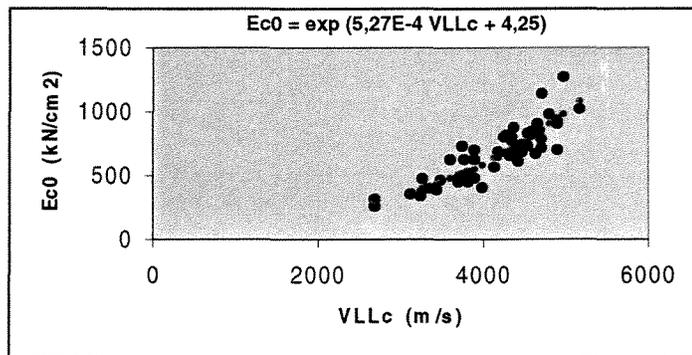
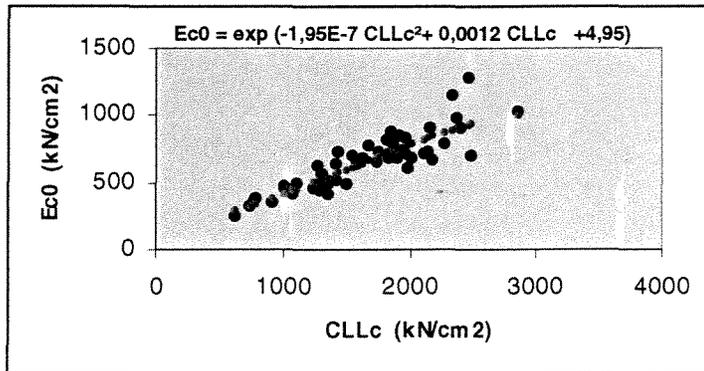


Figura A27 – Curva de correlação CLLc x  $f_{c0}$  para a espécie Pinus eliottii na condição saturada

Figura A28 – Curva de correlação CLLc x  $E_{c0}$  para a espécie Pinus eliottii na condição saturada



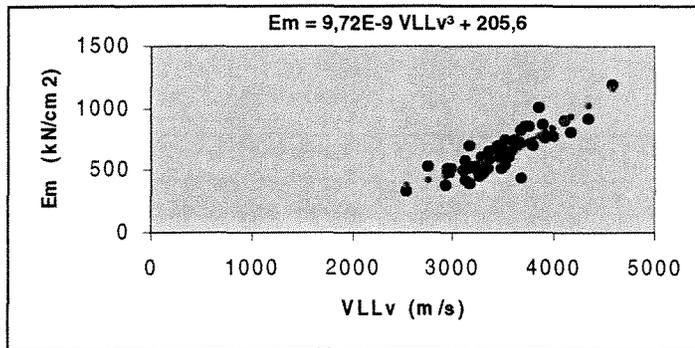


Figura A29 – Curva de correlação VLLv x Em para a espécie Pinus elliottii na condição saturada

Figura A30 – Curva de correlação CLLv x Em para a espécie Pinus elliottii na condição saturada

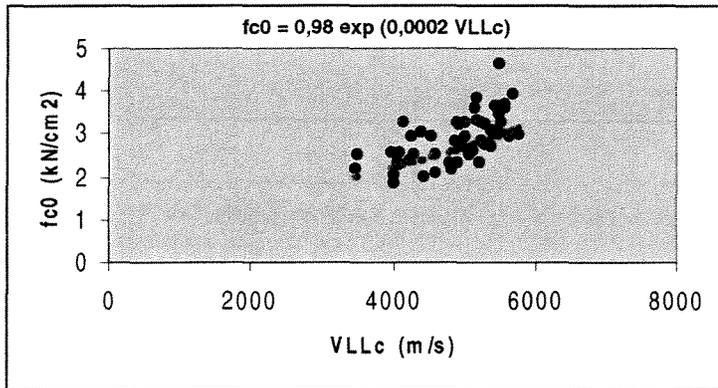
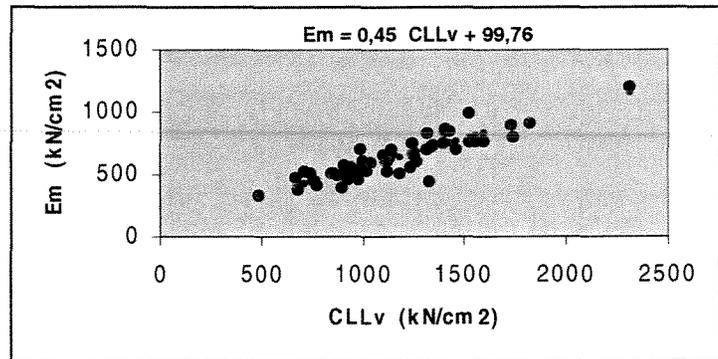
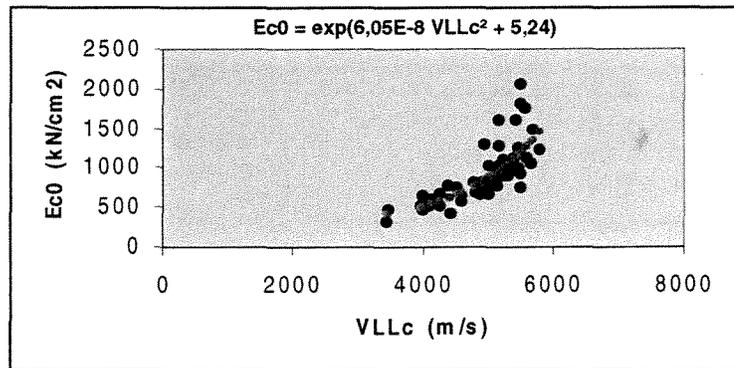


Figura A31 – Curva de correlação VLLc x fc0 para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar

Figura A32 – Curva de correlação VLLc x Ec0 para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar



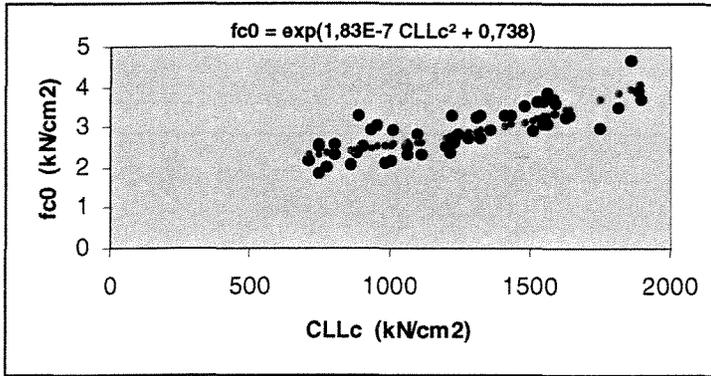


Figura A33 – Curva de correlação CLLc x fc0 para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar

Figura A34 – Curva de correlação CLLc x Ec0 para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar

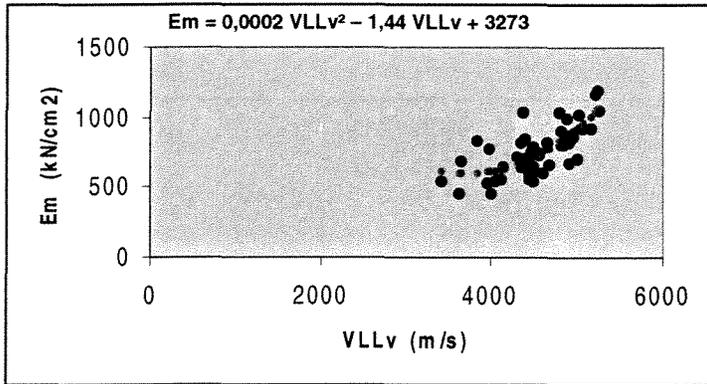
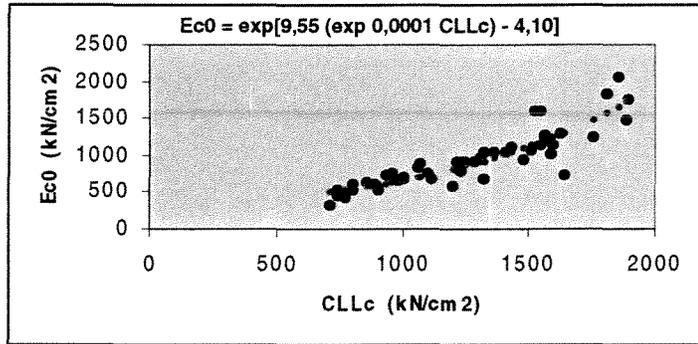
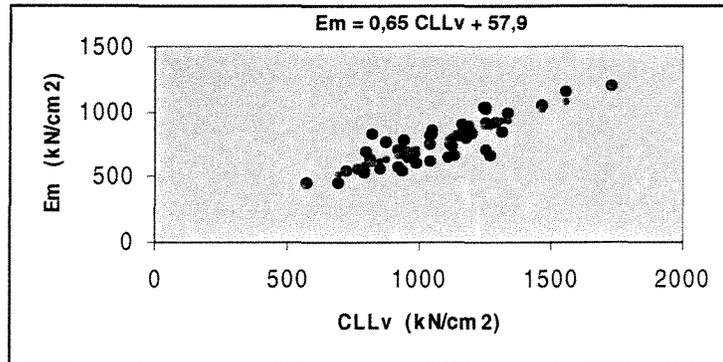


Figura A35 – Curva de correlação VLLv x Em para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar

Figura A36 – Curva de correlação CLLv x Em para a espécie Pinus elliottii na condição seca ao ar



# **ANEXO III**

Rapport sur le thèse de doctorat présentée par

André Bartholomeu

« Classification des éléments de structure en bois par ultrasons »

à l' Université de Campinas – FERAGRI – BRESIL

Directeur de thèse Mme le Professeur Raquel Gonçalves

Le rapport de thèse présenté par M André Bartholomeu est structuré en sept chapitres : introduction, revue de littérature, matériel et méthode, résultats, discussions, conclusions et bibliographie.

Dans le premier chapitre « Introduction » l' auteur décrit la méthode normalisée utilisée au Brésil pour la caractérisation des bois utilisés en construction, qui est celle de l' essais de la résistance à la compression parallèle aux fibres sur des échantillons de 5x5x15mm. Cette méthode est une méthode de laboratoire et elle est difficilement utilisable dans l' industrie. Les éléments de structure en bois sont testés par sollicitation de flexion selon la norme ASTM D-198-84 « Static tests of timbers in structural sizes ». Après une description détaillée de ces méthodes, l' auteur montre la nécessité de développer des techniques non destructives pour déterminer les caractéristiques mécaniques des bois des structures. Parmi les méthodes disponibles, il retient la méthode par ultrasons et il définit l' objectif de sa thèse, qui est d' accréditer la méthode de

la vitesse de propagation des ultrasons pour caractériser le comportement mécanique et pour classer le du bois brésilien de trois espèces : le cupiuba (*Goupia glabra*), l' eucalyptus (*Eucalyptus citriodora* ) et le pin (*Pinus elliotti*).

Dans le deuxième chapitre l'auteur passe en revue d' une part, la théorie liée à la propagation des ultrasons dans un solide orthotrope et d' autre part les relations existantes entre les constantes élastiques du bois, la vitesse de propagation des ultrasons et les résistances mécaniques du bois.

Les relations entre la vitesse de propagation des ultrasons et les paramètres expérimentaux comme l' humidité du bois, la géométrie des échantillons, la fréquence des ultrasons, la densité, sont étudiées.

La classification du bois basée sur les relations entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance mécanique est discuté prenant en compte les recherches de Waubke (1981) en Allemagne sur l' épicéa, de Sandoz (1990) et de Steiger (1996), en Suisse sur le sapin et l' épicéa. Six classes de qualité ont été défini pour le bois d' épicéa à l' humidité de 12 % pour lesquelles les vitesses mesurées varient entre 5100 m/s pour la moindre qualité et 5900 m/s pour la meilleure qualité (norme EN 338).

Le troisième chapitre « Matériel et méthodes » décrit le protocole expérimental pour les échantillons de laboratoire et pour les planches de 0.006 x 0.12 x 2.5 m et la méthodologie d' essais et la méthodologie statistique pour l' analyse des résultats pour le bois à l' état sec à l' air et vert .

Le quatrième chapitre montre les valeurs des vitesses de ultrasons et des résistances mesurées sur l'ensemble des données et les corrélations établies selon différents modèles de régression

Le cinquième chapitre est consacré aux discussions des résultats et montre les classes de qualité qui sont trois pour le cupiuba (*Goupia glabra*) et quatre pour l'eucalyptus (*Eucalyptus citriodora*) et pour le pin (*Pinus elliotti*).

En conclusion l'auteur valide la technique non destructive de la vitesses des ultrasons pour le classement du bois brésilien.

Nous notons le travail remarquable accompli au cours de cette thèse pour la valorification de la ressource forestière brésilienne et nous félicitons le thésard et son coordinateur pour les résultats obtenus. Nous suggérons la publication des résultats dans un article dans un journal de spécialité .

Fait à Nancy, le 14 Novembre 2001



Voichita Bucur

**Prof. Dr.-Ing. Georg Steinkamp**  
**LABORATORY FOR APPLIED PHYSICS**  
**ULTRASONIC EQUIPMENT**  
( since 1953 )

Tel.: ++49 (0) 421/510758  
Fax: ++49 (0) 421/511257

Dr.-Ing. Georg Steinkamp  
Steingraben 5, D-28259 Bremen

**Dr. Anfré Bartholomeu**  
**R. Antonio C. Lima, 67**  
**13251-392 – ITATIBA/SP**  
**BRASILIEN**

**Bremen, den 10.12.01**

Sehr geehrter Herr Bartholomeu,

Zu Ihrer erfolgreichen Promotion über das Thema: „Strukturholzsartierung mit Ultraschall“ möchte ich Ihnen recht herzlich gratulieren. Es ist mir eine große Freude, durch die Lieferung meines Ultraschall-Prüfgerätes BP-5 mit dazu beigetragen zu haben, daß Sie Ihre Messungen erfolgreich durchführen konnten.

An sich wäre ich gern zu der Feier gekommen, wenn ich es rechtzeitig vorher gewußt hätte; denn ich hätte bei der Gelegenheit noch andere Interessenten besuchen können, die sich aus Brasilien im Laufe der Zeit bei mir gemeldet haben.

So hoffe ich denn, daß Sie sich wacker bei der Verteidigung Ihre These geschlagen haben und daß Sie auch so viel Freude an dem neuerworbenen Titel haben werden, wie es mir vergönnt war. Wie schön, daß Sie alles noch vor dem Weihnachtsfest unter Dach und Fach gebracht haben.

Haben Sie jetzt vor die Hochschullaufbahn einzuschlagen ? Vielleicht wäre das jetzt eine gute Gelegenheit.

Mit recht herzlichen Grüßen und Glückwünschen zum  
Bevorstehenden Fest auch an Frau Hesse

Ihr



Bank Connections: Bremische Volksbank, D-28195 Bremen, No. 8705 000, Postal Code: (BLZ 291 900 24)  
Postbank Hamburg, No. 452925-203, Postal Code: (BLZ 200 100 20)