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

CONTRIBUIÇÃO AO ESTABELECIMENTO DE PARÂMETROS PARA ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS EM MADEIRA SERRADA POR MEIO DE ONDAS DE ULTRA-SOM

Fabiana Goia Rosa de Oliveira

USP/IFSC/SBI
8-2-001674

Tese apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos
2005

Oliveira, Fabiana Goia Rosa de

"Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som" - São Carlos, 2005.

Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2005 – páginas: 91
Área: Ciência e Engenharia de Materiais
Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

1. Madeira 2. Avaliação não-destrutiva 3. Ultra-som
I. Título

Universidade de São Paulo
Ciência e Engenharia de Materiais
Caixa Postal [illegible] – São Carlos [illegible] Fone [illegible]

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE FABIANA GOIA ROSA DE OLIVEIRA APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 20/06/2005.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Almir Sales (Orientador e Presidente) – UFSCar

Prof. Dr. Francisco Antonio Romero Gesualdo – UFU

Prof. Dr. Mauro Augusto Demarzo – UNICAMP

Prof. Dr. Carlito Calil Junior – EESC/USP

Prof. Dr. Antonio Alves Dias - EESC/USP

Dedicatória

Ao meu filho Caio, luz da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Almir Sales, pela confiança depositada em mim e pela sua maneira de conduzir a orientação deste trabalho. Minha eterna gratidão.

A meus pais e irmãos, pelo suporte, incentivo e compreensão.

Aos alunos de iniciação científica: Francieli, Marcela, Karla e José Luís, pela ajuda nos ensaios, amizade e carinho.

Aos professores, funcionários e colegas do LaMEM.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

Lista de tabelas i
Lista de figuras ii
Lista de símbolos v

RESUMO vi
ABSTRACT vii

1 INTRODUÇÃO 01

2 OBJETIVOS 03
Objetivo geral 03
Objetivos específicos 03

3 REVISÃO DE LITERATURA 04
3.1 Técnicas de avaliação não-destrutiva em madeiras 04
3.1.1 Avaliação visual 05
3.1.2 Máquinas de classificação mecânica 05
3.1.3 Método de ondas de tensão (stress wave) 06
3.2 Propagação de ondas sonoras 07
3.3 Utilização de ultra-som na madeira 08
3.3.1 Princípio de medição de ultra-som na madeira 10
3.3.2 Pesquisas relacionadas com ultra-som em madeira 12
3.3.3 Atenuação de ondas ultra-sônicas na madeira 13
3.4 Fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira 14
3.4.1 Freqüência do equipamento e dimensões do corpo-de-prova 15
3.4.2 Umidade da madeira 16
3.4.3 Direção de propagação da onda ultra-sônica 19
3.4.4 Densidade da madeira 20
3.4.5 Temperatura da madeira 21
3.4.6 Defeitos internos e defeitos visíveis 22
3.4.7 Características geométricas 23
3.5 Considerações finais 24

4 MATERIAIS E MÉTODOS 25
4.1 Espécies 25
4.2 Propriedades físicas e mecânicas 26
4.2.1 Densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$) 26
4.2.2 Teor de umidade (U) 26
4.2.3 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) 26
4.2.4 Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) 26
4.2.5 Módulo de elasticidade na flexão estática (MOE) 26
4.3 Estudo da influência da dimensão do corpo-de-prova 27
4.3.1 Estudo da influência da variação da seção transversal do corpo-de-prova 28
4.3.2 Estudo da influência da variação do comprimento do corpo-de-prova 28
4.4 Estudo da influência do teor de umidade 29

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 32
5.1 Variação da seção transversal do corpo-de-prova 32
5.2 Variação do comprimento do corpo-de-prova 38
5.3 Módulos de elasticidade estático e dinâmico 45
5.4 Influência do teor de umidade 62

6 CONCLUSÕES 84

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Velocidades médias, máximas e mínimas e coeficientes de variação (seção transversal).

Tabela 02 – Velocidades médias, máximas e mínimas e coeficientes de variação (comprimento).

Tabela 03 – Equações das regressões lineares – determinação do ponto crítico L/λ.

Tabela 04 – Valores médios e coeficientes de variação para as propriedades das vigas.

Tabela 05 – Quadro de análise de variância (MOE em função de E_d).

Tabela 06 – Coeficientes de regressão (MOE em função de E_d).

Tabela 07 – Regressões entre o módulo de elasticidade na flexão estática em função de E_d.

Tabela 08 – Valores médios e coeficientes de variação para as propriedades dos corpos-de-prova.

Tabela 09 – Quadro de análise de variância (f_{c0} em função de E_d).

Tabela 10 – Coeficientes de regressão (f_{c0} em função de E_d).

Tabela 11 – Regressões entre a resistência na compressão paralela em função de E_d.

Tabela 12 – Quadro de análise de variância (E_{c0} em função de E_d).

Tabela 13 – Coeficientes de regressão (E_{c0} em função de E_d).

Tabela 14 – Regressões entre o módulo de elasticidade na compressão paralela em função de E_d.

Tabela 15 – Seqüência de secagem das espécies.

Tabela 16 – Ponto de saturação das fibras.

Tabela 17 – Velocidades ultra-sônicas na direção paralela às fibras acima e abaixo do PSF.

Tabela 18 – Velocidades ultra-sônicas na direção perpendicular às fibras acima e abaixo do PSF.

Lista de Figuras

Figura 01 – Influência da seção transversal na velocidade.

Figura 02 – Velocidade e atenuação em função do teor de umidade na madeira.

Figura 03 – Influência da temperatura na velocidade ultra-sônica.

Figura 04 – Ensaio de flexão estática em vigas.

Figura 05 – Equipamento de ultra-som Sylvatest.

Figura 06 – Procedimentos do ensaio de variação da seção transversal.

Figura 07 – Ensaio de ultra-som em vigas.

Figura 08 – Equema do ensaio de variação de umidade.

Figura 09 – Medidor de umidade e caixa de conexão.

Figura 10 – Pinos de inox e prata.

Figura 11 – Ensaio de ultra-som variando-se o teor de umidade.

Figura 12 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – pinus caribea.

Figura 13 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – pinus elliottii.

Figura 14 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – eucalipto grandis.

Figura 15 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – eucalipto citriodora.

Figura 16 – Velocidade longitudinal em função seção transversal – cupiúba.

Figura 17 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – jatobá.

Figura 18 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal (V-Meter 54 kHz).

Figura 19 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal (V-Meter 150 kHz).

Figura 20 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – pinus caribea.

Figura 21 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – pinus elliottii.

Figura 22 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – eucalipto grandis.

Figura 23 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – eucalipto citriodora.

Figura 24 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – cupiúba.

Figura 25 – Velocidade longitudinal em função da relação L/λ – jatobá.

Figura 26 – Velocidade média em função da relação L/λ – pinus caribea.

Figura 27 – Velocidade média em função da relação L/λ – pinus elliottii.

Figura 28 – Velocidade média em função da relação L/λ – eucalipto grandis.

Figura 29 – Velocidade média em função da relação L/λ – eucalipto citriodora.

Figura 30 – Velocidade média em função da relação L/λ – cupiúba.

Figura 31 – Velocidade média em função da relação L/λ – jatobá.

Figura 32 – MOE versus E_d (pinus caribea).

Figura 33 – MOE versus E_d (pinus elliottii).

Figura 34 – MOE versus E_d (eucalipto grandis).
Figura 35 – MOE versus E_d (eucalipto citriodora).
Figura 36 – MOE versus E_d (cupiúba).
Figura 37 – MOE versus E_d (jatobá).
Figura 38 – f_{c0} versus E_d (pinus caribea).
Figura 39 – f_{c0} versus E_d (pinus elliottii).
Figura 40 – f_{c0} versus E_d (eucalipto grandis).
Figura 41 – f_{c0} versus E_d (eucalipto citriodora).
Figura 42 – f_{c0} versus E_d (cupiúba).
Figura 43 – f_{c0} versus E_d (jatobá).
Figura 44 – E_{c0} versus E_d (pinus caribea).
Figura 45 – E_{c0} versus E_d (pinus elliottii).
Figura 46 – E_{c0} versus E_d (eucalipto grandis).
Figura 47 – E_{c0} versus E_d (eucalipto citriodora).
Figura 48 – E_{c0} versus E_d (cupiúba).
Figura 49 – E_{c0} versus E_d (jatobá).
Figura 50 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus caribea).
Figura 51 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus elliottii).
Figura 52 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).
Figura 53 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (eucalipto grandis).
Figura 54 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).
Figura 55 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (cupiúba).
Figura 56 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (jatobá).
Figura 57 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus caribea).
Figura 58 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus elliottii).
Figura 59 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).
Figura 60 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (eucalipto grandis).
Figura 61 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).
Figura 62 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (cupiúba).
Figura 63 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (jatobá).
Figura 64 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus caribea).
Figura 65 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus elliottii).
Figura 66 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus elliottii tratado).
Figura 67 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (eucalipto grandis).

Figura 68 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (eucalipto citriodora).

Figura 69 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (cupiúba).

Figura 70 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (jatobá).

Figura 71 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus caribea).

Figura 72 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus elliottii).

Figura 73 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).

Figura 74 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (eucalipto grandis).

Figura 75 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).

Figura 76 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (cupiúba).

Figura 77 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (jatobá).

Figura 78 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (coníferas).

Figura 79 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (jatobá e eucalipto citridora).

Figura 80 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (cupiúba e eucalipto grandis).

Figura 81 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (coníferas e dicotiledôneas).

Figura 82 – Velocidade longitudinal em peças a 12% de umidade em função da densidade aparente (coníferas e dicotiledôneas).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

Lista de Símbolos

t – tempo

f – freqüência

k – número de onda

b – largura do corpo-de-prova

h – altura do corpo-de-prova

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras

U – teor de umidade

E_{c0} – módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras

MOE – módulo de elasticidade na flexão estática

MOR – módulo de ruptura

E_d – módulo de elasticidade dinâmico

C_{LL} – constante dinâmica

V_{LL} – velocidade ultra-sônica na direção paralela às fibras

V_{TT} – velocidade ultra-sônica na direção perpendicular às fibras

A – amplitude inicial

L – comprimento do corpo-de-prova

V – velocidade de propagação da onda ultra-sônica

$V_{LL,\,12\%}$ – velocidade longitudinal para amostras com teor de umidade de 12%

$V_{LL,\,U\%}$ – velocidade longitudinal para amostras com U% de teor de umidade

PFS – ponto de saturação das fibras

KAR – knot area ratio

ρ – densidade da madeira

$\rho_{ap,12\%}$ – densidade aparente a um teor de umidade de 12%

μ_{LT} – coeficiente de Poisson correspondente à direção longitudinal

ω – freqüência angular ($= 2\pi f$)

λ – comprimento de onda

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do teor de umidade e da dimensão do corpo-de-prova na velocidade de propagação ultra-sônica em madeira serrada. As espécies utilizadas no procedimento experimental foram: cupiúba *(Goupia glabra)*,eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis)*, jatobá *(Hymenaea spp)*, eucalipto citriodora *(Eucalyptus citriodora)*, pinus caribea *(Pinus caribea var. caribea)* e pinus elliottii *(Pinus elliottii var. elliottii)*. Utilizou-se o equipamento de ultra-som Sylvatest, com transdutores exponenciais de 22 kHz. A experimentação para avaliar a influência da dimensão do corpo-de-prova foi feita em duas etapas: variando a seção transversal e mantendo o comprimento da peça constante e a seguir mantendo a seção e variando o comprimento. Na primeira etapa, foram utilizados doze corpos-de-prova com dimensões variando desde 6 cm x 12 cm x 50 cm até 1 cm x 12 cm x 50 cm. Para a análise da influência do comprimento, foram utilizadas doze vigas por espécie com dimensão inicial de 6 cm x 12 cm x 300 cm, avaliadas até o comprimento final de 10 cm. A aplicação da onda ultra-sônica foi feita na direção longitudinal. Foram feitos ensaios destrutivos em vigas e corpos-de-prova para a comparação entre os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios estáticos e no ensaio com ultra-som. Na experimentação para avaliar a influência do teor de umidade na velocidade de propagação, foram avaliadas doze peças por espécie com dimensões 2,5 cm x 30 cm x 75 cm, desde saturadas até o teor de umidade em torno de 6%. Os resultados demonstraram que a influência da seção transversal do corpo-de-prova ocorre em função da relação entre as dimensões da seção e o comprimento de onda utilizado. Quando o comprimento de onda (λ) se aproxima de uma das dimensões da peça, ocorre uma diminuição na velocidade causada pelo efeito fronteira. O estudo sobre a influência do comprimento do corpo-de-prova (L) evidenciou que existe um ponto crítico na relação entre L e comprimento de onda (L/λ) a partir do qual a velocidade não é mais afetada. Os resultados sobre a influência do teor de umidade indicaram uma tendência de diminuição da velocidade com o aumento do teor de umidade, em ambas as direções de propagação da onda ultra-sônica (paralela e perpendicular às fibras), para todas as espécies estudadas. A influência do teor de umidade ocorreu de modo diferente, acima e abaixo do ponto de saturação, sendo mais significativa no segundo caso. Os resultados obtidos permitiram desenvolver uma expressão matemática para a correção da velocidade de propagação em função do teor de umidade e da densidade da madeira.

Palavras-chave: madeira, avaliação não-destrutiva, ultra-som.

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the influence of moisture content and dimensions of specimens on the ultrasonic velocity in wood. The species used were: cupiúba *(Goupia glabra)*,eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis)*, jatobá *(Hymenaea spp)*, eucalipto citriodora *(Eucalyptus citriodora)*, pinus caribea *(Pinus caribea var. caribea)* and pinus elliottii *(Pinus elliottii var. elliottii*). Ultrasonic measurements were taken with the experimental equipment Sylvatest with 22 kHz transducers. Experimental procedure about dimensions were carried out in two steps: specimens of constant length and variable cross-section and of constant cross-section and variable length. In the first case, were taken twelve specimens with initial cross-section of 6 cm x 12 cm, planed until 1 cm x 12 cm and constant length (50 cm). In the second case, were taken twelve specimens with length from 300 cm to 10 cm and constant cross-section (6 cm x 12 cm). Ultrasonic measurements were made in the longitudinal direction. They were also made destructive tests in beams and specimens with the purpose of comparison between static and ultrasonic methods. In the study of the influence of moisture content, twelve specimens (2.5 cm x 30 cm x 75 cm) were dried from green until about 6% moisture content. The results showed that the influence of cross-section depends on the relation between dimensions and wavelength, when λ is next to one of the dimensions, the ultrasonic velocity decreases because edge's effect. The study about the length showed that there is a critical point in the relation between sample length and wavelength (L/λ), and above it the velocity is not affected. The results about moisture content demonstrated that ultrasonic velocity, parallel and perpendicular to the grain, decreased when moisture content increased, and this influence was more significant below the fiber saturation point. It was developed an expression to correct the ultrasonic velocity as a function of moisture content and density of wood.

Keywords: wood, nondestructive evaluation, ultrasonic.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a escolha de uma determinada madeira para um projeto estrutural pode ser feita em função dos valores de resistência do material, independente da espécie, utilizando-se o sistema de classes de resistência. Esse sistema permite a utilização da madeira disponível na região da construção, o que propicia um melhor aproveitamento da diversidade de espécies nativas e de reflorestamento.

De acordo com a NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, no dimensionamento de estruturas de madeira devem-se minorar os valores de resistência e rigidez em função da variabilidade do lote de material recebido. Porém, conhecendo-se as propriedades específicas de cada peça e por meio de uma classificação visual e mecânica, a norma citada permite otimizar os valores de resistência, o que leva a uma melhor adequação do uso da madeira, resultando em estruturas mais seguras e econômicas.

O uso de propagação de ondas ultra-sônicas como técnica de avaliação não-destrutiva, mostra-se um método viável para a classificação mecânica da madeira. Pesquisas realizadas com técnicas de ultra-som obtiveram resultados que evidenciam a sua eficácia para estimar as propriedades mecânicas desse material. A validade desta técnica é testada por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios destrutivos, os quais fornecem parâmetros de correlação significativos.

A técnica do ultra-som apresenta, como vantagens em relação aos métodos convencionais de classificação, maior rapidez e versatilidade a um custo menor, podendo assim, ser empregada em indústrias e distribuidores de madeira e derivados, e também na avaliação de estruturas em serviço. Outra vantagem consiste no fato de que o material não é afetado pelo fenômeno de propagação, e a amostra pode ser testada diversas vezes sem que ocorram deformações na mesma.

É neste contexto que, compreendendo-se a relação entre os fatores que afetam as condições e os parâmetros físicos da técnica de ultra-som, pode-se melhorar seu potencial de aplicação.

Deste modo, a presente pesquisa poderá contribuir para ampliar os conhecimentos sobre a técnica de propagação de ondas ultra-sônicas nas madeiras nativas e cultivadas no Brasil, estabelecendo relações entre os parâmetros envolvidos, e favorecendo a utilização de ensaios não-destrutivos para a avaliação de propriedades físicas e mecânicas deste material, além de gerar subsídios técnico-científicos para a introdução de ensaios não-destrutivos na classificação de peças estruturais de madeira no Brasil.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral

Estabelecer parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas ultra-sônicas, identificando a dependência da velocidade ultra-sônica em relação às principais variáveis envolvidas. O desenvolvimento desta pesquisa permitirá ampliar a fronteira do conhecimento referente à propagação de ondas ultra-sônicas na madeira serrada de espécies nativas e cultivadas no Brasil

Objetivos específicos

a) Estabelecer parâmetros que permitam avaliar a influência da dimensão do corpo-de-prova no uso da técnica de ultra-som em peças de madeira de espécies nativas e cultivadas no Brasil.

b) Estabelecer parâmetros que permitam avaliar a influência do teor de umidade da madeira na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em peças de madeira serrada de espécies nativas e cultivadas no Brasil.

c) Propor relações que permitam a correção de valores da velocidade ultra-sônica em diferentes teores de umidade, para as coníferas e as dicotiledôneas em estudo.

d) Analisar a confiabilidade do método não-destrutivo utilizando ultra-som na avaliação de peças de madeira, por meio da comparação dos resultados obtidos com os valores determinados em ensaios destrutivos.

e) Gerar subsídios para a inclusão de ensaios não-destrutivos na normalização brasileira para projeto de estruturas de madeira (NBR 7190).

3. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a técnica de propagação de ondas ultra-sônicas na madeira. Estão relacionados os aspectos referentes à propagação de ondas ultra-sônicas na madeira como: relações entre o ultra-som e as propriedades mecânicas da madeira; princípio de utilização desta técnica; atenuação na madeira e fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira.

3.1 Técnicas de avaliação não-destrutiva em madeiras

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não-destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos-de-prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. A avaliação não-destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final.

JAYNE (1959) estabeleceu a hipótese fundamental para a avaliação não-destrutiva da madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não-destrutivo, seriam controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático deste material. Em nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia seriam controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a rigidez. Tais propriedades são observáveis como freqüência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade do som. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas ultra-sônicas podem ser usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, a avaliação não-destrutiva detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades

ocorrem naturalmente e a influência dessas sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada por meio de métodos não-destrutivos.

Várias técnicas, como raios X, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, são usadas para avaliar a madeira de modo não-destrutivo. Na indústria de produtos florestais, as técnicas não-destrutivas têm sido desenvolvidas e são empregadas em programas de classificação da madeira e seus derivados, resultando em materiais com características bem definidas.

3.1.1 Avaliação visual

A inspeção visual é a técnica mais simples para avaliação da madeira, sendo útil para detectar a presença de deterioração na superfície da peça, CARREIRA (2003). A qualidade da madeira é analisada pela dimensão e distribuição de anomalias que podem ser vistas na superfície da peça, tendo como desvantagens o fato de considerar apenas os defeitos aparentes e admitir resistência igual para as peças com os mesmos defeitos. As principais características visuais observadas foram:

- ⇨ nós – o efeito desfavorável do nó se deve à distorção das fibras em relação à sua direção normal;
- ⇨ rachaduras – surgem principalmente da separação das fibras devido à perda de umidade e liberação de tensões internas. Afetam as propriedades de resistência da madeira;
- ⇨ inclinação das fibras – fibras inclinadas dão origem a componentes de tensão na direção transversal, diminuindo a resistência devido à menor capacidade de carga da madeira quando solicitada à compressão perpendicular às fibras;
- ⇨ deterioração – a inspeção visual não possibilita verificar com segurança a extensão da influência causada pelo ataque de fungos. Assim, peças seriamente atacadas devem ser descartadas;
- ⇨ empenamento – geralmente esse defeito não afeta a resistência das peças de madeira.

3.1.2 Máquinas de classificação mecânica

Os primeiros métodos aplicados para classificação de madeiras foram essencialmente mecânicos e, segundo MELO (1984), possibilitaram um avanço da metodologia para a

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

caracterização estrutural de peças de madeira, substituindo os ensaios de corpos-de-prova isentos de defeitos pelo ensaio não-destrutivo da peça.

A significativa correlação existente entre a resistência à ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade na flexão (MOE) possibilitou a avaliação da resistência máxima de peças de madeira através do desenvolvimento de máquinas de classificação mecânica, BLASS; GARD (1994) e FREITAS (2004).

As máquinas de classificação mecânica são produzidas comercialmente desde a década de 60 e combinam análise visual de defeitos com medições não-destrutivas de flexão estática para estimar as propriedades da madeira. A classificação por meio das máquinas de classificação automática leva a um menor coeficiente de variação do módulo de elasticidade (MOE), ERIKSON et al. (2000).

A classificação mecânica automática consiste em colocar na peça um carregamento contínuo e medir a flecha resultante (algumas máquinas medem o carregamento para se obter uma flecha determinada). Assume-se que a resistência da madeira é proporcional à flecha sob um carregamento constante. A precisão das máquinas de classificação depende de duas características: da correlação entre resistência e rigidez; e da confiabilidade do equipamento em fornecer valores exatos entre o carregamento e a flecha, considerando-se as pequenas diferenças nas flechas entre os limites de classificação.

Do ponto de vista industrial, a utilização dessas máquinas de classificação mecânica tem limitações, uma vez que as mesmas trabalham com seções transversais restritas, não podendo ser utilizadas para controle de qualidade de material bruto da floresta ou para avaliações no local de estruturas de madeira. Além disso, esta técnica é cara, o que dificulta sua utilização por indústrias madeireiras de pequeno porte.

3.1.3 Método de ondas de tensão (stress wave)

Este método se baseia na teoria de propagação de ondas unidirecionais em uma barra homogênea e elástica. Com a aplicação de um impacto numa das extremidades da barra, uma onda é gerada e movimenta-se ao longo do comprimento da barra. A onda se propaga com velocidade constante, mas as partículas da mesma apresentam um leve movimento longitudinal,

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

como resultado da passagem da onda. Embora a velocidade da onda permaneça constante, a energia é dissipada e o movimento das partículas diminui a cada passagem sucessiva da onda. Ao final, todas as partículas da barra retornam à situação inicial de repouso.

O método de ondas de tensão (stress wave) tem sido empregado na avaliação da madeira por mais de 40 anos. A relação entre a velocidade da onda de tensão e as propriedades mecânicas da madeira tem sido estudada por vários pesquisadores: JAYNE (1959), PELLERIN (1965), HEARMON (1966), GERHARDS (1982), ROSS; PELLERIN (1991), ROSS; PELLERIN (1994), HALABE et al. (1995), MATOS (1997), ROSS et al. (1998), GABRIEL (2000), WANG et al. (2002) e HELLMEISTER (2003), os quais encontraram fortes correlações entre o módulo de elasticidade dinâmico (obtido a partir da velocidade de propagação da onda de tensão) e o módulo de elasticidade obtido no método de flexão estática ou compressão paralela às fibras.

3.2 Propagação de ondas sonoras

Quando as ondas sonoras se propagam em um material, o que realmente ocorre é uma perturbação do arranjo de equilíbrio dos átomos no material. É importante salientar que o material não se movimenta, apenas a perturbação é propagada.

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. As partículas materiais que transmitem a onda oscilam paralelamente à direção de propagação da própria onda.

As ondas sonoras possuem freqüências que situam-se em um intervalo capaz de estimular a sensação de audição no ouvido humano. Este intervalo está entre 20 Hz e 20000 Hz e é denominado intervalo audível. Uma onda mecânica longitudinal cuja freqüência está abaixo do intervalo audível é denominada onda infra-sônica, e se a freqüência estiver acima desse intervalo tem-se uma onda ultra-sônica, VARY (1987).

Se não encontrarem obstáculos, as ondas sonoras se propagarão em todas as direções a partir da fonte. Entretanto, é mais simples tratar da propagação em apenas uma direção.

Segundo NEPOMUCENO (1968), os fundamentos do estudo sobre propagação de ondas foram feitos por Newton, Laplace e Euler, ao estabelecerem as expressões matemáticas que explicam o processo. Diferentemente das ondas elétricas ou luminosas, a onda sonora exige um meio material para se propagar, o que foi verificado por Boyle, após Kircher ter demonstrado que o som não se propaga no vácuo, em 1605.

Quando as vibrações ocorrem no mesmo sentido da propagação da onda, tem-se a polarização longitudinal. Se as moléculas se movimentam perpendicularmente à propagação da onda, ocorre a polarização transversal.

Segundo BUCUR (1995), nas proximidades da fonte, as ondas são esféricas, cilíndricas ou planas, dependendo da relação entre as dimensões da fonte e a freqüência radiada.

3.3 Utilização de ultra-som na madeira

O ultra-som é caracterizado por freqüências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados, OLIVEIRA et al. (2002).

O desenvolvimento e crescimento da indústria de LVL (laminated veneer lumber) nos Estados Unidos têm sido resultado direto da aplicação do método não-destrutivo por meio de ultra-som, através da determinação das propriedades das lâminas de madeira. Utilizando-se relações empíricas, cada lâmina é classificada em uma categoria de resistência baseada na velocidade da onda sonora.

A técnica de emissão ultra-sônica pode ser empregada de diversas maneiras, desde florestas, WANG et al. (2001) e (2004), até a avaliação de estruturas de madeira em serviço, ROSS; PELLERIN (1994) e SANDOZ; BENOIT (2002), inclusive na classificação e caracterização de peças de madeiras e materiais derivados durante o processo para obtenção dos mesmos, SANDOZ (2004).

Os ensaios não-destrutivos são importantes ferramentas na inferência e na caracterização físico-mecânica da madeira. Dentre as diversas técnicas empregadas, a técnica do ultra-som se destaca pelo maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às freqüências das emissões. Além disso, parece ser a mais promissora, na medida em que sua extensão à indústria se daria de uma forma mais imediata e direta, conforme mostram os exemplos internacionais, BALLARIN; GONÇALVES (2001).

O avanço no uso da avaliação não-destrutiva possibilitou o desenvolvimento de técnicas para a obtenção de imagem tomográfica da madeira. A imagem não-destrutiva é baseada em diferentes métodos que utilizam ondas elásticas, radiação, luz, campos magnéticos, elétricos e raios X, EVANS; ILIC (2001), NICOLOTTI et al. (2003), BUCUR (2003) e QUOIRIN (2004). A imagem pode ser reconstruída através do mapeamento de diversos parâmetros e com o uso de procedimentos computacionais para o processamento dos resultados, reconstrução e exibição da imagem.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultra-som é baseada na relação entre a velocidade ultra-sônica, o módulo de elasticidade e a densidade.

Os termos da matriz de rigidez [C] podem ser determinados pelas medições com ultra-som e os termos da matriz de flexibilidade [S] por ensaios estáticos. A madeira é considerada um material ortotrópico e possui três eixos de simetria elástica (longitudinal, radial e transversal). A análise dos sólidos ortotrópicos é mais complexa porque as constantes elásticas são influenciadas mutuamente pelos três planos de simetria. A matriz de rigidez para estes materiais contém nove constantes independentes: seis termos diagonais (C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55} e C_{66}) e três termos não diagonais (C_{12}, C_{13} e C_{23}).

Pesquisadores nacionais como BALLARIN; GONÇALVES (2001) utilizam a constante dinâmica (C_{LL}) para reportar resultados obtidos a partir da velocidade ultra-sônica, sendo que em pesquisas internacionais utiliza-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_d). No âmbito desta pesquisa, apesar de possíveis erros de aproximação em corpos-de-prova pequenos, optou-se por utilizar o E_d, de modo a facilitar o entendimento e a comparação dos resultados, possibilitando a disseminação dos trabalhos em congressos e periódicos internacionais.

Os três módulos de elasticidade de Young (E) são proporcionais à rigidez corrigida por meio dos coeficientes de Poisson. Assim, para corpos-de-prova longos (considerados infinitos), o fator de correção é 1, sendo que deste modo, o C_{LL} pode representar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d).

De acordo com WANG; CHUANG (2000), a relação entre as matrizes de rigidez [C] e de flexibilidade [S] é: $[C]^{-1} = [S]$, e o módulo de elasticidade está relacionado com a matriz de flexibilidade na seguinte conformidade: $E_{11} = 1/S_{11}$, usando os valores corrigidos do coeficiente de Poisson. Segundo a pesquisadora Bucur, durante palestras quando em visita ao Brasil, para peças com dimensão estrutural, pode-se assumir que os valores experimentais são correspondentes ao módulo de elasticidade dinâmico sem necessidade de correção ($C_{LL} = E_d$).

3.3.1 Princípio de medição de ultra-som na madeira

Os aparelhos de ultra-som baseiam-se, em geral, na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultra-sônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. O equipamento pode ser usado para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de rigidez e para estimar a resistência mecânica de uma peça individual.

A propagação das ondas ultra-sônicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular. A densidade da parede celular é razoavelmente constante, mas há variação do módulo de elasticidade devido às variações na estrutura da parede celular, e desse modo, pode-se esperar que os valores para a velocidade de propagação resultem em intervalos de acordo com as características anatômicas e presença de defeitos nas peças investigadas.

A aplicação e medição de ondas ultra-sônicas consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda ultra-sônica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo, em microssegundos, realizada pelo próprio instrumento de ultra-som.

O transdutor incorpora um elemento piezo-elétrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica e segundo BUCUR (1995), seu desempenho está relacionado com parâmetros estruturais como área de superfície de radiação, amortecimento mecânico, características dos materiais piezo-elétricos e a conexão dos componentes elétricos e acústicos do sistema. O

transdutor deve apresentar boa sensibilidade e desempenho constante sob diferentes condições de uso.

A velocidade de uma onda ultra-sônica depende do modo de vibração (nas direções longitudinal e transversal) e das propriedades do material. A velocidade de propagação longitudinal (V) em uma direção ao longo do comprimento de uma barra esbelta (considerando-se uma barra com dimensões laterais muito menores que o comprimento de onda) é dada pela equação:

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \tag{1}$$

onde:

E_d – módulo de elasticidade dinâmico (MPa);
ρ – densidade da madeira (kg/m^3);
V – velocidade de propagação longitudinal da onda ultra-sônica (m/s).

Quando a aproximação para um corpo unidimensional (barra delgada) não se aplica, a velocidade de propagação de uma onda longitudinal através de um corpo nas três direções é:

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu_{LT})}{\rho(1+\mu_{LT})(1-2\mu_{LT})}} \tag{2}$$

onde:

μ_{LT} – coeficiente de Poisson correspondente à direção longitudinal.

A escolha entre as equações (1) e (2) depende da magnitude do comprimento de onda quando comparado com as dimensões da peça analisada. De acordo com BUCUR (1995), a equação (2) foi derivada para um material isotrópico e é apenas uma aproximação para um meio transversalmente isotrópico como a madeira.

De acordo com ROSS; PELLERIN (1991), a equação (1) é a simplificação para a teoria de propagação de ondas aplicada a um material isotrópico e homogêneo e considerando-se um corpo-de-prova com dimensões laterais menores que o comprimento de onda empregado.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

Um pulso ultra-sônico mantém sua forma à medida que se desloca em um material, e todas as ondas harmônicas que a compõem apresentarão a mesma velocidade desde que a velocidade não dependa do comprimento de onda e da freqüência, o que ocorre em meios não dispersivos como, por exemplo, o ar.

Mas a madeira é um material dispersivo; por isso, a velocidade ultra-sônica é influenciada pela freqüência e pelo comprimento de onda. O pulso é alterado à medida que avança no material, ocorrendo a perda do componente de maior freqüência do sinal, o que resulta em um atraso no tempo de chegada da onda, BLITZ; SIMPSON (1996). Deste modo, a velocidade do pulso não é a mesma que a velocidade média das ondas que o constituem. A velocidade média das ondas harmônicas é denominada velocidade de fase e a velocidade do pulso é denominada velocidade de grupo (obtida por meio dos equipamentos de ultra-som comercialmente disponíveis).

3.3.2 Pesquisas relacionadas com ultra-som em madeira

As pesquisas pioneiras sobre o uso de ensaios não-destrutivos por meio de ultra-som para a avaliação de propriedades da madeira foram realizadas na década de 60.

Pesquisas nacionais e internacionais demonstram a viabilidade do método de ultra-som, por meio de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios destrutivos (compressão paralela às fibras e flexão estática) e em ensaios dinâmicos (ultra-som). Os resultados apresentam correlações significativas, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,57 e 0,89, McDONALD et al. (1990), ROSS; PELLERIN (1991), ROSS; PELLERIN (1994), ROSS et al. (1995), HALABE et al. (1996), ROMERO (1996), BARADIT et al. (1998), ROSS (1999), ROSS et al. (2000), BARTHOLOMEU; GONÇALVES (2000), MACHADO (2000), OLIVEIRA (2001), BARTHOLOMEU (2001), NOGUEIRA (2003), SASAKI; HASEGAWA (2003) e PELIZAN (2004).

É difícil relacionar o módulo de ruptura (MOR) com o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), pois a presença de defeitos e a inclinação das fibras têm efeitos mais significativos no MOR do que na velocidade longitudinal da onda. Como os defeitos na madeira afetam a inclinação das fibras, qualquer método que seja sensível a isso, terá alto potencial para estimar a resistência da madeira.

Os baixos valores do coeficiente de determinação entre MOR e E_d ocorrem também porque a tensão induzida na madeira durante os ensaios dinâmicos é muito pequena, ou seja, as medições dinâmicas são baseadas nas propriedades mecânicas apenas dentro do limite elástico. O módulo de ruptura acontece em maior tensão, e depois do limite elástico, resultando em pobre correlação com os parâmetros dos ensaios não-destrutivos. Também, como já mencionado, o comportamento do MOR pode ser afetado significativamente pela presença de nós na seção transversal.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos no método de ultra-som são usualmente maiores que os encontrados por meio da flexão estática. Isso pode ser explicado considerando-se a madeira um material viscoelástico e altamente amortecedor. Na vibração da madeira, a força elástica é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade.

Portanto, quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso. Este comportamento é mais proeminente no ensaio de flexão estática (longa duração) se comparado ao ensaio de ultra-som. Assim, o módulo de elasticidade determinado no método de ultra-som é usualmente maior que aquele obtido na flexão estática.

3.3.3 Atenuação das ondas ultra-sônicas na madeira

A intensidade de uma onda ultra-sônica diminui à medida em que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico. Os materiais enfraquecem a propagação do som devido a dois fatores: dispersão e absorção, que podem ser combinados no termo atenuação.

A dispersão é resultante da não homogeneidade do material, que contém contornos onde a impedância acústica muda devido à diferença de densidade.

A absorção é a conversão direta da energia do som em calor e pode ser visualizada como um freio na oscilação das partículas, tornando claro porque uma oscilação rápida perde mais energia que uma lenta. A absorção aumenta com a freqüência, mas em uma taxa menor que a dispersão.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. Trata-se de um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

É possível obter relações entre a velocidade de propagação e atenuação das ondas e a elasticidade e a resistência da madeira. A base da avaliação ultra-sônica da madeira está associada a medidas de velocidade e coeficientes de atenuação.

A caracterização da atenuação da onda em um material envolve a medição da energia perdida durante a propagação da onda devido à interação com a microestrutura do material, BUCUR; FEENEY (1992). Para a propagação de uma onda plana em um meio homogêneo na direção x, a amplitude A (x,t) é dada por:

$$A(x,t) = A_0 \, e^{i(kx - wt)} \qquad (3)$$

onde:

x – distância percorrida desde o ponto de origem;
t – tempo;
A_0 – amplitude inicial;
ω – freqüência angular (= $2\pi f$);
f – freqüência;
k – número de ondas.

De acordo com BEALL (2002), a atenuação das ondas ultra-sônicas é causada por dois efeitos: geometria e propriedades do material. Como a atenuação aumenta exponencialmente com a freqüência, o nível usual para os transdutores em madeira se encontra entre 22 kHz e 200 kHz. Nesta faixa de freqüência, a atenuação na direção das fibras, e através dessas, é em torno de 30 dB/m e 200 dB/m, respectivamente.

3.4 Fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira

Na madeira, os fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie (macro e microestruturas), condições do meio (temperatura, umidade) e o procedimento utilizado para tomada das

medidas (freqüência e sensibilidade dos transdutores, seu tamanho e sua posição e características do equipamento), BUCUR; BÖHNKE (1994).

3.4.1 Freqüência do equipamento e dimensões do corpo-de-prova

Em geral, as perdas de velocidade aumentam com freqüência mais elevadas. A diminuição da velocidade com o aumento da freqüência se deve provavelmente ao fato de que o comprimento de onda (λ) se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira. Em testes com este material, freqüências maiores que 1 MHz devem ser evitados porque a atenuação se torna muito elevada.

É necessário adequar a freqüência do transdutor ao tamanho do corpo-de-prova para que se evite interferências indesejáveis na medição da velocidade. O comprimento de onda se relaciona com a velocidade segundo a equação:

$$V = \lambda f \tag{4}$$

onde:

λ – comprimento de onda;
f – freqüência.

O comprimento do corpo-de-prova deve ser maior que o comprimento de onda a ser utilizado já que o desenvolvimento teórico das expressões que descrevem essa propagação é realizado considerando-se um meio infinito. O comprimento mínimo do corpo-de-prova deve ser estabelecido experimentalmente, pois não há um critério teórico para isso.

BUCUR (1995) analisou a influência da dimensão de pequenos corpos-de-prova nas medições com ultra-som em coníferas européias e apresentou o estudo de duas situações distintas: mantendo-se o comprimento constante e variando-se a seção transversal, e vice-versa. No primeiro caso, foram tomadas medidas nas direções longitudinal (V_{LL}), radial (V_{RR}) e tangencial (V_{TT}). A velocidade V_{LL} foi fortemente afetada pela razão b:h, sendo o valor máximo obtido quando a relação variou entre 0 e 1. A velocidade mínima V_{LL} foi medida na razão b:h entre 12 e 13, conforme ilustrado na Figura 1. As velocidades V_{RR} e V_{TT}, correspondentes à seção transversal da espécie, foram menos afetadas pela modificação da dimensão da peça.

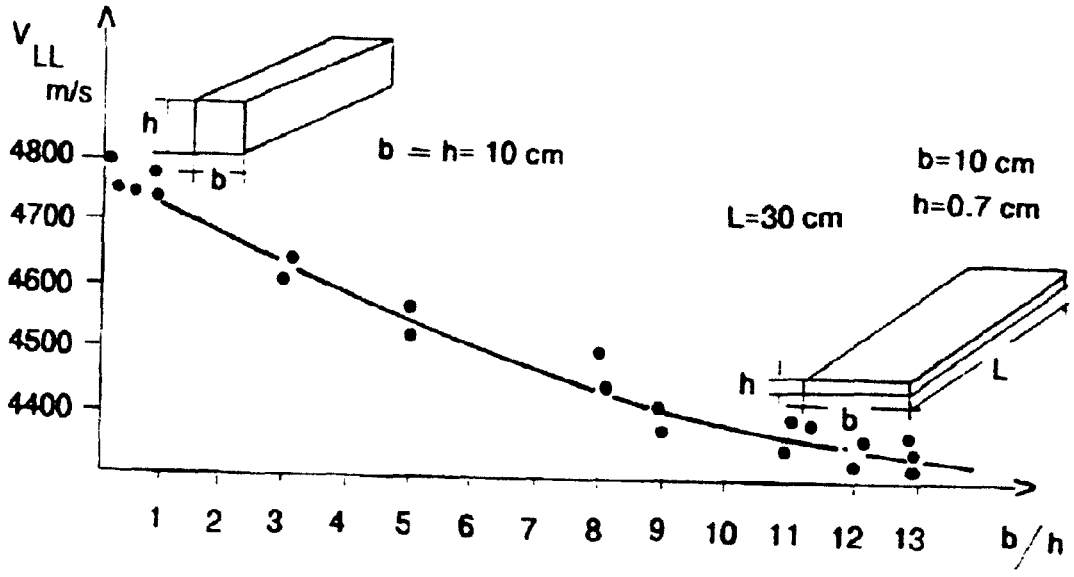

Figura 1 - Influência da seção transversal na velocidade. Fonte: BUCUR (1995).

No segundo caso, diminuindo-se o comprimento do corpo-de-prova e mantendo-se a seção transversal, observou-se que V_{LL} é praticamente constante quando a razão L:b varia entre 20 e 40.

PUCCINI et al. (2001) pesquisaram a influência da variação do comprimento de peças estruturais de pinho do paraná na velocidade de propagação. Os resultados desse trabalho indicam os valores 7 λ para as medições com os transdutores posicionados nas faces laterais da peça e 2,5 λ para os transdutores posicionados no topo da peça.

3.4.2 Umidade da madeira

Como a madeira é um material higroscópico, suas propriedades físicas são afetadas pela umidade. Do ponto de vista elástico, a madeira pode ser considerada um sólido ortotrópico. Quando saturada, torna-se um material de duas fases, uma sólida, o esqueleto da estrutura, correspondente aos elementos anatômicos e uma fluída, representada pelo volume de água nos poros.

Uma árvore recém cortada pode apresentar teor de umidade entre 35% e 200%, dependendo da espécie. A secagem da madeira está diretamente relacionada com a estrutura celular. O mecanismo de secagem pode ser explicado de maneira distinta, acima e abaixo do ponto de saturação das fibras. Acima do PSF, o movimento da água livre segue as leis capilares, quanto

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

menor o diâmetro dos capilares, maior será a força de tração da coluna de água nestes capilares. Abaixo do PSF, a secagem pode ser considerada um processo de difusão: a água das camadas mais internas se difunde na forma de vapor preenchendo os espaços vazios deixados pela água livre, até atingir a superfície da madeira por capilaridade.

Existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, KABIR et al. (1997).

De acordo com BUCUR (1995), em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água existente na madeira está ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultra-sônico é espalhado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos. Nestes contornos, analogamente ao que ocorre nos contornos de grãos de um sólido policristalino, há uma descontinuidade do módulo de elasticidade e, conseqüentemente, da impedância acústica. A pressão que atua nas partículas das moléculas de celulose, resultante da passagem da onda ultra-sônica, reorienta a posição da hidroxila (OH) ou outro radical pertencente àquelas moléculas. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado às características das paredes celulares constitui, provavelmente, o fator mais importante.

Em teores de umidade mais elevados, mas ainda abaixo do ponto de saturação, o espalhamento nos limites das células pode ser considerado o mais importante mecanismo de perdas. Após o ponto de saturação das fibras, quando a água está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na dispersão ultra-sônica.

A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena, conforme apresentado na Figura 2. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes das células começam a reter água livre. Vale salientar que o diagrama apresentado na Figura 2 foi obtido a partir da experimentação com uma única espécie européia.

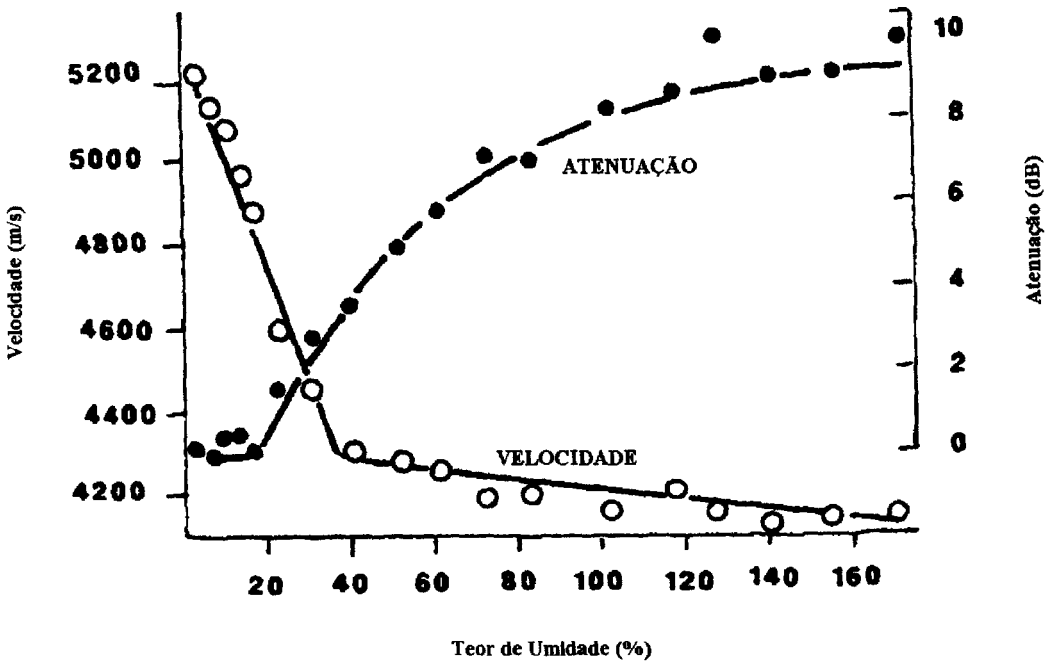

Figura 2 - Velocidade e atenuação em função do teor de umidade na madeira.
Fonte: BUCUR (1995).

As pesquisas de laboratório com a técnica de ultra-som para estimar as propriedades da madeira saturada têm atingido resultados promissores. Correlações confiáveis têm sido obtidas entre a avaliação não-destrutiva da madeira saturada e seca, indicando que é possível selecionar a madeira antes do processo de secagem, o que resulta em uma significativa economia para os produtores de madeira e derivados.

Os resultados de trabalhos internacionais têm demonstrado o potencial do uso da velocidade ultra-sônica para controlar o processo de secagem da madeira em estufa, principalmente para teores de umidade acima de 30%.

A velocidade ultra-sônica na madeira nas direções longitudinal e radial tende a aumentar com a diminuição do teor de umidade. A influência da umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é mais significativa do que acima deste ponto, mas as relações numéricas entre essas grandezas variam muito entre as diferentes espécies, JAMES et al. (1982), SAKAI et al. (1990), BUCUR; SAREM (1992), MISHIRO (1995), OLIVITO (1996), SIMPSON (1998), SIMPSON; WANG (2001), KANG; BOOKER (2002a), WANG et al. (2003) e OLIVEIRA et al. (2005).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

SANDOZ (1993) estudou o efeito do teor de umidade da madeira na velocidade de propagação ultra-sônica para duas espécies européias. A velocidade foi medida desde 60% de umidade até a madeira seca. As relações obtidas para cada seção foram bi-lineares com uma mudança na inclinação em torno de 32% de umidade, ou seja, próximo ao ponto de saturação das fibras. De acordo com o autor, para qualquer qualidade de madeira, a velocidade ultra-sônica pode ser corrigida:

Teor de umidade $\leq 32\%$ $\rightarrow$ $V_r = V_m + 29\,(U_i - 12)$ (5)

Teor de umidade $> 32\%$ $\rightarrow$ $V_r = 580 + V_m + 4\,(U_i - 32)$ (6)

onde:

U_i – teor de umidade da ISO 3130;
V_m – velocidade ultra-sônica em Ui;
V_r – velocidade referência para teor de umidade = 12%.

WANG; CHUANG (2000) investigaram o fenômeno de propagação de ondas ultra-sônicas na madeira desde 200% de teor de umidade até o ponto de saturação das fibras em peças de dimensões: 3 cm x 3 cm x 50 cm. Os resultados demonstraram que o efeito do teor de umidade é diferente para valores abaixo e acima do ponto de saturação das fibras (PSF). As relações obtidas pelos autores estão expressas a seguir:

0% - 200% $\rightarrow$ $V = 524\,(U)^2 - 1870\,(U) + 4858$ ($R^2 = 0{,}975$) (7)

> PSF $\rightarrow$ $V = -738\,(U) + 4364$ ($R^2 = 0{,}984$) (8)

< PSF $\rightarrow$ $V = -2655\,(U) + 4998$ ($R^2 = 0{,}986$) (9)

3.4.3 Direção de propagação da onda ultra-sônica

Os coeficientes de atenuação das ondas estão relacionados com a geometria do campo de radiação e com a dispersão e absorção de energia ultra-sônica pelo sólido. A menor e a maior atenuações são observadas respectivamente nas direções longitudinal e tangencial.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. Uma onda que se propaga na direção radial, cruza camadas de lignina e hemicelulose para chegar à

celulose, o que acarreta uma atenuação devido às regiões amorfas e inelásticas destes compostos. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial, quando as ondas se propagam através de regiões com maiores quantidades de lignina e hemicelulose, e assim estão sujeitas a grandes atenuações.

O grau de polimerização diferenciado para os constituintes principais da parede celular, também reforça a afirmação anterior, sendo que, quanto maior o valor médio do GP, maior a continuidade de matéria elástica e cristalina, FENGEL; WEGENER (1984). Deste modo, a onda se propaga com maior velocidade nas camadas de celulose (GP entre 1000 e 15000) do que nas nas camadas de hemicelulose (GP entre 50 e 200), sendo mais baixa quando cruza camadas de lignina (GP entre 5 e 60).

De acordo com BEALL (2002), as velocidades ultra-sônicas típicas são da ordem de 1-2 km/s através das fibras e 5-6 km/s na direção das fibras. A velocidade radial é em torno de 50% maior que a velocidade tangencial.

A velocidade na direção longitudinal pode ser considerada a mais importante, pois está relacionada com o módulo de elasticidade. As velocidades nas direções radial e tangencial estão ligadas à anisotropia da madeira.

3.4.4 Densidade da madeira

O efeito da densidade nas ondas ultra-sônicas é dependente da espécie analisada, da estrutura da madeira e da direção da medição. De modo geral, para um teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções de propagação da madeira. Porém, mais importante que a própria densidade, é a estrutura anatômica da madeira, como por exemplo, o comprimento de traqueídes (3 mm) e fibras (1,0 mm a 1,5 mm), o que explica maiores velocidades em algumas coníferas, mesmo com menores valores de densidade.

De acordo com CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR (2003), não é propriamente o aumento da densidade que acarreta o aumento na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas em madeiras. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a diminuição da velocidade de propagação, visto que a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da

densidade (equação 1). Entretanto, considerando-se um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade decorre da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores da densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez. Portanto, as maiores velocidades ultra-sônicas são geralmente alcançadas em espécies de madeira com maior densidade.

3.4.5 Temperatura da madeira

As temperaturas usuais nas quais utilizamos a madeira em estruturas enquadram-se em uma mesma classe segundo critérios definidos por BUCUR (1995), de tal modo que a influência da temperatura não é significativa na variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, JAMES (1961), KANG; BOOKER (2002a) e KANG; BOOKER (2002b).

SANDOZ (1993) pesquisou o efeito da temperatura na velocidade de propagação ultra-sônica em vários teores de umidade. A temperatura variou de 60°C até -20°C. A velocidade diminui com o aumento da temperatura de modo perfeitamente linear, mesmo em torno de 0°C. A inclinação da reta diminui com o aumento do teor de umidade, Figura 3.

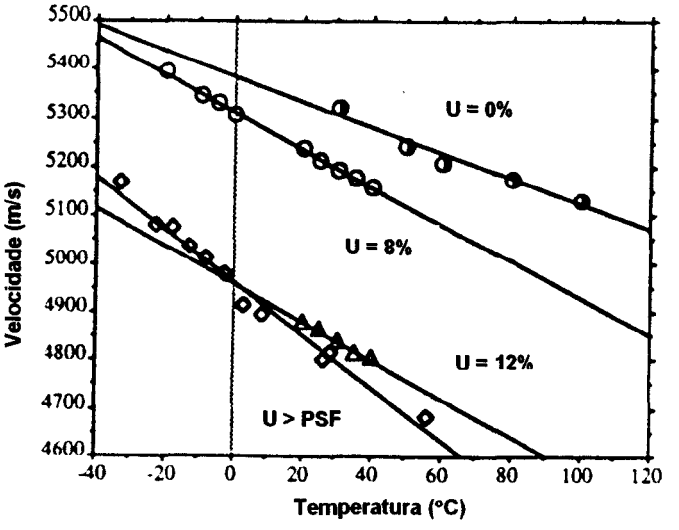

Figura 3 - Influência da temperatura na velocidade ultra-sônica. Fonte: SANDOZ (1993).

3.4.6 Defeitos internos e defeitos visíveis

A onda ultra-sônica se propaga mais rapidamente na madeira sadia e de maior rigidez em relação à madeira deteriorada e de módulo de elasticidade inferior, DIVOS; SZALAI (2002). A presença de degradação na linha entre os dois transdutores resulta numa diminuição da velocidade de propagação ultra-sônica, se comparada com uma velocidade de referência.

Com a medição radial, detecta-se a degradação da madeira; as medições longitudinais são usadas para a estimativa de propriedades mecânicas (E_d) e as medições comparativas detectam singularidades como a presença e a magnitude da medula e de defeitos internos.

A técnica ultra-sônica permite a distinção entre a estrutura natural da madeira e patologias inerentes. Para uma maior acuracidade do método, devem-se considerar fatores como: velocidade e atenuação em diferentes direções, as propriedades de reflexão nos contornos dos elementos anatômicos, e a dispersão devido às heterogeneidades, BERNDT et al. (2000).

Segundo MACHADO (2000), a detecção de nós se torna confiável, ou seja, é possível detectar variações na inclinação das fibras, quando KAR é superior a 20%, (Knot Area Ratio – proporção da seção transversal ocupada pelo nó).

KARSULOVIC et al. (2000) e SCHMOLDT et al. (1994) pesquisaram o uso de ultra-som para determinar os parâmetros mais sensíveis aos defeitos e a resposta ultra-sônica que melhor caracteriza o tamanho e a posição destes.

A velocidade média para madeira que apresenta nós é 17% inferior em relação à madeira sã. A presença de medula provoca uma diminuição de 13% nos valores médios de propagação em relação à madeira sã, PUCCINI (2002).

A velocidade ultra-sônica é um bom parâmetro para avaliar a degradação biológica da madeira no seu estágio moderado; uma diminuição de 50% na velocidade indica um decréscimo de 60% no módulo de elasticidade. A atenuação detecta a degradação ainda no seu estágio inicial, sendo que uma diminuição entre 20% e 50% na energia recebida, sinaliza que existe degradação, ROSS et al. (2000).

KABIR et al. (2002) descrevem um trabalho inicial para desenvolver um sistema automatizado para classificar madeira para *pallets* usando a técnica de ultra-som. Nós, córtex, vazios, fissuras, deterioração, etc, são caracterizados através de seis variáveis ultra-sônicas calculadas em função da forma das ondas recebidas. Dessas variáveis, três envolvem o tempo de percurso da onda, duas envolvem o pulso de energia ultra-sônica e uma, a duração do pulso. Para cada tipo de defeito, pelo menos uma variável ultra-sônica demonstrou significativa capacidade para distinguir entre este defeito e a madeira sadia. Os sinais ultra-sônicos são fortemente afetados pelos nós, córtex, vazios, fissuras, deterioração, etc. Tipicamente, o tempo de percurso da onda exibiu, segundo os autores, uma tendência de aumento para todos os defeitos, enquanto a perda de energia aumentou.

A perda de energia é mais sensível a vários defeitos se comparada com medições de tempo de percurso da onda, pois a perda de energia mede um atributo de todo o sinal ultra-sônico e o tempo de percurso mede um valor pontual.

3.4.7 Características geométricas

As condições para uma preparação satisfatória das amostras dependem da magnitude da atenuação da onda ultra-sônica na madeira. As formas geométricas típicas são: paralelepípedos retangulares, cubos, barras e discos. A onda ultra-sônica interage com os contornos do corpo-de-prova, de modo geral, quanto maior a peça, maior será a interação da onda com os constituintes da madeira, propiciando melhores resultados.

Em função da relação entre as dimensões do corpo-de-prova e o comprimento de onda, podem-se ter diferentes tipos de propagação de ondas ultra-sônicas. As ondas de volume ocorrem quando as dimensões do corpo-de-prova são maiores se comparadas com o comprimento de onda, e podem ser longitudinais ou transversais, dependendo do tipo de transdutor utilizado.

Quando uma das dimensões do corpo-de-prova se aproxima do comprimento de onda, a propagação ocorre por meio de ondas de superfície, as quais são mais complexas e com maior atenuação. As ondas de superfície podem ser divididas em ondas de placa, caracterizadas pelo efeito fronteira, com maior amortecimento devido à mudança da impedância acústica; e ondas Rayleigh, nas quais a trajetória da onda é elíptica e paralela à direção de propagação.

A preparação adequada da amostra é essencial para a determinação de velocidades ultra-sônicas. Das três direções principais de propagação, pode-se afirmar que a velocidade na direção longitudinal é a mais afetada pela variação da geometria do corpo-de-prova.

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

A influência da variabilidade natural das espécies na velocidade e atenuação pode ser analisada pela escolha de uma freqüência da fonte na qual o comprimento de onda no material fique aproximadamente entre a dimensão máxima dos elementos anatômicos e a dimensão mínima da amostra.

Os mecanismos de dispersão da onda ultra-sônica ao longo da madeira são intrinsecamente relacionados às dimensões dos elementos estruturais desse material. Quando uma onda longitudinal se propaga ao longo da direção das fibras da madeira, o comprimento de onda e o comprimento das células são da mesma ordem de grandeza. A propagação ocorre, dessa forma, no regime de dispersão estocástico. Por outro lado, ao longo das direções radial e tangencial, os comprimentos de onda são consideravelmente maiores que as dimensões médias das células e a propagação ocorre dentro de um regime de dispersão conhecido como dispersão de Rayleigh, BUCUR (1995). Estas duas condições de propagação estão diretamente relacionadas à freqüência da onda utilizada.

3.5 Considerações finais

No escopo dos conhecimentos apresentados na revisão da literatura, esta pesquisa visou o estudo da influência do teor de umidade e da dimensão dos corpos-de-prova na técnica de ultra-som, parâmetros estes de grande valia para o correto emprego deste método, devido à importância significativa dessas variáveis na interpretação dos resultados. Além disso, salienta-se a necessidade de pesquisas referentes à avaliação não-destrutiva em madeiras cultivadas no Brasil, pois a maior parte do conhecimento existente nesta área foi desenvolvido com coníferas européias e outras essências cultivadas no hemisfério norte, as quais possuem complexidade anatômica bem diferenciada das essências tropicais e cultivadas em nosso país.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, são descritos os critérios utilizados para a definição das espécies estudadas, a metodologia para a secagem e confecção dos corpos-de-prova e o detalhamento dos procedimentos adotados na experimentação.

4.1 Espécies

De maneira a se obter uma boa representatividade dos dados, foram estudadas folhosas das classes C-30 e C-40 e coníferas da classe C-25. As espécies e respectivas classes de resistência estão relacionadas a seguir, salientando-se que o enquadramento inicial nas classes de resistência foi efetuado a partir dos valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, conforme anexo E da NBR 7190/97, e dados disponíveis no LaMEM/SET/EESC/USP.

→ Dicotiledôneas: *Goupia glabra* (C-30); *Eucalyptus grandis* (C-30); *Hymenaea spp* (C-40) e *Eucalyptus citriodora* (C-40).

→ Coníferas: *Pinus caribea var. caribea* (C-25) e *Pinus elliottii var. elliottii* (C-25), sem tratamento preservativo para os ensaios referentes à variação das dimensões dos corpos-de-prova, e com e sem tratamento preservativo para os ensaios referentes à variação do teor de umidade. O tratamento preservativo utilizou o produto hidrossolúvel CCA (arseniato de cobre cromatado), por meio do processo de pressão em autoclave utilizando um nível de 9,6 kg de ingrediente ativo por m^3 de madeira tratada.

Salienta-se que o maior número de espécies de dicotiledôneas pesquisadas ocorre em função do uso mais intensivo destas em estruturas de madeira em nosso país. A inclusão de uma espécie de pinus tratada com preservantes teve como objetivo tornar os resultados deste estudo mais úteis, já que o emprego de pinus para estruturas de madeira requer o uso de algum tratamento preservativo.

4.2 Propriedades físicas e mecânicas

Foram realizados ensaios para avaliação das seguintes propriedades físicas e mecânicas:

- ⇨ Densidade aparente a um teor de umidade de 12%: $\rho_{ap,12\%}$ (kg/m^3);
- ⇨ Teor de umidade: U (%);
- ⇨ Resistência à compressão paralela às fibras: f_{c0} (MPa);
- ⇨ Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: E_{c0} (MPa);
- ⇨ Módulo de elasticidade na flexão estática: MOE (MPa);
- ⇨ Módulo de elasticidade dinâmico: E_d (MPa).

4.2.1 Densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$)

A metodologia utilizada neste ensaio está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B6, nas quais os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal retangular de 2 cm x 3 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Além disso, na determinação da densidade na condição seca ao ar, o corpo-de-prova deve apresentar-se com teor de umidade de aproximadamente 12%.

4.2.2 Teor de umidade (U)

Para se conhecer o valor do teor de umidade, foram obtidas as massas inicial (m_i) e seca (m_s) do corpo-de-prova. Os procedimentos para a determinação do valor da massa seca são os mesmos utilizados na determinação da densidade.

4.2.3 Resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0})

A metodologia utilizada neste ensaio está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B8.

4.2.4 Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0})

Seguindo as recomendações da NBR 7190/97, foi possível determinar os valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras das espécies em estudo por meio do ensaio de compressão paralela às fibras.

4.2.5 Módulo de elasticidade na flexão estática (MOE)

Vigas de 6 cm x 12 cm x 300 cm foram utilizadas no ensaio de flexão estática para obtenção do módulo de elasticidade à flexão estática (MOE). Para simplificar o ensaio, as peças foram

EESC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

colocadas na posição de menor inércia, conforme ilustrado na Figura 4. Nos ensaios, as peças foram submetidas a um carregamento aplicado no meio do vão e foram feitas 8 leituras de deslocamento. A partir dos dados de força e deslocamento, foi calculado o módulo de elasticidade na flexão estática.

Figura 4 - Ensaio de flexão estática em vigas.

4.3 Estudo da influência da dimensão do corpo-de-prova

Neste estudo foram utilizadas as espécies já definidas com teor de umidade em torno de 12%. A experimentação para avaliar a influência da dimensão do corpo-de-prova foi feita em duas etapas: variando a seção transversal e mantendo o comprimento da peça constante, e a seguir, mantendo a seção constante e variando o comprimento. Os corpos-de-prova apresentaram forma paralelepipédica. O equipamento de ultra-som utilizado foi o comercialmente denominado Sylvatest com transdutores exponenciais de 22 kHz, ilustrado na Figura 5.

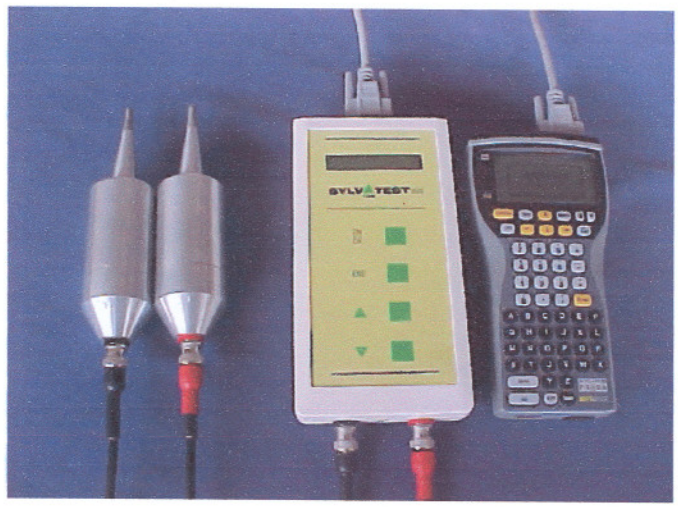

Figura 5 – Equipamento de ultra-som Sylvatest.

4.3.1 Estudo da influência da variação da seção transversal do corpo-de-prova

Na primeira etapa, foram utilizados doze corpos-de-prova com dimensão inicial em torno de 6 cm x 12 cm x 50 cm. As medidas com o ultra-som foram feitas a partir dessa dimensão, com um intervalo em torno de 1 cm, até a seção em torno de 1 cm x 12 cm x 50 cm (Figura 6). A partir dos valores do tempo de propagação ultra-sônica e da distância percorrida pela onda, foi calculada a velocidade da onda na direção longitudinal (V_{LL}).

Figura 6 – Procedimentos do ensaio de variação da seção transversal.

4.3.2 Estudo da influência da variação do comprimento do corpo-de-prova

Para a análise da influência do comprimento, foram utilizadas doze vigas por espécie, com dimensão inicial de 6 cm x 12 cm x 300 cm, avaliadas com um intervalo de 50 cm, até resultar em peças com dimensões 6 cm x 12 cm x 50 cm, e a partir daí, a variação foi de 10 cm resultando em peças de 6 cm x 12 cm x 10 cm. Esses intervalos de variação de 50 cm e 10 cm foram definidos a partir de ensaios preliminares. A aplicação da onda ultra-sônica foi feita na direção longitudinal. Além da velocidade de propagação, calculou-se também o módulo de elasticidade dinâmico (E_d), a partir da velocidade longitudinal (V_{LL}) e da densidade aparente a um teor de umidade de 12%.

IFSC-USP SERVIÇO INFORMAÇÃO

Figura 7 – Ensaio de ultra-som em vigas.

Simultaneamente aos ensaios com ultra-som, foram feitos ensaios de flexão nas vigas com 6 cm x 12 cm x 300 cm (descrito no item 4.2.5) para comparação dos valores do módulo de elasticidade obtidos em ambos os métodos. Para um trecho de 50 cm retirado da viga, foram realizados ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente (descritos nos itens 4.2.3 e 4.2.1 respectivamente). Salienta-se a importância da obtenção das relações entre f_{c0}, E_d e MOE, tendo em vista que a atual norma brasileira utiliza a resistência à compressão paralela às fibras como principal parâmetro na especificação da madeira.

4.4 Estudo da influência do teor de umidade

Foram avaliadas doze peças por espécie com dimensões 2,5 cm x 30 cm x 75 cm, desde saturadas até o teor de umidade em torno de 6%. Na figura a seguir está ilustrado o esquema do ensaio.

Figura 8 – Equema do ensaio de variação de umidade.

As peças foram imersas em água até ficarem saturadas. Após a retirada das mesmas do tanque iniciou-se a etapa de secagem ao ar, sendo o controle do teor de umidade feito com o equipamento DL 2000 (marca Digisystem), acoplado em uma caixa de conexão DPC 8760 (Figura 9) e também por meio da extração de pequenas amostras de tábuas de referência secas em estufa a 103 ± 2°C.

O equipamento fornece leituras do teor de umidade na área imediatamente em contato com as agulhas do eletrodo, indicando o ponto com teor de umidade mais elevado na profundidade percorrida, ou seja, trata-se de uma leitura localizada. A faixa de medição está entre 6% e 60%, com resolução de 0,1%. Os valores da resistência elétrica são convertidos em valores de teor de umidade com as seguintes tolerâncias: 0,5% de tolerância para teores de umidade entre 6% e 12%; 1,0% de tolerância para teores de umidade entre 12% e 20%; e 2,0% de tolerância para teores de umidade entre 20% e 30%.

O medidor de umidade foi calibrado para cada espécie e também em função da temperatura ambiente. A utilização da caixa de conexão visou minimizar variações decorrentes da perfuração necessária para diversas medições ao longo do processo de secagem.

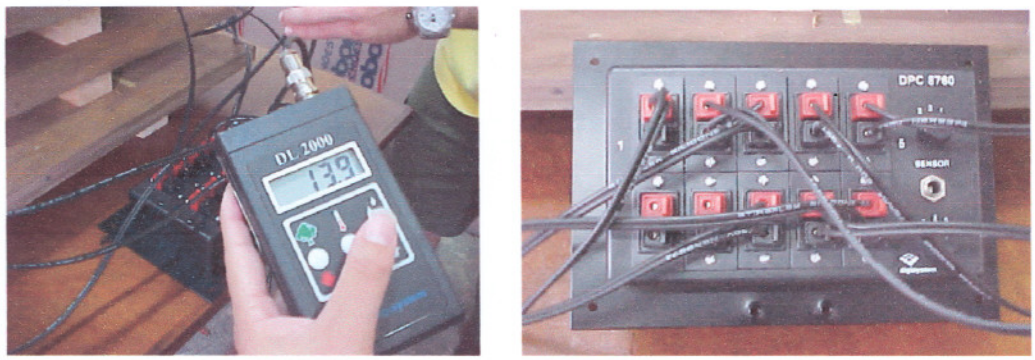

Figura 9 – Medidor de umidade e caixa de conexão.

A partir do teor de umidade em torno de 14%, ou seja, próximo do ponto de equilíbrio com o ar, as peças foram colocadas na estufa para que atingissem em torno de 6% de umidade. Salienta-se que cada lote destinado a este processo foi composto apenas por uma espécie, evitando-se interferências inerentes à velocidade de secagem.

Foram utilizados dois tipos de pinos (Figura 10) para a medição de umidade: pinos com revestimento de prata (em seis peças) e pinos de inox (nas seis peças restantes), cravados até a metade da espessura das tábuas. A utilização de pinos com diferentes revestimentos metálicos teve como intuito avaliar possíveis interferências nas medições. Em função disto, na análise dos resultados, foi possível propor correções para os valores obtidos de modo a diminuir a possibilidade de erros sistemáticos na experimentação.

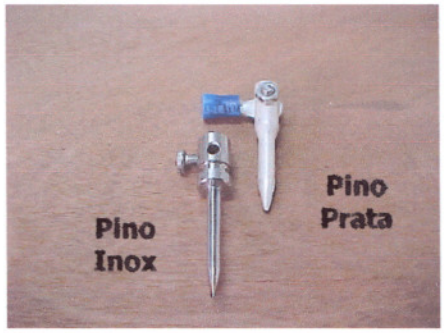

Figura 10 – Pinos de inox e prata.

Após a medição do teor de umidade para cada peça, foi feito o ensaio de ultra-som nas direções longitudinal e transversal (Figura 11), com um intervalo do teor de umidade em torno de 2%.

Figura 11 – Ensaio de ultra-som variando-se o teor de umidade.

A partir dos valores do tempo de propagação ultra-sônica e da distância percorrida pela onda, foi calculada a velocidade longitudinal da onda nas direções longitudinal (V_{LL}) e transversal (V_{TT}). Com os resultados dos ensaios, foi realizada uma análise estatística que permitiu verificar a influência da umidade na velocidade de propagação ultra-sônica, e também estabelecer relações entre ambas, para cada uma das espécies em estudo.

Para a análise estatística de todos os dados obtidos na experimentação foi utilizado o software MINITAB.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, estão apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios descritos em Materiais e Métodos para as espécies: pinus caribea, pinus elliottii (com e sem tratamento preservativo para os ensaios referentes à variação do teor de umidade), eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba e jatobá.

5.1 Variação da seção transversal do corpo-de-prova

Na Tabela 1 estão apresentados os valores das velocidades médias, máximas e mínimas e os coeficientes de variação.

Tabela 1 – Velocidades médias, máximas e mínimas e coeficientes de variação (seção transversal).

	$V_{média}$ (m/s)	$V_{mín}$ (m/s)	$V_{máx}$ (m/s)	CV (%)
Pinus caribea	4674	4220	5051	4,0
Pinus elliottii	4420	3125	5155	10,8
Eucalipto grandis	5073	4608	5376	3,0
Eucalipto citriodora	5047	4237	5510	6,0
Cupiúba	4368	3745	4673	5,1
Jatobá	5126	4791	5491	3,8

A seguir, estão apresentados os gráficos da variação da velocidade longitudinal em função da variação da seção transversal, obtidos a partir da experimentação realizada para as espécies em estudo. As linhas coloridas representam os doze corpos-de-prova utilizados para cada espécie.

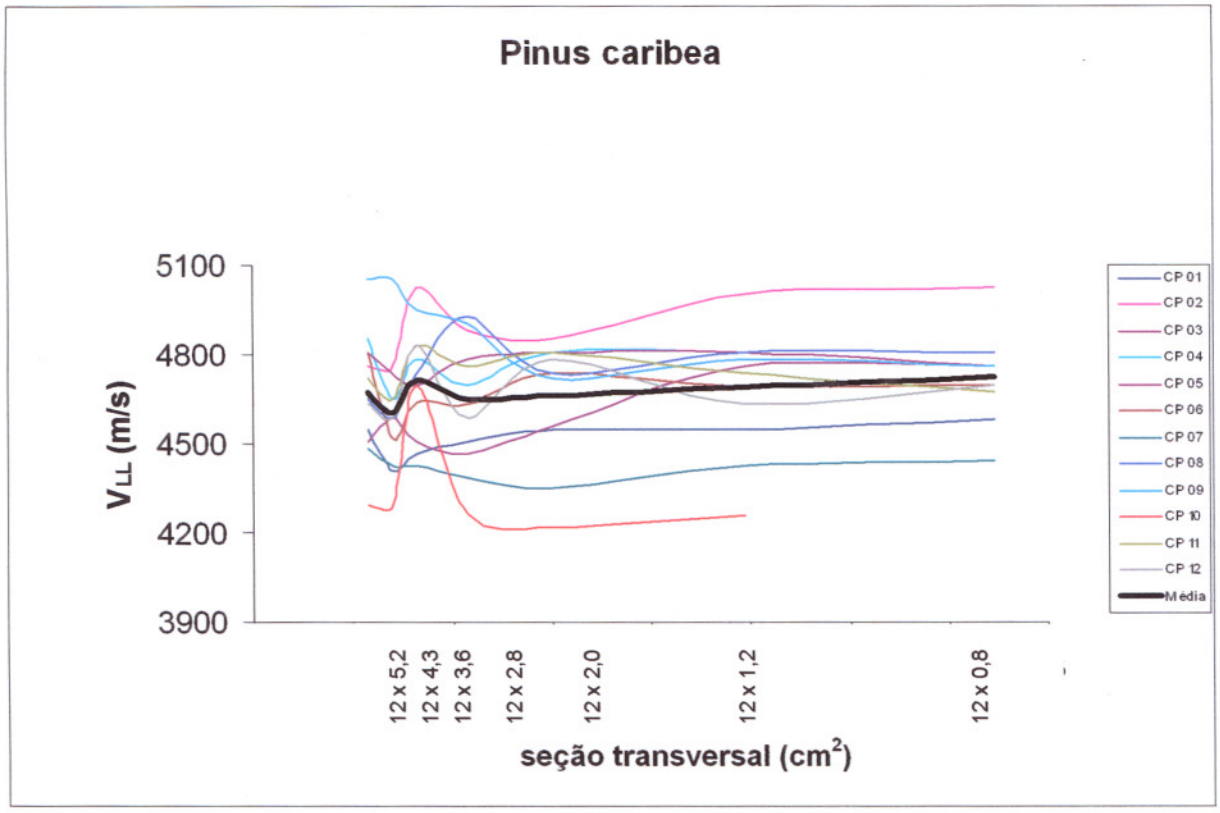

Figura 12 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – pinus caribea.

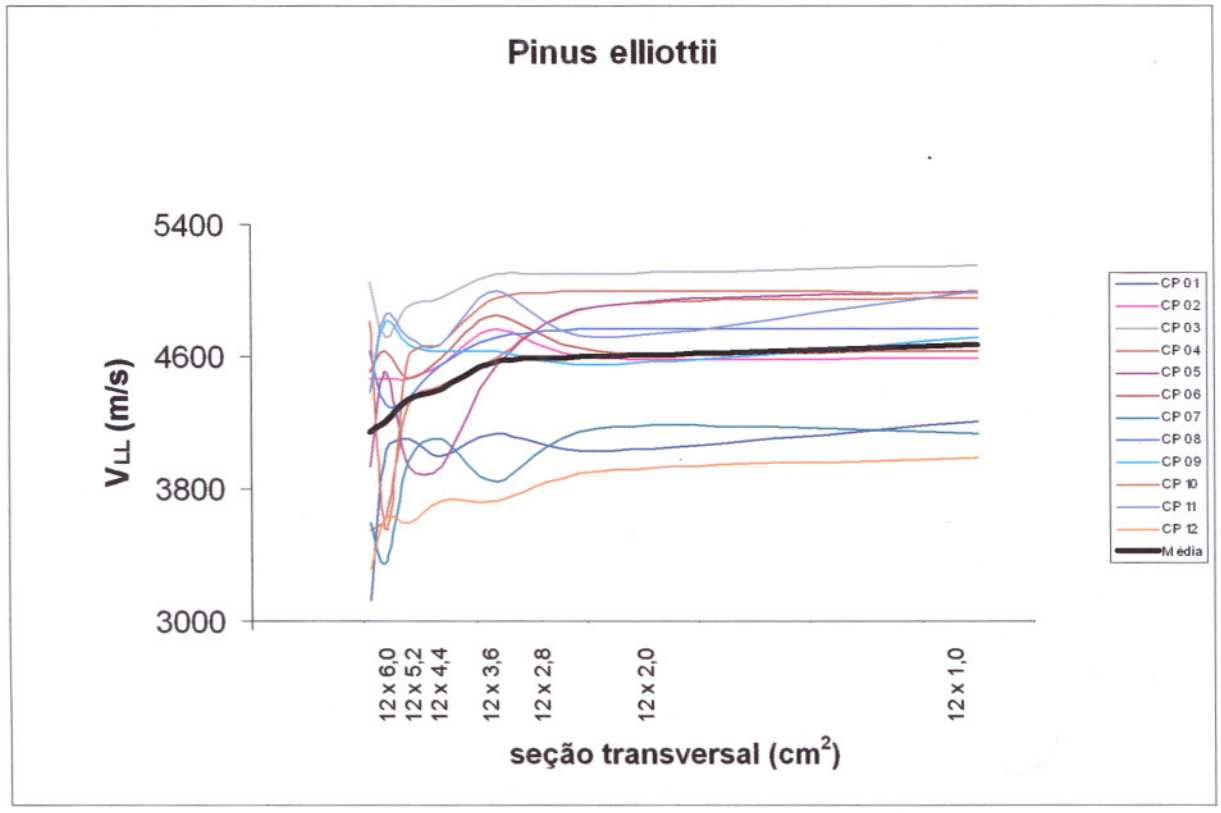

Figura 13 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – pinus elliottii.

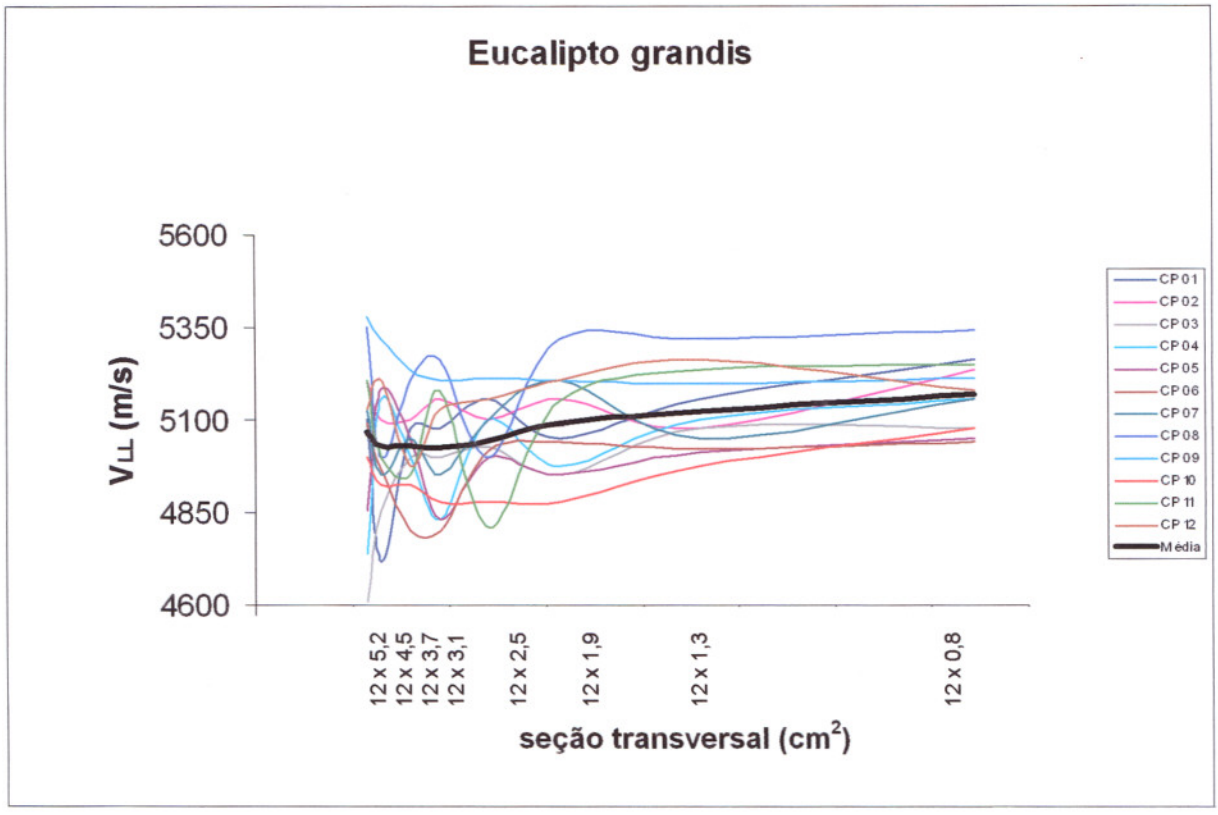

Figura 14 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – eucalipto grandis.

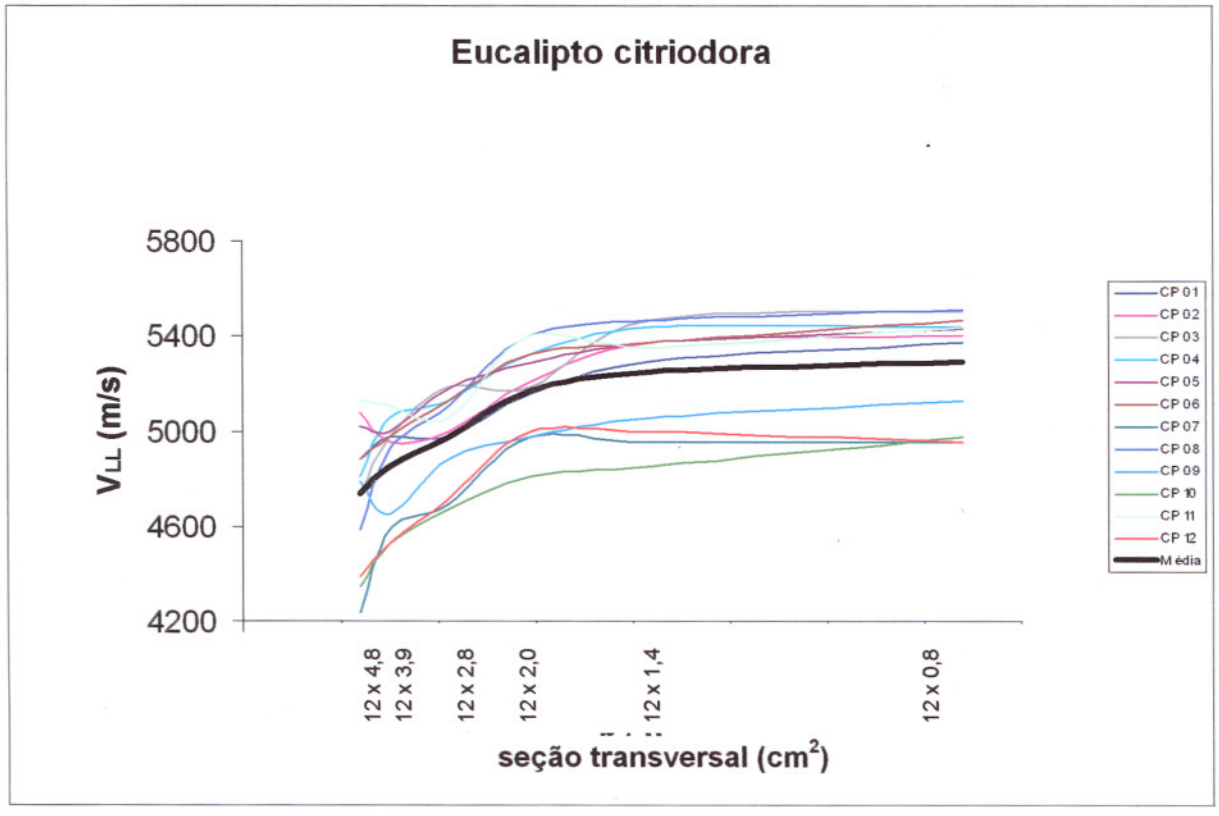

Figura 15 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – eucalipto citriodora.

IFSC-USP SERVIÇO DE SI... INFORMAÇÃO

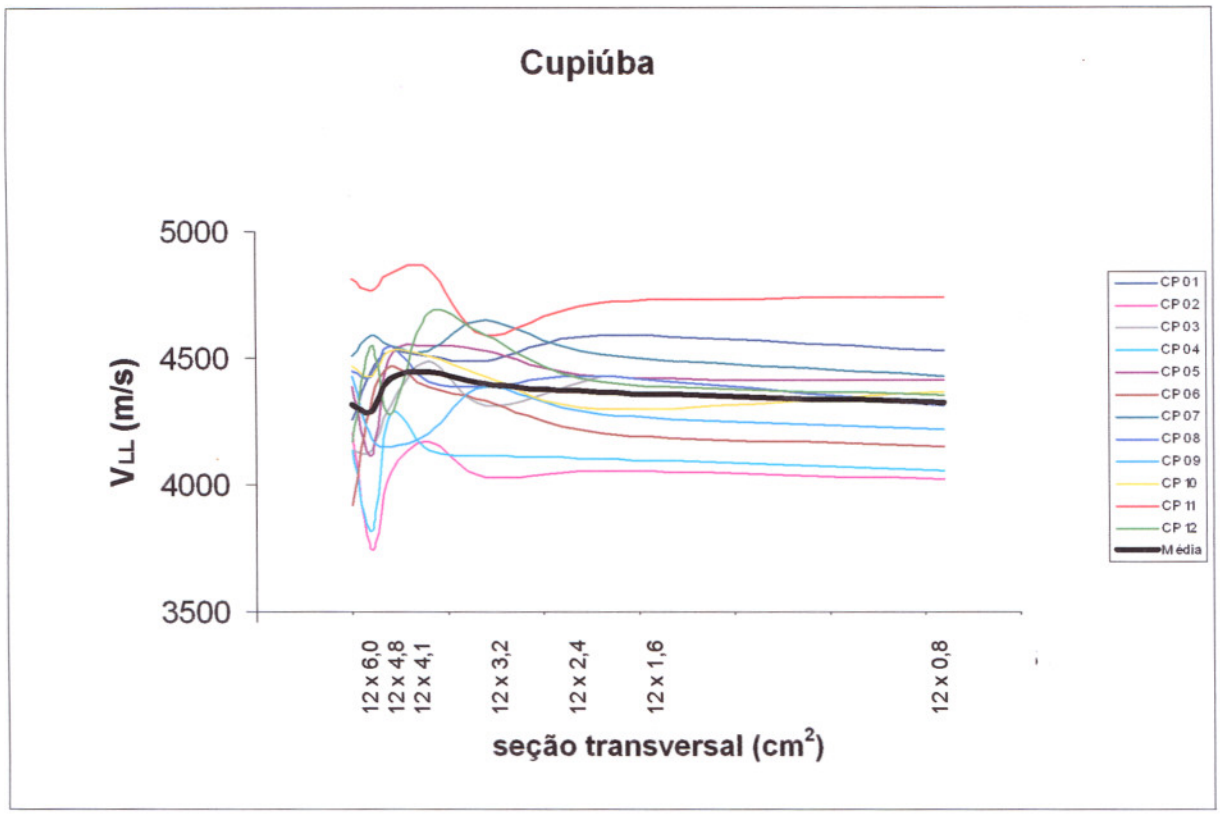

Figura 16 – Velocidade longitudinal em função seção transversal – cupiúba.

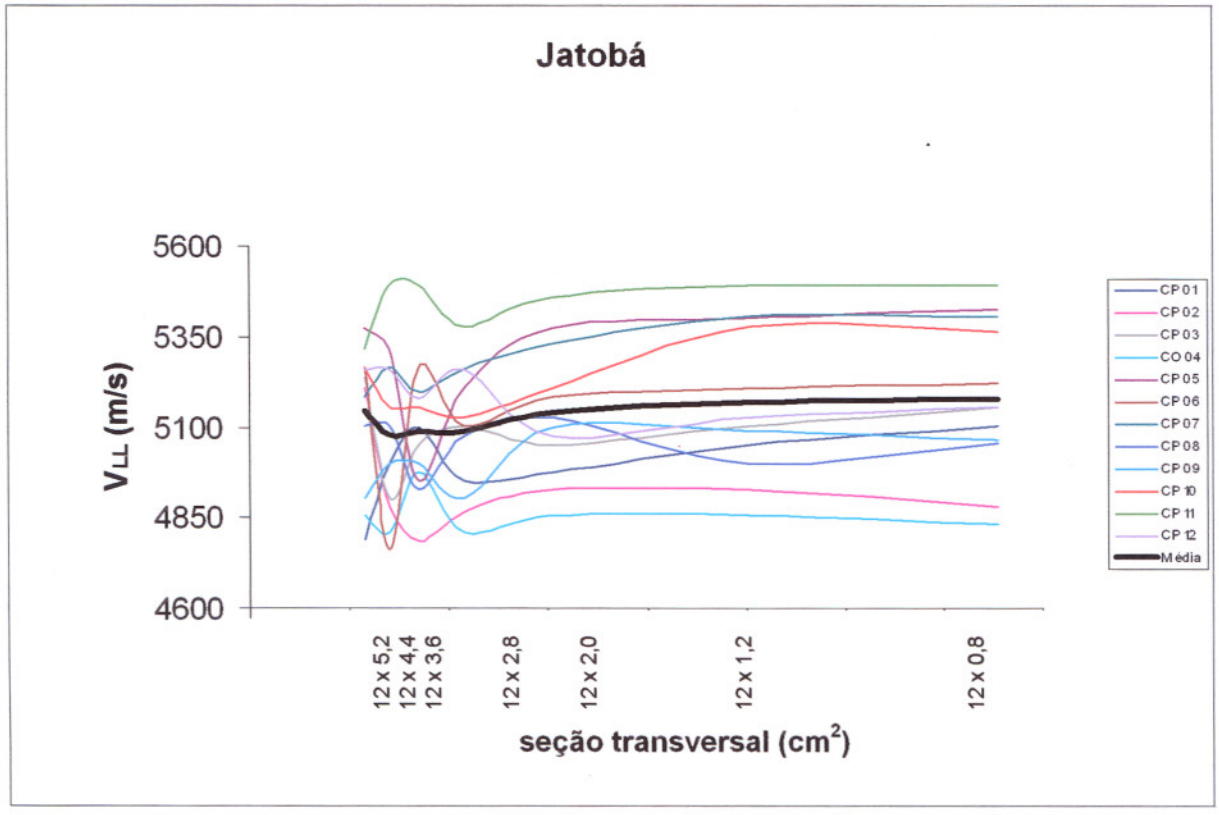

Figura 17 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal – jatobá.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

A partir da observação das Figuras 12 a 17 não é possível constatar a influência da geometria do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica. Salienta-se que estas constatações não permitem o estabelecimento de limites para a seção em função do comprimento de onda ou freqüência do equipamento.

As linhas pretas em negrito nos gráficos indicam os valores médios para os doze corpos-de-prova de cada espécie estudada e demonstram que não houve uma tendência de aumento ou de diminuição da velocidade em função da diminuição da seção transversal. Os gráficos demonstram também que ocorreu uma variação distinta da velocidade para cada corpo-de-prova, sendo que o comportamento das curvas se tornou praticamente uniforme a partir da seção transversal em torno de 12 cm x 2,0 cm para todas as espécies estudadas.

Em função dos gráficos obtidos, observa-se também uma melhor adequação da freqüência de 22 kHz (Sylvatest) para ensaios em peças com seção transversal reduzida (tábuas).

Nos resultados anteriormente apresentados, o comprimento de onda foi em torno de 20 cm, ou seja, maior que as dimensões da seção transversal dos corpos-de-prova. A fim de comparação com a literatura pesquisada (BUCUR, 1995), foram realizados ensaios complementares com o equipamento de ultra-som V-Meter, com duas freqüências: 54 kHz e 150 kHz, e respectivamente, comprimentos de onda de 8 cm e 3 cm. Foram utilizados doze corpos-de-prova da espécie eucalipto citriodora, com a seção transversal variando desde 12 cm x 12 cm até em torno de 12 cm x 1 cm para cada freqüência. Os resultados estão apresentados nas Figuras 18 e 19.

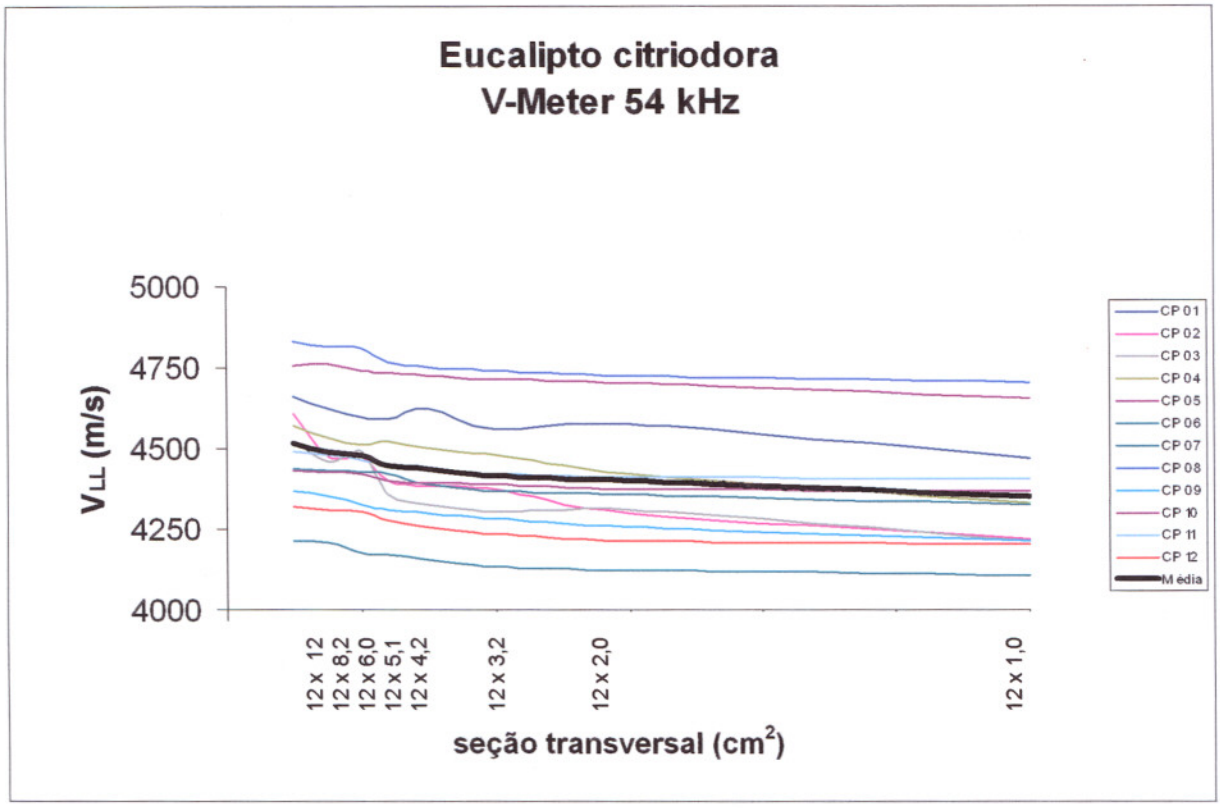

Figura 18 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal (V-Meter 54 kHz).

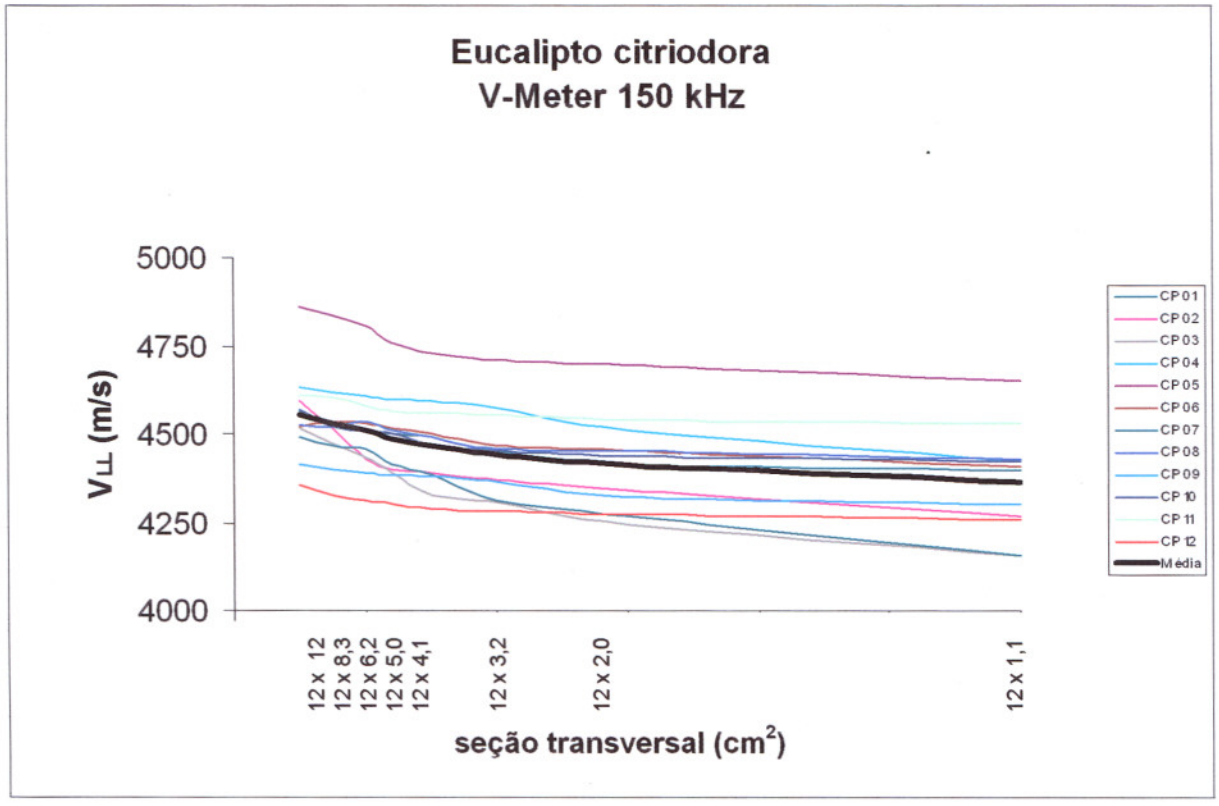

Figura 19 – Velocidade longitudinal em função da seção transversal (V-Meter 150 kHz).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

A partir destes dois gráficos, é possível constatar a tendência de diminuição da velocidade ultra-sônica longitudinal com a diminuição da seção transversal (3,8% e 4,3% respectivamente para as freqüências de 54 kHz e 150 kHz). Constata-se também que estes resultados, com freqüências mais elevadas, não sofreram perturbação nos valores de propagação para a seção transversal em torno de 12 cm x 2 cm, indicando uma melhor adequação para estas freqüências.

Uma possível explicação para a diminuição observada na velocidade é o efeito fronteira que ocorre quando o comprimento de onda (λ) se aproxima de uma das dimensões da peça. No início dos ensaios complementares, quando as dimensões da peça eram superiores ao comprimento de onda, havia apenas a propagação da onda longitudinal de volume. No prosseguimento da experimentação, quando uma das dimensões da peça se aproximou do comprimento de onda, toda a espessura da peça passou a ser penetrada pelo feixe de ondas formando uma onda de placa, (mistura de ondas longitudinais e transversais), que apresenta menor velocidade de propagação.

5.2 Variação do comprimento do corpo-de-prova

Na Tabela 2 estão apresentados os valores das velocidades médias, máximas e mínimas e os coeficientes de variação para as espécies estudadas.

Tabela 2 – Velocidades médias, máximas e mínimas e coeficientes de variação (comprimento).

	$V_{média}$ (m/s)	$V_{mín}$ (m/s)	$V_{máx}$ (m/s)	CV (%)
Pinus caribea	3873	2745	4706	12,5
Pinus elliottii	4205	3030	4987	10,3
Eucalipto grandis	4724	3333	5405	9,3
Eucalipto citriodora	4660	3544	5195	8,3
Cupiúba	4055	2059	4874	14,8
Jatobá	4283	2857	5415	13,4

Na seqüência, são mostrados os gráficos da variação da velocidade longitudinal em função da variação do comprimento das peças de madeira, sendo que L é o comprimento da peça e λ é o comprimento de onda utilizado para a freqüência de 22 kHz. O comprimento de onda,

calculado a partir da média da velocidade inicial para as espécies em estudo, de acordo com a equação (4), foi em torno de 20cm.

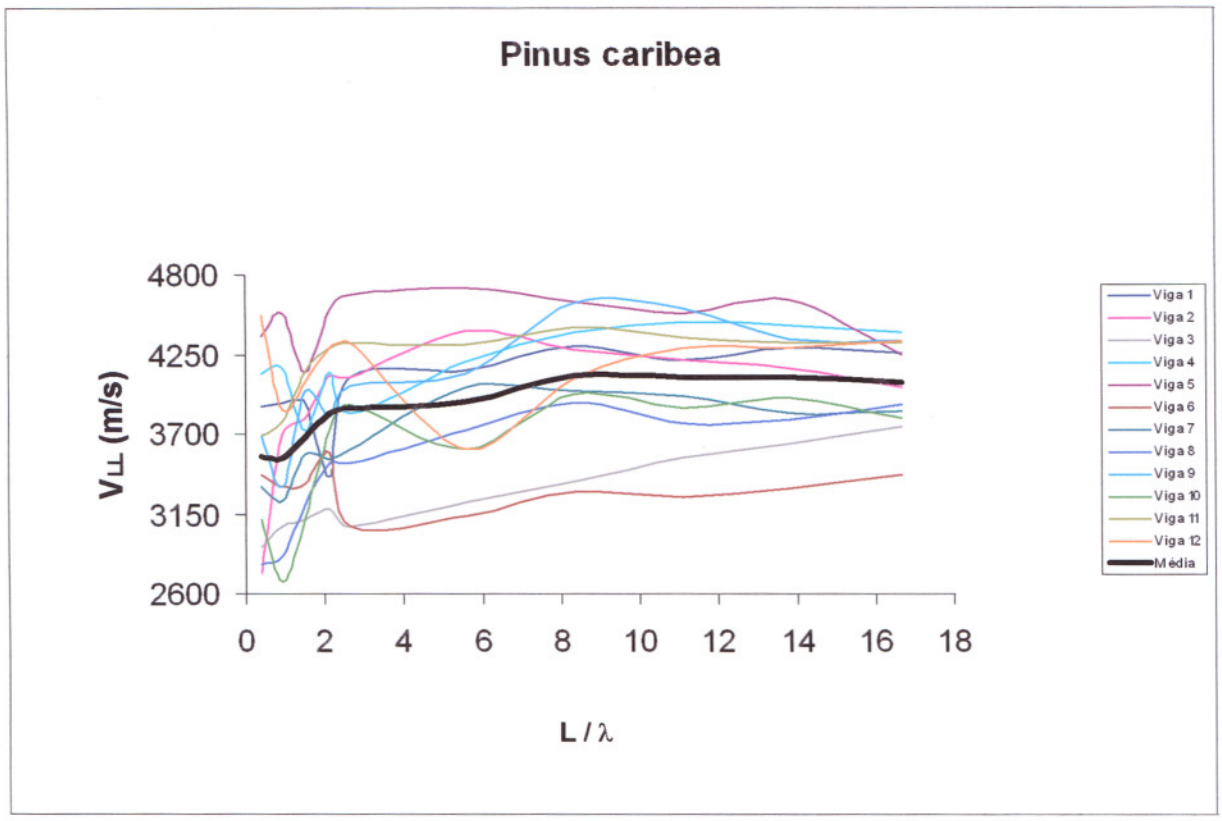

Figura 20 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – pinus caribea.

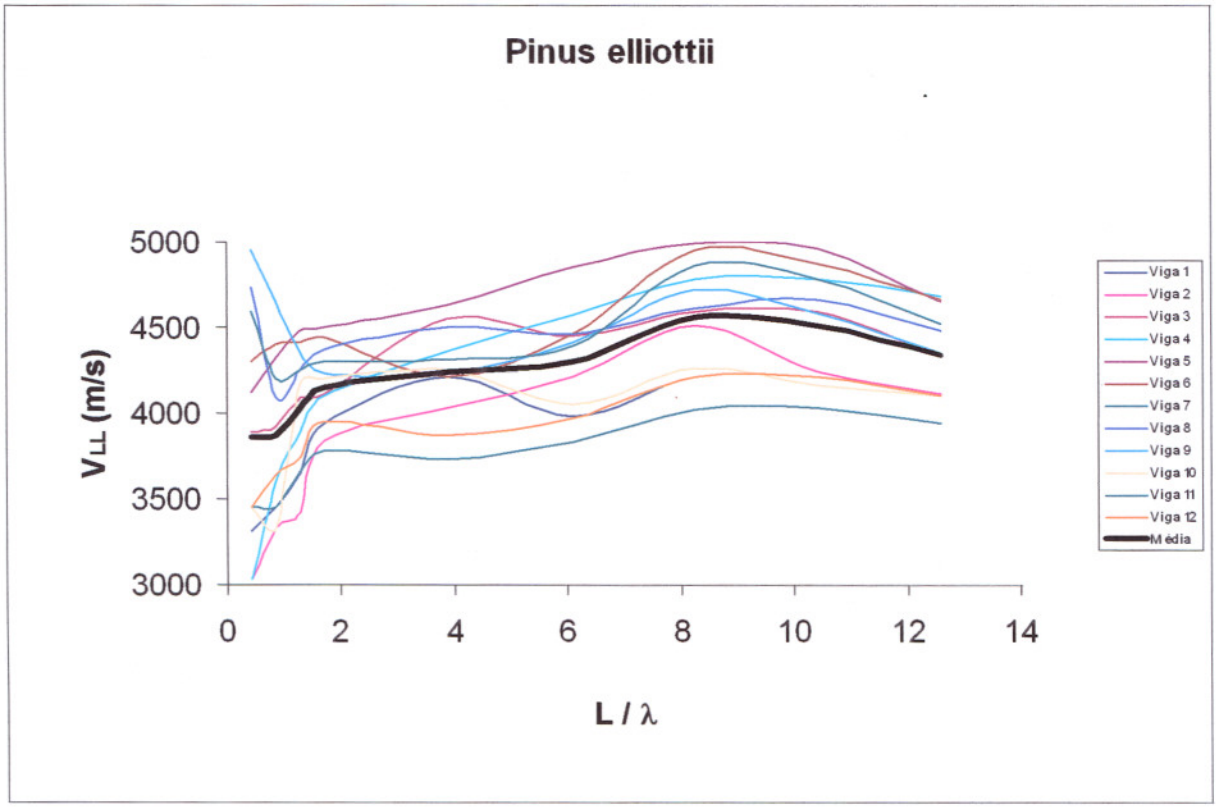

Figura 21 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – pinus elliottii.

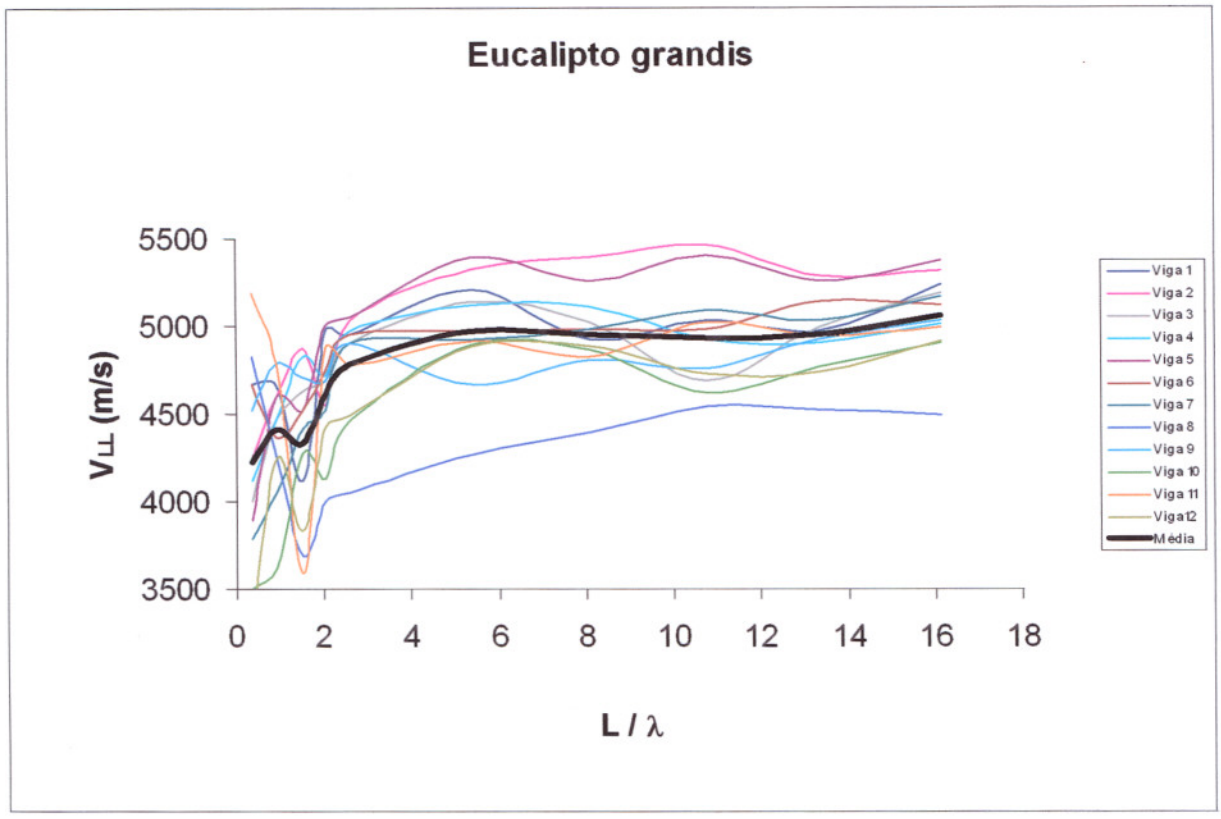

Figura 22 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – eucalipto grandis.

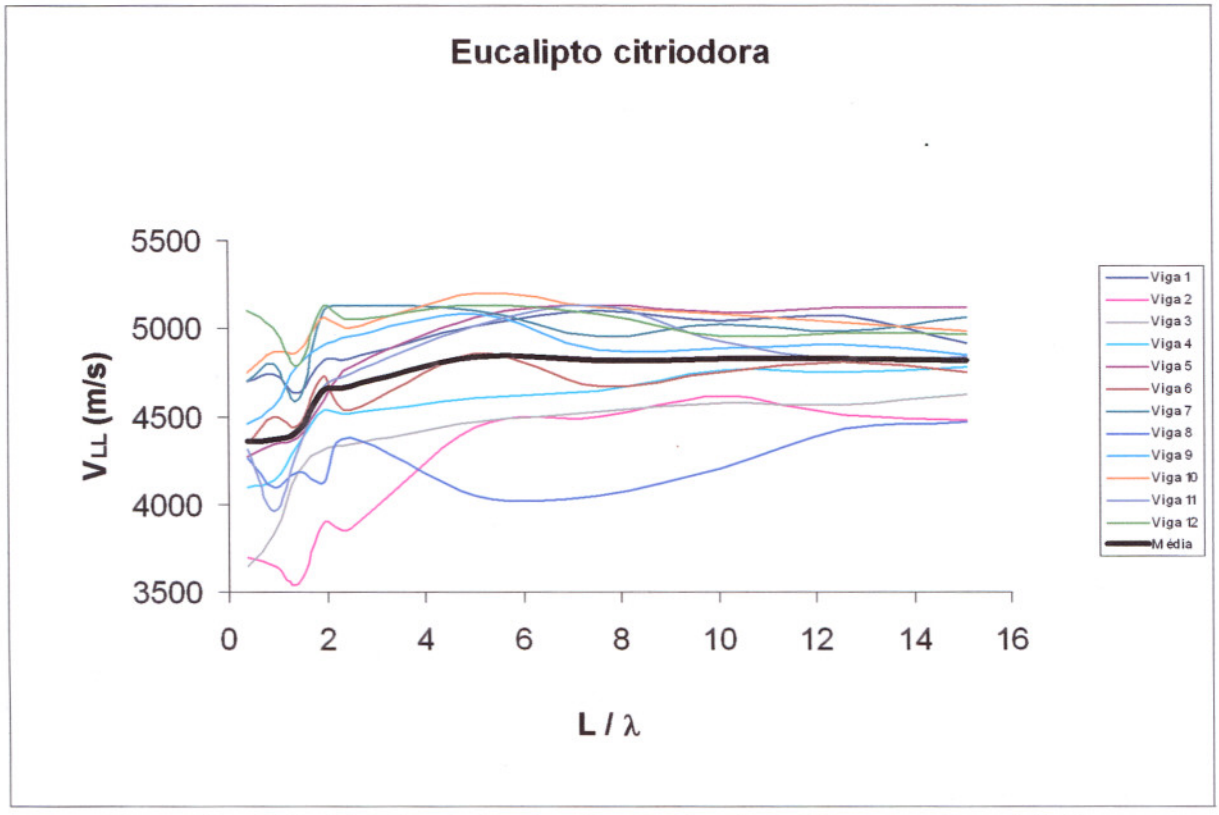

Figura 23 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – eucalipto citriodora.

EESC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

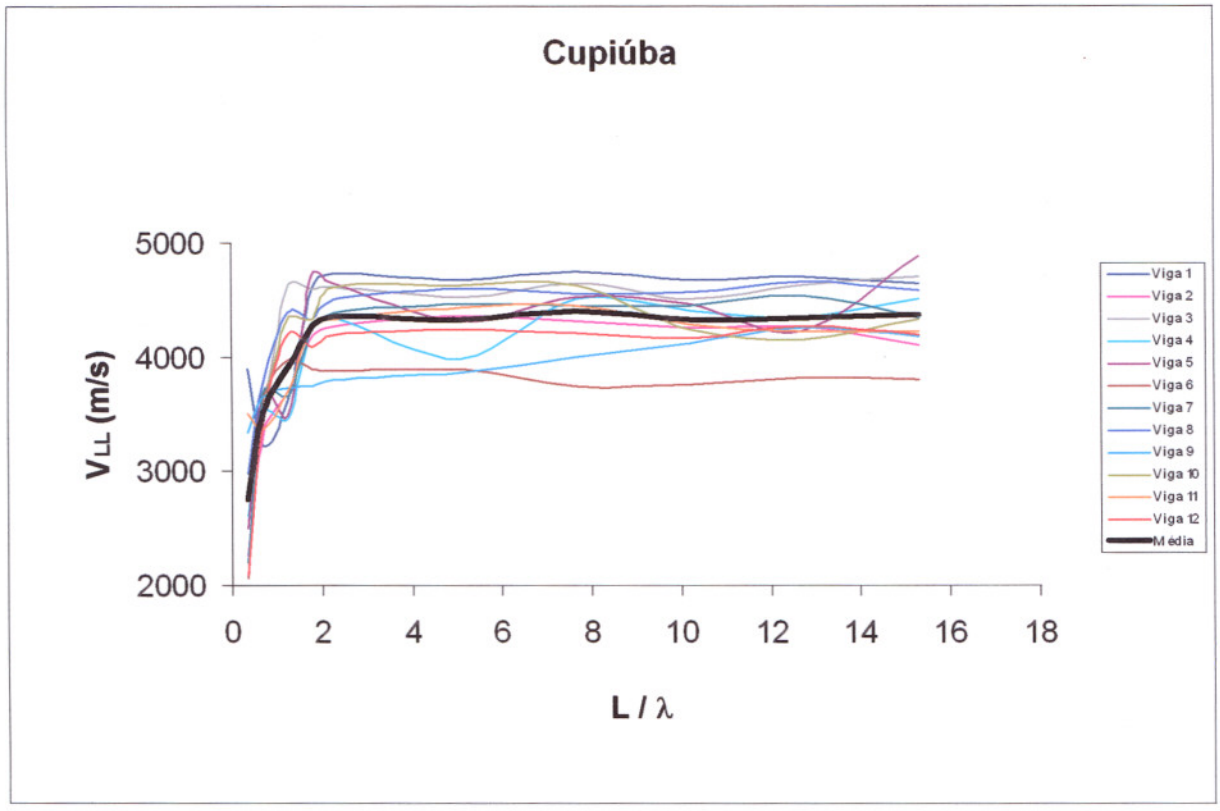

Figura 24 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – cupiúba.

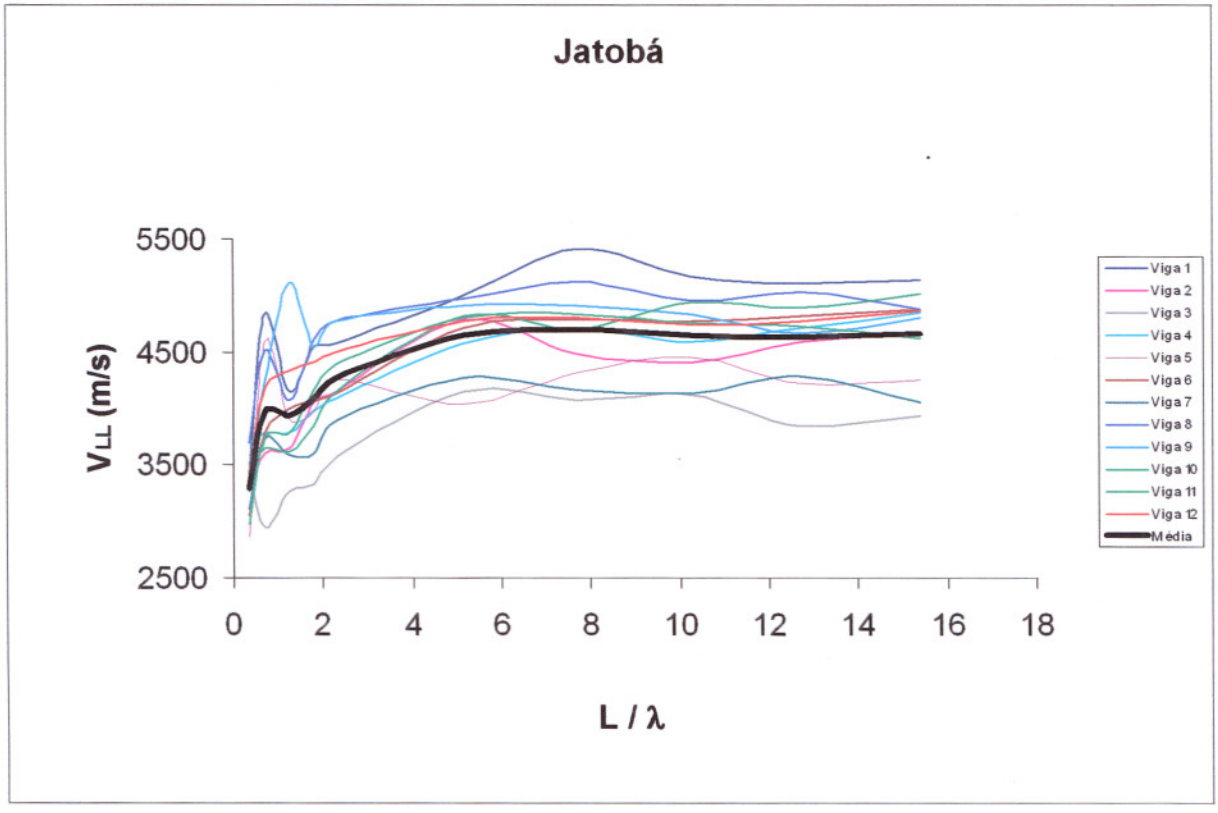

Figura 25 – Velocidade longitudinal em função da relação L/ λ – jatobá.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

Com base nos resultados apresentados, verificou-se que, para as espécies estudadas, a velocidade ultra-sônica longitudinal mostrou-se sensível à variação da relação entre o comprimento da peça e o comprimento de onda utilizado.

Os resultados indicaram que existe um ponto crítico na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda (L/λ) a partir do qual a velocidade não é mais afetada, ou seja, para a freqüência utilizada, existe um comprimento mínimo da peça, equivalente a alguns comprimentos de onda, para que a velocidade obtida não sofra interferências significativas.

A determinação do ponto crítico foi feita para cada espécie através de regressões lineares em ambos os trechos (acima e abaixo do ponto crítico) a partir do gráfico das velocidades médias para cada conjunto de doze vigas (Figuras 26 a 31).

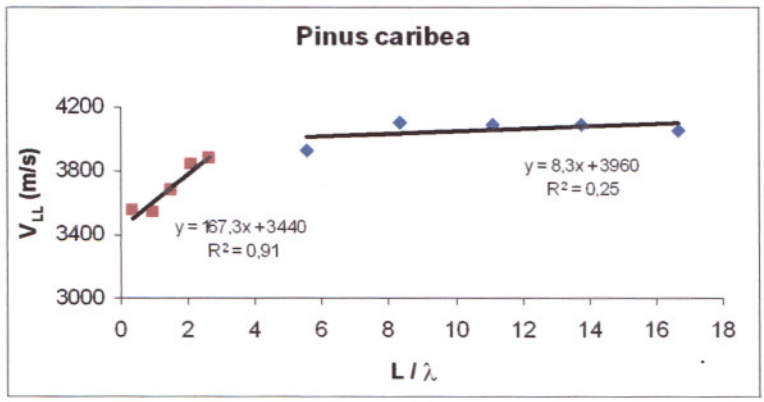

Figura 26 – Velocidade média em função da relação L/ λ – pinus caribea.

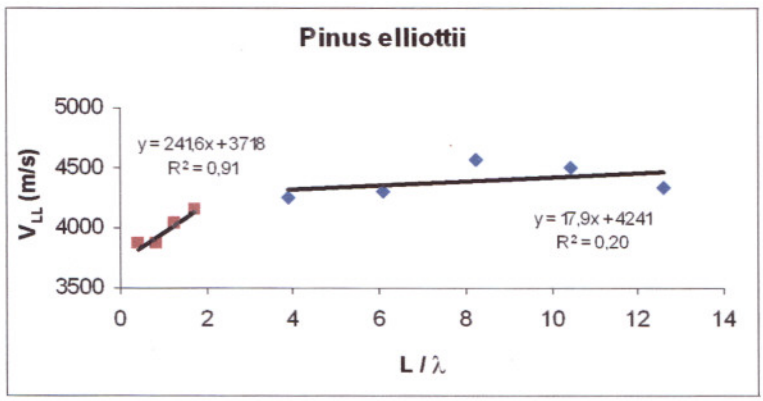

Figura 27 – Velocidade média em função da relação L/ λ – pinus elliottii.

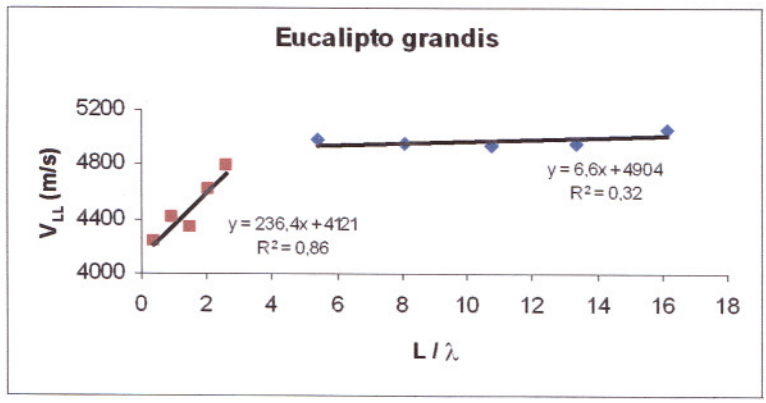

Figura 28 – Velocidade média em função da relação L/ λ – eucalipto grandis.

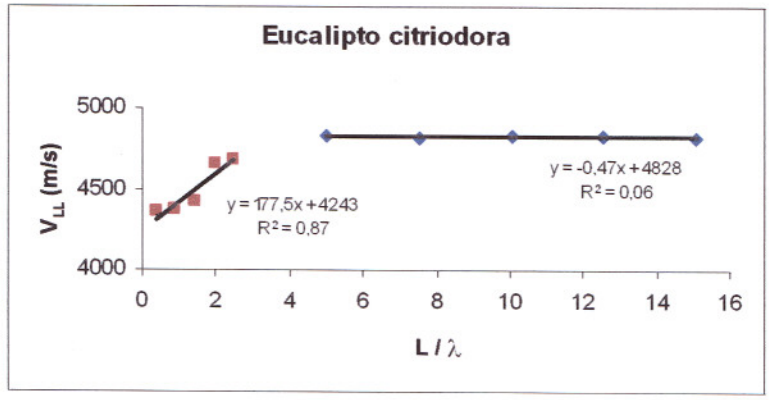

Figura 29 – Velocidade média em função da relação L/ λ – eucalipto citriodora.

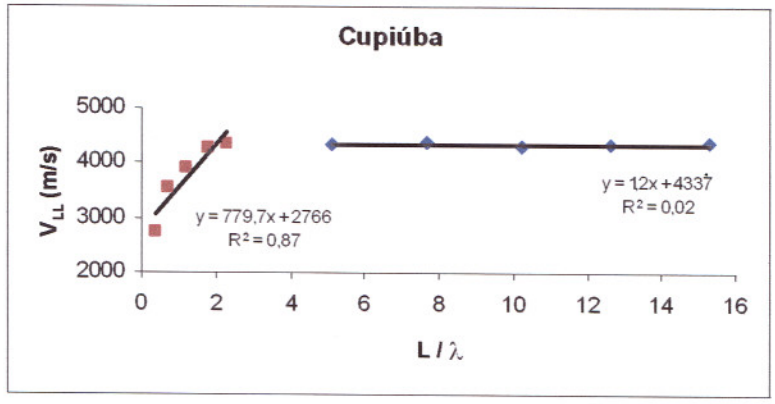

Figura 30 – Velocidade média em função da relação L/ λ – cupiúba.

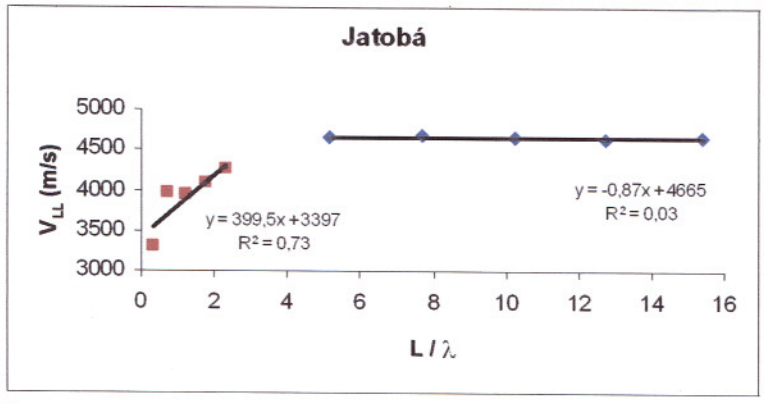

Figura 31 – Velocidade média em função da relação L/ λ – jatobá.

As equações obtidas e os coeficientes de determinação estão apresentados na Tabela 3, assim como o ponto crítico L/λ para cada espécie em estudo.

Tabela 3 – Equações das regressões lineares – determinação do ponto crítico L/λ.

	Abaixo do ponto crítico		**Acima do ponto crítico**		**L / λ crítico**
	Equação (*)	**R^2**	**Equação (*)**	**R^2**	
Pinus caribea	y = 167,3x + 3440	0,91	y = 8,3x + 3960	0,25	3,3
Pinus elliottii	y = 241,6x + 3718	0,91	y = 17,9x + 4241	0,20	2,3
Eucalipto grandis	y = 236,4x + 4121	0,86	y = 6,6x + 4904	0,32	3,3
Eucalipto citriodora	y = 177,5x + 4243	0,87	y = -0,47x + 4828	0,06	3,1
Cupiúba	y = 779,7x + 2766	0,87	y = 1,2x + 4337	0,02	2,0
Jatobá	y = 399,5x + 3397	0,73	y = -0,87x + 4665	0,03	3,2

(*) **Obs:** $y = V_{LL}$ e $x = L/\lambda$

Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para o trecho acima do ponto crítico em cada espécie estudada foram muito baixos, e deste modo, pode-se afirmar que a velocidade não é mais afetada pela razão L/λ. Para as espécies pinus caribea, eucalipto grandis, eucalipto citriodora e jatobá o valor crítico ocorreu quando L/λ foi igual a três; e para as espécies cupiúba e pinus elliottii quando L/λ foi igual a dois.

A velocidade mostrou-se sensível à variação do comprimento das vigas, apresentando aumento com o crescimento na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda de: 14,3%, 12,3%, 19,7%, 10,5%, 59,2% e 41,4%, respectivamente para as espécies: pinus caribea, pinus elliottii, eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba e jatobá.

Os resultados estão de acordo com a literatura pesquisada BUCUR (1995), PUCCINI et al. (2001) e BARTHOLOMEU et al. (2003) e demonstram que existe um ponto crítico na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda (L/λ) a partir do qual a velocidade não é mais afetada, ou seja, para a freqüência utilizada, existe um comprimento mínimo da peça, equivalente a alguns comprimentos de onda, para que a velocidade obtida não tenha interferências.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

5.3 Módulos de elasticidade estático e dinâmico

Na Tabela 4, estão apresentados os valores referentes à densidade, à velocidade ultra-sônica na direção longitudinal, ao módulo de elasticidade longitudinal e também ao módulo de elasticidade dinâmico, para as vigas com dimensões 6 cm x 12 cm x 300 cm.

Tabela 4 - Valores médios e coeficientes de variação para as propriedades das vigas.

		$\rho_{ap,12\%}$ (kg/m³)	V_{LL} (m/s)	E_d (MPa)	MOE (MPa)
Pinus caribea (n=12)	Média	523,0	4081	8829	9720
	CV (%)	5,2	8,4	21,0	19,0
Pinus elliottii (n=12)	Média	586,7	4698	13080	13246
	CV (%)	9,4	5,1	19,1	23,4
Eucalipto grandis (n=12)	Média	789,2	5071	20501	21612
	CV (%)	10,7	4,6	18,9	11,1
Eucalipto citriodora (n=12)	Média	1256,7	4797	29128	22097
	CV (%)	8,4	4,0	15,8	7,2
Cupiúba (n=12)	Média	891,6	4357	17154	13702
	CV (%)	8,0	6,8	20,0	18,8
Jatobá (n=12)	Média	945,9	4614	20443	20145
	CV (%)	6,1	8,4	21,9	19,9

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, obtidos para cada uma das vigas, foram feitas regressões lineares, apresentadas nas Figuras 32 a 37.

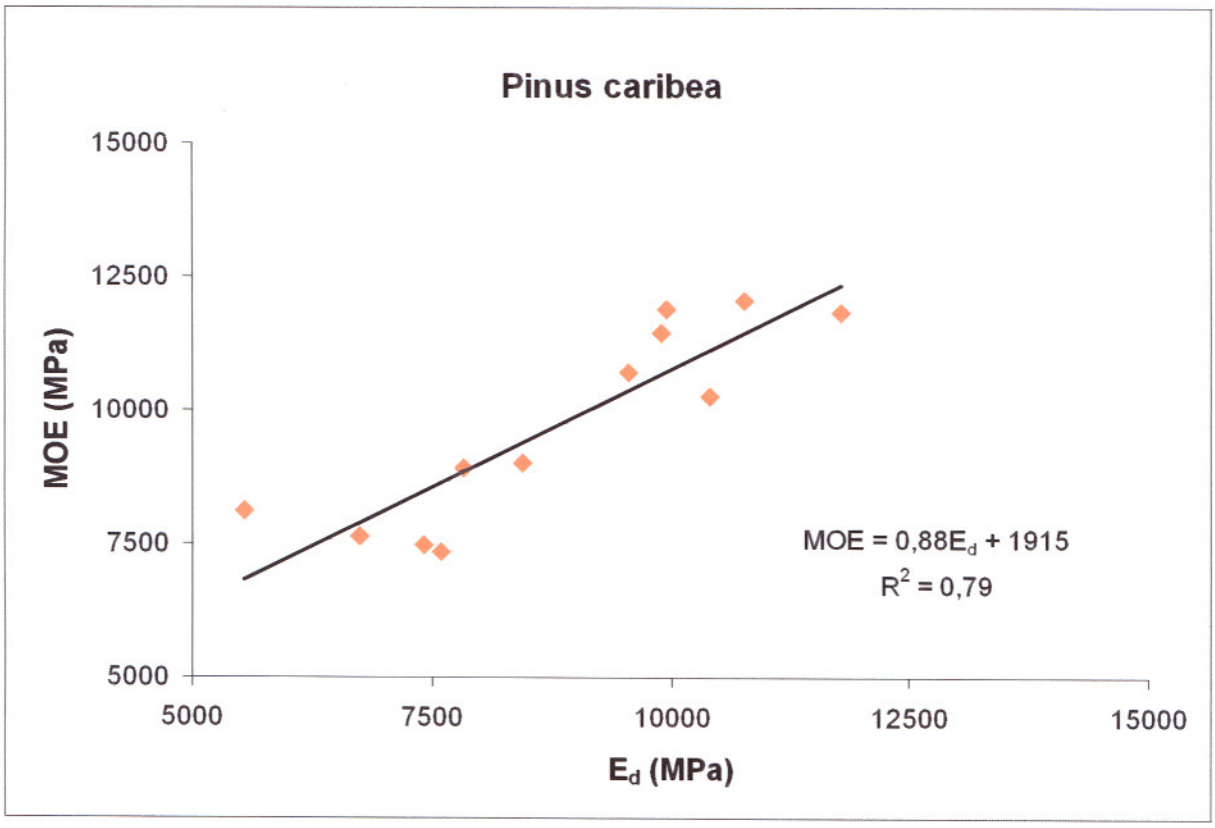

Figura 32 – MOE versus E_d (pinus caribea).

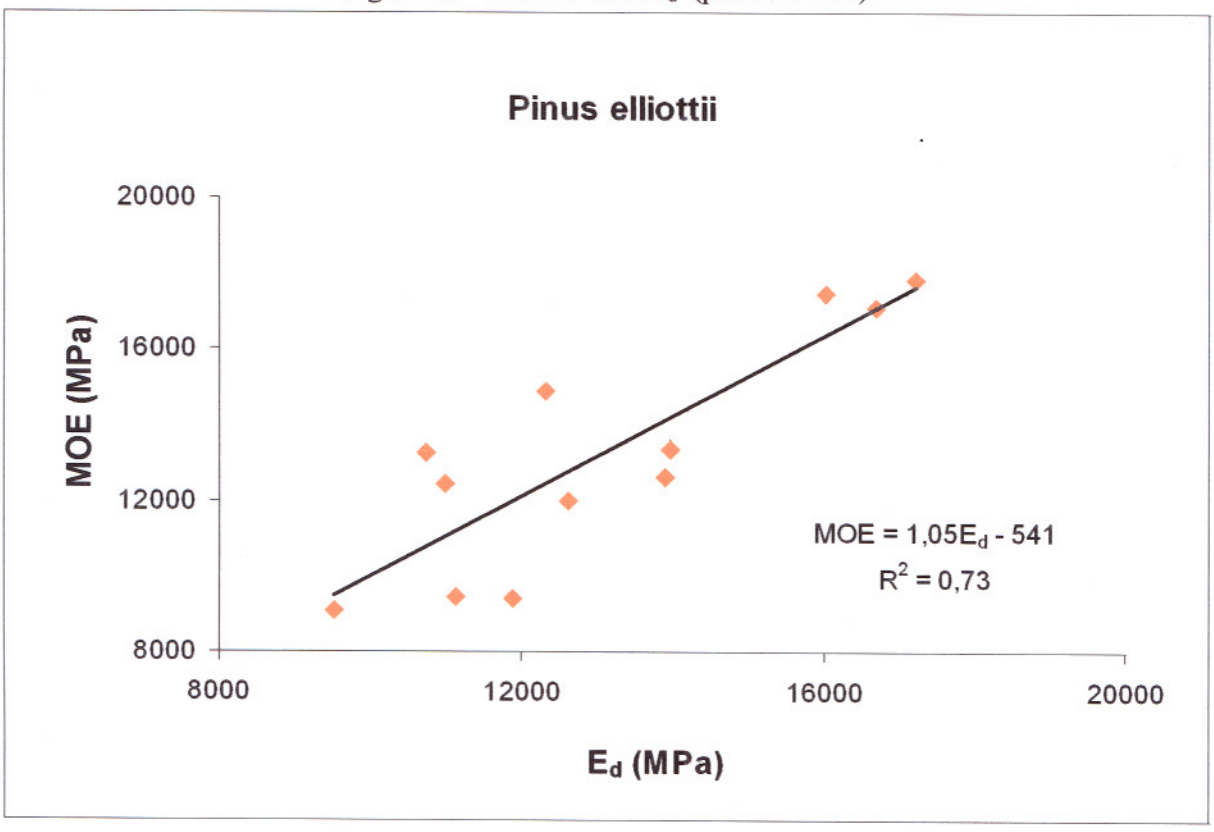

Figura 33 – MOE versus E_d (pinus elliottii).

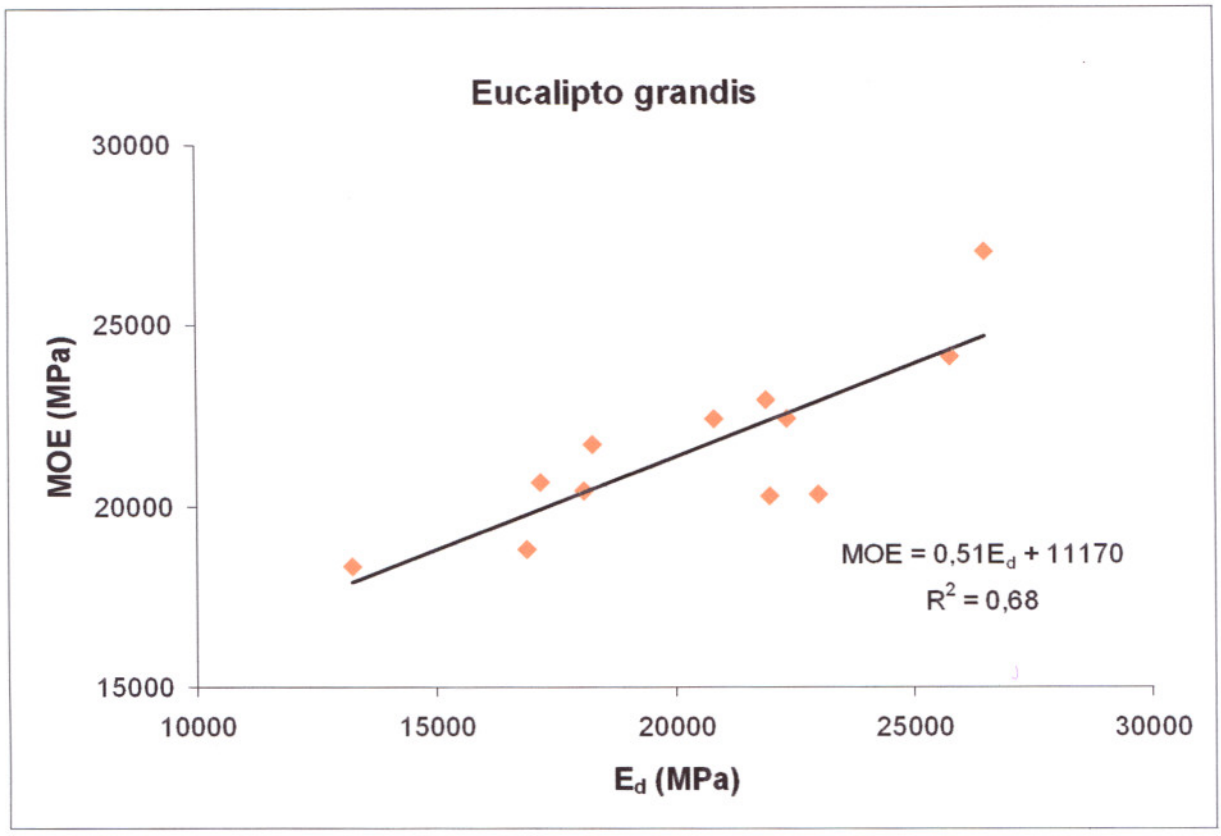

Figura 34 – MOE versus E_d (eucalipto grandis).

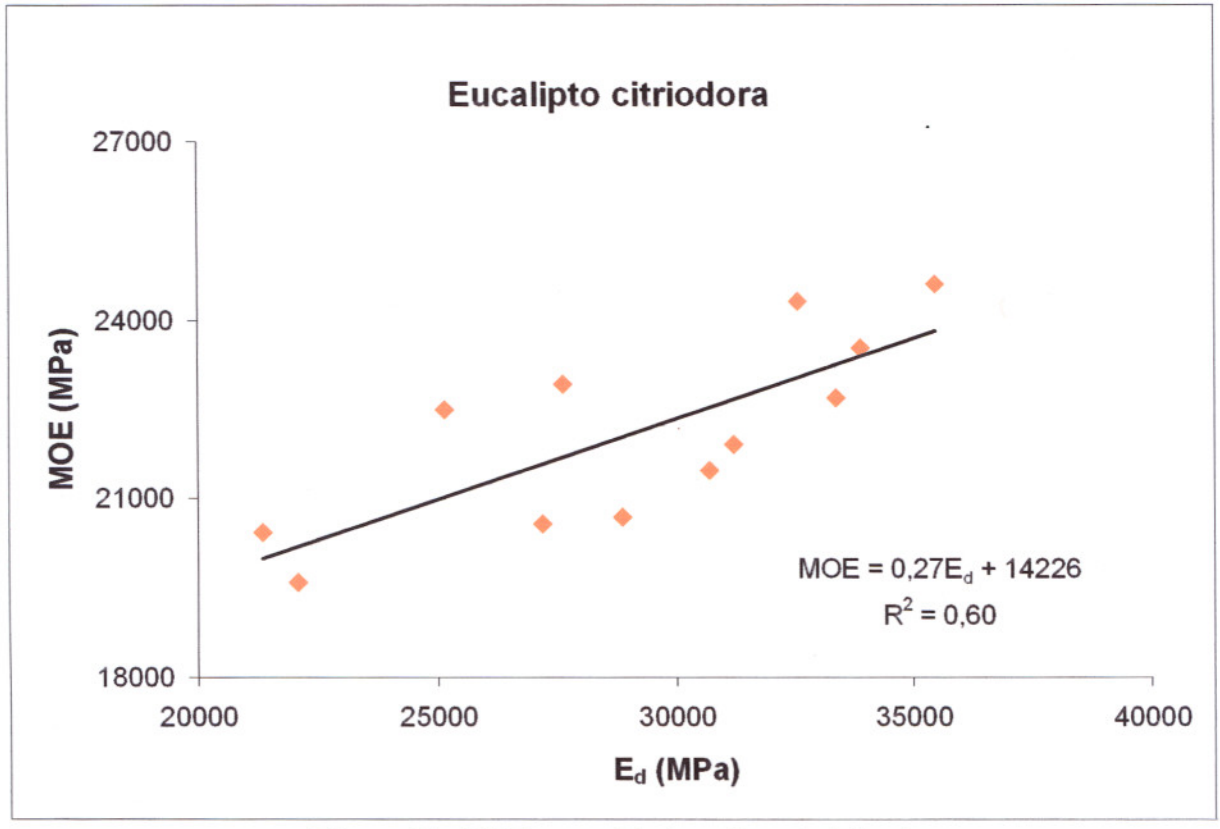

Figura 35 – MOE versus E_d (eucalipto citriodora).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

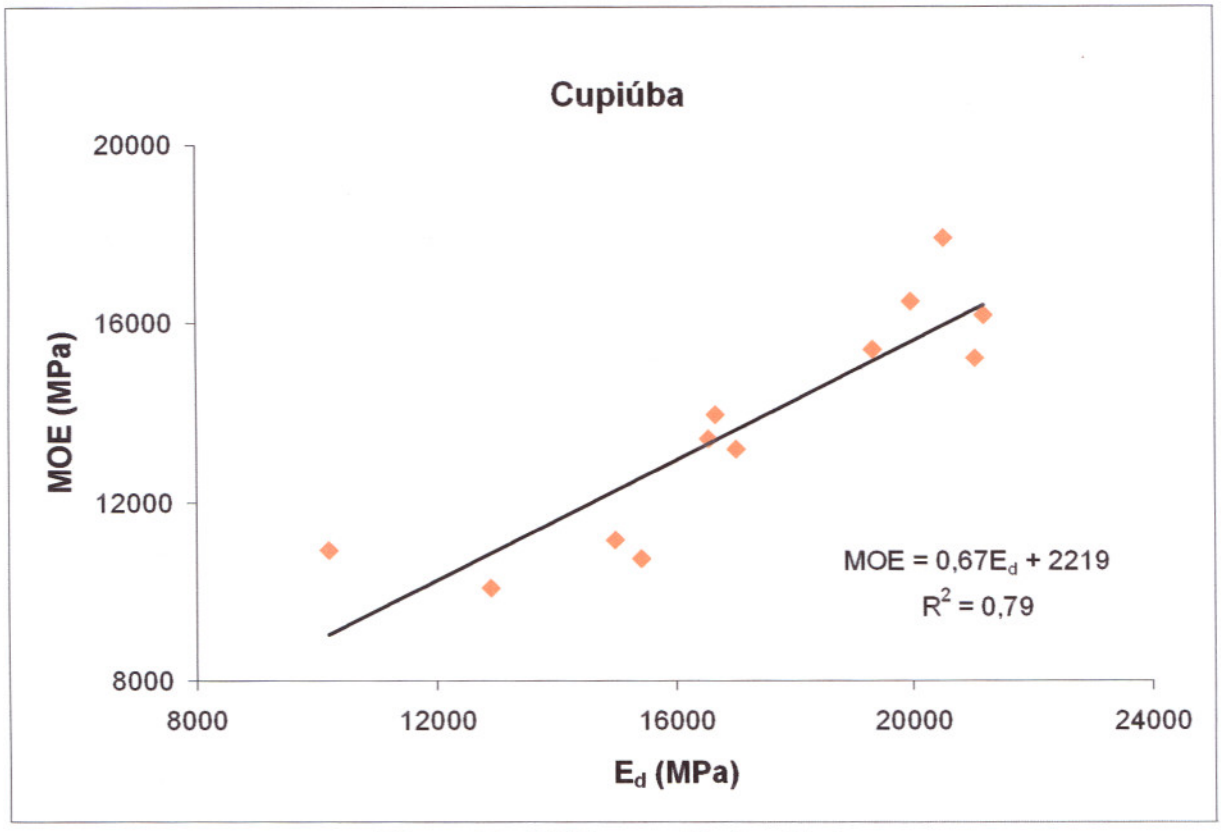

Figura 36 – MOE versus E_d (cupiúba).

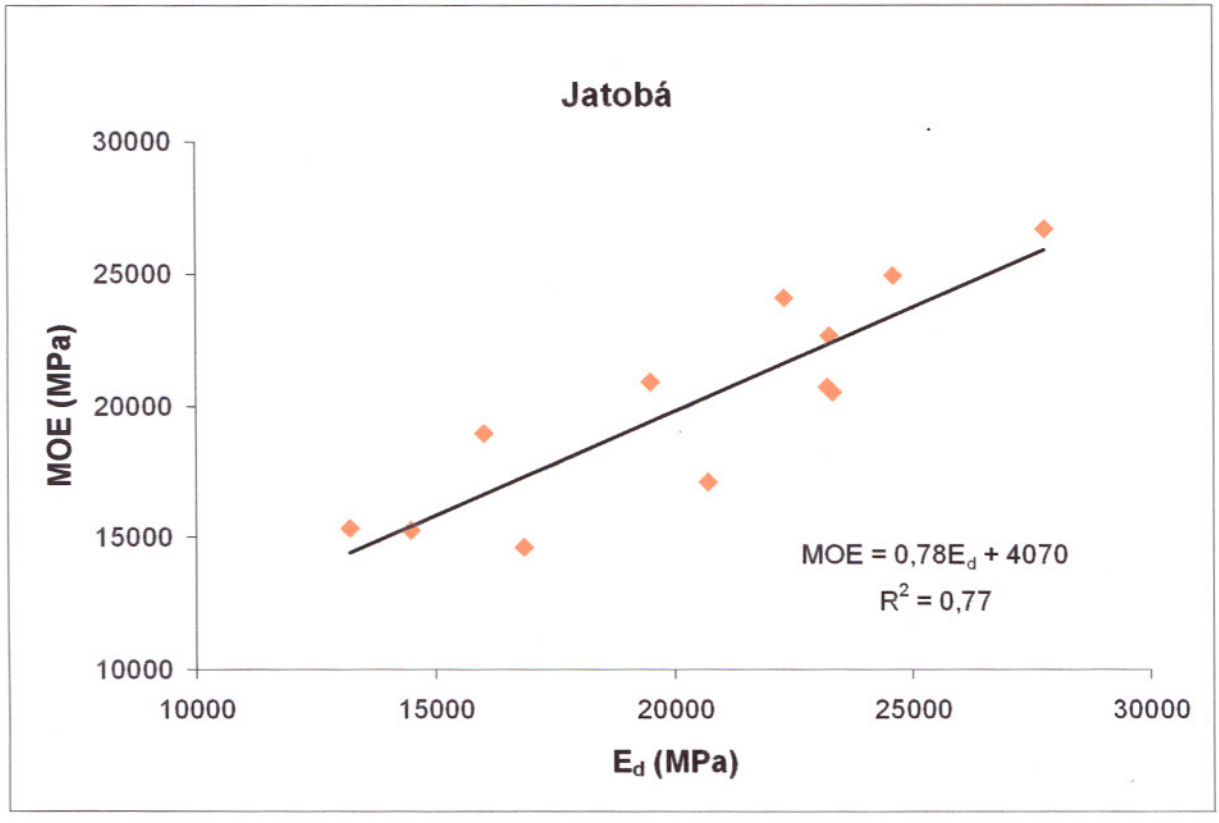

Figura 37 – MOE versus E_d (jatobá).

Seguindo-se o procedimento estatístico, foram elaborados os quadros de análise de variância para as espécies em estudo, de modo a permitir a avaliação dos níveis de significância dos parâmetros envolvidos. Assim, pode-se construir os quadros de análise de variância os quais permitem verificar ao nível de significância escolhido, a dependência linear neste nível e o comportamento dos principais indicadores avaliados nas análises desenvolvidas: F, t, R^2 e t_{dados}.

A partir dos coeficientes, foi possível afirmar o quanto da variação de cada uma das variáveis em estudo poderia ser explicado. De maneira a garantir a verossimilhança dos dados obtidos, foram analisados os resíduos dos modelos verificando-se se estes apresentavam distribuição aleatória em torno de zero.

Este procedimento desenvolvido para a análise estatística dos dados relativos às vigas foi também aplicado para os dados de f_{c0} e E_{c0} referentes aos corpos-de-prova extraídos das vigas.

Tabela 5 - Quadro de análise de variância (MOE em função de E_d).

	Fonte de variação	**Soma dos quadrados**	**Graus de liberdade**	**Quadrado médio**	F_{dados}	$F_{5\%}$
Pinus caribea	Devido à regressão	29595644	1	29595644	36,99	4,84
	Residual	8001075	10	800107		
	Total	37596719	11			
Pinus elliottii	Devido à regressão	76830280	1	76830280	26,73	4,84
	Residual	28746498	10	2874650		
	Total	105576778	11			
Eucalipto grandis	Devido à regressão	42831180	1	42831180	20,91	4,84
	Residual	20484484	10	2048448		
	Total	63315664	11			
Eucalipto citriodora	Devido à regressão	16922632	1	16922632	15,02	4,84
	Residual	11269849	10	1126985		
	Total	28192481	11			
Cupiúba	Devido à regressão	58057936	1	58057936	38,41	4,84
	Residual	15116577	10	1511658		
	Total	73174513	11			
Jatobá	Devido à regressão	135925808	1	135925808	32,73	4,84
	Residual	41529072	10	4152907		
	Total	177454880	11			

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de MOE e E_d, ao nível de 5% de significância. Como os valores da variável de teste F_{dados} foi superior aos valores críticos $F_{5\%}$ para todas as espécies em estudo, é rejeitada a hipótese nula H_0, ou seja, fica estatisticamente evidenciada a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$.

Seguindo-se o procedimento estatístico, foram elaborados os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de regressão (MOE em função de E_d).

	Variável	Coeficiente	t_{dados}	$t_{0,5}$
Pinus caribea	Constante	1915	1,46	2,20
	E_d	0,8839	6,08	2,20
	n = 11	R^2 = 78,7 %		
Pinus elliottii	Constante	-541	-0,20	2,20
	E_d	1,0540	5,17	2,20
	n = 11	R^2 = 72,8 %		
Eucalipto grandis	Constante	11170	4,81	2,20
	E_d	0,5094	4,57	2,20
	n = 11	R^2 = 67,6 %		
Eucalipto citriodora	Constante	14226	6,93	2,20
	E_d	0,27023	3,88	2,20
	n = 11	R^2 = 60,0 %		
Cupiúba	Constante	2219	1,18	2,20
	E_d	0,669	6,20	2,20
	n = 11	R^2 = 79,3 %		
Jatobá	Constante	4070	1,42	2,20
	E_d	0,785	5,72	2,20
	n = 11	R^2 = 76,6 %		

Os coeficientes apresentados na Tabela 6 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de MOE pode ser explicado por E_d para as espécies em estudo. A consideração da significância dos coeficientes (significativos ou altamente significativos) foi definida em função da magnetude dos valores obtidos na literatura em estudos correlacionados, e também a partir da relação entre os valores do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de correlação de Pearson (R), que pode ser expressa por: $t = R\,(N-2)^{1/2} / (1-R^2)^{1/2}$.

De posse dessas análises, foi possível construir a Tabela 7, que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela 7 - Regressões entre o módulo de elasticidade na flexão estática em função de E_d.

	Equação da regressão	R^2	Significância
Pinus caribea	$MOE = 0{,}88E_d + 1915$	0,79	Altamente significativa
Pinus elliottii	$MOE = 1{,}05E_d - 541$	0,73	Altamente significativa
Eucalipto grandis	$MOE = 0{,}51E_d + 11170$	0,68	Significativa
Eucalipto citriodora	$MOE = 0{,}27E_d + 14226$	0,60	Significativa
Cupiúba	$MOE = 0{,}67E_d + 2219$	0,79	Altamente significativa
Jatobá	$MOE = 0{,}78E_d + 4070$	0,77	Altamente significativa

Na Tabela 8 estão apresentados os valores obtidos nos ensaios referentes à velocidade ultrasônica na direção longitudinal, a resistência à compressão paralela às fibras, ao módulo de elasticidade longitudinal e também ao módulo de elasticidade dinâmico, para os corpos-de-prova com dimensões 5 cm x 5 cm x 15 cm.

Tabela 8 - Valores médios e coeficientes de variação para as propriedades dos corpos-de-prova.

		V_{LL} (m/s)	E_d (MPa)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
Pinus caribea (n=24)	Média	4044	8673	40,1	10072
	CV	12,1	25,6	11,2	27,6
Pinus elliottii (n=24)	Média	4127	10044	32,9	13534
	CV	7,1	14,5	18,8	33,9
Eucalipto grandis (n=24)	Média	5041	20132	58,5	21902
	CV	6,5	13,3	12,5	14,3
Eucalipto citriodora (n=24)	Média	4376	24227	78,9	24340
	CV	8,1	15,9	7,5	14,2
Cupiúba (n=24)	Média	4275	16421	58,4	16640
	CV	8,7	17,5	13,0	19,0
Jatobá (n=24)	Média	4533	19711	85,7	22455
	CV	12,0	22,8	13,4	24,2

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e resistência à compressão paralela às fibras, obtidos para cada um dos corpos-de-prova, foram feitas as regressões lineares, apresentadas nas Figuras 38 a 43.

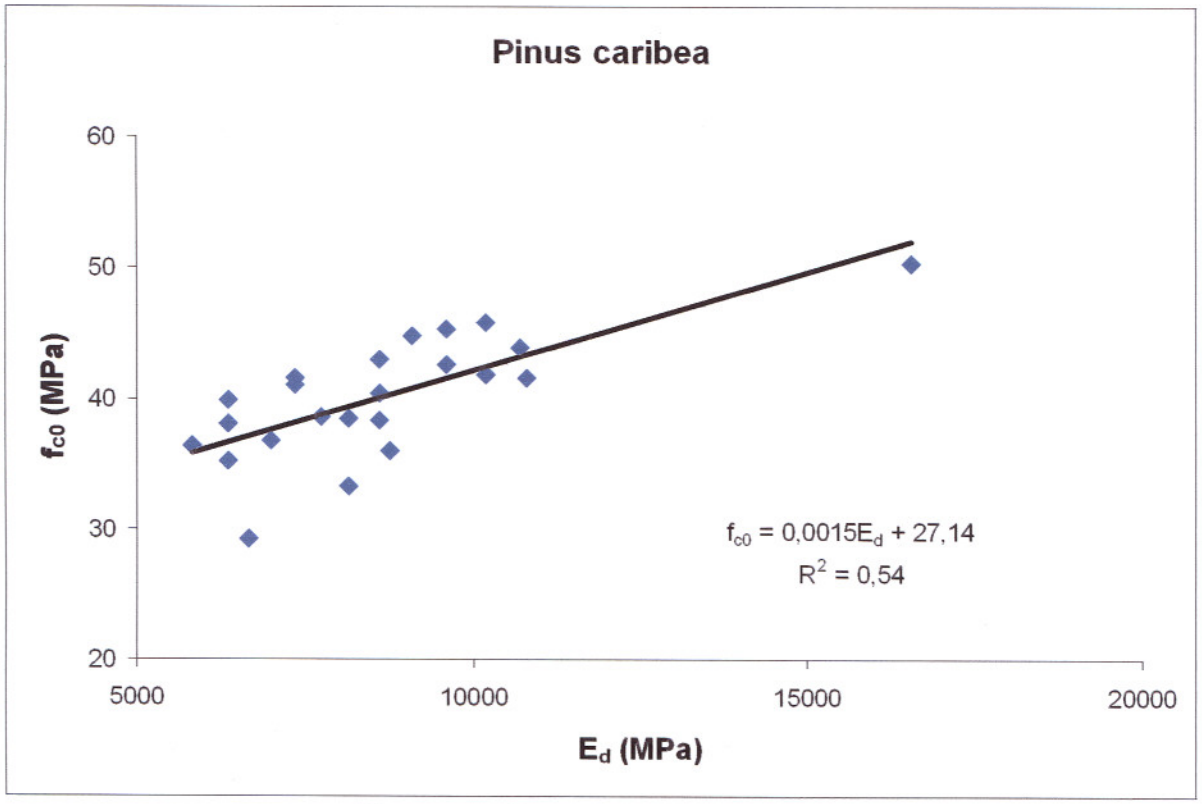

Figura 38 – f_{c0} versus E_d (pinus caribea).

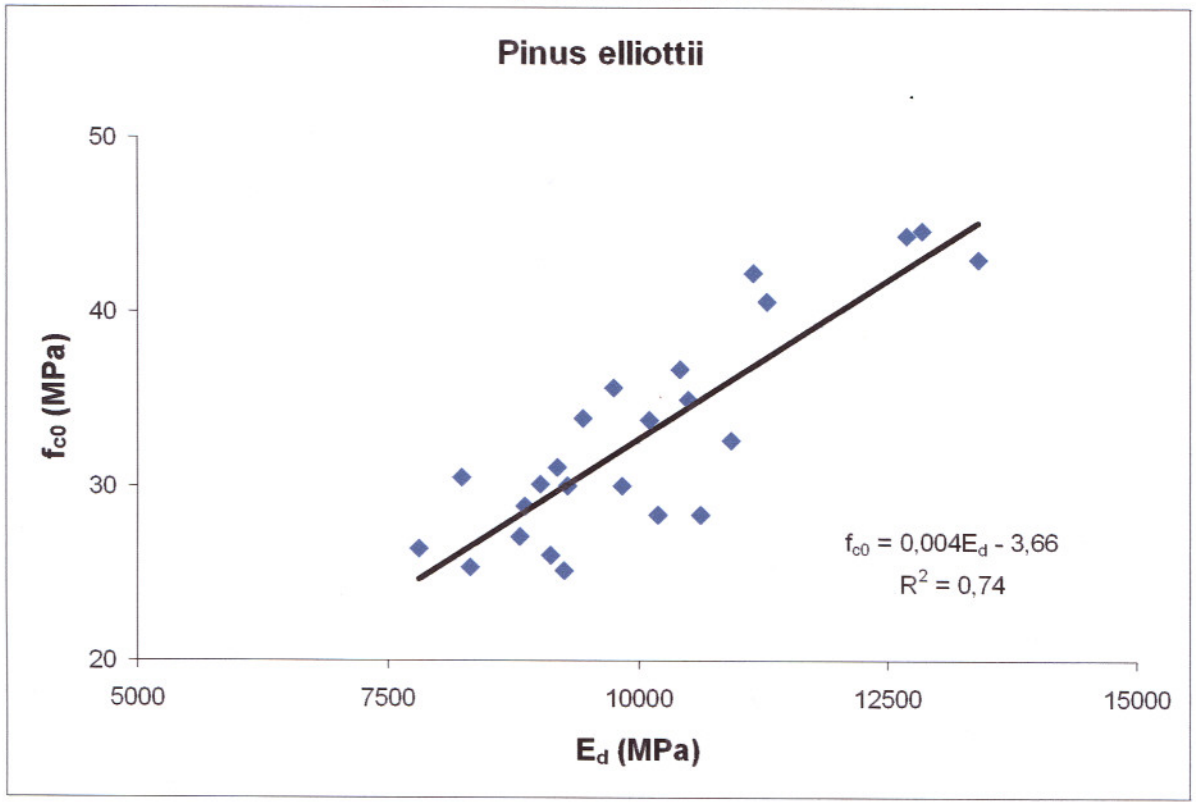

Figura 39 – f_{c0} versus E_d (pinus elliottii).

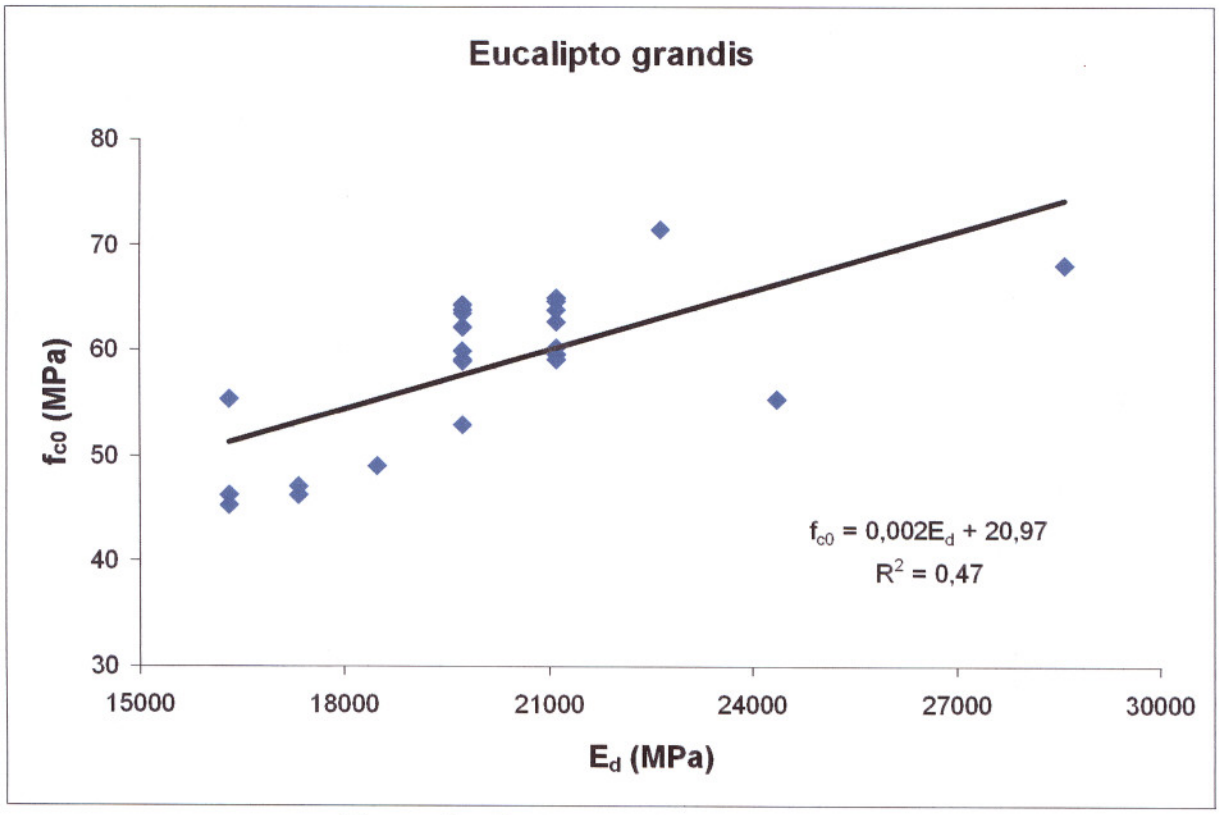

Figura 40 – f_{c0} versus E_d (eucalipto grandis).

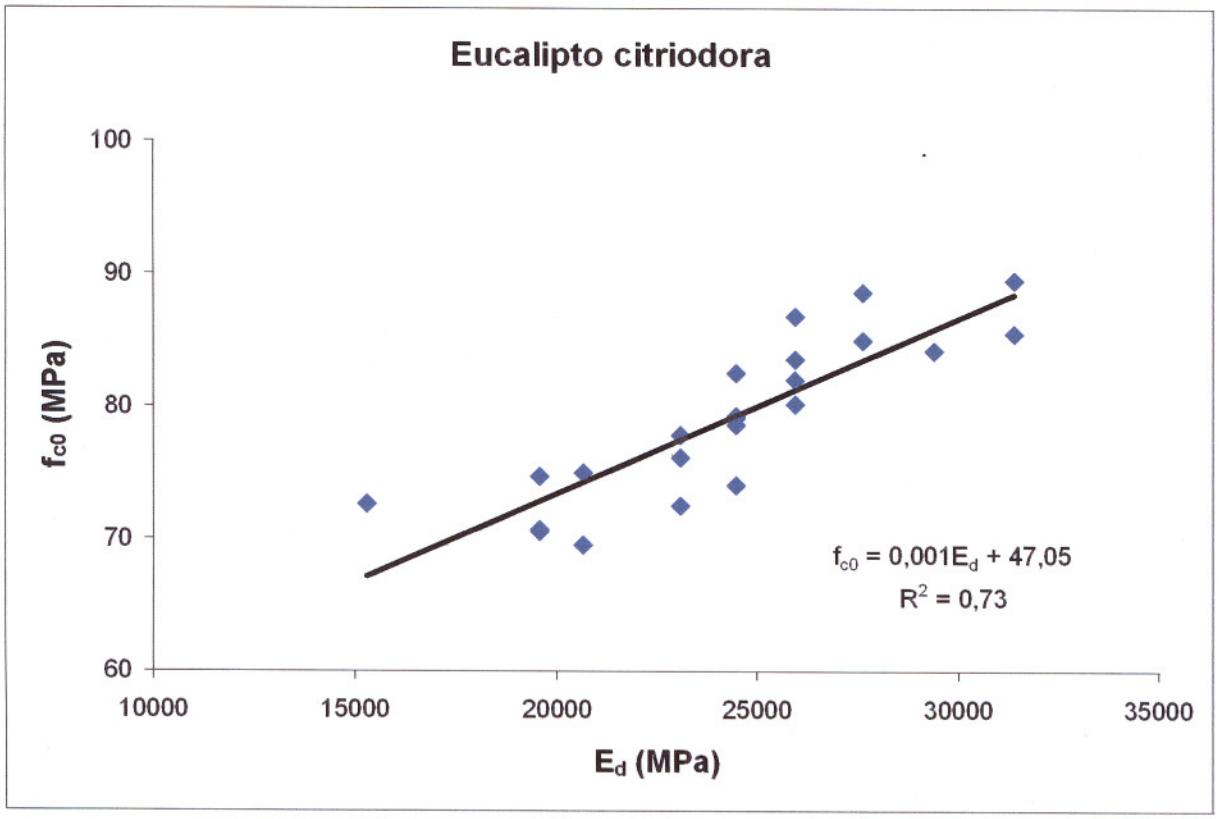

Figura 41 – f_{c0} versus E_d (eucalipto citriodora).

IESC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

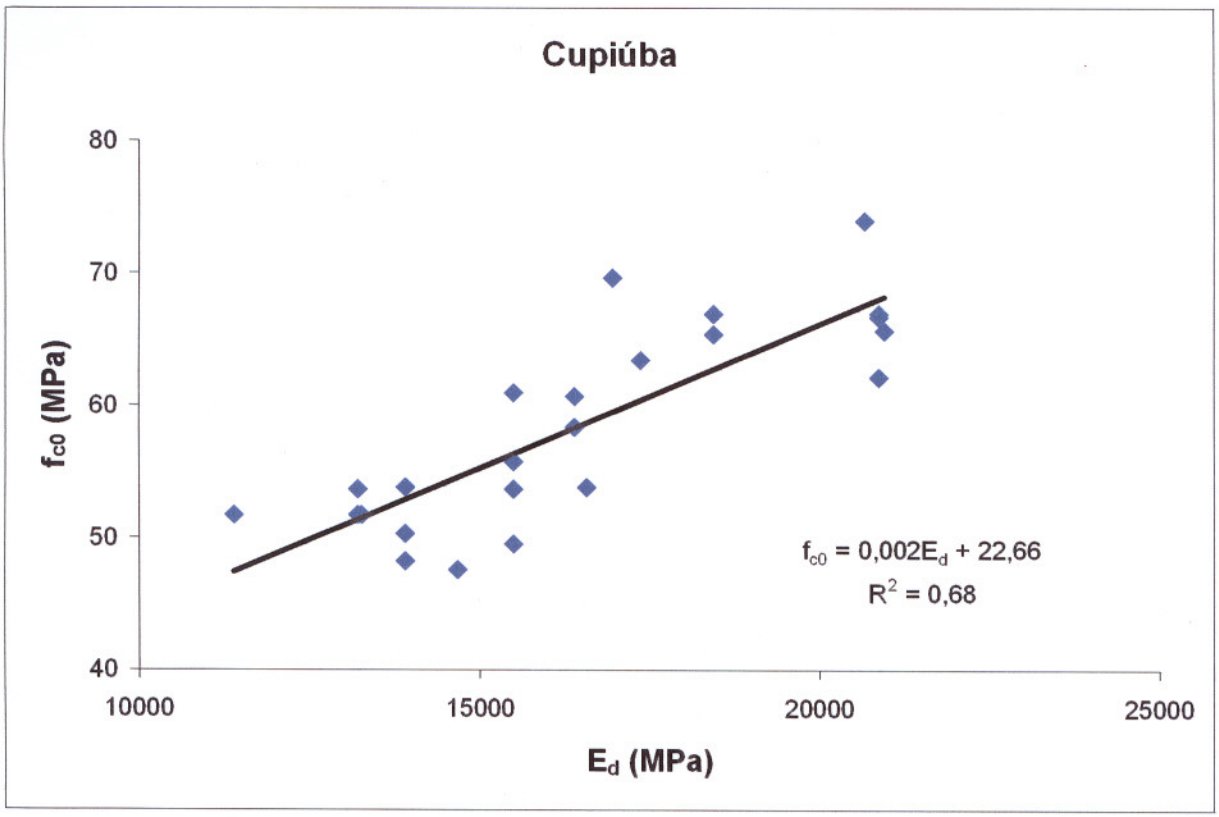

Figura 42 – f_{c0} versus E_d (cupiúba).

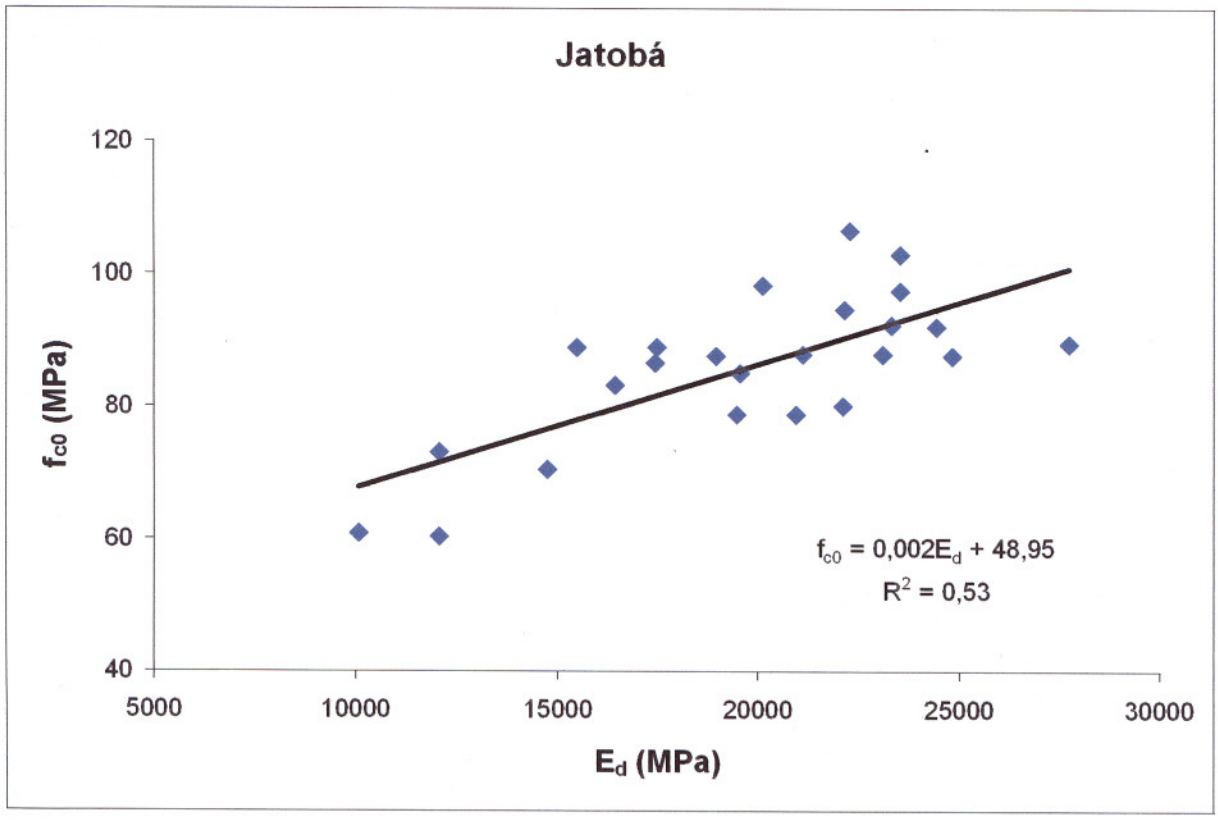

Figura 43 – f_{c0} versus E_d (jatobá).

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, foram elaborados os quadros de análise de variância para as espécies em estudo, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Quadro de análise de variância (f_{c0} em função de E_d).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	$F_{5\%}$
Pinus caribea	Devido à regressão	255,29	1	255,29	26,21	4,28
	Residual	214,25	22	9,74		
	Total	469,54	23			
Pinus elliottii	Devido à regressão	648,81	1	648,81	62,18	4,28
	Residual	229,57	22	10,43		
	Total	878,38	23			
Eucalipto grandis	Devido à regressão	576,44	1	576,44	19,28	4,28
	Residual	567,72	22	29,90		
	Total	1144,16	23			
Eucalipto citriodora	Devido à regressão	590,19	1	590,19	61,16	4,28
	Residual	212,30	22	9,65		
	Total	802,49	23			
Cupiúba	Devido à regressão	897,11	1	897,11	45,78	4,28
	Residual	431,12	22	19,60		
	Total	1328,23	23			
Jatobá	Devido à regressão	1617,0	1	1617,0	25,23	4,28
	Residual	1410,2	22	64,1		
	Total	3027,2	23			

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de f_{c0} e E_d, ao nível de 5% de significância. Como os valores da variável de teste F_{dados} foi superior aos valores críticos $F_{5\%}$ para todas as espécies em estudo, é rejeitada a hipótese nula H_0, ou seja, fica estatisticamente evidenciada a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$.

Seguindo-se o procedimento estatístico, foram elaborados os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Coeficientes de regressão (f_{c0} em função de E_d).

	Variável	Coeficiente	t_{dados}	$t_{0,5}$
Pinus caribea	Constante	27,143	10,38	2,07
	E_d	0,0014976	5,12	2,07
	n = 24	R^2 = 54,4 %		
Pinus elliottii	Constante	-3,662	-0,78	2,07
	E_d	0,0036392	7,89	2,07
	n = 24	R^2 = 73,9 %		
Eucalipto grandis	Constante	20,97	2,44	2,07
	E_d	0,0018621	4,39	2,07
	n = 24	R^2 = 46,7 %		
Eucalipto citriodora	Constante	47,047	11,41	2,07
	E_d	0,0013153	7,82	2,07
	n = 24	R^2 = 73,5 %		
Cupiúba	Constante	22,656	4,23	2,07
	E_d	0,002176	6,77	2,07
	n = 24	R^2 = 67,5 %		
Jatobá	Constante	48,951	6,52	2,07
	E_d	0,0018667	5,02	2,07
	n = 24	R^2 = 53,4 %		

Os coeficientes apresentados na Tabela 10 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de f_{c0} pode ser explicado por E_d para as espécies em estudo. De posse dessas análises, foi possível construir a Tabela 11, que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela 11- Regressões entre a resistência na compressão paralela em função de E_d.

	Equação da regressão	R^2	Significância
Pinus caribea	$f_{c0} = 0{,}0015E_d + 27{,}14$	0,54	Significativa
Pinus elliottii	$f_{c0} = 0{,}004E_d - 3{,}66$	0,74	Altamente significativa
Eucalipto grandis	$f_{c0} = 0{,}002E_d + 20{,}97$	0,47	Significativa
Eucalipto citriodora	$f_{c0} = 0{,}001E_d + 47{,}05$	0,73	Altamente significativa
Cupiúba	$f_{c0} = 0{,}002E_d + 22{,}66$	0,68	Significativa
Jatobá	$f_{c0} = 0{,}002E_d + 48{,}95$	0,53	Significativa

Com os pares de valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático, obtidos para cada um dos corpos-de-prova, foram feitas as regressões lineares, apresentadas nas Figuras 44 a 49.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

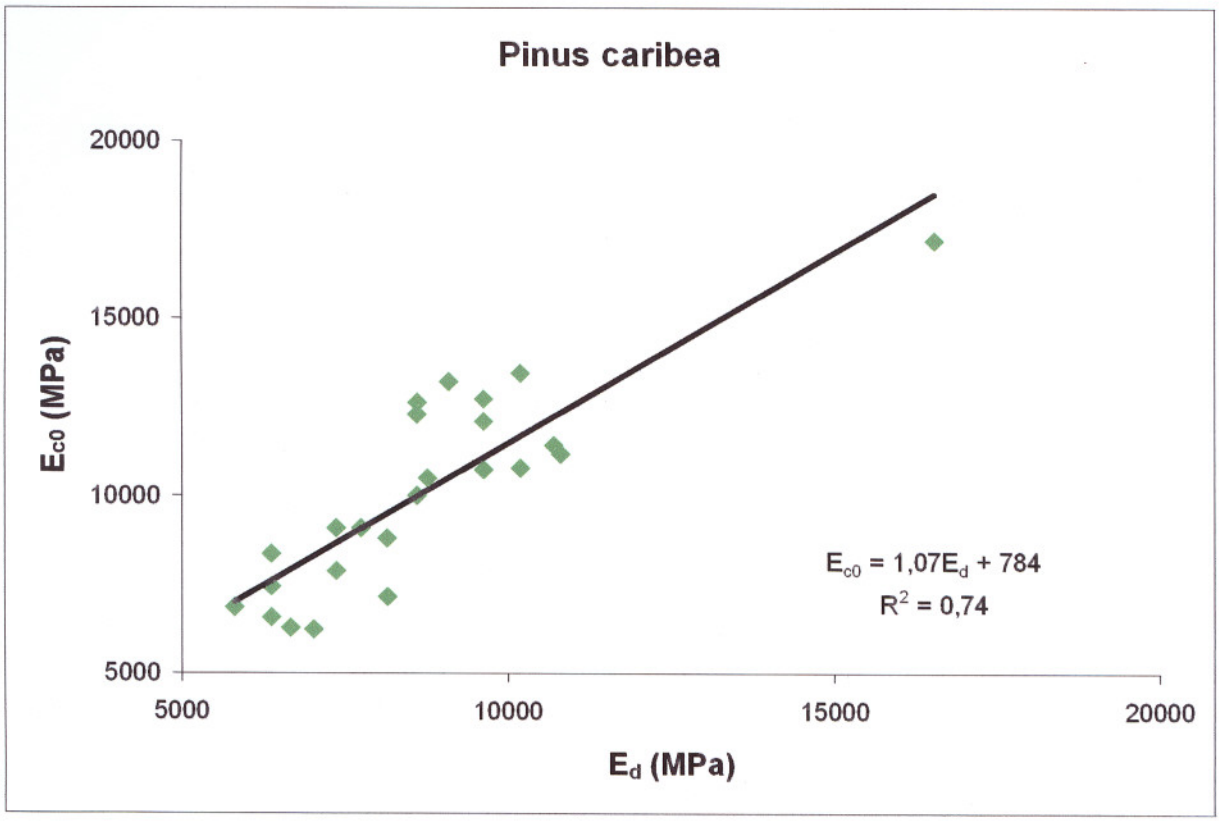

Figura 44 – E_{c0} versus E_d (pinus caribea).

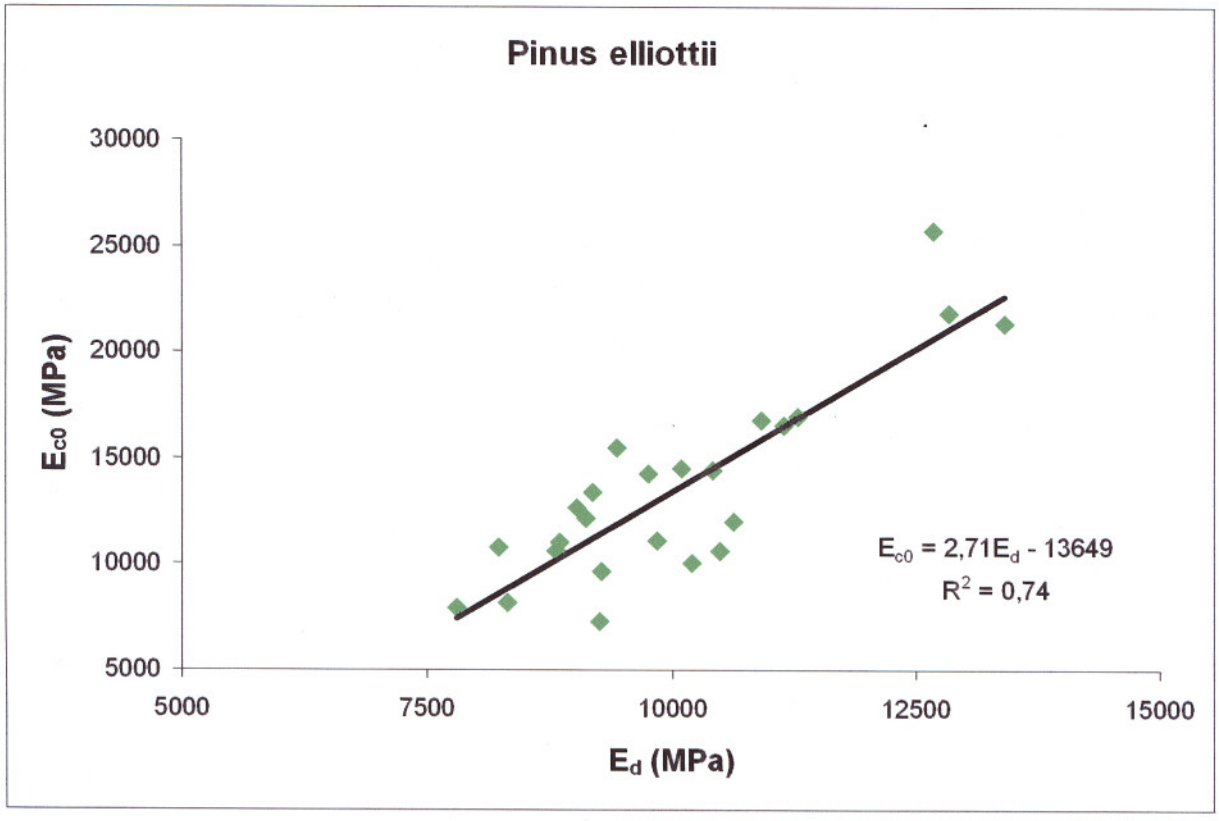

Figura 45 – E_{c0} versus E_d (pinus elliottii).

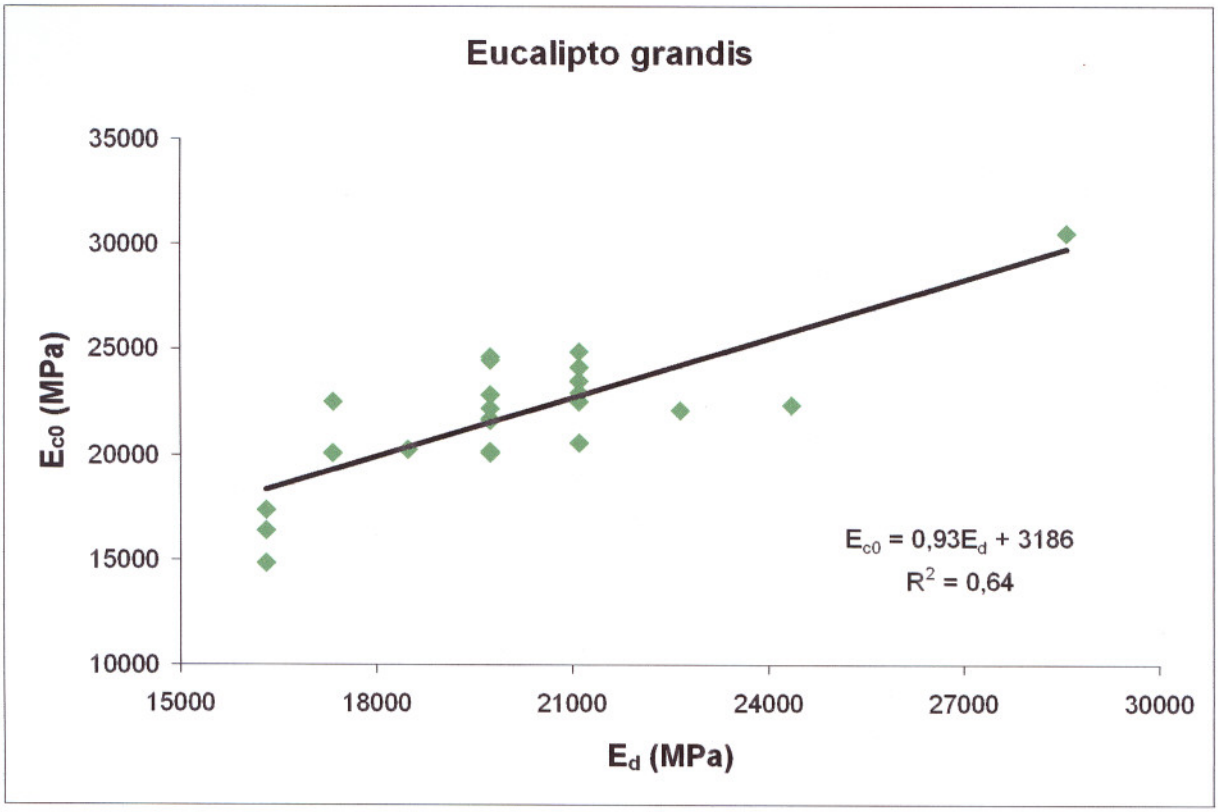

Figura 46 – E_{c0} versus E_d (eucalipto grandis).

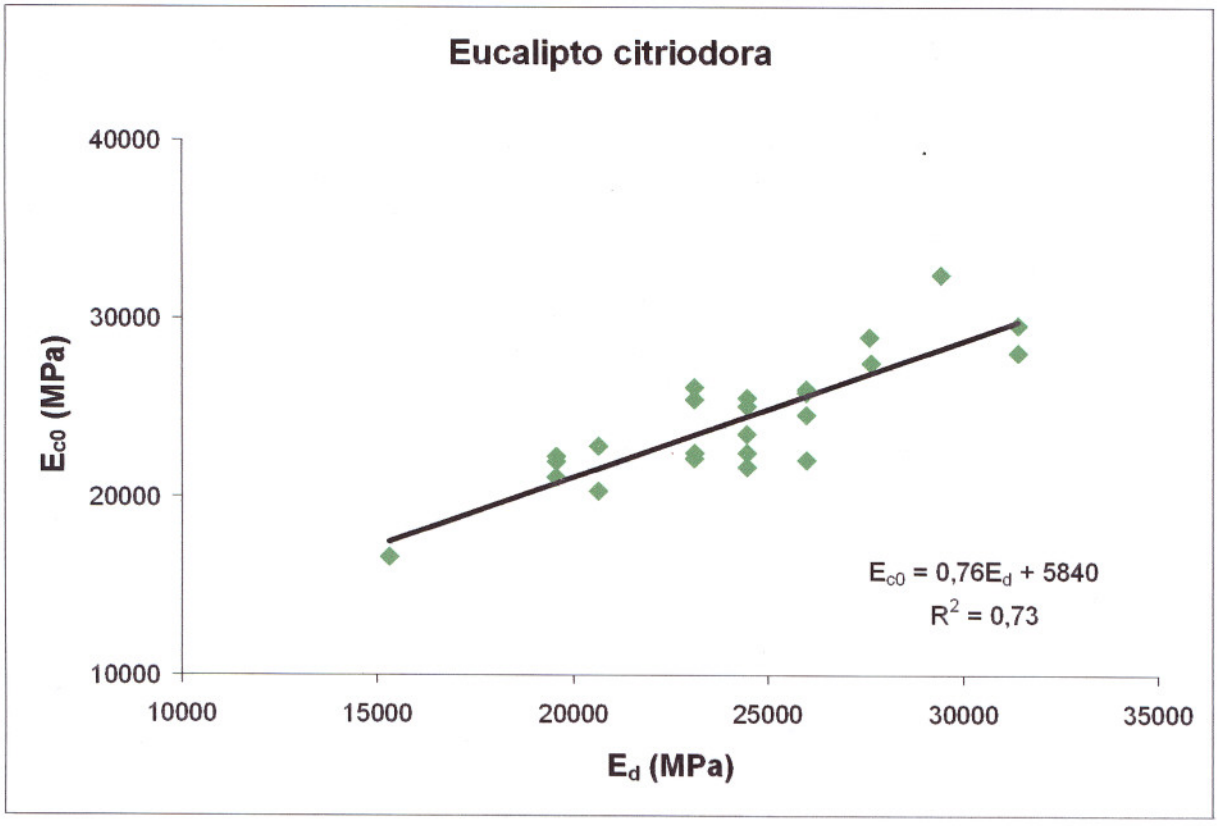

Figura 47 – E_{c0} versus E_d (eucalipto citriodora).

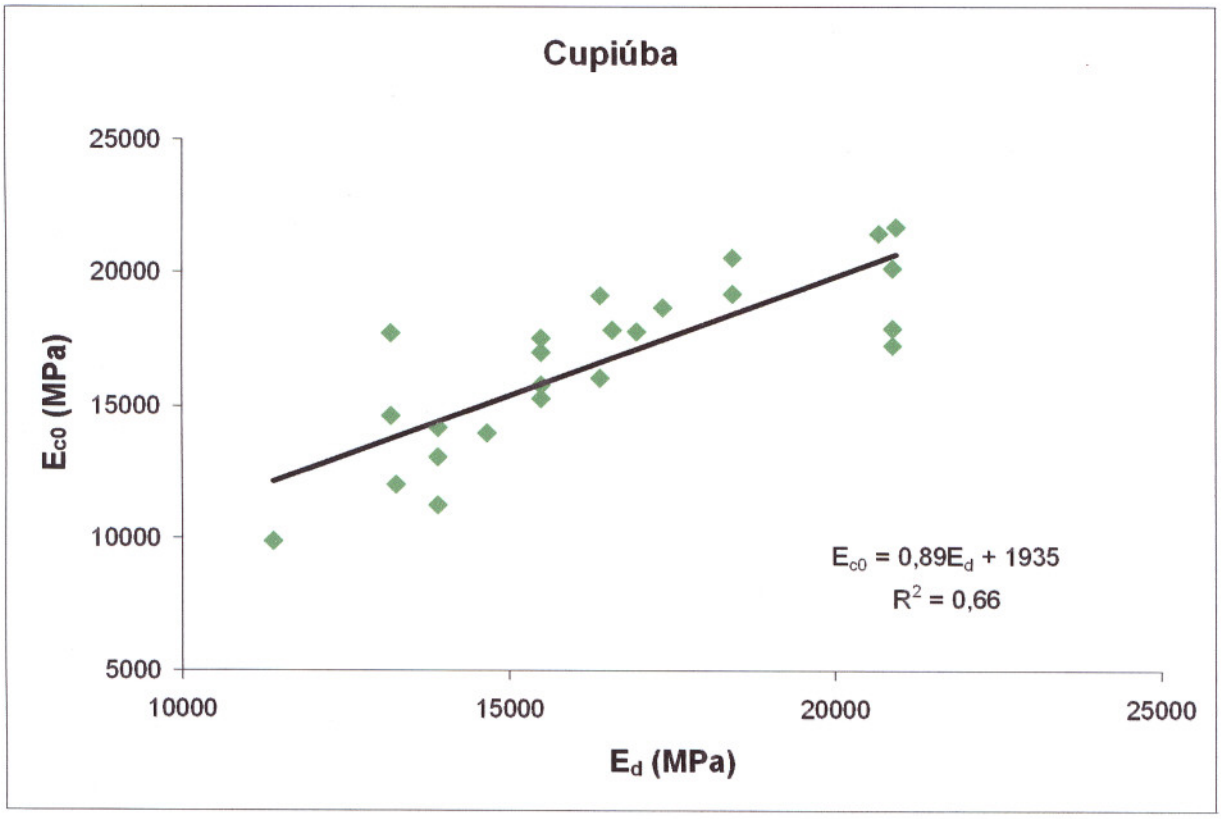

Figura 48 – E_{c0} versus E_d (cupiúba).

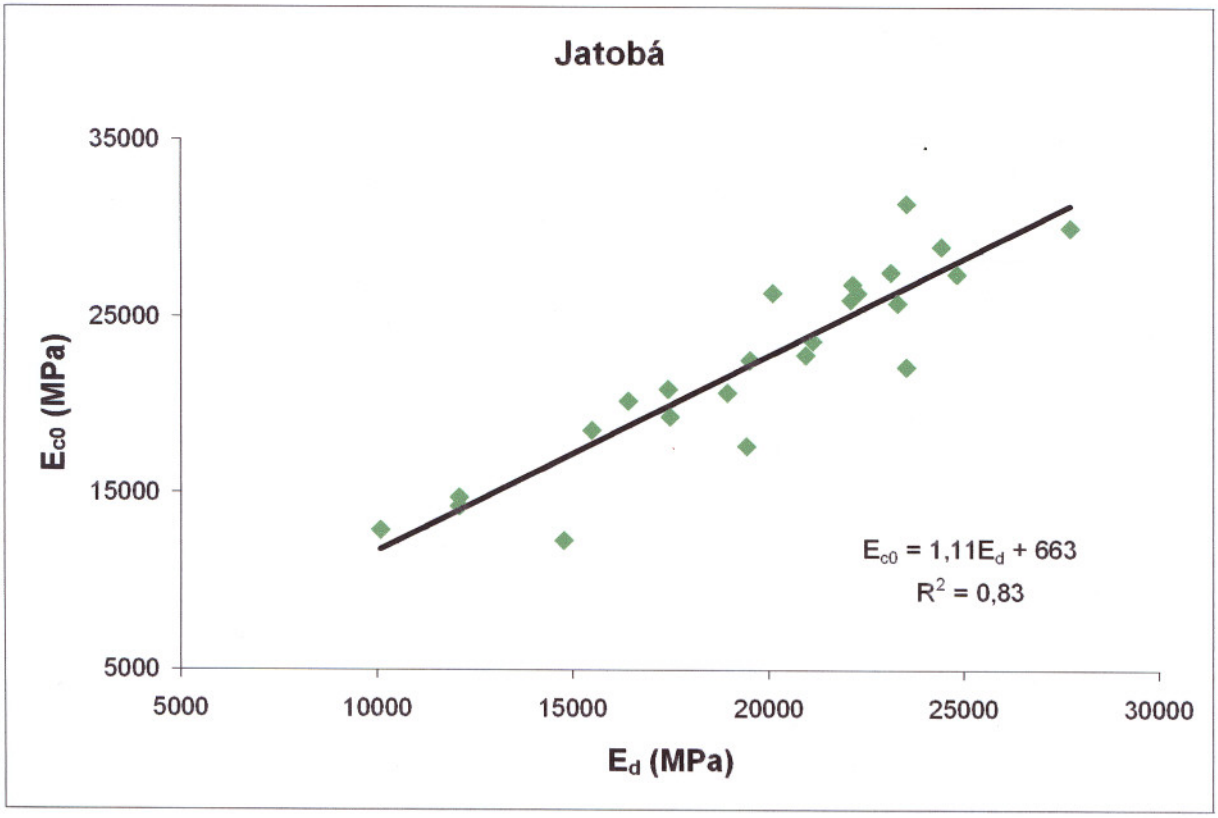

Figura 49 – E_{c0} versus E_d (jatobá).

Seguindo-se o procedimento estatístico já descrito, foram elaborados os quadros de análise de variância para as espécies em estudo, apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Quadro de análise de variância (E_{c0} em função de E_d).

	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	$F_{5\%}$
Pinus caribea	Devido à regressão	130541832	1	130541832	61,29	4,28
	Residual	46859036	22	2129956		
	Total	177400868	23			
Pinus elliottii	Devido à regressão	358881376	1	358881376	62,92	4,28
	Residual	125489712	22	5704078		
	Total	484371088	23			
Eucalipto grandis	Devido à regressão	143683088	1	143683088	38,55	4,28
	Residual	81998384	22	3727199		
	Total	225681472	23			
Eucalipto citriodora	Devido à regressão	198928016	1	198928016	58,29	4,28
	Residual	75081616	22	3412801		
	Total	274009632	23			
Cupiúba	Devido à regressão	151927904	1	151927904	42,67	4,28
	Residual	78329520	22	3560433		
	Total	230257424	23			
Jatobá	Devido à regressão	567157568	1	567157568	109,58	4,28
	Residual	113862616	22	5175574		
	Total	681020184	23			

A análise de variância desenvolvida permite comparar os dados de E_{c0} e E_d, ao nível de 5% de significância. Como os valores da variável de teste F_{dados} foi superior aos valores críticos $F_{5\%}$ para todas as espécies em estudo, é rejeitada a hipótese nula H_0, ou seja, fica estatisticamente evidenciada a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$.

Seguindo-se o procedimento estatístico, foram elaborados os quadros com os coeficientes de regressão para as espécies em estudo apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Coeficientes de regressão (E_{c0} em função de E_d).

	Variável	Coeficiente	t_{dados}	$t_{0,5}$
Pinus caribea	Constante	784	0,64	2,07
	E_d	1,0709	7,83	2,07
	n = 24	R^2 = 73,6 %		
Pinus elliottii	Constante	- 13649	- 3,94	2,07
	E_d	2,7066	7,93	2,07
	n = 24	R^2 = 74,1 %		
Eucalipto grandis	Constante	3186	1,05	2,07
	E_d	0,9297	6,21	2,07
	n = 24	R^2 = 63,7 %		
Eucalipto citriodora	Constante	5840	2,38	2,07
	E_d	0,7636	7,63	2,07
	n = 24	R^2 = 72,6 %		
Cupiúba	Constante	1935	0,85	2,07
	E_d	0,8955	6,53	2,07
	n = 24	R^2 = 66,0 %		
Jatobá	Constante	663	0,31	2,07
	E_d	1,1056	10,47	2,07
	n = 24	R^2 = 83,3 %		

Os coeficientes apresentados na Tabela 13 são significativos e permitem afirmar o quanto da variação de E_{c0} pode ser explicado por E_d para as espécies em estudo.

De posse dessas análises, foi possível construir a Tabela 14, que sintetiza a significância dos modelos obtidos.

Tabela 14 - Regressões entre o módulo de elasticidade na compressão paralela em função de E_d.

	Equação da regressão	R^2	Significância
Pinus caribea	$E_{c0} = 1,07E_d + 784$	0,74	Altamente significativa
Pinus elliottii	$E_{c0} = 2,71E_d - 13649$	0,74	Altamente significativa
Eucalipto grandis	$E_{c0} = 0,93E_d + 3186$	0,64	Significativa
Eucalipto citriodora	$E_{c0} = 0,76E_d + 5840$	0,73	Altamente significativa
Cupiúba	$E_{c0} = 0,89E_d + 1935$	0,66	Significativa
Jatobá	$E_{c0} = 1,11E_d + 663$	0,83	Altamente significativa

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

5.4 Influência do teor de umidade

A seqüência das espécies ensaiadas, bem como as temperaturas e os teores de umidade ambiente durante o processo de secagem estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Seqüência de secagem das espécies.

	Início da secagem	Término da secagem	Temperatura ambiente (°C)	Umidade ambiente (%)
Cupiúba	17/02/2003	30/04/2003	27,5	68
Pinus caribea	06/05/2003	30/07/2003	25,4	60
Jatobá	19/07/2003	29/09/2003	22,1	62
Eucalipto grandis	05/11/2003	09/02/2004	29,8	75
Eucalipto citriodora	29/01/2004	16/03/2004	28,7	64
Pinus elliottii	23/03/2004	21/05/2004	28,9	68
Pinus elliottii tratado	24/05/2004	23/07/2004	23,9	61

Os resultados obtidos para a velocidade longitudinal na direção paralela (V_{LL}) às fibras, utilizando-se os pinos de prata e inox, estão apresentados nas Figuras 50 a 56.

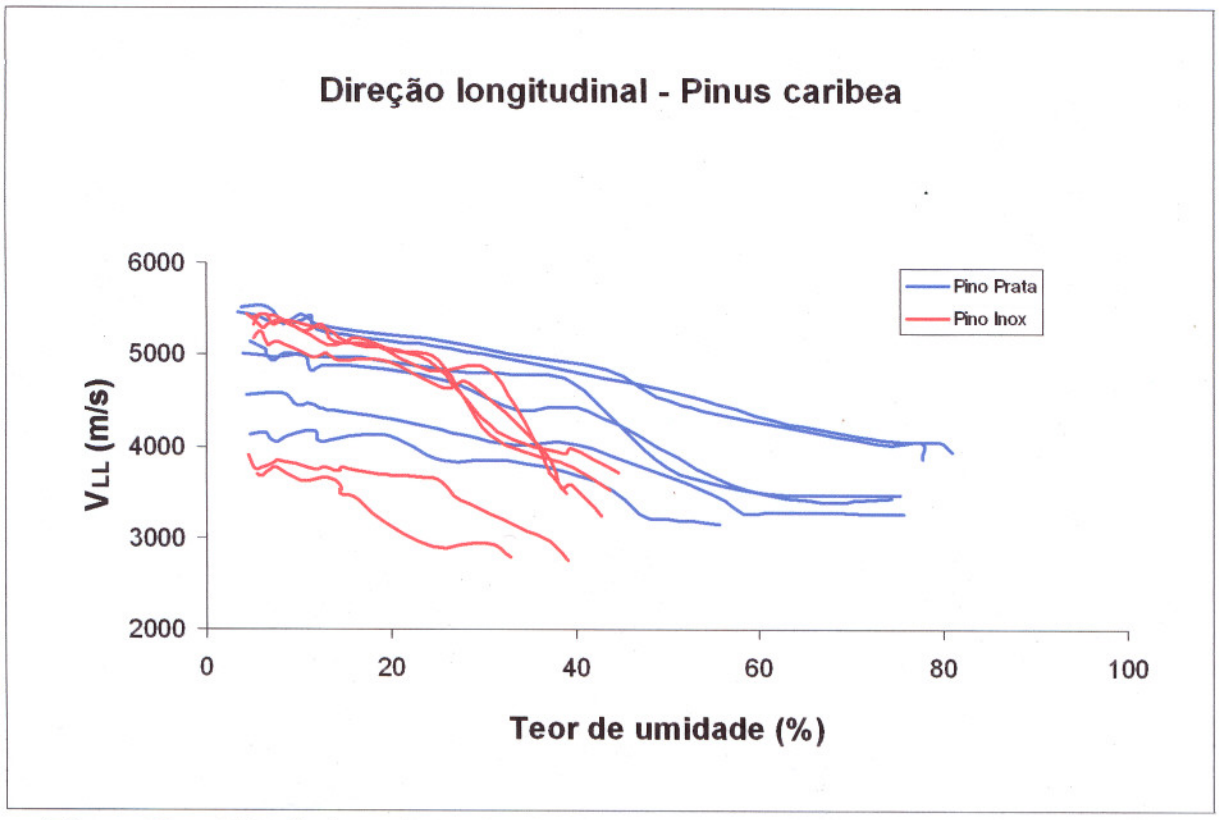

Figura 50 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus caribea).

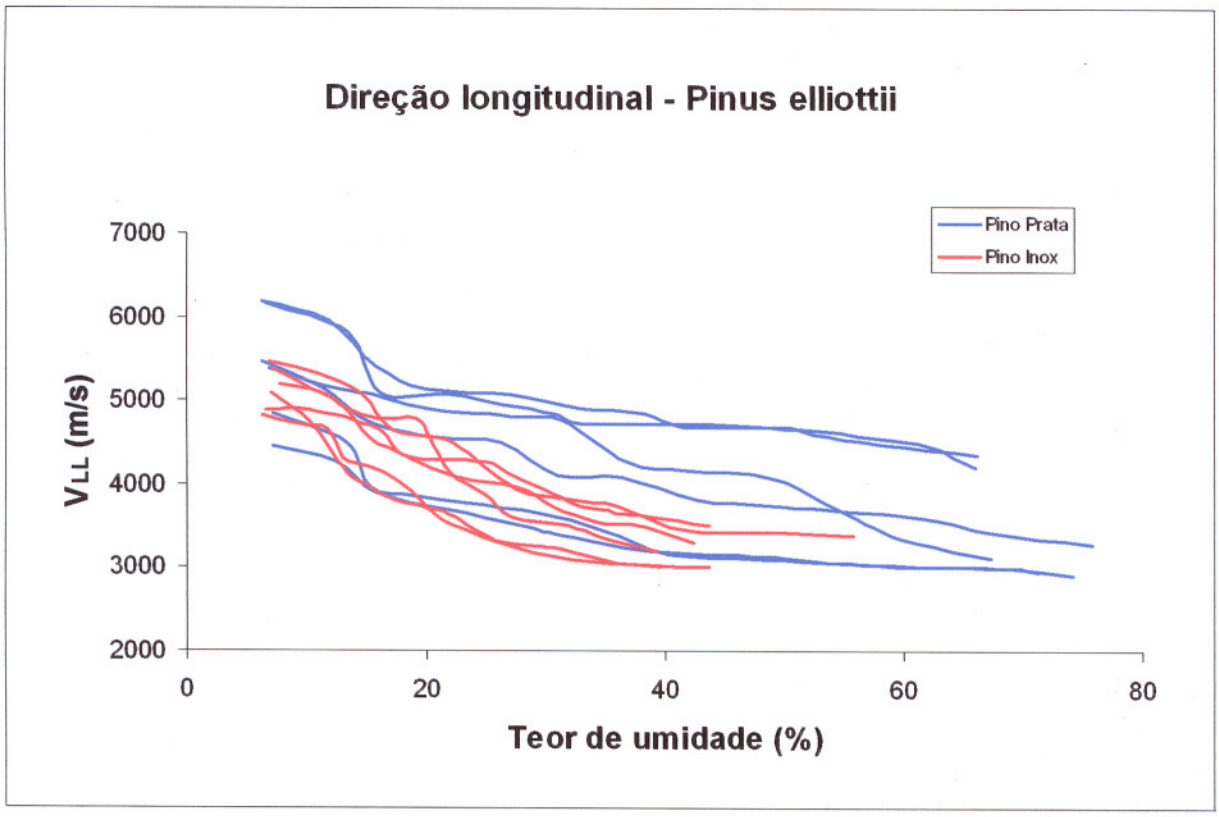

Figura 51 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus elliottii).

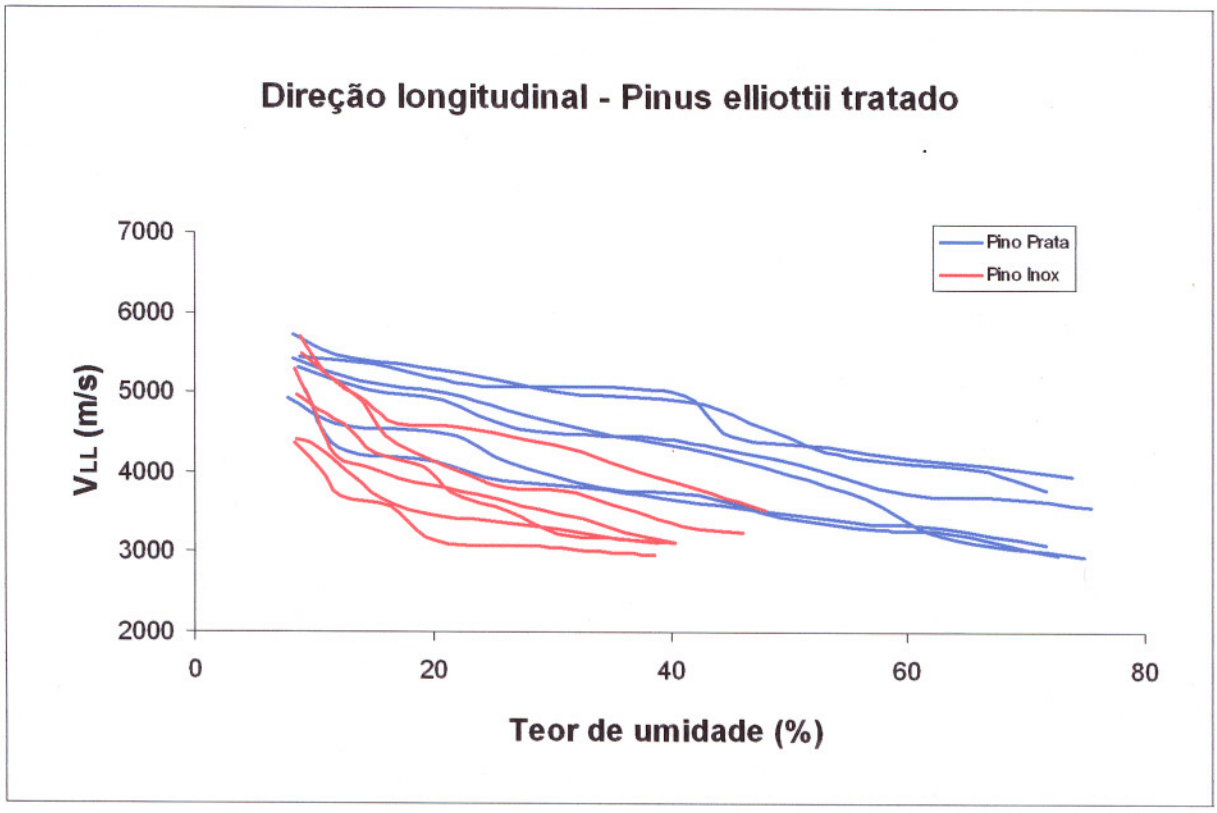

Figura 52 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

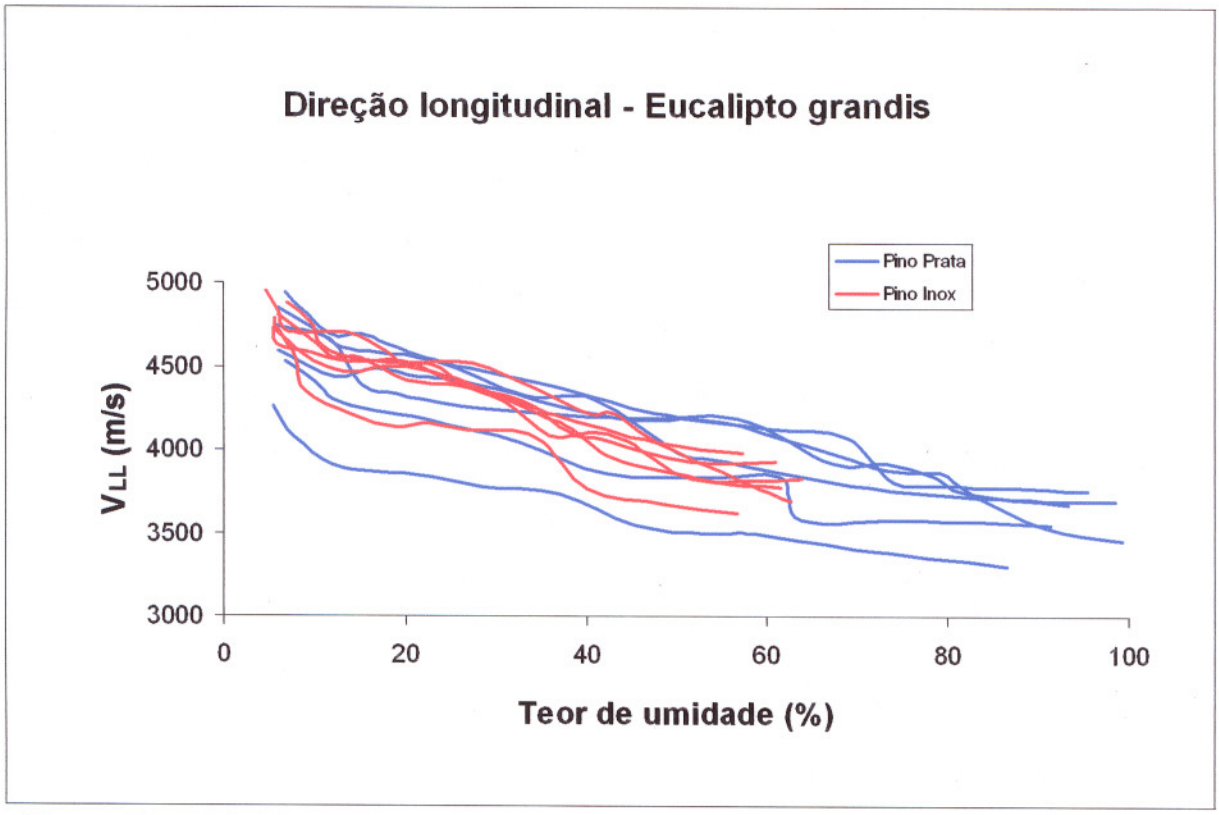

Figura 53 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (eucalipto grandis).

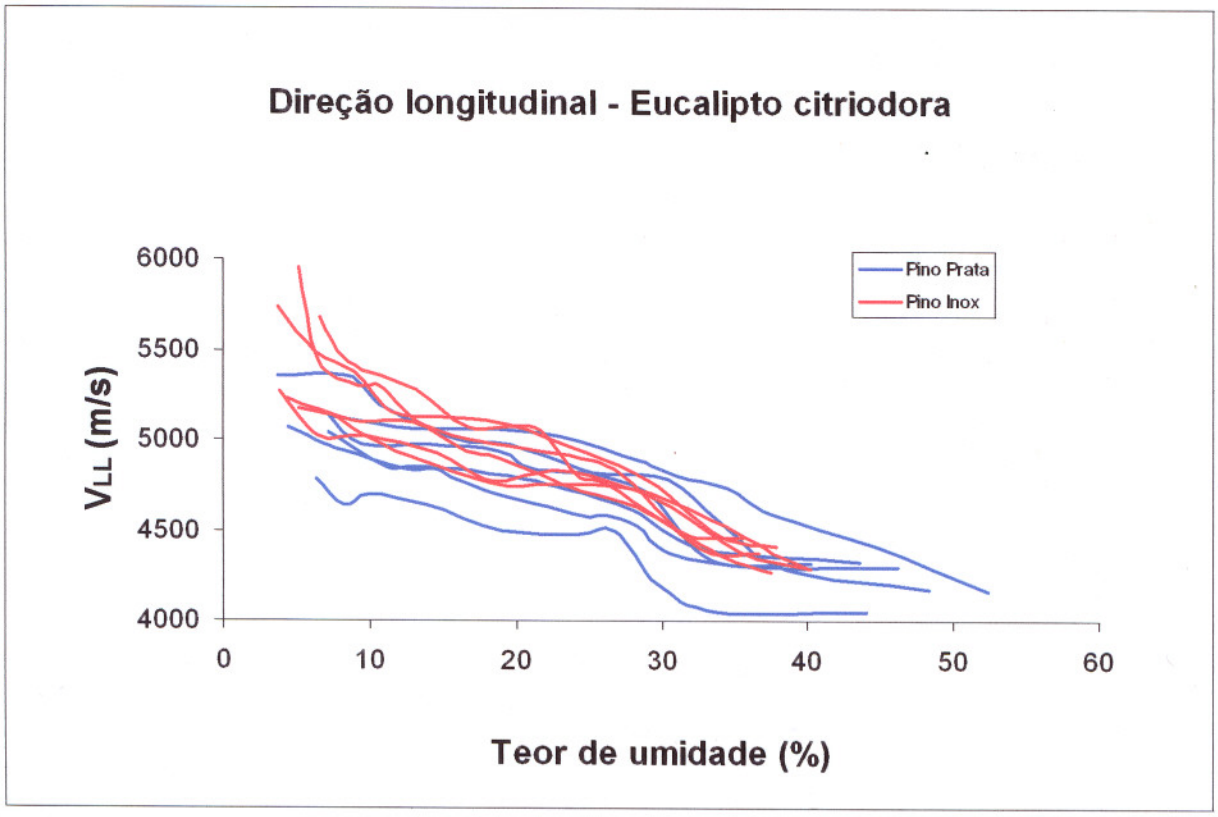

Figura 54 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).

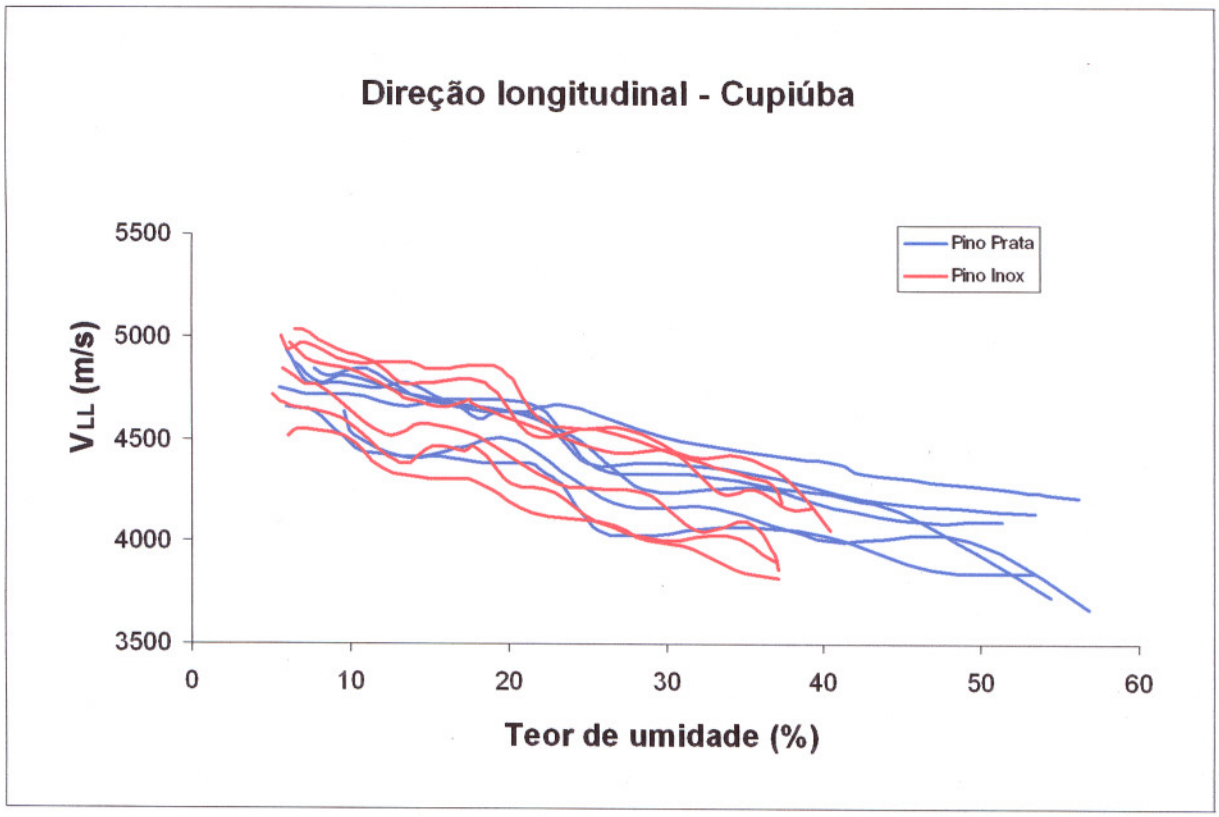

Figura 55 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (cupiúba).

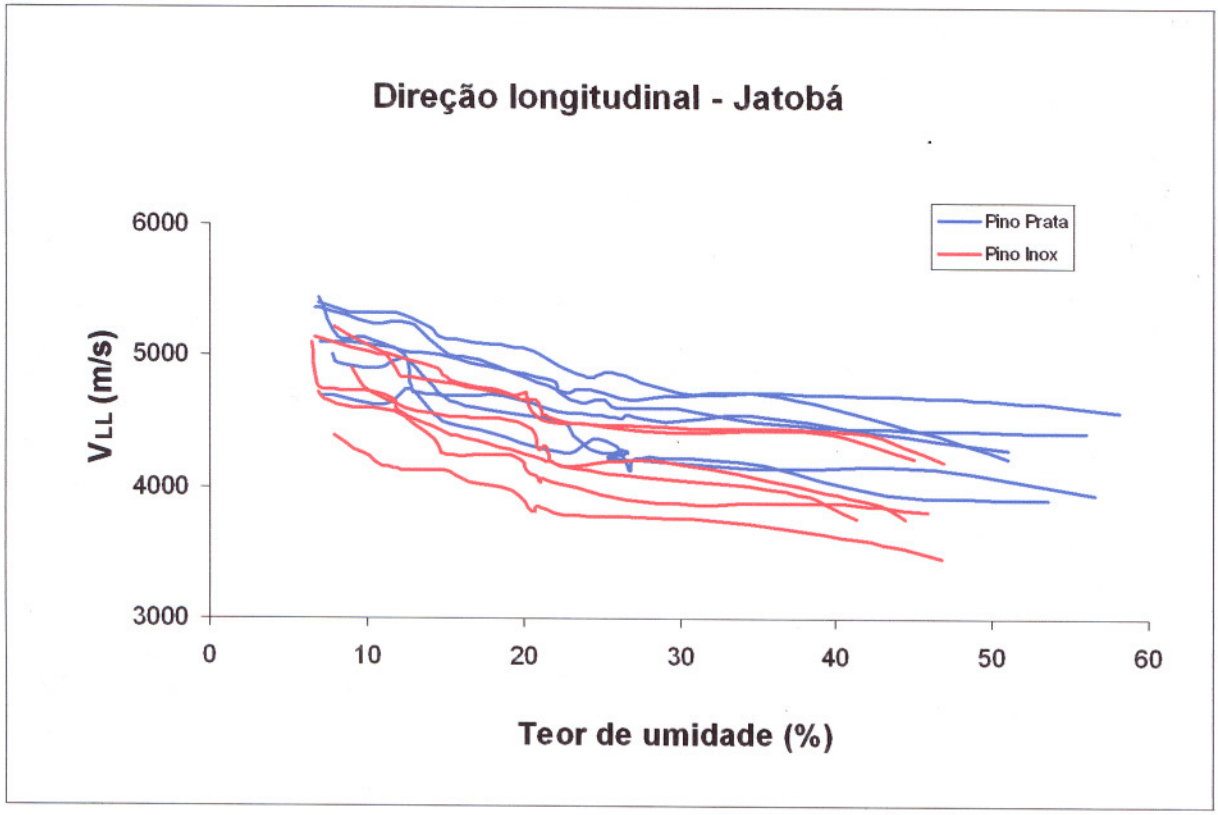

Figura 56 – Velocidade na direção longitudinal em função do teor de umidade (jatobá).

Os resultados obtidos para a velocidade longitudinal na direção perpendicular (V_{TT}) às fibras, utillizando-se os pinos de prata e inox, estão apresentados nas Figuras 57 a 63.

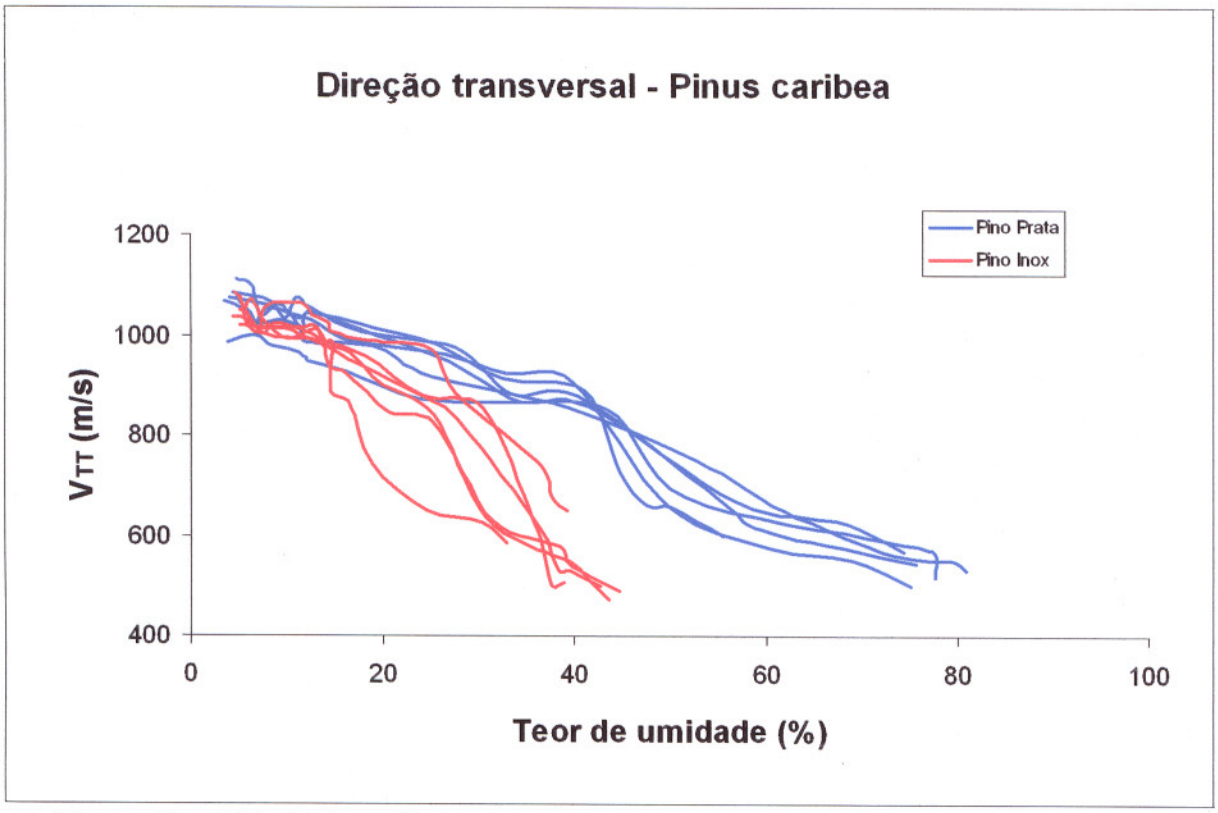

Figura 57 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus caribea).

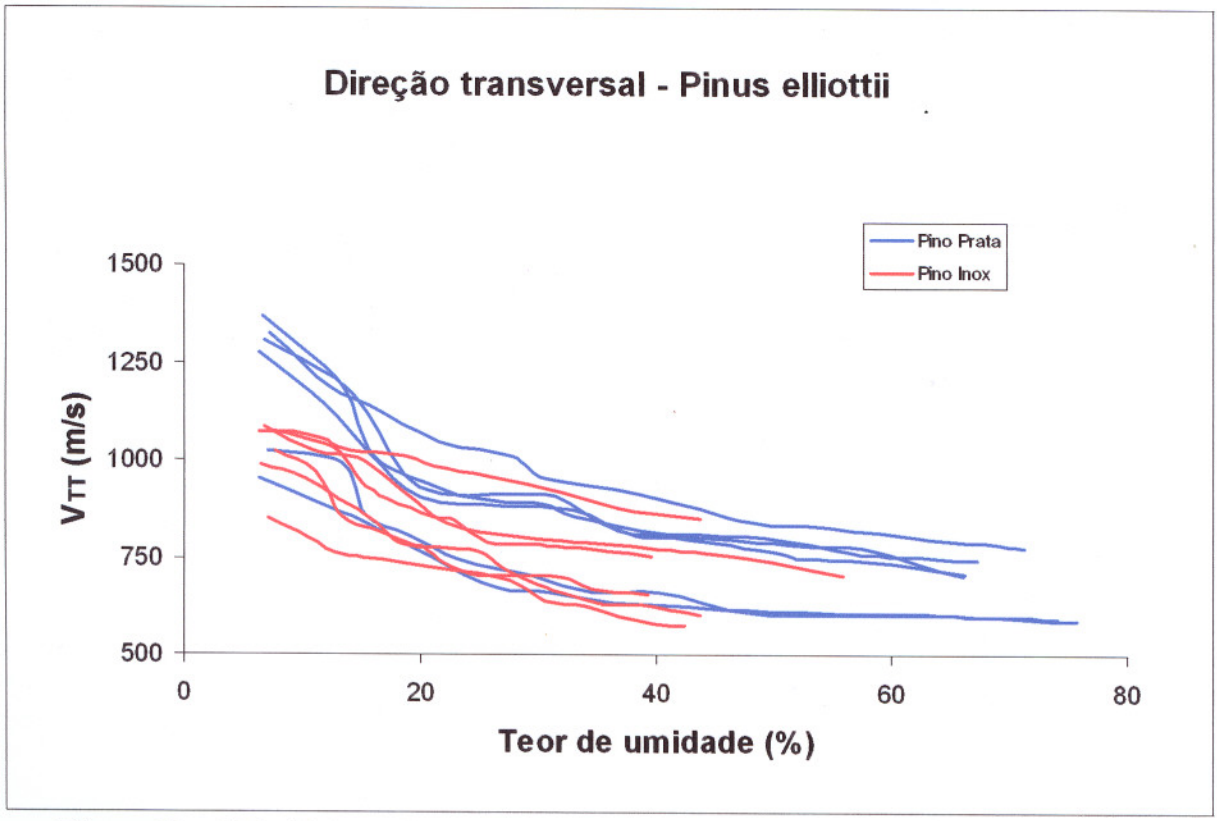

Figura 58 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus elliottii).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

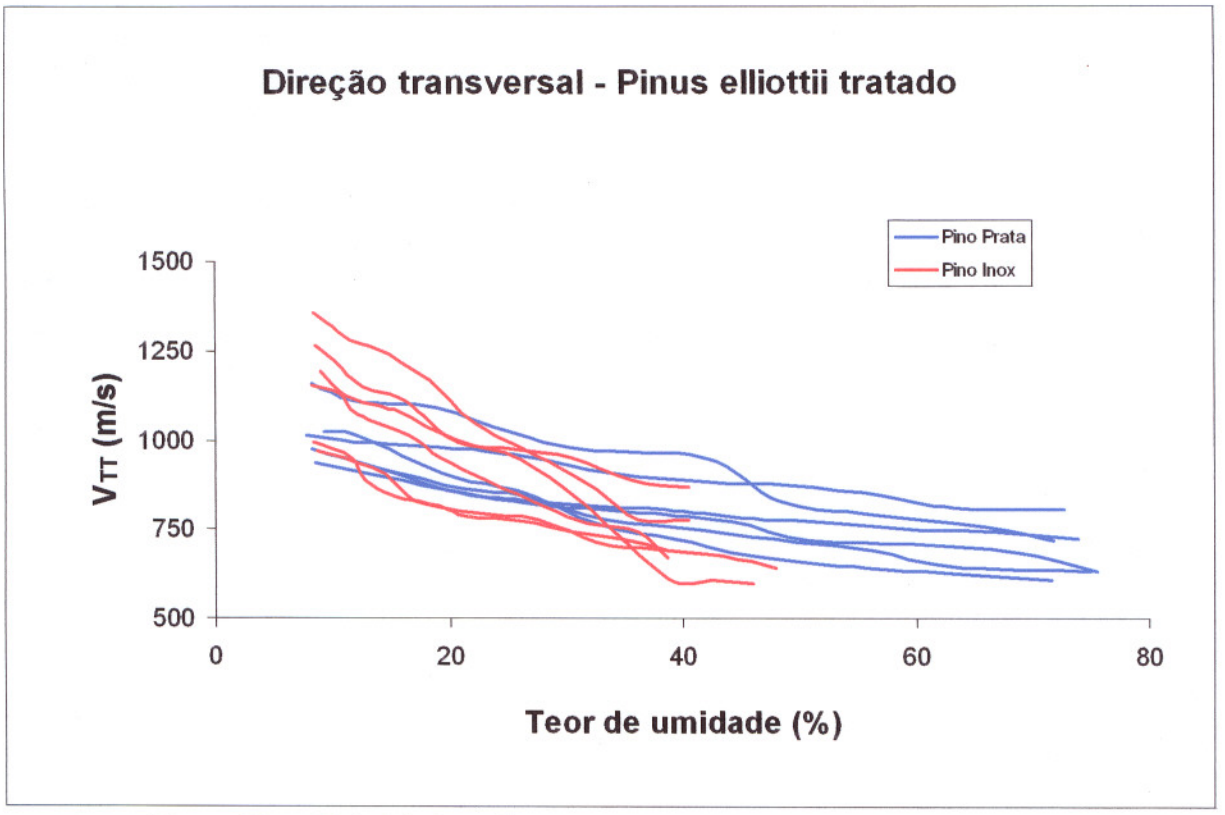

Figura 59 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).

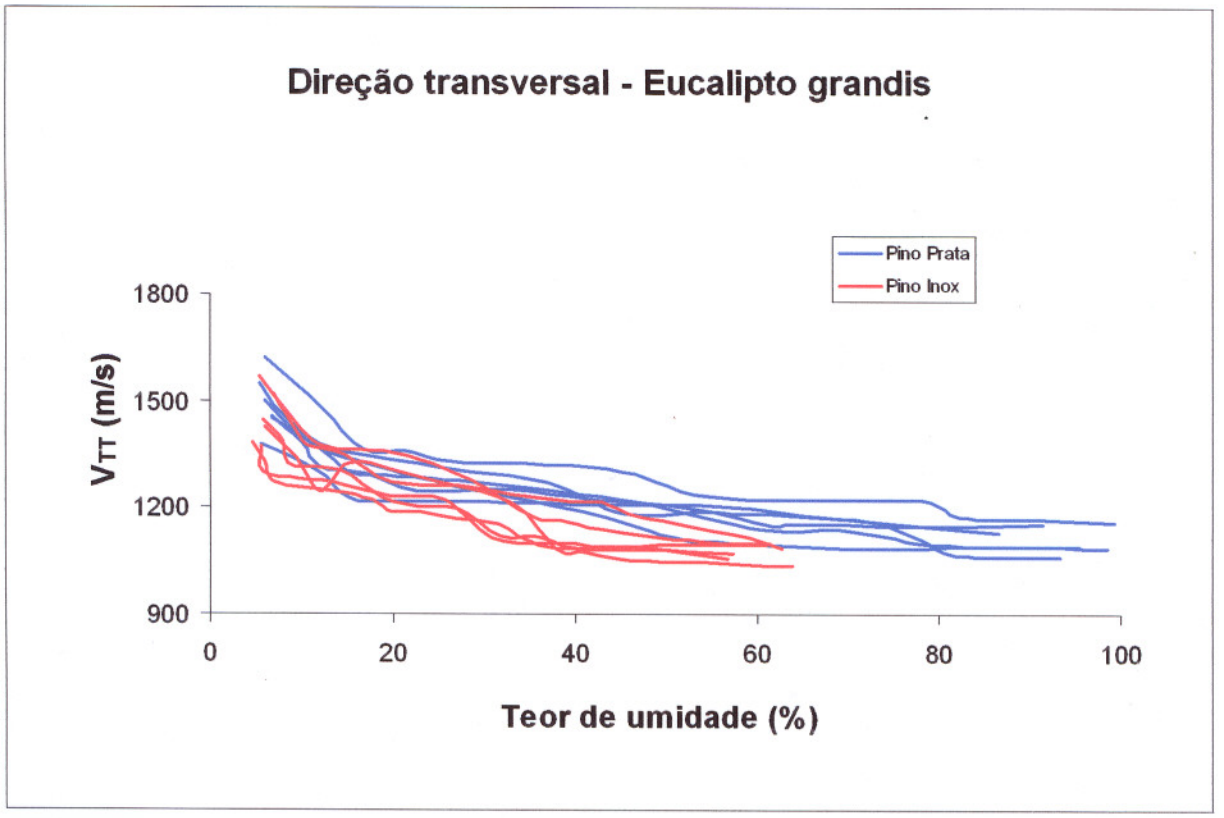

Figura 60 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (eucalipto grandis).

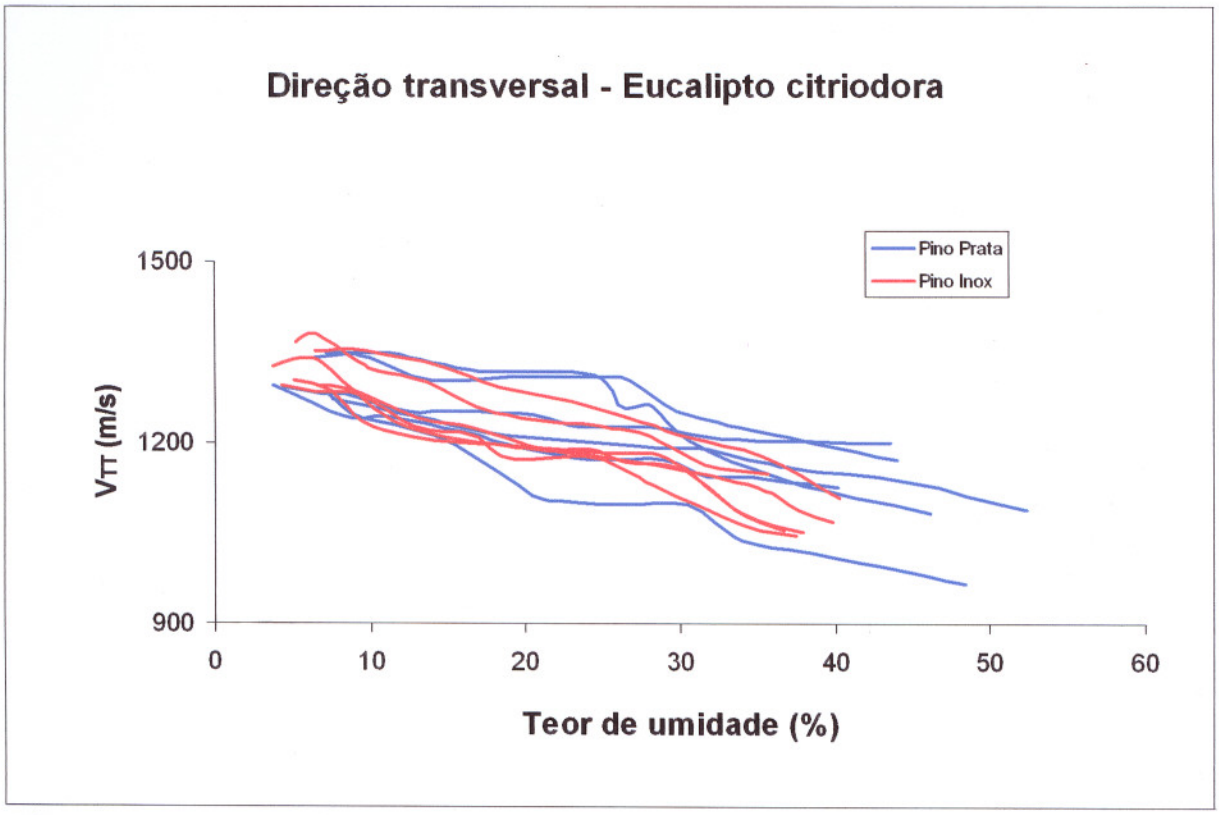

Figura 61 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).

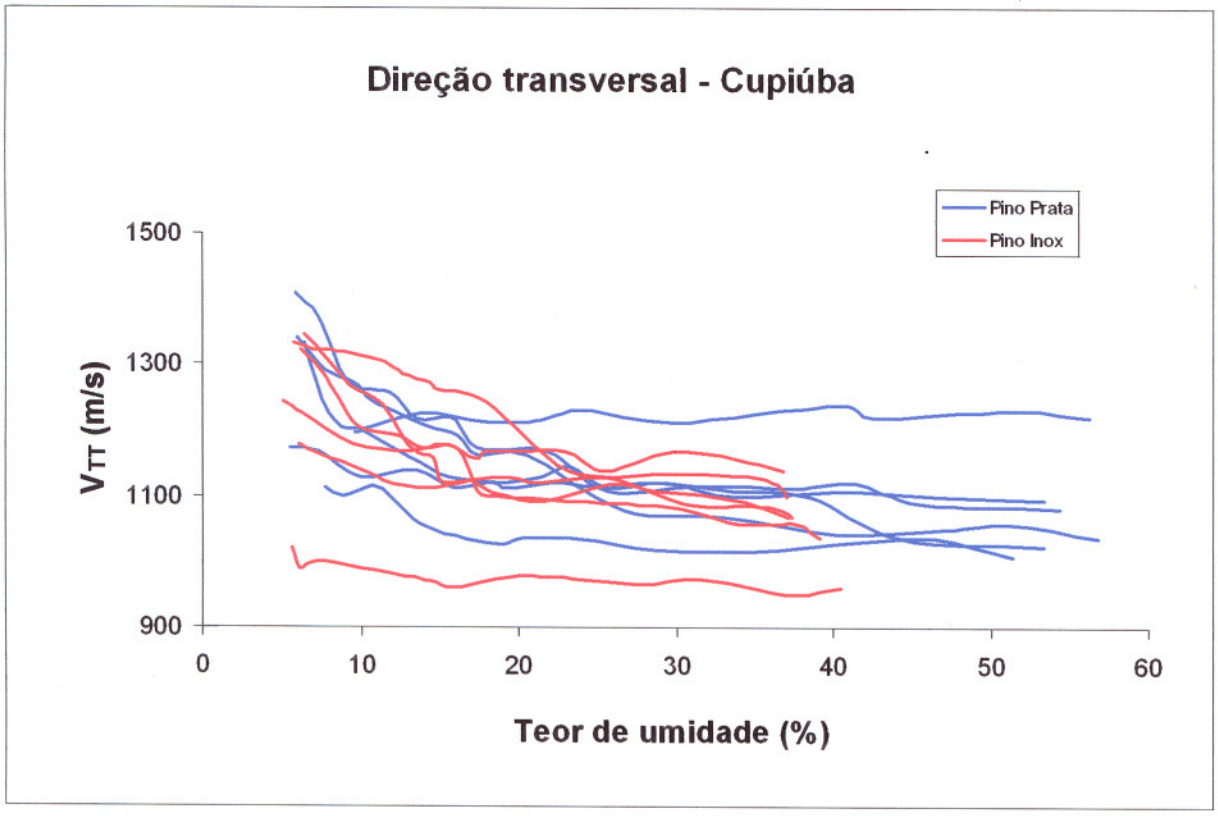

Figura 62 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (cupiúba).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

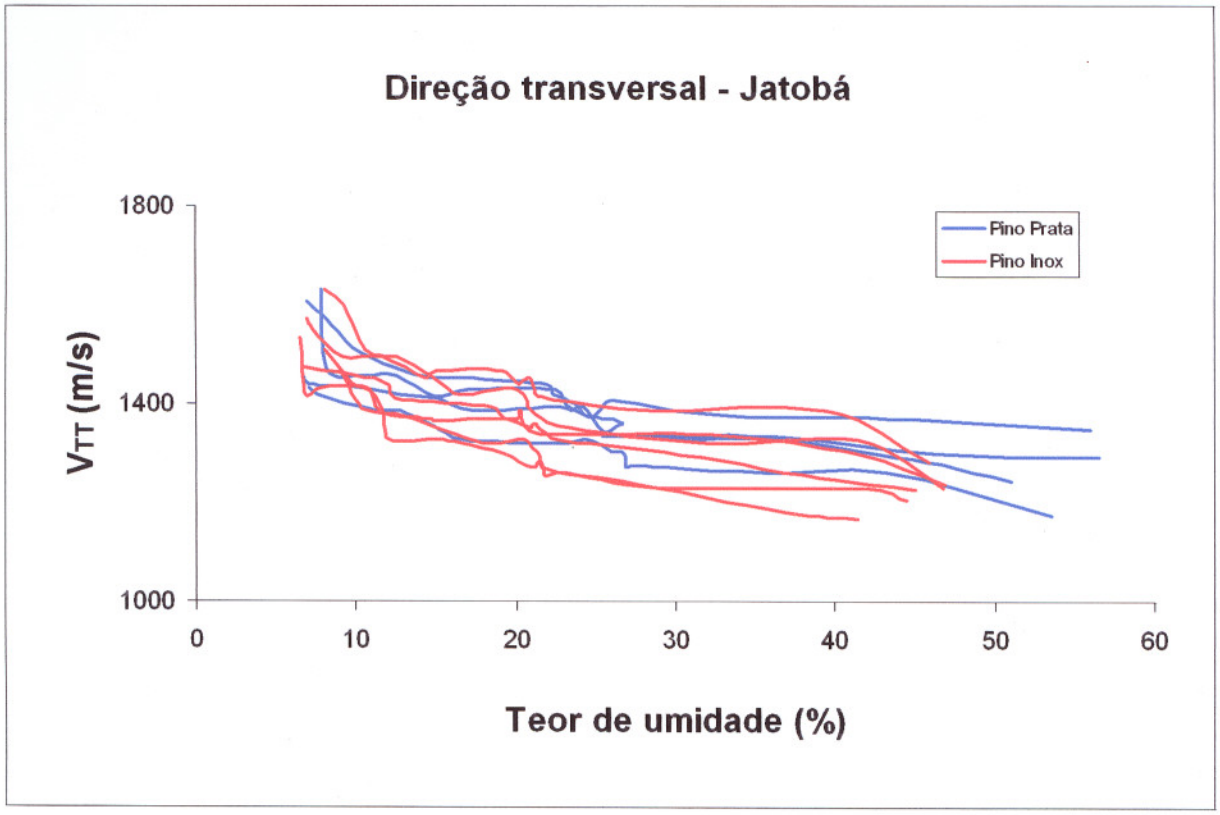

Figura 63 – Velocidade na direção transversal em função do teor de umidade (jatobá).

Como pôde ser observado, os resultados indicaram uma tendência de diminuição da velocidade com o aumento do teor de umidade, em ambas as direções de propagação da onda ultra-sônica (paralela e perpendicular às fibras), para todas as espécies estudadas.

A densidade e a estrutura anatômica também interferem na velocidade de secagem. As espécies com vasos ou traqueídes mais abertos e abundantes favorecem a circulação da umidade e propiciam uma secagem mais rápida, GALVÃO; JANKOWSKY (1985). As coníferas, em geral, secam mais rapidamente que as dicotiledôneas, o que pode ser constatado, especialmente para as espécies pinus elliottii e eucalipto grandis, com, respectivamente, o menor e o maior tempo de secagem.

O teor de umidade inicial também interfere na velocidade de secagem. Amostras com alto teor de umidade inicial levam mais tempo para secar, conforme os resultados obtidos com a espécie eucalipto grandis, que apresentou o maior teor de umidade inicial (em torno de 90%) e também o maior tempo de secagem (90 dias). A secagem mais rápida ocorreu com a espécie eucalipto citriodora, que apresentou teor de umidade inicial em torno de 60% e tempo de secagem de 47 dias, para o mesmo programa de secagem utilizado.

Os gráficos anteriormente apresentados demonstram também diferenças significativas entre os valores do teor de umidade obtidos a partir dos pinos de prata e de inox, principalmente em relação à madeira saturada. Esses dados foram comparados com os valores de umidade obtidos a partir de pequenas amostras retiradas de tábuas de referência e secas em estufa a 103 ± 2°C, sendo estes considerados os valores de umidade de maior exatidão. Nas Figuras 64 a 70 estão ilustrados os resultados da comparação entre o teor de umidade obtido com: pinos de revestimento de prata (PP), pinos de inox (PI) e secagem de corpos-de-prova por meio de estufa (CPs).

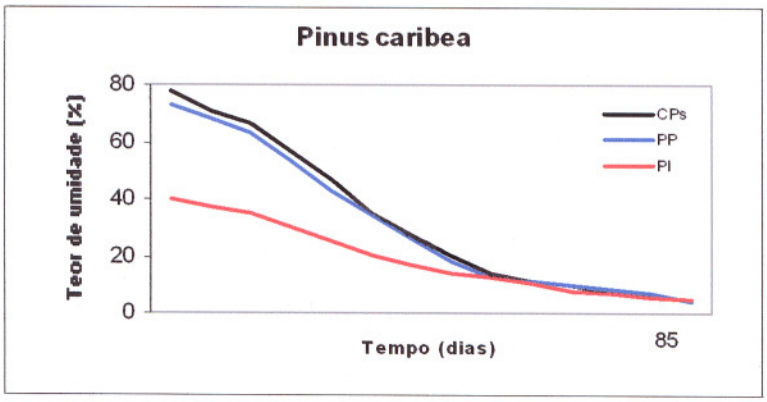

Figura 64 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus caribea).

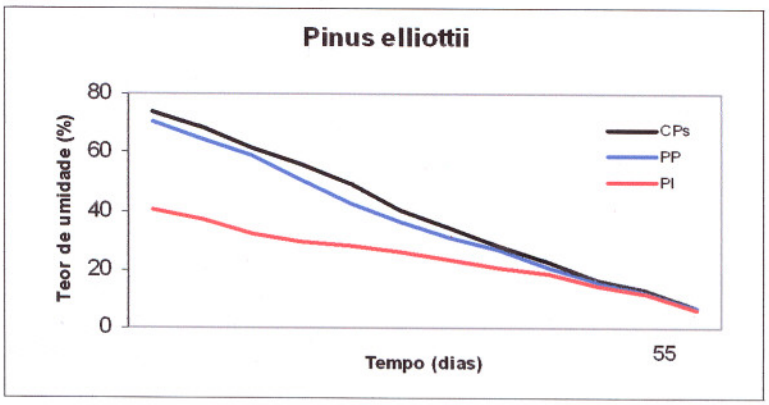

Figura 65 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus elliottii).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

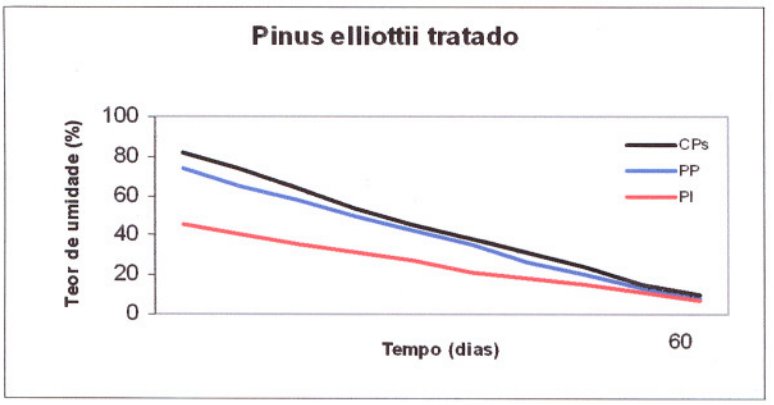

Figura 66 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (pinus elliottii tratado).

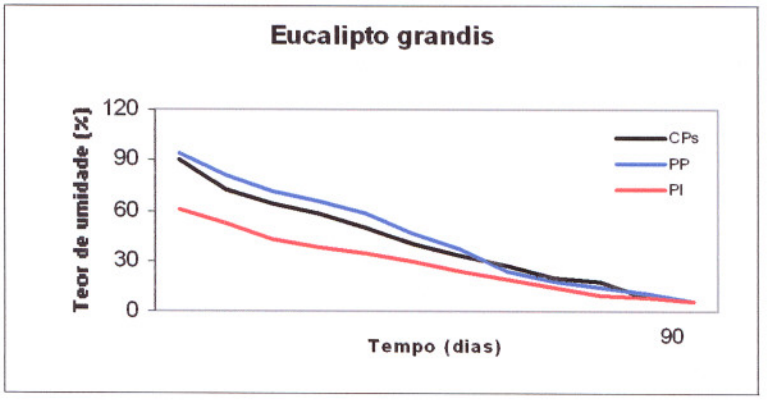

Figura 67 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (eucalipto grandis).

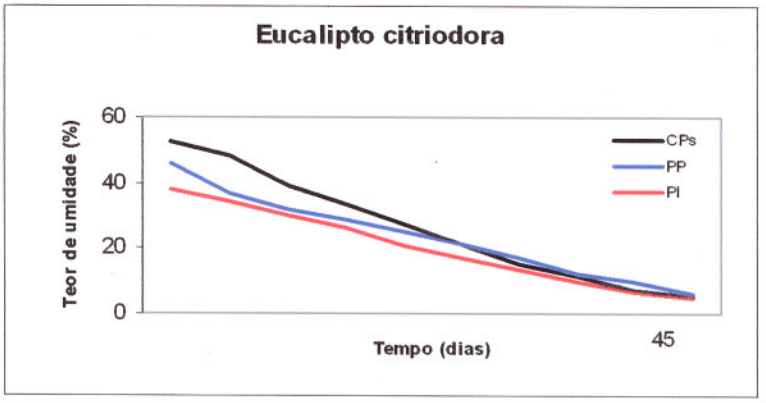

Figura 68 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (eucalipto citriodora).

EESC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

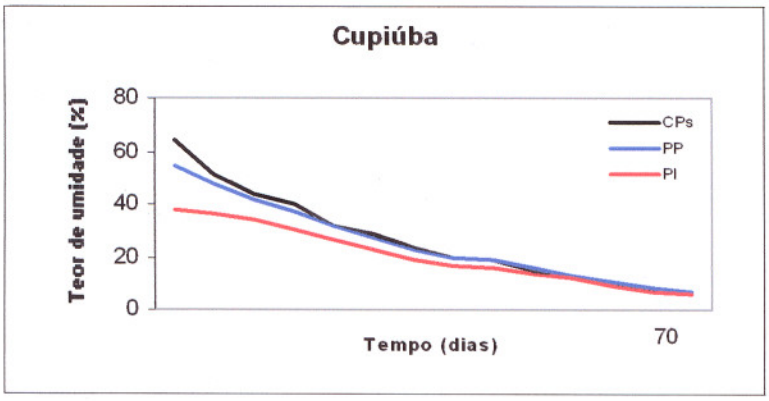

Figura 69 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (cupiúba).

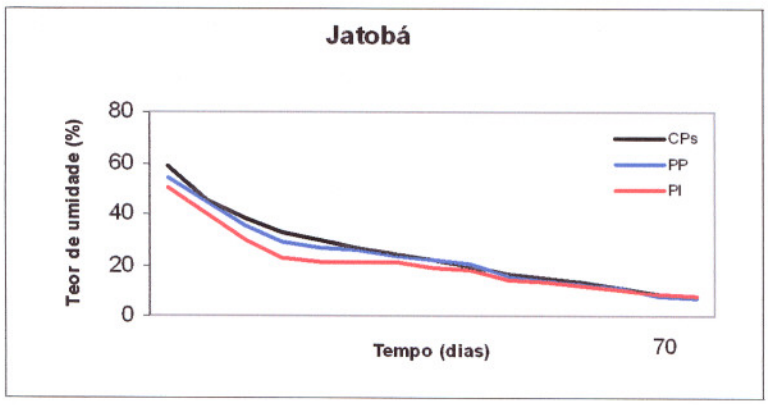

Figura 70 – Comparação entre os teores de umidade obtidos por meio de PP, PI e CPs (jatobá).

Em função da não adequação do pino de inox, conforme demonstrado nas Figuras 64 a 70, os resultados obtidos com este tipo de pino não foram considerados, ou seja, a próxima etapa da análise dos resultados, que consiste na verificação da possibilidade de inferência do ponto de saturação das fibras a partir da velocidade de propagação, foi feita com os resultados obtidos com os pinos de revestimento de prata, em função da maior exatidão dos valores de teor de umidade obtidos. Este comportamento mais adequado do pino de prata em relação ao pino de inox pode ser explicado em função da maior resistividade elétrica do pino de aço, o que dificulta o transporte de cargas elétricas, levando a uma queda ôhmica no sistema, WEAST (1984).

As velocidades médias foram transformadas em velocidades relativas, usando a relação $V_{saturada}/V_{seca}$, a fim de possibilitar uma melhor visualização da variação da velocidade com o teor de umidade. Para a inferência do ponto de saturação das fibras para cada espécie, utilizou-

se a propagação da velocidade da direção perpendicular às fibras, conforme OLIVEIRA et al. (2005).

Durante a secagem, a quantidade de água capilar que chega à superfície da madeira é menor que a quantidade de água que se evapora, provocando um gradiente de umidade. Este gradiente é função da permeabilidade da madeira e do tempo de secagem. Segundo SIMPSON (1975), a permeabilidade na direção transversal é a mais importante no processo de secagem.

A partir dos dados obtidos da experimentação, foram feitas regressões lineares em dois trechos do teor de umidade, sendo que a intersecção entre as retas indica o ponto de saturação das fibras, ou seja, neste ponto ocorre uma mudança na inclinação das curvas, mostrando que a influência do teor de umidade ocorre de modo diferente acima e abaixo do ponto de saturação, sendo mais significativa no segundo caso.

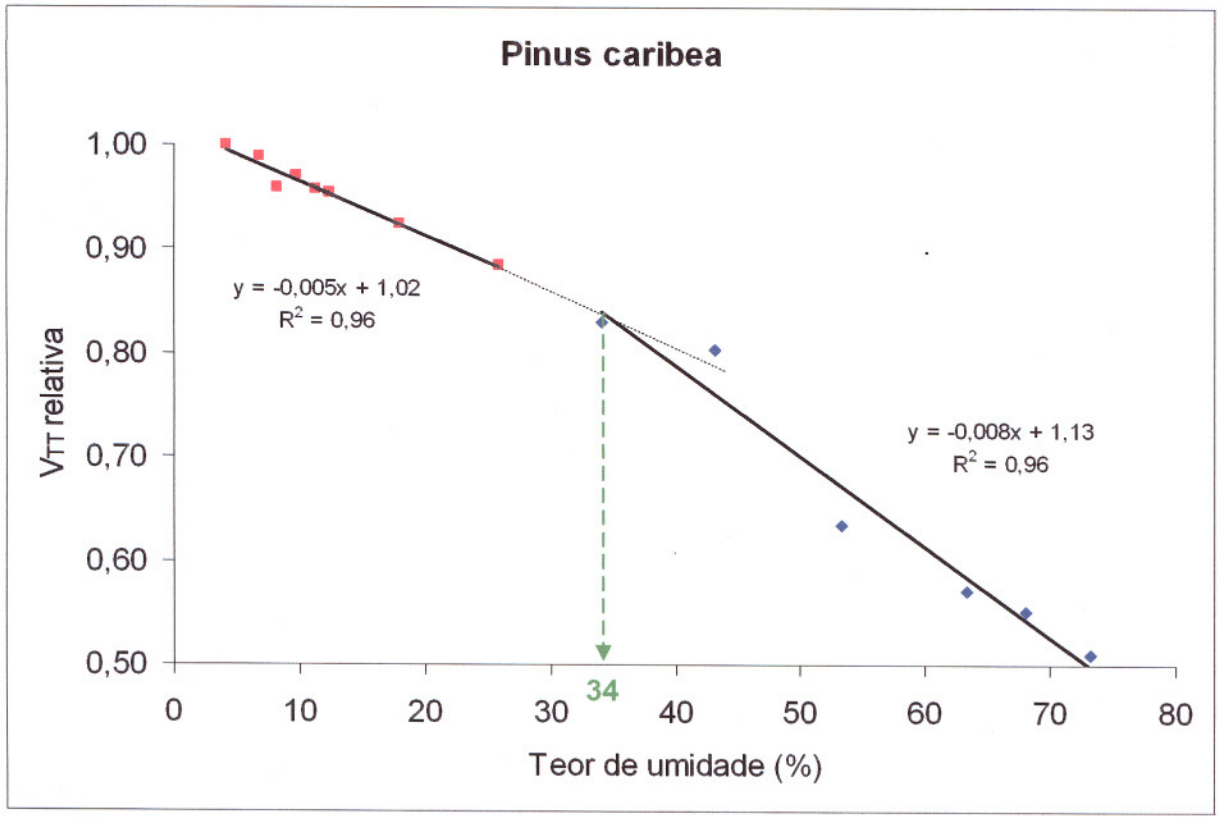

Figura 71 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus caribea).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

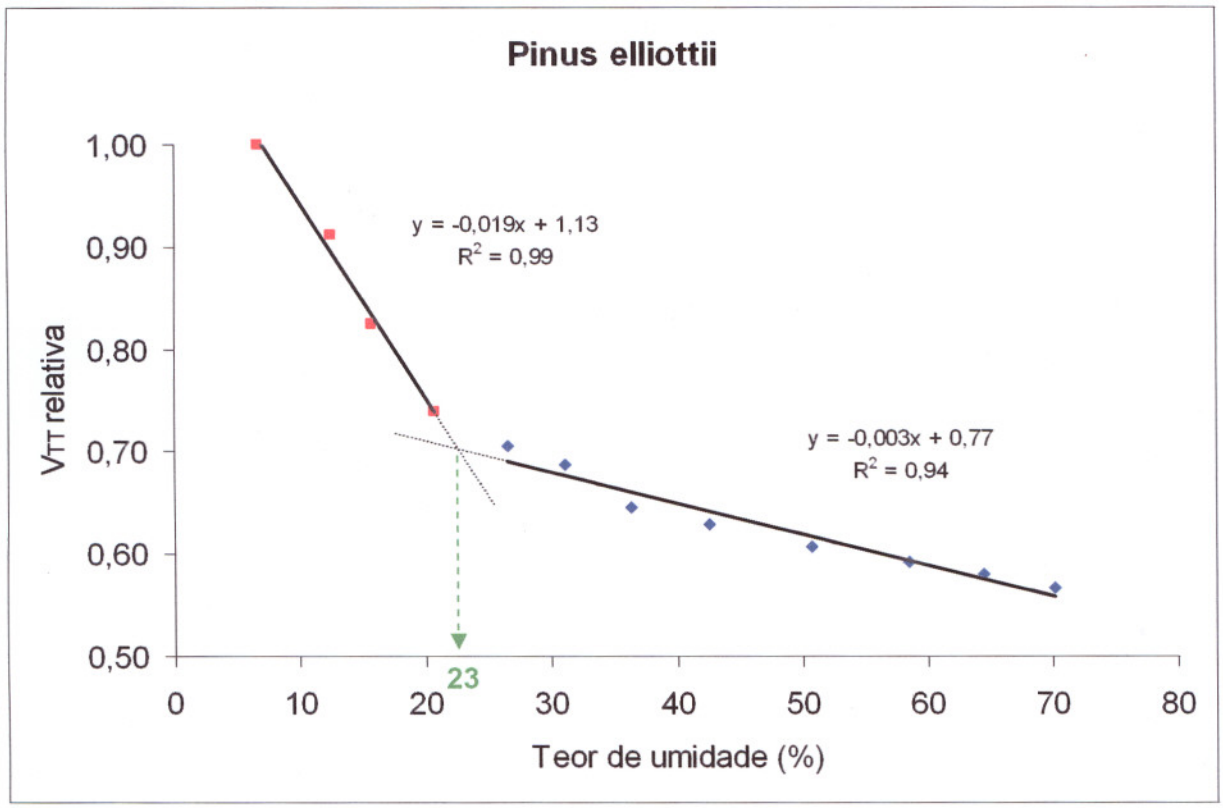

Figura 72 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus elliottii).

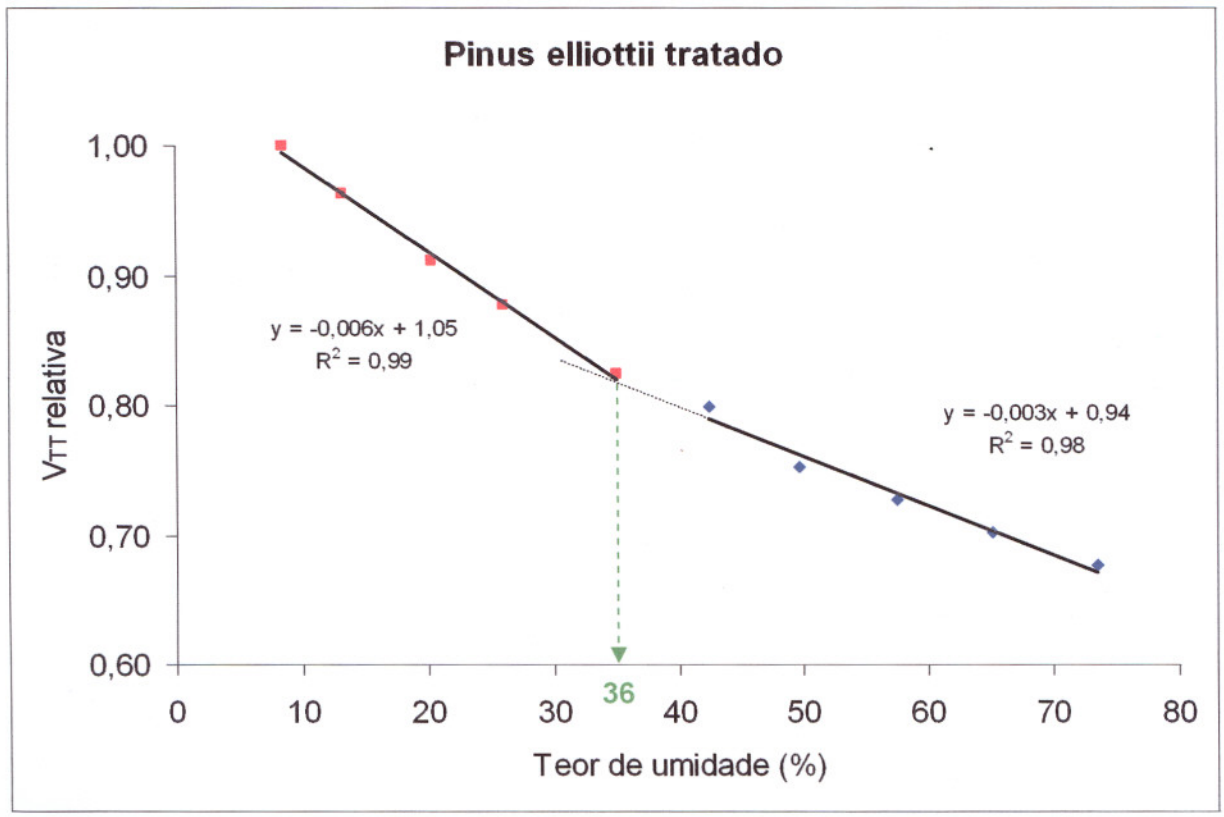

Figura 73 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (pinus elliottii tratado).

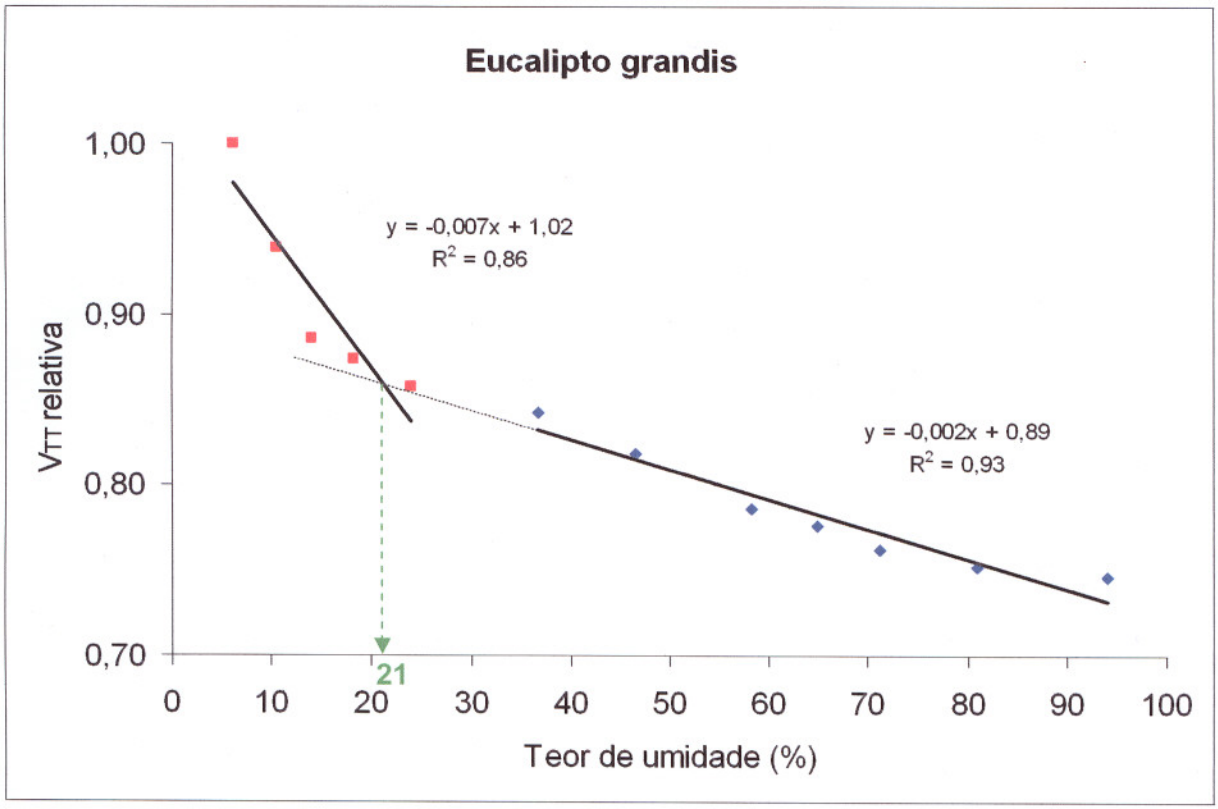

Figura 74 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (eucalipto grandis).

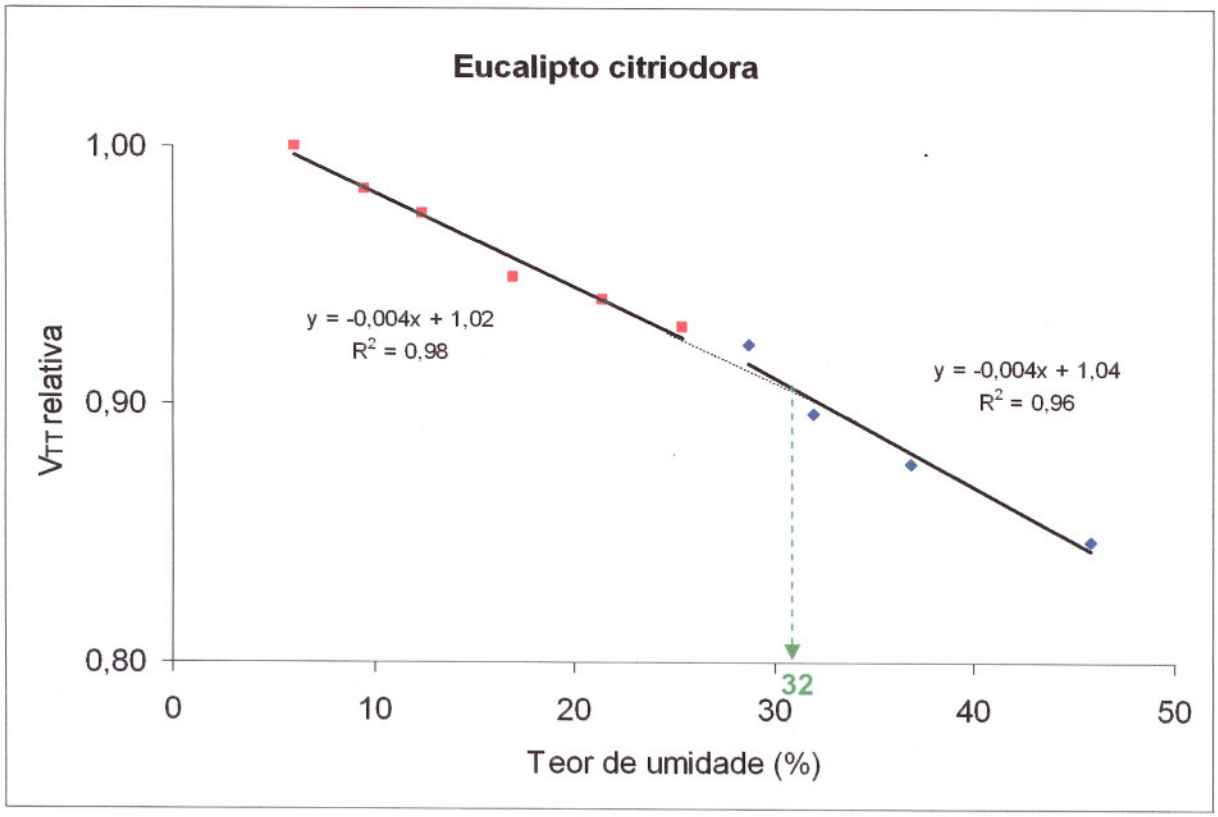

Figura 75 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (eucalipto citriodora).

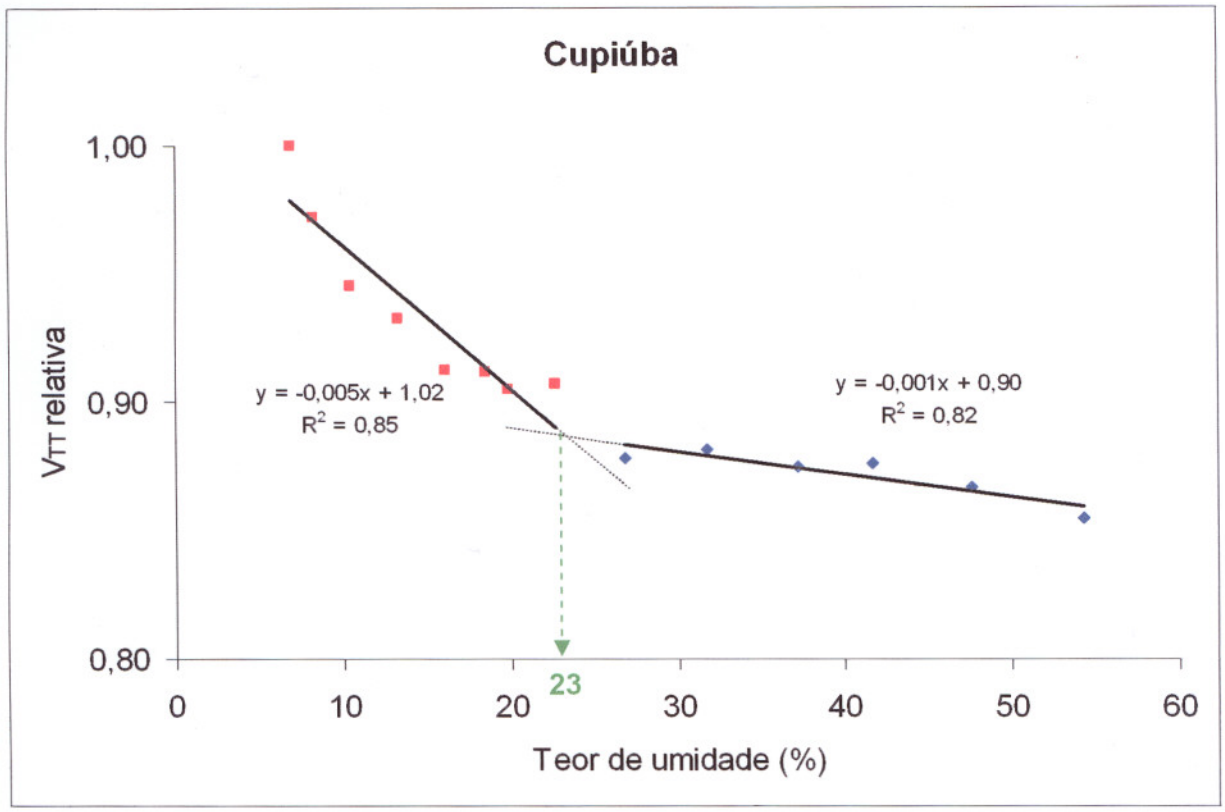

Figura 76 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (cupiúba).

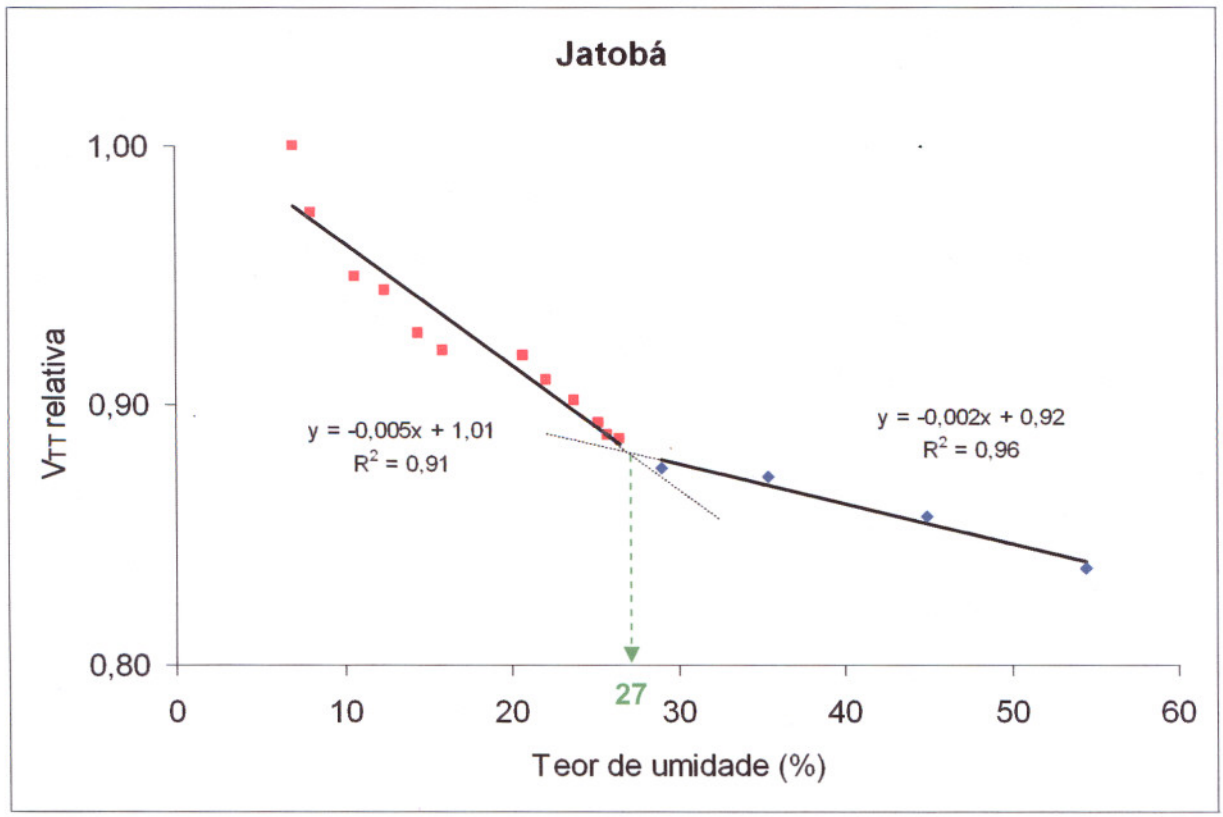

Figura 77 – Velocidade transversal relativa em função do teor de umidade (jatobá).

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

A Tabela 16 resume os resultados do ponto de saturação das fibras, obtidos nos gráficos anteriores.

Tabela 16 - Ponto de saturação das fibras.

	PSF (%)
Pinus caribea	34
Pinus elliottii	23
Pinus elliottii tratado	36
Eucalipto grandis	21
Eucalipto citriodora	32
Cupiúba	23
Jatobá	27

Conforme literatura existente sobre a determinação do ponto de saturação das fibras para as espécies pinus caribea, pinus elliottii, eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba e jatobá, os valores variam de 23% a 35% (JARA, 1987). Os valores obtidos na presente pesquisa variam de 21% a 34%. Porém, os valores individuais para cada espécie apresentaram alguma variação que pode ser explicada em função da procedência da madeira em ambas as pesquisas.

Os valores médios, máximos, mínimos e de coeficiente de variação, obtidos na direção paralela às fibras estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Velocidades ultra-sônicas na direção paralela às fibras acima e abaixo do PSF.

	Acima do PSF				**Abaixo do PSF**			
	$V_{Média}$ (m/s)	$V_{Mínima}$ (m/s)	$V_{Máxima}$ (m/s)	CV (%)	$V_{Média}$ (m/s)	$V_{Mínima}$ (m/s)	$V_{Máxima}$ (m/s)	CV (%)
Pinus caribea	3886	3138	5000	14,0	4880	3846	5515	9,8
Pinus elliottii	3923	2913	5057	17,8	4940	3685	6185	14,3
Pinus elliottii tratado	3783	2945	4882	13,0	4821	3800	5708	10,8
Eucalipto grandis	3836	3296	4360	7,0	4441	3848	4934	6,4
Eucalipto citriodora	4408	4048	4777	4,8	4890	4474	5357	4,3
Cupiúba	4162	3870	4515	4,7	4628	4282	4934	3,3
Jatobá	4377	3906	4719	5,8	4789	4213	5432	7,0

Os valores médios, máximos, mínimos e de coeficiente de variação, obtidos na direção perpendicular às fibras estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Velocidades ultra-sônicas na direção perpendicular às fibras acima e abaixo do PSF.

	Acima do PSF				**Abaixo do PSF**			
	$V_{Média}$ (m/s)	$V_{Mínima}$ (m/s)	$V_{Máxima}$ (m/s)	CV (%)	$V_{Média}$ (m/s)	$V_{Mínima}$ (m/s)	$V_{Máxima}$ (m/s)	CV (%)
Pinus caribea	692	501	922	20,0	1018	873	1111	4,9
Pinus elliottii	756	589	1007	14,3	1048	750	1366	16,6
Pinus elliottii tratado	740	606	948	11,3	926	775	1157	10,8
Eucalipto grandis	1168	1059	1309	5,2	1359	1216	1622	7,2
Eucalipto citriodora	1156	966	1303	7,0	1256	1096	1349	5,3
Cupiúba	1099	1007	1213	6,1	1179	1033	1407	7,3
Jatobá	1294	1173	1386	3,9	1393	1271	1630	5,4

Na continuidade da avaliação dos resultados, foi feita uma análise visando à obtenção de modelos que melhor se ajustem aos valores experimentais obtidos (com coeficientes de determinação significativos), a fim de propor relações que permitam a correção de valores da velocidade ultra-sônica em diferentes teores de umidade, considerando-se os conjuntos formados por coníferas e dicotiledôneas e também globalmente para todas as espécies.

Foram avaliados os modelos: linear, logarítmico, polinomial, potência e exponencial, a fim de se obter o maior coeficiente de determinação. A análise também foi feita dividindo-se os resultados acima e abaixo do ponto de saturação das fibras.

Os valores de R^2 mais significativos foram obtidos com o modelo de regressão linear e considerando-se apenas um trecho para a variação da velocidade, desde a madeira saturada até seca.

Para as coníferas, a comparação entre os modelos obtidos, considerando-se apenas o pinus caribea e o pinus elliottii e depois com a adição do pinus elliottii tratado com preservantes, levou ao mesmo valor de R^2, indicando assim, que na madeira tratada ensaiada não houve mudança significativa na variação da velocidade de propagação durante o processo de

secagem. Na Figura 78 está apresentado o modelo linear para a variação da velocidade longitudinal em função do teor de umidade, para as espécies: pinus caribea e pinus elliottii (com e sem tratamento preservativo).

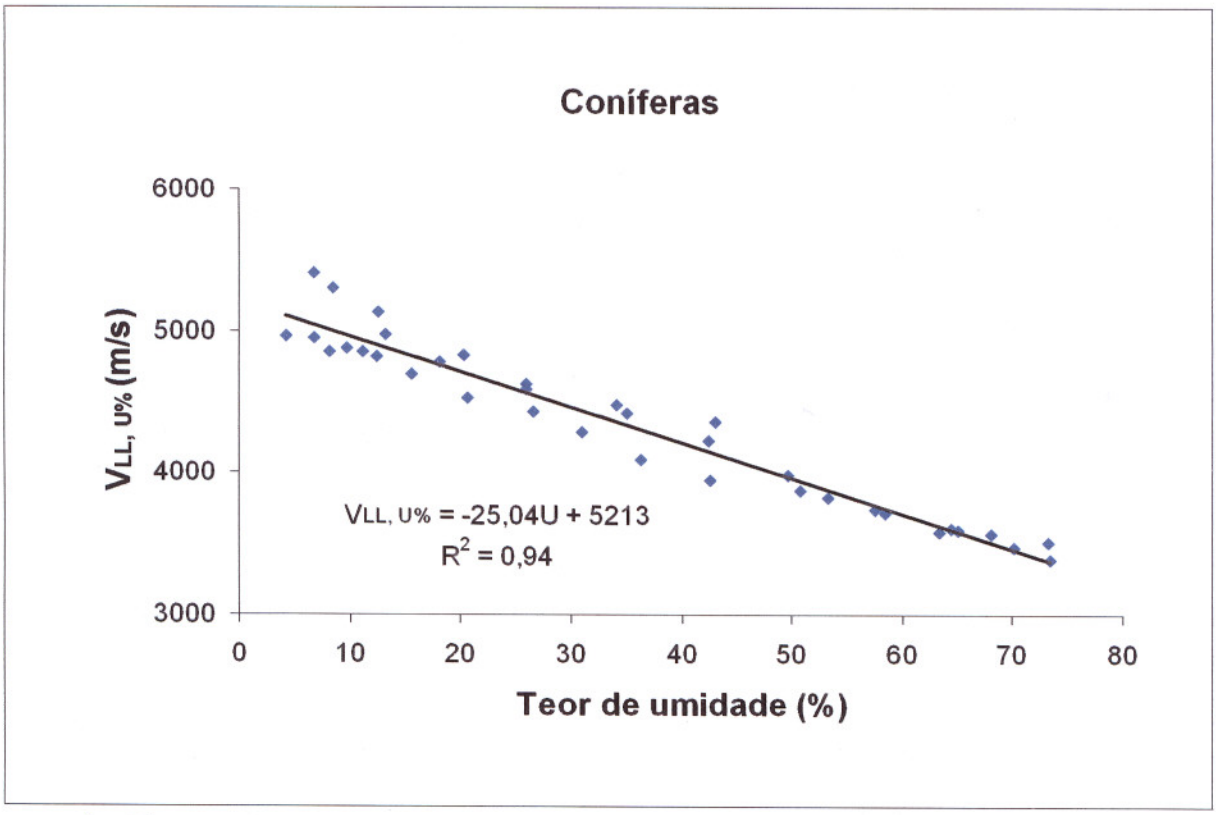

Figura 78 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (coníferas).

Na avaliação do melhor modelo para as dicotiledôneas, foram feitas análises com as quatro espécies em conjunto e posteriormente separando-as em função de serem nativas (cupiúba e jatobá) e de reflorestamento (eucalipto grandis e eucalipto citriodora) e também agrupando as espécies em função das classes de resistência: eucalipto citriodora e jatobá (C-40), e eucalipto grandis e cupiúba (C-30). Das três possibilidades mencionadas, o melhor coeficiente de determinação foi obtido com a divisão das espécies em função da classe de resistência, conforme ilustrado nas Figuras 79 e 80.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

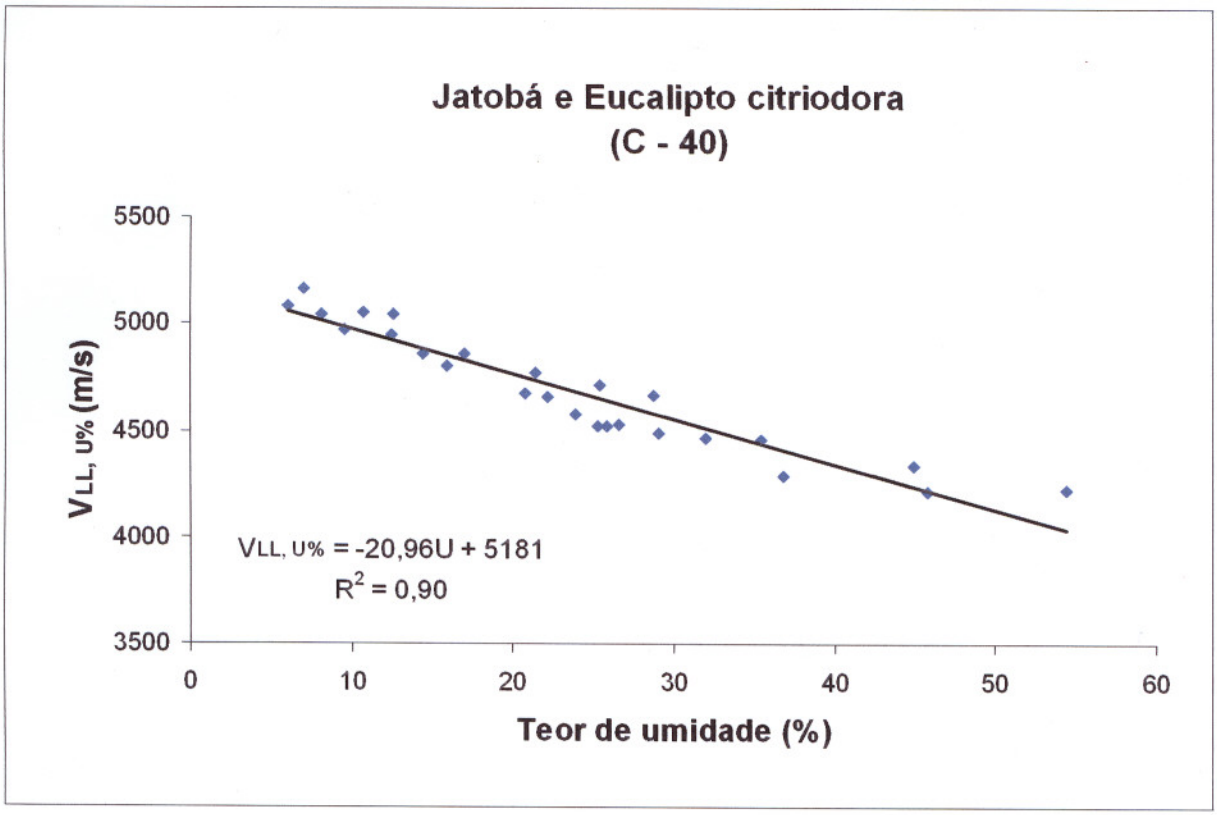

Figura 79 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (jatobá e eucalipto citridora).

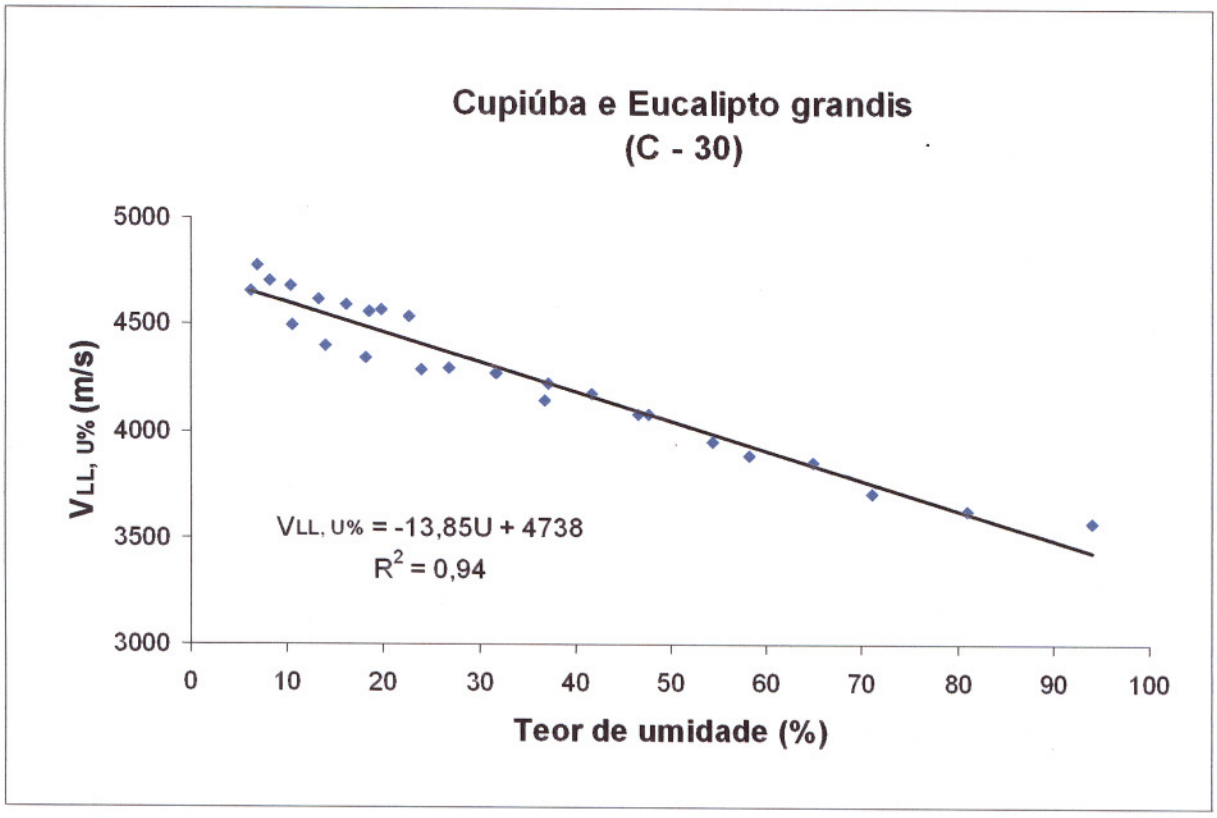

Figura 80 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (cupiúba e eucalipto grandis).

Finalmente, foi feita a análise do modelo mais adequado considerando-se todas as espécies estudadas, inclusive o pinus elliottii com tratamento preservativo (Figura 81).

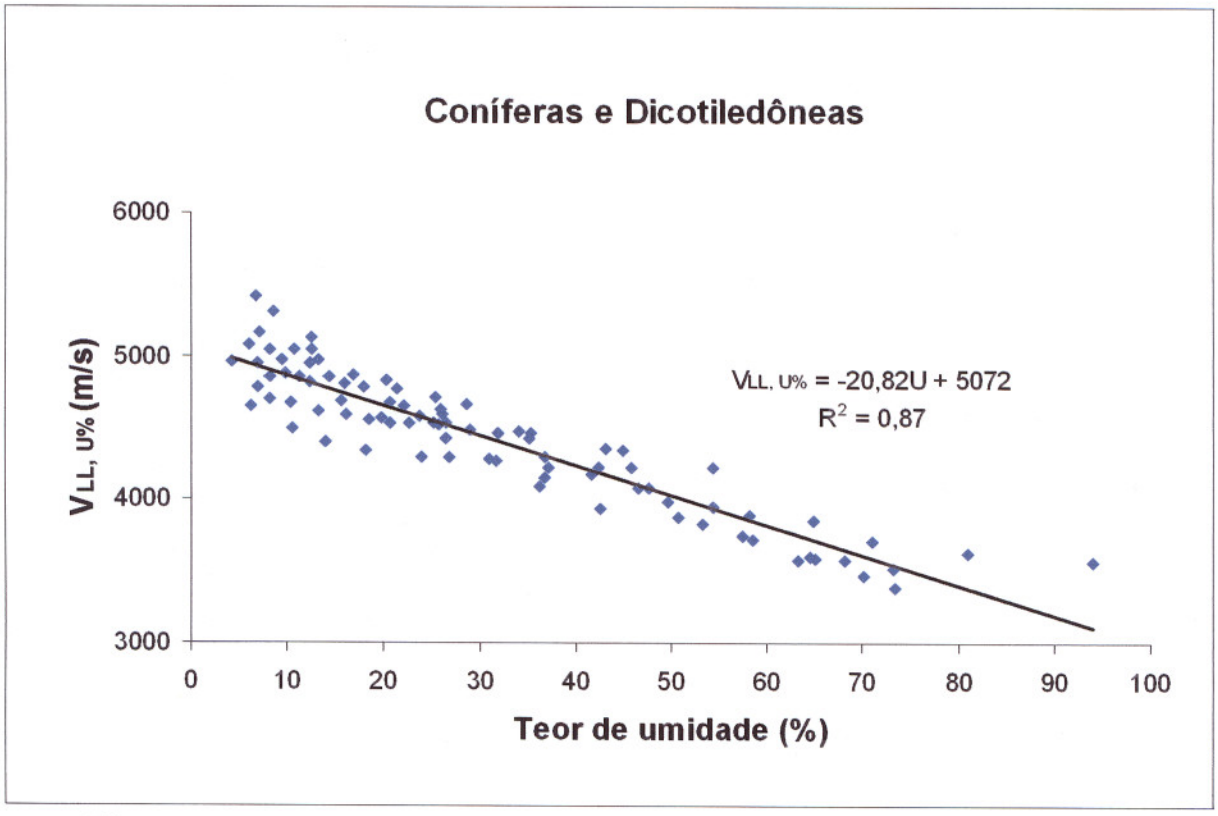

Figura 81 – Representação gráfica do modelo de correção para a velocidade em função do teor de umidade (coníferas e dicotiledôneas).

Todas as relações obtidas apresentaram coeficientes de determinação significativos (0,87 a 0,94), sendo que os modelos permitem relacionar o valor da velocidade de propagação ultra-sônica a partir do teor de umidade por meio de expressões lineares.

Embora o gráfico da Figura 81 indique uma tendência de decréscimo da velocidade com o aumento do teor de umidade para os valores acima do ponto de saturação das fibras, é interessante observar que as propriedades de resistência e rigidez da madeira não possuem tal comportamento, ou seja, a partir do PSF existe uma tendência dos valores das propriedades mecânicas se tornarem constantes. Neste sentido, para os casos em que a velocidade (V_{LL}) seja utilizada para estimar o valor do módulo de elasticidade, torna-se importante a utilização de uma expressão que permita adequar o valor de E_d acima do ponto de saturação das fibras.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

A partir das relações obtidas foi possível sugerir uma expressão geral, englobando todas as espécies estudadas, de modo a relacionar a velocidade longitudinal com o teor de umidade, apresentada a seguir:

$$V_{LL,\,U\%} = -20{,}82\,U + 5072 \qquad (10)$$

onde:

$V_{LL,\,U\%}$ – velocidade longitudinal para amostras com U% de teor de umidade (m/s);

U – teor de umidade da amostra (%).

Por meio dos dados experimentais obtidos na presente pesquisa, também foi possível estabelecer uma expressão geral relacionando a velocidade longitudinal e a densidade aparente a 12% para as mesmas peças estudadas, o que permitiu a proposição do modelo representado graficamente na Figura 82. A equação deste modelo está apresentada a seguir:

$$V_{LL,\,12\%} = -1{,}01\rho_{ap,12\%} + 5722 \qquad (11)$$

onde:

$V_{LL,\,12\%}$ - velocidade longitudinal para amostras com teor de umidade de 12% (m/s);

$\rho_{ap,12\%}$ - densidade aparente a 12% (kg/m^3).

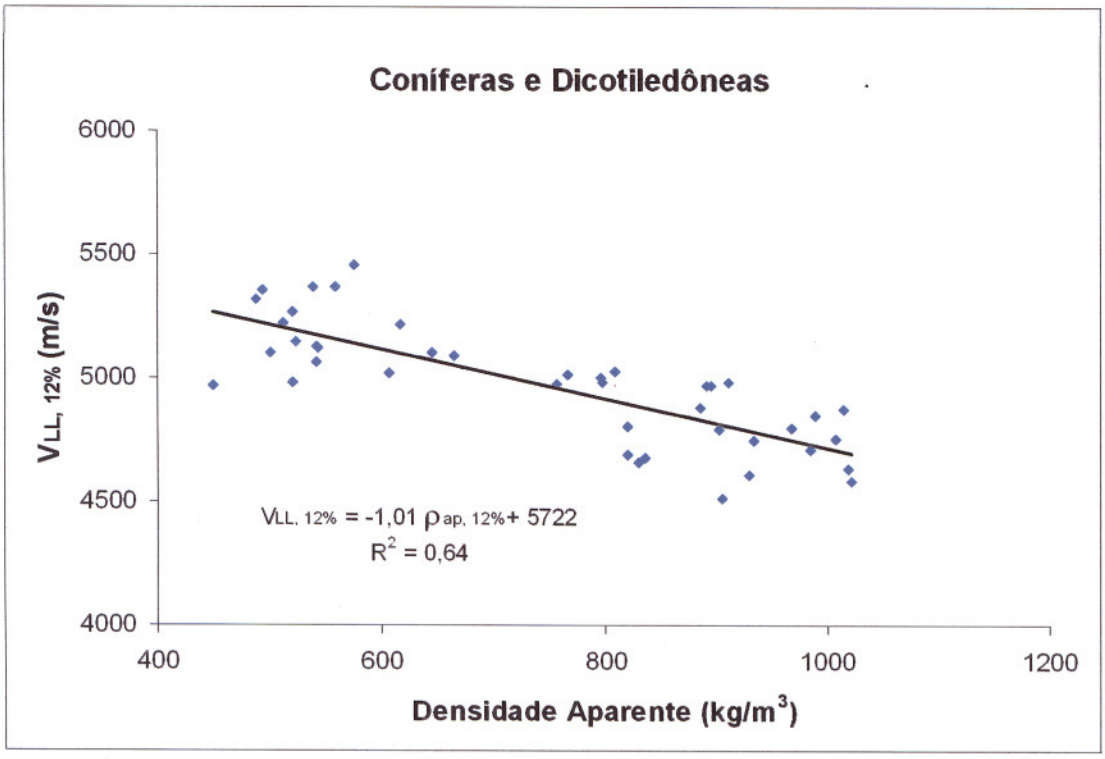

Figura 82 – Velocidade longitudinal em peças a 12% de umidade em função da densidade aparente (coníferas e dicotiledôneas).

A partir da diferença entre as expressões (11) e (10) foi possível obter uma outra expressão que permite de modo simplificado a correção dos valores de velocidade longitudinal obtidos em peças com teor de umidade acima de 12%, conhecendo-se a densidade aparente, conforme demonstrado a seguir:

$$V_{LL,\,12\%} - V_{LL,\,U\%} = -1{,}01\rho_{ap,\,12\%} + 20{,}82\,U + 5722 - 5072$$

$$V_{LL,\,12\%} = V_{LL,\,U\%} - 1{,}01\rho_{ap,\,12\%} + 20{,}82\,U + 650$$

Ou:

$$V_{LL,\,12\%} = V_{LL,\,U\%} - \rho_{ap,\,12\%} + 21\,U + 650 \qquad (12)$$

Salienta-se que esta expressão foi obtida a partir de dados experimentais de um mesmo lote de peças de madeira das espécies utilizadas neste estudo, considerando também que o intuito desta expressão é simplificar a correção da velocidade obtida em ensaios de ultra-som, de modo a facilitar a inclusão de ensaios não-destrutivos na normalização brasileira.

6. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- A influência da seção transversal do corpo-de-prova ocorre em função da relação entre as dimensões da seção e o comprimento de onda utilizado. Quando o comprimento de onda (λ) se aproxima de uma das dimensões da peça verifica-se uma diminuição na velocidade causada pelo efeito fronteira, ou seja, quando uma das dimensões da peça se aproxima do comprimento de onda, toda a espessura da peça passa a ser penetrada pelo feixe de ondas formando uma onda de placa, mistura de ondas longitudinais e transversais, que apresenta menor velocidade de propagação. Constatou-se também que os resultados com freqüências mais elevadas (54 kHz e 150 kHz) não sofreram perturbação nos valores de propagação, indicando uma melhor adequação para estas freqüências.

- O estudo sobre a influência do comprimento do corpo-de-prova evidenciou que existe um ponto crítico na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda (L/λ) a partir do qual a velocidade não é mais afetada, ou seja, para a freqüência utilizada, existe um comprimento mínimo da peça, para que a velocidade obtida não sofra interferências significativas. Para as espécies pinus caribea, eucalipto grandis, eucalipto citriodora e jatobá o valor crítico ocorreu quando L/λ foi igual a três; e para as espécies cupiúba e pinus elliottii, quando L/λ foi igual a dois. A velocidade mostrou-se sensível à variação do comprimento das vigas, apresentando aumento com o crescimento na relação entre comprimento da peça e comprimento de onda de: 14,3%, 12,3%, 19,7%, 10,5%, 59,2% e 41,4%, respectivamente para as espécies: pinus caribea, pinus elliottii, eucalipto grandis, eucalipto citriodora, cupiúba e jatobá.

- As relações obtidas entre os ensaios com ultra-som (E_d) e os ensaios destrutivos (MOE, f_{c0} e E_{c0}), utilizando-se peças com dimensão estrutural e corpos-de-prova, estão de acordo com a literatura e apresentaram coeficientes de determinação significativos, para todas as espécies avaliadas, demonstrando assim que o método de ultra-som pode ser utilizado para a estimativa das propriedades mecânicas de coníferas e dicotiledôneas com confiabilidade.

- Com base nos resultados obtidos para as propriedades de resistência e elasticidade, sugere-se que a técnica de ultra-som é mais indicada para o agrupamento e classificação de peças estruturais de um dado lote, sendo que para a caracterização destas propriedades torna-se necessária a consideração de ensaios destrutivos.

- Os resultados sobre a influência do teor de umidade indicaram uma tendência de diminuição da velocidade com o aumento do teor de umidade, em ambas as direções de propagação da onda ultra-sônica (paralela e perpendicular às fibras), para todas as espécies estudadas. A influência do teor de umidade ocorreu de modo diferente acima e abaixo do ponto de saturação, sendo mais significativa no segundo caso. A partir de regressões em ambos os trechos foi possível a obtenção do ponto de saturação das fibras para as espécies em estudo.

- Os resultados obtidos para a determinação do teor de umidade utilizando pinos com diferentes revestimentos indicaram uma melhor adequação dos pinos com revestimento de prata em relação ao pino de inox. Este comportamento mais adequando do pino de prata pode ser explicado em função da maior resistividade elétrica do pino de aço, o que dificulta o transporte de cargas elétricas.

- A expressão $V_{LL,\,12\%} = V_{LL,\,U\%} - \rho_{ap,\,12\%} + 21\,U + 650$ pode ser empregada como um subsídio para a inclusão de ensaios não-destrutivos na normalização brasileira para projeto de estruturas de madeira, pois permite a correção dos valores da velocidade obtida em ensaios de ultra-som, em função do teor de umidade e da densidade da peça.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro.

BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. (2001). Ensaios não-destrutivos aplicados aos produtos à base de madeira: a situação brasileira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 20. São Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.

BARADIT, E.; ROZAS, C.; VARGAS, G. (1998). Aplicación de ultrasonido en la evaluación de madera de pinus radiata. **Maderas: Ciencia y Tecnologia.** v. 1, p.27-33.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. (2000). O uso do ultra-som na determinação de constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.

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

BARTHOLOMEU, A., GONÇALVES, R., BUCUR, V. (2003). Dispersion of ultrasonic waves in eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. **Scientia Forestalis**. n. 63, p. 235-240.

BEALL, F. C. (2002). Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**. v. 36, p. 197-212.

BERNDT, H., SCHNIEWIND, A. P., JOHNSON, G. C. (2000). Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much. 12 th Symposium NDT of Wood, University of Western Hungary, Sopron. **Proceedings**. p. 57-65.

BLASS, H.; GARD, W. (1994). Machine strength grading of timber. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Austrália. **Proceedings**. v.2, p.598-603.

BLITZ, J.; SIMPSON, G. (1996). **Ultrasonic methods of non-destructive testing**. Chapman & Hall.

BUCUR, V. (1995). **Acoustics of wood**. New York, CRC Press Inc.

BUCUR, V. (2003). **Nondestructive characterization and imaging of wood**. New York, Springer-Verlag.

BUCUR, V.; BÖHNKE, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics.** v. 32, n. 5, p.385-390.

BUCUR, V.; SAREM, M. (1992). An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood.In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos. **Anais**. São Carlos, v. 2, p.127-138.

BUCUR, V.; FEENEY, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. **Ultrasonics.** v. 30, n.2, p.76-81.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. (2003). Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **Engenharia Civil**. Guimarães. Portugal. v. 1, n. 16, p. 27-37.

CARREIRA, M. R. (2003). **Critérios para classificação visual de peças de pinus sp**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC,USP.

DIVOS, F.; SZALAI, L. (2002). Tree evaluation by acoustic tomography. 13 th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of California. USA. **Proceedings**. p. 251– 256.

ERIKSON, R. G.; GORMAN, T. M.; GREEN D. W.; GRAHAM, D. (2000). Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal.** v. 50, n. 7/8, p.59-65.

EVANS, R.; ILIC, J. (2001). Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. **Forest Products Journal**. v. 51, n. 3, p. 53-57.

FENGEL, D.; WEGENER, G. (1984). **Wood: chemestry, ultrastruture, reactions.** Berlin, Walter de Gruyter, 613 p.

FREITAS, R. R. (2004). **Classificação de peças estruturais de pinus spp pela MSR (Machine stress rate)**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC,USP.

GABRIEL, M. S. C. (2000). **O uso do método de ondas de tensão na qualificação mecânica da madeira serrada de *Pinus taeda L*.** Botucatu, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. (1985). **Secagem racional da madeira**. Nobel. 112 p.

GERHARDS, C. C. (1982). Longitudinal stress waves for lumbre stress grading: factors affecting applications: state of the art. **Forest Products Journal**. v. 32, n. 2, p. 20-25.

HALABE, U. B.; BIDIGALU, G. M.; GANGARAO, H. V. S.; ROSS, R. J. (1995). Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. **Materials Evaluation.** p. 1013-1018.

EESC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

HALABE, U. B.; GANGARAO, H. V. S.; PETRO, S. H.; HOTA, V. R. (1996). Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. **Materials Evaluation**. p.314-322.

HEARMON, R. F. S. (1966). Theory of the vibration testing of wood. **Forest Products Journal**. v. 16, n. 8, p. 29-40.

HELLMEISTER, L. A. V. (2003). **Aplicação do método de ondas de tensão na caracterização mecânica de toras, pranchas e tábuas de *Pinus taeda* L.** Botucatu, 161p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.

JAMES, W. L. (1961). Effect of temperature and moisture content on internal friction and speed of sound in Douglas-fir. **Forest Products Journal**. v. 11, n. 9, p. 383-390.

JAMES, W. L.; BOONE, R. S.; GALLIGAN, W. L. (1982). Using speed of sound in wood to monitor drying in a kiln. **Forest Products Journal.** v.32, n. 9, p.27-34.

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

JARA, E. P. (1987). **Determinação do ponto de saturação das fibras de madeiras utilizadas no Brasil.** São Paulo. Boletim ABPM n. 58, 6p.

KABIR, M. F.; SIDEC, H. A. A.; DAUD, W. M.; KHALID, K. (1997). Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. **Holzforschung.** v. 51, n.3, p.263-267.

KABIR, M. F.; SCHMOLDT, D. L.; SCHAFER, M. E. (2002). Time domain ultrasonic signal characterization for defects in thin unsurfaced hardwood lumber. **Wood and Fiber Science**. v. 34, n. 1, p. 165-182.

KANG, H.; BOOKER, R. E. (2002a). Variation of stress wave velocity with the MC and temperature. **Wood and Science Technology**. v. 36, p. 41-54.

KANG, H.; BOOKER, R. E. (2002b). The characteristics of ultrasonic stress wave transmitted through wood during drying. In: XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. University of California, Berkeley Campus, USA. **Proceedings**. p. 209-212.

KARSULOVIC, J. T.; LEÓN, L. A.; GAETE, L. (2000). Ultrasonic detection of knots and annual ring orientation in pinus radiata lumber. **Wood and Fiber Science**. v. 32, n.3, p. 278-286.

MACHADO, J. M. R. S. (2000). **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo *(Pinus pinaster Ait.)* por meio de ultra-sons.** Lisboa, 265p. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa.

MATOS, J. L. M. (1997). **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 117p. Tese (Doutorado) – Univ. Federal de Paraná.

McDONALD, K. A.; FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M. (1990). **Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs.** Madison, WI: U.S. Dep. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 137-147.

MELO, J. E. (1984). **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira**. São Carlos, 84 p. Dissertação (Mestrado) - EESC, USP.

MISHIRO, A. (1995). Ultrasonic velocity in wood and its moisture content. Effects of moisture content gradients on ultrasonic velocity in wood. **Mokuzai Gakkaishi**. v.41, n.6, p.1086-1092.

NEPOMUCENO, L. X. (1968). **Acústica técnica.** São Paulo, Etegil.

NICOLOTTI, G., SOCCO, L. V., MARTINIS, R., GODIO, A., SAMBUELLI, L. (2003). Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**. v. 29, n. 2, p. 66-78.

NOGUEIRA, M. (2003). **Determinação de módulos de elasticidade à compressão de madeira de *Pinus taeda L.* com o uso de ultra-som.** Botucatu, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.

OLIVEIRA, F. G. R. (2001). **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não-destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC,USP.

OLIVEIRA, F. G. R., CAMPOS, J. A. O.; SALES, A. (2002). Ultrasonic measurements in brazilian hardwood. **Materials Research.** v. 5, n. 1, p. 51-55.

OLIVEIRA, F. G. R., CANDIAN, M., LUCCHETTE, F. F., SALGON, J. L., SALES, A. (2005). A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (Goupia glabra). **Building and Environment.** v. 40, n. 2, p. 297-300.

OLIVITO, R. S. (1996). Ultrasonic measurements in wood. **Materials Evaluation**. April, p. 514-517.

PELIZAN, T. R. (2004). **Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som.** São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP.

PELLERIN, R. F. (1965). A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. **Forest Products Journal**. v. 14, n. 13, p. 93-101.

PUCCINI, C. T.; GONÇALVES, R.; BALLARIN, A. W. (2001). Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de pinho do paraná em função do comprimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 20. São Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA INFORMAÇÃO

PUCCINI, C. T. (2002). **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando ultra-som.** Campinas, 72 p. Tese (Doutorado) – UNICAMP.

QUOIRIN, N. S. R. (2004). **Diagnóstico de amostras de madeira por tomografia de raios X.** Curitiba. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

ROMERO, I. J. B. (1996). **Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del módulo de elasticidad de la madera de pinus radiata D. Don. por ultrasonido.** Concepción, 60p. Dissertação – Universidad del Bio Bio.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. (1991). NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber. **Forest Products Journal**. v. 41, n. 6, p. 57-59.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. (1994). **Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review.** Gen. Tech. Report. FPL – GTR – 70. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 40 p.

ROSS, R. J.; FULLER, J. J.; DRAMM, J. R. (1995). Nondestructive evaluation of green defect-prone red oak lumber: a pilot study. **Forest Products Journal**. v. 45, n. 11/12, p. 51-52.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. (1998). Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal.** v. 48, n.1, p. 14-19.

ROSS, R. J. (1999). Using sound to evaluate standing timber. **Forest Produts Journal**. Review. p. 43-44.

ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. (2000). Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. In: XII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. **Proceedings**. Hungary, Sopron. p. 155-163.

SAKAI, H.; MINAMISAWA, A.; TAKAGI, K. (1990). Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. **Ultrasonics**. v. 28. p. 382-385.

SANDOZ, J. L. (1993). Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. **Wood Science and Technology**. v. 27. p.373-380.

SANDOZ, J. L., BENOIT, Y. (2002). AUS timber grading: industrial applications. In: XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. University of California, Berkeley Campus, USA. **Proceedings.** p. 137–142.

SANDOZ, J. L. (2004). Industrial ultrasonic grading for multi-glued laminated timber. In: 8th WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING. Lahti, Finland. **Proceedings.** Arquivo digital.

SASAKI, Y.; HASEGAWA, M. (2003). Effects of cyclic loading on velocities of ultrasonic waves propagating through wood. **Wood and Fiber Science**. v. 35, n. 1, p. 110-119.

SCHMOLDT, D. L.; DUKE JR, J. C.; MORRONE, M.; JENNINGS, C. M. (1994). Application of ultrasound nondestructive evaluation to grading pallet parts. In: IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. Madison, Wisconsin, USA. **Proceedings**. p. 183-190.

SIMPSON, W. T; WANG, X. (2001). Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**. v. 51, n.10, p. 51-54.

SIMPSON, W. T. (1975). Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. **Forest Products Journal**. v. 7, n. 3, p. 247-255.

SIMPSON, W. T. (1998). Relationship between speed of sound and moisture content of red oak and hard maple during drying. **Wood and Fiber Science**. v.30, n.4, p.405-413.

VARY, A. (1987). **Materials analysis by ultrasonics.** New Jersey, Noyes Data Corporation.

WANG, X.; CHUANG, S. (2000). Experimental data correction of the dynamic elastic moduli, velocity and density of solid wood as a function of moisture content above the fiber saturation point. **Holzforschung**. v.54, p.309-314.

WANG, X., ROSS, R. J., McCLELLAN, M., BARBOUR, R. J., EEICKSON, J. R., FORSMAN, J. W., McGINNIS, G. D. (2001). Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood and Fiber Science**. v. 33, n. 4, p. 522-533.

WANG, X., ROSS, R. J., BRASHAW, B. K., ERICKSON, J. R., FORSMAN, J. W., PELLERIN, R. (2002). Diameter effect on stress wave evaluation of modulus of elasticity of logs. In: XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. University of California, Berkeley Campus, USA. **Proceedings**. p. 149-156.

WANG, S. Y.; LIN, C. J.; CHIU, C. M. (2003). The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. **Holzforschung**. v.57, n. 5, p. 547-552.

WANG, X., DIVOS, F., PILON, C., BRASHAW, B. K., ROSS, R. J., PELLERIN, R. F. (2004). **Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools**. Gen. Tech. Report. FPL – GTR – 147. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

WEAST, R. C. (1984). **Handbook of Chemistry and Physics**. 64th edition. CRC Press. Boca Raton, Florida.