

CARLOS AUGUSTO PUEHRINGER

**“USO DE EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO PARA  
AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ÁRVORES  
E DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L.”**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de “Mestre em Ciências Florestais”, Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Jorge L. M. de Matos

CURITIBA  
2002



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias – Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**  
Av. Lothário Meissner, 3400 – Jardim Botânico – CAMPUS III  
80210-170 - CURITIBA - Paraná  
Tel. (41) 360.4212 - Fax. (41) 360.4211 - <http://www.floresta.ufpr.br/poe-graduacao>  
e-mail: [pinheiro@floresta.ufpr.br](mailto:pinheiro@floresta.ufpr.br)

## PARECER

Defesa nº 482

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o mestrando **CARLOS AUGUSTO PUEHRINGER** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "USO DE EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO PARA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ÁRVORES E DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L.", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do acadêmico, habilitando-o ao título de *Mestre em Ciências Florestais*, na área de concentração em *Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais*.

  
**Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos**

Professor e pesquisador do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal  
Orientador e presidente da banca examinadora

  
**Dr. Lourival Mann Mendes**

Professor e pesquisador da Universidade Federal de Lavras  
Primeiro examinador

  
**Dr. Setsuo Iwakiri**

Professor e pesquisador do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal  
Segundo examinador

Curitiba, 30 de julho de 2002.



**Nivaldo Eduardo Rizzi**

Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

**Franklin Galvão**

Vice-coordenador

## ABSTRACT

New technologies like non destructive evaluation (NDE) - acoustic waves can be used to access wood and other materials quality. The objective of this work was evaluate the NDE acoustic waves method to evaluate living trees, logs, veneer and boards of *Pinus taeda* using Metriguard Stress Wave Timer, model 239A. The final tests are made with 25 trees. By the pre tests using 13 trees, some guidelines were produced: an apparatus was built and used to standardizing the impact strength; in the living trees the impact wave was applied after removing the bark, in three directions: horizontal, diagonal, and vertical one. In the logs, the stress wave was applied through its length parallel near the bark and near the pith, and crossing the pith. The veneer wave measurements were made through its length and through its width, in the middle section of both positions. In the boards the wave measurements were made only at the length direction. At pre testing occasion, veneers were qualified by the Veneer Lumber Factory workers in A and B quality categories. The best correlation values at 95% confidence level were: 79% between veneer quality A volume and stress time propagation in living trees, at the breast height diameter (BHD), 84% by stress time propagation in veneer quality B length direction and 2,6 m long logs, near the pith application of stress wave; and 92% between wave speed propagation into veneer quality A, width direction, and 2,6 long logs, near the pith application of stress wave. The final tests show that the better way to apply the stress wave is, in living trees, through the wood in diagonal direction. To the log evaluation, the stress wave was best applied through its length crossing the pith. Conclusion is that non destructive evaluation works for wood quality assessment in living trees, with correlation with its products: logs, veneers and boards. Recommended complementary studies must be developed to identify moisture influence at the stress wave measurements, using this same material (veneers and boards) after drying.

## RESUMO

A aplicação de tecnologias inovadoras como a de emissão de ondas de tensão na avaliação da qualidade da madeira, pode transformar em material de maior valor econômico para outros setores, as árvores plantadas comercialmente para produção de fibras, ampliando substancialmente o mercado para a madeira. Como objetivo deste trabalho tem-se: Avaliar a eficiência da utilização do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão na qualificação de árvores, toras, tábuas e lâminas de madeira de *Pinus taeda*. Foram utilizadas 25 árvores para realização das medidas efetivas de propagação de ondas acústicas com o aparelho Stress Wave Timer METRIGUARD, modelo 239A. Adotou-se com base na fase preliminar do experimento (13 árvores) os seguintes procedimentos: construção e utilização de aparato com objetivo de padronizar a força de impacto para emissão da onda de tensão; realização da aplicação e recepção das ondas de tensão nas árvores em pé na altura do DAP diretamente na madeira, procedendo à prévia retirada da casca; realização da tomada da onda de tensão em três posições: “horizontal”, “diagonal” e “vertical”. Nas toras traçadas, procedeu-se à aplicação da onda de tensão no sentido de seu comprimento (longitudinal), em duas faixas: próximo à medula, e próximo à casca, e ainda através da medula. A tomada nas lâminas das leituras de propagação das ondas de tensão deu-se nos sentidos longitudinal e transversal às fibras, posicionando os transdutores no ponto médio do comprimento e largura das mesmas. A tomada, nas tábuas, das leituras de propagação das ondas de tensão realizou-se no sentido longitudinal às fibras. Na fase 1 as lâminas foram classificadas visualmente pelas funcionárias da laminadora em duas classes: A e B. Os melhores valores obtidos a um nível de significância de 95%, foram: de 79% entre as variáveis volume de lâminas classe A e a propagação da onda de tensão na árvore em pé, na altura do DAP; de - 84% entre as leituras de tempo de propagação da onda de tensão nas lâminas classe B no sentido longitudinal e nas toras de 2,6 m na região de aplicação da onda próximo à medula; e ainda de - 92% entre as velocidades de propagação da onda nas lâminas classe A no sentido transversal às fibras e nas toras de 2,6 m na região de aplicação da onda próximo à medula. Na fase 2, com relação à aplicação do impacto na árvore em pé do martelo emissor da onda de tensão, a melhor alternativa é fazê-lo no sentido diagonal por este apresentar menor coeficiente de variação, e conseqüentemente medidas mais homogêneas. Nas toras, a emissão da onda de tensão pelo impacto é recomendada no sentido cruzado, através da medula, entre a emissão e recepção da onda. Concluiu-se que há eficiência no sortimento em classes de qualidade das árvores primeiramente, pelo método não destrutivo, resultando na correlação entre estas e seus produtos: toras, tábuas e lâminas. Recomenda-se ainda que seja realizado o estudo com o material após secagem (tábuas e lâminas), para verificar a influência da umidade neste processo e método de avaliação de qualidade da madeira.

**Aos meus familiares,**

**À minha noiva,**

**DEDICO.**

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os que direta ou indiretamente permitiram e colaboraram para a construção deste trabalho.

Ao Professor Dr Jorge Luis Monteiro de Matos pela orientação, amizade e valiosos ensinamentos transmitidos.

Aos Professores Dr. Setsuo Iwakiri e Dr. Lourival Marin Mendes pela orientação.

Aos Funcionários e Professores do Curso de Engenharia Florestal e da Coordenação do Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

À Empresa PISA NORSKE SKOG, na pessoa da Engenheira Vanilda Rosangela de Souza Shimoyama pelo apoio e doação do material utilizado neste presente trabalho.

Às empresas localizadas no município de Sengés, no Estado do Paraná: serraria AVS Madeiras Ltda, na pessoa do Sr Alvaro Vitorino dos Santos, e Laminadora 3R Ltda, que permitiram a utilização de suas instalações e pessoal para o processamento do material

Aos Graduandos em Engenharia Florestal Leopoldo Karman Saldanha e Dayane Gloria Fagundes Nogueira pelo auxílio no trabalho e na coleta das informações de campo.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo auxílio financeiro.

Aos amigos sinceros pelas horas de seu precioso tempo dedicadas a enriquecer este trabalho.

## **BIOGRAFIA**

CARLOS AUGUSTO PUEHRINGER, filho de Carlos e Elisabete Puehringer, nasceu em São Bernardo do Campo, Estado de São Paulo, em 9 de Julho de 1976.

Concluiu os estudos de primeiro grau em 1990 na Escola Estadual de Primeiro Grau Profª Ilka Jotta Germano, e concluiu o segundo grau em 1993 na Escola Estadual de Segundo Grau Dr. Carlos Augusto de Freitas Villalva Júnior, ambas na cidade de São Paulo.

Em Março de 1995 iniciou os estudos de graduação no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, concluindo-o em Dezembro de 1999.

Realizou em Novembro de 1999 o exame seletivo para ingressar no Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal da referida Universidade, tendo a honra de conseguir a aprovação em primeiro lugar entre os candidatos ao mestrado.

Realizou no ano de 2001, paralelamente ao curso de Mestrado em Engenharia Florestal, a Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho da Universidade Federal do Paraná, concluindo-a em Março de 2002.

Concluiu o presente trabalho em Março de 2002.

# SUMÁRIO

PÁGINA

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Revisão de Literatura .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Variabilidade das propriedades da madeira .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2</b>	<b>Propriedades físicas da madeira .....</b>	<b>5</b>
3.2.1	Contração e inchamento.....	5
<b>3.3</b>	<b>Propriedades mecânicas da madeira .....</b>	<b>6</b>
3.3.1	Módulo de Elasticidade - MOE.....	6
3.3.2	Módulo de ruptura - MOR.....	8
<b>3.4</b>	<b>Fatores que afetam as propriedades mecânicas da madeira .....</b>	<b>10</b>
3.4.1	Fatores inerentes a madeira.....	10
3.4.1.1	Teor de umidade.....	10
3.4.1.2	Espécie.....	10
3.4.1.3	Densidade .....	11
3.4.1.3.1	Densidade básica .....	11
3.4.1.4	Posição na árvore .....	12
3.4.1.5	Porcentagem de lenho juvenil e lenho adulto .....	13
3.4.1.6	Largura e uniformidade dos anéis de crescimento.....	13
3.4.1.7	Porcentagem de lenho tardio.....	14
3.4.1.8	Ângulo microfibrilar .....	15
3.4.1.9	Defeitos: nós, rachaduras e grã .....	16
3.4.1.10	Lenho de compressão .....	16
3.4.1.11	Grã espiralada .....	17
3.4.1.12	Extrativos .....	17
3.4.1.13	Cerne.....	18
3.4.2	Fatores inerentes ao meio.....	18
3.4.2.1	Espaçamento de plantio.....	18
3.4.2.2	Sítio de crescimento .....	18
3.4.2.3	Localização geográfica.....	19
3.4.2.4	Manejo e práticas silviculturais .....	19
3.4.2.4.1	Desbaste .....	19
3.4.2.4.2	Poda .....	20
3.4.2.4.3	Adubação .....	21
3.4.2.4.4	Irrigação e drenagem .....	22
3.4.2.4.5	Roçada .....	23



<b>3.5</b>	<b>Técnicas tradicionais de determinação de propriedades mecânicas da madeira.....</b>	<b>23</b>
3.5.1	Ensaio destrutivo .....	23
3.5.2	Amostragem .....	24
<b>3.6</b>	<b>Ensaio não destrutivo.....</b>	<b>24</b>
3.6.1.1	Conceito.....	25
3.6.1.2	O papel dos ensaios não destrutivos em assegurar o uso inteligente dos recursos florestais.....	26
3.6.1.3	O uso do método não destrutivo na avaliação da árvore.....	28
3.6.1.4	Madeira sólida.....	29
3.6.1.5	Painéis laminados.....	30
3.6.1.6	Painéis compostos de madeira .....	30
3.6.2	Tipos de aplicação dos ensaios não destrutivos .....	31
3.6.2.1	Pesquisa básica e coleta de dados .....	31
3.6.2.2	Avaliação da qualidade de produtos .....	32
3.6.2.3	Predição da estabilidade química.....	33
3.6.2.4	Avaliação de componentes estruturais “in-situ” .....	34
3.6.2.5	Métodos de avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas da madeira .....	35
3.6.2.6	Ondas sonoras .....	36
3.6.2.7	Ultra som .....	37
3.6.2.8	Observações Visuais .....	37
3.6.2.9	Métodos pseudo não destrutivos .....	38
3.6.2.10	Acústicos.....	39
3.6.2.10.1	Ondas sonoras de impacto .....	39
3.6.2.10.2	Ultra som.....	40
<b>3.7</b>	<b>Experiências brasileiras no uso de técnicas de avaliação não destrutiva de madeiras .....</b>	<b>42</b>
3.7.1	Métodos mecânicos .....	42
3.7.2	Métodos acústicos .....	43
<b>3.8</b>	<b>Teoria da propagação de ondas de tensão em meio elástico.....</b>	<b>44</b>
3.8.1	Madeira como meio elástico .....	44
3.8.2	Determinação do módulo dinâmico de elasticidade.....	45
3.8.2.1	Método acústico .....	45
3.8.2.2	Método mecânico .....	46
<b>4</b>	<b>Materiais e métodos.....</b>	<b>47</b>
4.1	Características do material estudado .....	47
4.2	Metodologia de avaliação não destrutiva .....	47
4.3	Seleção preliminar do método de aplicação de ondas de tensão em árvores em pé .....	49
4.4	Avaliação efetiva da propagação de ondas de tensão .....	50

4.4.1	Em árvores em pé .....	50
4.4.2	Seleção do método de aplicação de ondas de tensão nas toras .....	51
4.4.3	Avaliação efetiva em toras .....	52
4.4.4	Avaliação efetiva em lâminas .....	53
4.4.5	Avaliação efetiva nas tábuas .....	54
<b>4.5</b>	<b>Procedimentos de conversão do material .....</b>	<b>54</b>
4.5.1	Derrubada e retirada das árvores do talhão .....	54
4.5.2	Seccionamento das árvores .....	55
4.5.3	Identificação do material .....	55
4.5.4	Conversão em lâminas .....	56
4.5.5	Conversão em tábuas .....	56
4.5.6	Classificação das lâminas .....	56
<b>5</b>	<b><i>Resultados e discussão</i> .....</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>Avaliação preliminar do tempo de propagação em árvores em pé, toras, lâminas e tábuas.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>Avaliação efetiva da propagação das ondas de tensão.....</b>	<b>61</b>
5.2.1	Para as árvores em pé .....	61
5.2.2	Para as primeiras toras .....	62
5.2.3	Para as segundas toras .....	62
5.2.4	Para as lâminas .....	63
5.2.5	Para as tábuas .....	63
<b>6</b>	<b><i>Conclusões</i> .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b><i>Recomendações</i> .....</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b><i>Referências bibliográficas</i> .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Stress Wave Timer	48
1	Martelo de impacto Stress Wave Timer	48
1	Garras e Pêndulo Stress Wave Timer	48
1	Transdutores Stress Wave Timer	48
2	Utilização Stress Wave Timer em árvores em pé	49
3	Pontos de emissão e recepção das ondas de tensão nas árvores	51
3a	Pontos de emissão e recepção das ondas de tensão nas toras	52
4	Retirada dos discos e toras	53
5	Utilização Stress Wave Timer em lâminas	54

## LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁGINA
1	Tempo de propagação de ondas de tensão em toras	57
2	Tempo de propagação de ondas de tensão por posição	58
3	Tempo de propagação de ondas de tensão por aplicação	58
4	Tempo de propagação de ondas de tensão lâminas	59
5	Rendimento em lâminas obtidas das árvores da Fase 1	60
6	Correlações das médias de leituras em micro-segundos	60
7	Tempo de propagação de onda de tensão nas árvores em pé	61
8	Tempo de propagação de onda de tensão nas primeiras toras	62
9	Tempo de propagação de onda de tensão nas segundas toras	62
10	Tempo de propagação de ondas de tensão por posição	63
11	Tempo de propagação de ondas de tensão por posição	63
12	Correlações das médias de leituras em micro-segundos	64
13	Correlações da velocidade de propagação em m/s	65
14	Correlações das médias de velocidades m/s	66
15	Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, densidade da árvore	67
16	Correlações entre módulos de elasticidade individuais	68

# 1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas tecnologias, e aprimoramento das existentes, observa-se uma mudança no conceito de aproveitamento da madeira como matéria-prima. Partimos de um conceito inicial em que as grandes empresas do setor de papel e celulose plantavam com o objetivo único de produção de cavacos, para uma nova mentalidade de aproveitamento que conhecemos por usos múltiplos da madeira.

Esta mudança ocorreu pela escassez da matéria-prima para utilização na indústria madeireira de serrados e, especialmente, de movelaria que utiliza madeiras de espécies nativas, com crescentes complicações de obtenção, seja por restrições legais, seja pela distância de transporte aos mercados consumidores.

Atualmente a avaliação não destrutiva da madeira já é amplamente aplicada na Europa e nos Estados Unidos, apresentando bons resultados e significativa economia financeira, transformando-se em mais uma ferramenta para o melhor aproveitamento desta matéria-prima.

Historicamente são utilizados testes destrutivos com a confecção de corpos de prova a partir de amostras das madeiras que se pretende determinar os valores de resistência. Os valores de MOE e MOR (módulo de elasticidade e módulo de ruptura, respectivamente) obtidos em laboratório são admitidos como representativos da madeira amostrada; porém com a adoção de coeficientes de segurança que promovem o super dimensionamento das peças.

A aplicação dessas tecnologias inovadoras na avaliação da qualidade da madeira, pode transformar em material de maior valor econômico para outros setores, as árvores plantadas comercialmente para produção de fibras, ampliando substancialmente o mercado para a madeira.

Para a realidade brasileira esta ferramenta pode ser de grande utilidade trazendo também um melhor aproveitamento através do sortimento de toras, pré classificação de produtos como tábuas e lâminas fornecendo subsídios para a

qualificação dos produtos industrializados como os painéis, vigas coladas, entre outros.

De nada serve a variedade de materiais existentes na natureza se não se pode conhecer as características físico-mecânicas que determinam seus limites e indicam suas utilizações. Para tanto existem os mais variados procedimentos normalizados para caracterizar e definir parâmetros de comparação entre os diferentes materiais.

Esses procedimentos são conduzidos tradicionalmente com a confecção de corpos de prova do material que se deseja avaliar, sendo estes livres de defeitos, e no caso da madeira, com características como massa específica e umidade bem definidas.

A confecção dos corpos de prova além de demandar tempo, conduz a disponibilização de peças que são retiradas da linha de produção, tomadas como amostras cujos valores serão considerados como representativos do lote.

Para materiais homogêneos como o aço, salvo problemas de processo de fabricação, as amostras são altamente representativas e de baixa variabilidade.

No caso da madeira, cujo processo de formação depende de um conjunto de variáveis ambientais e características genéticas, as amostras são retiradas num intervalo de maiores amplitudes de valores, o que leva por fim à adoção de limites de segurança que conduzem ao super dimensionamento de estruturas, ou descarte de um lote inteiro de peças.

O desperdício é um fator severamente combatido nas empresas de maneira geral, e não deixa de o ser nas empresas florestais que se inserem no cenário econômico atual caracterizado pela competição entre empresas locais de pequeno porte e empresas multinacionais que se utilizam da mesma fonte de recursos: a árvore.

São grandes as dificuldades do setor que utiliza a madeira na forma de tábuas ou peças maciças, pois não podem mais contar com a fartura dos tempos de exploração das florestas naturais, de onde se retiravam toras de grandes dimensões de árvores centenárias, capazes de produzir madeira de excelente qualidade e trabalhabilidade.

Não são menores as dificuldades do setor papelero que procura alternativas para aumentar a segurança frente ao mercado internacional, que rege o preço da polpa e do papel produzidos, buscando uma independência parcial aplicando o conceito de usos múltiplos para seus plantios de *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*.

A estas dificuldades somam-se os povoamentos de *Pinus* e *Eucalyptus* do Brasil, provenientes dos incentivos fiscais da década de 1960, plantados respectivamente para fornecer matéria-prima para a indústria de papel e celulose e para a produção de energia, sob a forma de carvão, que sem o adequado manejo e trato silvicultural desenvolveram-se em materiais sem uniformidade e qualidade definidas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da utilização do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão na qualificação de árvores, toras, tábuas e lâminas de madeira de *Pinus taeda*.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a metodologia mais adequada para aplicação e medição das ondas de tensão em árvores em pé e toras.
- Selecionar árvores, toras, tábuas e lâminas de madeira de *Pinus taeda* em classes de qualidade, a partir de método de avaliação não destrutivo.
- Estabelecer relação entre a velocidade de propagação de ondas de tensão em árvores e toras e os rendimentos em classes de qualidade e volumes de tábuas e lâminas.
- Avaliar a eficiência da classificação de toras pelo método não destrutivo e a correlação entre estas e seus produtos: tábuas e lâminas.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 VARIABILIDADE DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

As propriedades mecânicas e elásticas da madeira podem fornecer, da mesma forma que as propriedades físicas, informações muito valiosas para a industrialização (fabricação de compensados, aglomerados, móveis, pontes, portas, etc). Considerando que no Brasil crescem aproximadamente 4000 diferentes espécies madeireiras, das quais utilizam-se perto de 50, e que mais de 300 já foram pesquisadas, percebe-se a importância para o país, da pesquisa das espécies ainda desconhecidas para possibilitar o uso racional deste patrimônio natural.

#### 3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

##### 3.2.1 Contração e inchamento

Como a madeira é um material higroscópico ela tende a entrar em equilíbrio de temperatura e umidade com o meio em que se encontra, e como é anisotrópico, apresenta diferentes taxas de contração e inchamento à medida que perde ou ganha água. Como são efeitos antagônicos, os conceitos aplicados a contração podem ser aplicados ao inchamento.

A contração longitudinal é o defeito mais freqüentemente associado à madeira juvenil. Apesar de algumas vezes a madeira expandir nos primeiros estágios da secagem, a maioria das madeiras contrai longitudinalmente a medida que a umidade lhes é retirada. Se há presença de madeira de reação, a contração longitudinal será acentuada.

A contração da madeira juvenil está grandemente relacionada com a densidade. Quanto menor a densidade, maior a contração longitudinal da madeira; e quanto maior a densidade, maior a contração radial, tangencial, e volumétrica.



O lenho juvenil de baixa densidade contrai em maior quantidade que o lenho outonal de maior densidade da madeira juvenil. A menor densidade do lenho primaveril pode ser atribuída aos traqueídeos mais curtos com maiores diâmetros e paredes mais finas. Como a umidade é retirada dos espaços entre as microfibrilas e finalmente da matriz celulósica, a contração anisotrópica aumenta progressivamente. O ângulo fibrilar por sua vez, é negativamente relacionado tanto com o tamanho quanto com a espessura da parede do traqueídeo.

Não há uma propriedade facilmente mensurável relacionada à contração longitudinal, e da mesma forma, não há características de crescimento para identificar madeiras propensas a empenar. Apesar disso posto, evidências sugerem que a contração está mais relacionada com o ângulo fibrilar. (LISBOA, 1993).

### 3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades mecânicas e elásticas da madeira como a dureza ou as diversas formas de resistência, podem fornecer assim como as propriedades físicas, informações muito valiosas para sua industrialização. (KOLLMANN, 1950).

#### 3.3.1 Módulo de Elasticidade - MOE

Um corpo sólido sujeito a uma determinada carga sofre uma deformação. Quando esta carga é removida, esse corpo tem a tendência de retornar à forma e posição originais. Essa tendência é denominada elasticidade.

A propriedade elástica é característica dos corpos sólidos abaixo de um limite de esforços. Acima deste limite ocorrerão deformações plásticas, até a ruptura. Um corpo sólido é chamado elástico quando a deformação produzida devido à aplicação de carga abaixo do limite proporcional é completamente anulada após o

relaxamento desta carga. Além do limite proporcional as deformações plásticas sofridas pelo material são irreversíveis. (KOLLMAN, 1950).

Na prática o limite proporcional de um material é determinado pelo diagrama “carga-deformação”. O ponto em que a linha do diagrama começa a curvar-se é o limite proporcional.

A relação entre as cargas aplicadas e as deformações correspondentes até o limite proporcional é expressa pela Lei de Hooke:

$$E = \alpha \sigma^n$$

Onde:

E = deformação relativa em mm

$\sigma$  = tensão em N/mm<sup>2</sup>

$\alpha$  = coeficiente de deformação

n = constante específica do material, que no caso da madeira é igual a 1.

Nas literaturas técnicas utiliza-se o valor recíproco  $1/\alpha = E$ , onde E é chamado módulo de elasticidade ou módulo de Young, que expressa o esforço hipotético pelo qual um corpo de 1 cm<sup>2</sup> de área transversal pode ser estendido ao dobro de seu comprimento original. Na realidade o valor E é impossível de ser atingido, pois ocorre antes a ruptura do material. Em testes de flexão estática a determinação do valor do módulo de elasticidade pode ser feita com a parte da linha descrita pelas avaliações carga-deformação, onde o ponto de inflexão registraria a carga e a deformação no limite de proporcionalidade, ou limite elástico.

A aptidão de uma madeira a resistir à deformação imposta por determinada carga é definida como rigidez da madeira. Ela é expressa numericamente através do módulo de elasticidade, e em ensaios de flexão estática com dois apoios e um ponto de aplicação de carga, este valor é obtido através da equação:

$$MOE = (P' \times L^3) / (4 \times d \times b \times h^3)$$

Onde:

MOE = módulo de elasticidade (N/mm<sup>2</sup>)

P' = carga no limite proporcional (N)

L = comprimento do vão (mm)

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional (mm)

b = largura do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

Para o cálculo do módulo de elasticidade para peças de dimensões estruturais, onde geralmente utiliza-se de dois pontos de aplicação de carga dispostos simetricamente em relação ao centro do corpo de prova, a equação seria:

$$MOE = [(P' \times a) / (4 \times d \times b \times h^3)] \times (3L^2 - 4a^2)$$

Onde:

a = distância entre o ponto de aplicação de carga ao apoio mais próximo (mm).

### 3.3.2 Módulo de ruptura - MOR

A resistência de um material é definida como o esforço máximo que ocorre antes ou no momento da ruptura. Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico e a resistência máxima, no entanto essa faixa de resistência chamada inelástica não é considerada na aplicação da teoria de resistência para vigas estruturais de madeira, por ser esta faixa muito variável com relação a outros materiais de construção como o aço. Testes em corpos de prova da mesma espécie e dimensões podem resultar numa considerável variação em valores de resistência.

A resistência de uma viga de madeira à ruptura é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do Módulo de Ruptura, que expressa o esforço máximo nas fibras verificado nos extremos superior e inferior da seção transversal

da viga. Os valores dos Módulos de Ruptura são utilizados para a obtenção de tensões admissíveis para as diversas formas de utilização da madeira.

O Módulo de Ruptura pode ser obtido em testes de flexão estática, com viga apoiada simples e com aplicação de carga no centro do vão, utilizando-se da fórmula:

$$\text{MOR} = (1,5 \times P \times L) / (b \times h^2)$$

Onde:

MOR = Módulo de Ruptura (N/mm<sup>2</sup>);

P = carga máxima (N);

L = distância entre apoios (mm);

b = largura da viga (mm);

h = altura da viga (mm).

Para o caso de dois pontos de aplicação de carga sobre a viga, teríamos:

$$\text{MOR} = (3 \times P \times a) / (b \times h^2)$$

Onde:

a = distância entre o ponto de aplicação de carga ao apoio mais próximo.

## 3.4 FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

### 3.4.1 Fatores inerentes a madeira

#### 3.4.1.1 Teor de umidade

A determinação da massa específica depende do peso do material tomado a um certo teor de umidade. Variações do teor de umidade causam variações do peso da peça de madeira. Deste modo é fácil perceber a alta influência que o teor de umidade exerce sobre a massa específica. Também o volume poderá sofrer alteração devido a contrações ou inchamentos da peça de madeira. (KOLLMAN, 1950).

Grande parte do peso de uma árvore, e em alguns casos a maior parte dele, se deve à presença da água, preenchendo os espaços vazios celulares e intercelulares do lenho, impregnando as paredes das células e participando de sua constituição química.

A umidade interfere nas propriedades da madeira reduzindo sua resistência mecânica, seu poder calorífico e por outro lado facilitando a trabalhabilidade, aumentando o rendimento e qualidade da polpa celulósica, e aumentando a suscetibilidade ao ataque de fungos e insetos.

#### 3.4.1.2 Espécie

As espécies apresentam grande variabilidade de sua estrutura interna. Deste modo, diferentes espécies possuem massas específicas diferentes. As diferenças de arranjo dos tecidos, dimensões do lume das células e espessura das paredes celulares determinam valores próprios de massa específica para cada espécie de madeira. Salienta-se que a resistência da madeira está estreitamente relacionada com sua massa específica.

Esta variabilidade em valores de massa específica pode ocorrer ainda dentro de uma mesma espécie, dependendo da região onde a árvore cresce. Portanto os valores de massa específica representam valores médios para a espécie, sendo importante, quando da sua determinação, uma amostragem adequada das árvores. (KLOCK, 2000).

#### 3.4.1.3 Densidade

A densidade de um material é definida como sendo a relação de massa por unidade de volume.

A madeira é formada por células das quais depende a formação da matéria lenhosa. A massa específica depende, portanto do tipo de formação deste tecido celular, especialmente das dimensões do lume e das substâncias constituintes da parede celular.

As paredes celulares das madeiras mais leves são de pequena espessura e seus lumes são grandes, finalizando um total de até 90% de espaços vazios, enquanto que as madeiras mais pesadas podem apresentar, pela maior espessura da parede de suas células, apenas 6% de espaços vazios.

A massa específica real é similar para todas as madeiras. Seu valor pode variar entre 1,53 e 1,56 g/cm<sup>3</sup>; representando a massa específica de cada um dos principais componentes da madeira: celulose(1,58 g/cm<sup>3</sup>); lignina (1,38 g/cm<sup>3</sup> a 1,41 g/cm<sup>3</sup>).

##### 3.4.1.3.1 Densidade básica

Este é talvez o mais utilizado critério para avaliação da qualidade e resistência da madeira. É a fração entre o peso de uma amostra de madeira e o peso de um volume igual de água, a uma temperatura padrão; e por isso mesmo adimensional. Usualmente utiliza-se o peso seco e o volume verde da amostra de

madeira. Devido a sua praticidade e utilidade como critério de avaliação, pesquisadores tem procurado relação entre a densidade básica e as condições de crescimento das árvores.

Resultados dessas pesquisas indicam que o tamanho dos anéis de crescimento não é critério válido para avaliação da qualidade da madeira. Também indicam que o menor espaçamento inicial nos plantios apenas mascara os efeitos da madeira juvenil confinando sua existência a uma pequena área próxima à medula, onde sua influência nas propriedades estruturais da madeira são minimizadas.

Na madeira juvenil a densidade básica aumenta rapidamente com o desenvolvimento do anel de crescimento. Além da zona de madeira juvenil a densidade básica continua a aumentar, porém este incremento é mais gradual devido a uma percentagem mais consistente de lenho outonal associado à maturidade do anel de crescimento. As percentagens de lenho outonal não são constantes, e por isso a densidade básica da madeira adulta pode variar com as variações sazonais do clima e das condições de sítio. (KOLLMANN, 1950)

#### 3.4.1.4 Posição na árvore

A árvore em geral forma anéis de crescimento mais largos no seu interior, próximo à medula, e anéis estreitos na parte mais externa, próximo à casca. Ocorrem variações de percentagem de lenho inicial e lenho tardio, resultando em variações da densidade de massa.(KLOCK,2000).

Outro aspecto importante relacionado com a posição no tronco, é a ocorrência da madeira juvenil e da madeira adulta em espécies de rápido crescimento. A grande diferença entre os dois tipos de lenho está na massa específica. A madeira juvenil é bem mais leve, de menor massa específica, apresentando menor resistência que a madeira adulta, de maior massa específica. (PANSIN & ZEEW, 1970 in KLOCK, 2000).

Ao longo do tronco existem ainda grandes variações da massa específica, encontrando-se um valor máximo na base do tronco, onde são requeridos tecidos de sustentação mais rígidos. A massa específica decresce a medida que se distancia da base em direção à copa. (SPURR & HSIUNG, 1954 in KLOCK, 2000). Tal variabilidade ocorre entre indivíduos nos sentidos longitudinal e radial.

#### 3.4.1.5 Percentagem de lenho juvenil e lenho adulto

Madeira juvenil é comumente definida como uma madeira que aparece em volta da medula em que as características alteram-se rápida e progressivamente nos anéis de crescimento sucessivos. Esta madeira mais velha envolvendo a madeira juvenil é denominada madeira adulta, madeira madura, e madeira externa. A madeira juvenil difere da adulta pela menor percentagem de lenho tardio, menor densidade, traqueídeos mais curtos com maiores ângulos fibrilares, ocasionalmente lenho de reação, grã distorcida e depósitos de metabólitos. (LARSON, 2001)

Madeira juvenil propriamente dita é produzida durante os três primeiros anos de vida da árvore. Depois, madeira similar é produzida na porção central do tronco em todos os níveis de altura. Esta madeira tem sido chamada mais apropriadamente de madeira de cerne. É também referida como madeira formada pela copa, pois é formada dentro da copa viva ou em proximidade aos processos fisiológicos da copa viva. (LARSON, 2001)

#### 3.4.1.6 Largura e uniformidade dos anéis de crescimento

Obviamente as condições de crescimento influenciam dramaticamente as dimensões dos anéis de crescimento, e mudanças abruptas nestas condições contribuem para taxas não uniformes de crescimento radial. Taxas desuniformes de



crescimento no período juvenil não influenciam diretamente a qualidade da madeira estão associadas a outras características que contribuem para a qualidade dos produtos de madeira sólida. (LARSON, 2001)

Para conseguir uniformidade dos anéis de crescimento, uma taxa constante de incremento deve ser mantida não somente no período juvenil, mas também durante a transição de lenho juvenil para adulto e além. Uma taxa uniforme de crescimento, entretanto, não significa que os anéis terão as mesmas dimensões. É obviamente impossível manter a igualdade dos anéis já que a árvore cresce circunferencial e volumetricamente. O que uniformidade significa é que os anéis decrescem com a idade da árvore, tendo constante a taxa de crescimento estabelecida na formação da madeira juvenil. (LARSON, 2001)

#### 3.4.1.7 Percentagem de lenho tardio

Em muitas espécies florestais de clima temperado, existe diferenciação na velocidade de crescimento das árvores, influenciada pela variação das condições climáticas. Em períodos com maior disponibilidade de luz, calor e água no solo (primavera/verão), a planta apresenta intenso crescimento vegetativo, desenvolvendo células de paredes finas, lume grande e, no conjunto, uma coloração mais clara e, em consequência, de menor massa específica. No final do período vegetativo (outono/inverno) a planta reduz sua atividade vital, resultando em células de paredes espessas, lume pequeno e aspecto mais escuro, com maior massa específica. (PANSWIN & ZEEW, 1970 in KLOCK, 2000).

Esta distinção no crescimento do lenho, mais evidenciado em coníferas, exerce importante influência na massa específica média da árvore. Em folhosas o contraste entre as massas específicas dos lenhos inicial e tardio é menos evidente. (KLOCK, 2000).

KOLLMAN (1950) afirma que, como regra geral, a grande variabilidade na massa específica da madeira de coníferas depende mais da

variabilidade da porcentagem de lenho tardio do que da variabilidade nas massas específicas individuais dos lenhos inicial e tardio.

A porcentagem de lenho tardio é a característica da madeira mais facilmente determinada, e por isso a mais utilizada. Por ser altamente relacionada com a densidade da madeira e por proporcionar um índice visual de resistência e propriedades estruturais é uma característica muito utilizada como regra de classificação em qualidade de madeira.

Madeira juvenil possui pouco lenho outonal. Neste caso, há maior quantidade de lenho primaveril pois seu crescimento é favorecido pela predominância da copa. De fato, em algumas árvores os primeiros anéis de crescimento de madeira juvenil aparentam ser completamente formados por lenho primaveril. Em outras espécies, o aparecimento de falsos anéis de crescimento combinado com uma zona indistinta de traqueídeos de transição tornam impossível distinguir entre lenho primaveril e outonal. Conseqüentemente, é difícil e as vezes impossível quantificar a madeira juvenil nos Pinus do Sul dos EUA. A maioria dos pesquisadores simplesmente realizam estimativas visuais baseadas nas aparentes mudanças de densidade dos anéis de crescimento, e na coloração da madeira. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.8 Ângulo microfibrilar

A parede secundária não se constitui de madeira sólida. Ela consiste de microfibrilas helicoidais de celulose orientadas ao longo do eixo do traqueídeo. A orientação das microfibrilas varia na madeira juvenil dentro da mesma árvore e entre diferentes árvores. (LARSON et al, 2001)

Os traqueídeos da madeira de reação que são anormalmente curtos e com paredes espessas possuem grandes ângulos microfibrilares. Os anéis de crescimento da madeira de compressão com estes grandes ângulos possuem uma

alta contração longitudinal e menor contração tangencial comparadas a madeira normal. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.9 Defeitos: nós, rachaduras e grã

O menor espaçamento inicial das árvores reduz o crescimento radial da tora, e também confina o núcleo nodoso a um pequeno espaço na madeira juvenil. Qualquer manejo que favoreça o desenvolvimento da copa e folhagem, como desbaste ou fertilização, prolongará a vida e o crescimento dos galhos existentes. (LARSON et al, 2001)

Os nós na madeira juvenil contribuem para a minimização do valor desta madeira. Nós de grandes diâmetros são áreas de menor resistência na madeira que já está classificada como de menor qualidade, ainda mais se a árvore for de rápido crescimento. Árvores com grandes volumes de nós tem também grande quantidade de madeira de compressão. O volume ocupado pelo núcleo nodoso e pela madeira de compressão aumenta substancialmente acima no tronco, contribuindo para o menor valor das toras mais altas. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.10 Lenho de compressão

Madeira de compressão ou de reação ocorre nas bases das toras das coníferas, no lado inferior dos galhos e na região de inserção dos galhos no tronco. É uma resposta gravitacional e sua formação tende a retornar à posição vertical um tronco inclinado, ou manter a posição dos galhos na copa. (LARSON et al, 2001)

A densidade da madeira de compressão é usualmente tida como mais alta que a da madeira normal, possivelmente pela maior proporção de lenho outonal nos anéis de crescimento. Entretanto, a densidade do lenho outonal da madeira de compressão é ligeiramente menor que da madeira normal devido aos espaços

intercelulares, maiores diâmetros dos lumes, e a estrutura espiralada na parede secundária. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.11 Grã espiralada

Este é um defeito no qual os traqueídeos aparecem no anel de crescimento fazendo um ângulo com a vertical, ou melhor, com o eixo normal da tora. (LARSON et al, 2001)

A grã espiralada é uma característica herdada, variando consideravelmente entre as árvores. Varia também entre as espécies, sendo que “slash pine” e “lobolly pine” são afetados em um grau muito menor que o *Pinus radiata*. Entretanto, em todas as espécies, algumas árvores apresentam propensão à formação da grã espiralada nos anéis de crescimento próximos à medula. A tendência desaparece nos anéis mais velhos, podendo persistir nas árvores de crescimento extremamente rápido. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.12 Extrativos

São essencialmente ácidos da resina e terebintina. Normalmente saturam os anéis de crescimento próximos à medula em diferentes quantidades. Quando presente em grandes quantidades nos produtos de madeira sólida eles podem criar problemas na pintura, acabamento e na impregnação de preservantes. Apesar disso, eles exercem pouca ou nenhuma influência na resistência ou nas propriedades físicas da madeira, afetando significativamente apenas os valores de densidade. Por esse motivo, uma extração de álcool-benzeno é recomendada antes de se fazer a determinação da densidade. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.1.13 Cerne

A formação do cerne, assim como a presença de extrativos, exerce pouca ou nenhuma influência na resistência ou nas propriedades físicas da madeira. Entretanto, a deposição de minerais e outros constituintes bioquímicos associados à morte e dissolução das células dos raios podem afetar significativamente os valores da densidade. O cerne serve como preservante para certos produtos de madeira. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.2 Fatores inerentes ao meio

##### 3.4.2.1 Espaçamento de plantio

No manejo do plantio, a densidade é determinada pelo estoque inicial e posteriormente pela frequência e intensidade dos desbastes. A densidade inicial do plantio é uma decisão da área de manejo com importantes conseqüências sobre a quantidade e a qualidade do produto final. Uma vez o plantio instalado, as práticas silviculturais podem modificar o estoque inicial para determinado fim, porém estas práticas são caras e pouco efetivas. (LARSON et al, 2001)

##### 3.4.2.2 Sítio de crescimento

A qualidade do sítio é o fator seguinte ao espaçamento de plantio em grau de importância, afetando tanto o crescimento como a formação da madeira. O sítio varia grandemente na área de ocorrência de uma espécie, mas em todos os casos, a qualidade da madeira pode ser relacionada com a resposta ao crescimento. Ou seja, bons sítios de crescimento, ricos em nutrientes e com umidade adequada, produzirão madeiras com características de rápido crescimento; enquanto que os

sítios pobres ou deficientes em umidade produzirão árvores características de crescimento lento. (LARSON et al, 2001)

Assim como os efeitos do espaçamento de plantio que pode ser modificado pelo desbaste, os efeitos da qualidade do sítio podem ser amenizadas pela fertilização, irrigação e drenagem. (LARSON et al, 2001)

### 3.4.2.3 Localização geográfica

A madeira juvenil é afetada aparentemente em um menor grau que a madeira adulta em se tratando da localização geográfica do sítio de plantio. Por exemplo, Talbert e Jett (1981) concluíram que a gama de valores de densidade para a madeira juvenil de loblolly pine é menor que a de madeira adulta, e que as tendências devidas à localização geográfica não foram evidentes. Em estudos mais antigos, Zobel et al (1959) não detectaram tendências na densidade do cerne relacionada com a localização geográfica. (LARSON et al, 2001)

### 3.4.2.4 Manejo e práticas silviculturais

#### 3.4.2.4.1 Desbaste

O efeito do desbaste na qualidade da madeira é variável. Depende do estoque inicial, da idade das árvores, sítio, e muitas outras condições de crescimento.

O objetivo principal do desbaste em qualquer idade é aumentar a taxa de crescimento promovendo o desenvolvimento da copa. Para maximizar a qualidade da madeira nos plantios jovens, um balanço ótimo deve ser buscado entre as taxas de crescimento do tronco e de desenvolvimento da copa, de modo a promover a competição e a desrama natural.

Desta maneira, desbastes pesados ou freqüentes nos plantios jovens promovem o crescimento dos galhos baixos, atrasam a desrama natural, provocam o estreitamento das toras, aumentam a proporção de lenho primaveril no anel de crescimento, aumentam a tendência de formação de madeira de reação, assim como outras características das madeiras de rápido crescimento.

Desbastes leves ou tardios em plantios de alta densidade inicial produzem respostas quanto à qualidade da madeira. Do ponto de vista da qualidade da madeira, algumas respostas serão benéficas, porém a custo do crescimento volumétrico individual das árvores do plantio. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.2.4.2 Poda

O objetivo da poda de galhos verdes é reduzir a copa da árvore em pleno crescimento simulando uma condição de crescimento mais lento. A poda severa em que muitos galhos são removidos ao mesmo tempo, causa reajustes pronunciados no crescimento da árvore.

Devido a pequena copa residual, o crescimento em altura da árvore é temporariamente diminuído. Principalmente porque os galhos baixos da nova copa iniciam seu crescimento e aumentam seu vigor. O crescimento radial na base da tora da árvore severamente podada é reduzido, e a altura em que o anel de crescimento ocorre na árvore passa a ser a nova base da copa.

Juntamente a estas mudanças no tamanho do anel de crescimento, a percentagem de lenho outonal e a densidade aumentam na mais baixa tora. Todas essas respostas podem ser associadas a uma copa menor e menos vigorosa e ao longo tronco livre de galhos. Em árvores jovens, a poda tende a acelerar a transição da madeira juvenil para a adulta na formação dos anéis de crescimento abaixo da base da nova copa.

Em muitos pontos as respostas de crescimento devidas à poda são opostas às aquelas causadas pelo desbaste. Porém, da mesma maneira que no desbaste,

os efeitos causados são de vida curta. Dependendo da quantidade de galhos vivos removida, o quadro de crescimento retorna às condições normais em questão de poucos anos. (LARSON et al, 2001)

Os benefícios da poda de galhos verdes são: produzir toras retas ou troncos com nós pequenos e bem presos à madeira, e ainda um pequeno núcleo nodoso confinado ao centro das toras. Outros benefícios subordinados a estes são o aumento do diâmetro da tora de base e o aumento da percentagem de lenho outonal e da densidade nesta tora.

Como considerações econômicas pode-se dizer que um efeito negativo da poda é o crescimento dos galhos da nova base da copa e a conseqüente redução do valor econômico das toras superiores da árvore. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.2.4.3 Adubação

È difícil generalizar os efeitos da fertilização na qualidade da madeira devido a um sem número de fatores que afetam esta relação, bem como ao fato de os estudos sobre o tema não terem condições de ensaio semelhantes.

Afirmações gerais podem ser feitas, entretanto, relacionadas ao crescimento do tronco e da copa. Os seus efeitos estão de certa forma aquém dos observados após o desbaste. Se é promovido o crescimento em altura e o desenvolvimento da copa, um crescimento de madeira é esperado, acompanhado do incremento de lenho primaveril e formação dos traqueídeos de transição, e em função disto, observa-se um decréscimo na percentagem de lenho outonal e na densidade da madeira. Se por outro lado, a massa foliar e a eficiência fotossintética forem promovidas ou se o crescimento sazonal for prolongado, a percentagem de lenho outonal deve ser mantida apesar do aumento do anel de crescimento.

Sob algumas circunstâncias específicas, o aumento da eficiência fotossintética pode aumentar significativamente a espessura da parede celular dos traqueídeos do lenho outonal. (LARSON et al, 2001)



De fato, a maioria dos estudos conduzidos sobre o crescimento dos Pinus do sul dos EUA em sítios razoavelmente bons indicaram que tanto a percentagem de lenho outonal quanto a densidade não são adversamente afetados pela fertilização (McGraw 1986, Blanche et al 1992, Jokela and Stearns-Smith 1993). Se entretanto a fertilização for pesada e aplicada freqüentemente, como nos estudos com lobolly de Posey (1994), reduções significativas podem ocorrer na percentagem de lenho outonal e na densidade da madeira. Estes valores retornam a um patamar normal após alguns anos. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.2.4.4 Irrigação e drenagem

As respostas de crescimento relacionadas à irrigação são similares àquelas relativas à fertilização. Ou seja, a resposta depende da época do ano em que é fornecida água ao plantio. Conseqüentemente, a irrigação no início da estação de crescimento favorecerá o crescimento em altura e o desenvolvimento da copa, que promovem o desenvolvimento de lenho primaveril; por outro lado, a irrigação feita no final da estação de crescimento prolongará a atividade cambial na formação de lenho outonal. Na maioria dos estudos sobre a irrigação a água é fornecida ao longo de toda a estação de crescimento resultando em grande crescimento e em anéis de crescimento maiores. Como são formados tanto lenho primaveril como outonal os efeitos na densidade da madeira são negligenciáveis. (LARSON et al, 2001)

Na prática a água deve ser fornecida quando necessária. Como a umidade do solo é um fator limitante no final da estação de crescimento, a irrigação neste período promoverá a formação de lenho outonal aumentando assim a densidade da madeira. (LARSON et al, 2001)

#### 3.4.2.4.5 Roçada

Nos plantios novos a roçada serve para remover as plantas maiores que abafam as jovens mudas e competem pela umidade do solo e seus nutrientes. Este é um procedimento que continua aplicado durante período jovem do plantio.

Schimidtling (1973) in LARSON, 2001, afirmou que a roçada de um plantio de lobolly durante os três primeiros anos de crescimento resultou em uma vantagem aos 9 anos de 1,9m em altura comparado a outro plantio sem este trato cultural. Além disso, observa-se uma maior taxa de crescimento nos plantios roçados, e a distribuição de tamanho das árvores foi mais uniforme. A respeito da taxa de crescimento dos plantios roçados, a densidade da madeira dos plantios não foi apreciavelmente menor que naqueles não roçados. Novamente, o efeito da roçada é prolongar a formação do lenho outonal aumentando a disponibilidade de umidade no final da estação de crescimento.

### 3.5 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

#### 3.5.1 Ensaios destrutivos

Comparando-se as diferentes normas pode-se observar que existem algumas dificuldades com relação à avaliação dos resultados obtidos devido aos diferentes tamanhos de corpos de prova e velocidade dos testes. A norma brasileira utiliza-se do Pascal e suas frações e múltiplos como unidade de medida de carga, enquanto as demais normas adotam o sistema métrico decimal relacionado com a unidade de tempo minuto.

Considerando ainda as dimensões dos corpos de prova pode-se dizer que a norma COPANT é a mais econômica delas já que poupa material em comparação com as outras normas, como se observa no teste de flexão estática onde a diferença

é grande: pela COPANT o corpo é de 2 x 2 x 30 cm, pela ASTM de 5 x 5 x 76 cm, e pela ABNT NBR 7190 de 5 x 5 x 115 cm. (PUEHRINGER, 1999).

Vislumbra-se atualmente a utilização de testes não convencionais que têm por base a avaliação não destrutiva dos corpos de prova, que passam a ter dimensões independentes de normas já que são testadas as peças em seu tamanho natural de utilização. (PUEHRINGER, 1999).

### 3.5.2 Amostragem

Sendo a madeira um produto de crescimento orgânico natural, mostra ampla variação de propriedades entre indivíduos da mesma espécie (diferentes procedências, diferentes regiões e condições de crescimento), assim como variações dentro da própria árvore (diferentes posições no tronco).

Um valor médio exato das propriedades só poderia ser obtido testando-se todas as árvores de uma espécie. Logicamente, como isto não é viável, foram criados métodos de amostragem com base estatística, que utilizam amostras relativamente pequenas, diminuindo assim os custos das pesquisas sem prejuízo para a precisão e o valor dos resultados.

## 3.6 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O campo dos ensaios não destrutivos de maneira geral e para a madeira e produtos compostos de madeira está ainda no início de seu desenvolvimento. É necessário obter-se muito mais conhecimento antes de se tornar possível a predição das qualidades de um material. Considerando por exemplo a largamente utilizada relação entre a força e o módulo de elasticidade (MOE) dos produtos de madeira, podemos esperar apenas correlações parciais entre estas duas variáveis como foi afirmado a quase meio século atrás que não há relação teórica entre estas duas

variáveis: força e dureza. Isto porque uma falha localizada controla a força do material, enquanto dureza é uma expressão de efeitos integrados de todas as características do material. (BODIG, 2001).

Nessa linha de raciocínio chama-se a atenção para a vantagem dos métodos acústicos de determinação de propriedades mecânicas da madeira, capazes de fornecer resultados confiáveis que podem ser facilmente comparados com os resultados fornecidos pelas demais metodologias. (PUEHRINGER, 1999).

As vantagens que os métodos não destrutivos apresentam sobre os métodos tradicionais são: a possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores apresentados que permitem o sortimento peça a peça e uma garantia das suas propriedades físico-mecânicas individuais e do conjunto de peças com um limite de segurança mais adequado, contribuindo todos esses fatores para uma economia financeira e de matéria-prima.

#### 3.6.1.1 Conceito

Por definição avaliação não destrutiva de materiais é a ciência que identifica as propriedades físicas e mecânicas de um material qualquer sem alterar sua capacidade de uso futuro, e usa estas informações para tomar decisões a respeito das aplicações apropriadas para o material avaliado. Desta maneira as avaliações confiam nos testes não destrutivos para obter informações acuradas sobre as propriedades, a performance ou as condições do material em questão. (ROSS et al, 1997).

### 3.6.1.2 O papel dos ensaios não destrutivos em assegurar o uso inteligente dos recursos florestais

Nossas florestas são um recurso extremamente valioso. Além de seu valor estético e recreacional, a floresta serve como fonte de matéria-prima para uma lista sempre crescente de produtos de madeira e fibras utilizados pela sociedade. A madeira tem sido usada por séculos como moradia, proteção, combustível e matéria-prima, e como a população humana mundial cresce exponencialmente, o estoque de florestas no planeta diminuirá. (PUEHRINGER, 1999).

Conservar as florestas enquanto se usa delas requer incrementos de engenharia e tecnologia no processamento da madeira o mais cedo possível. A engenharia da natureza criou através da genética, ventos, climas, solos e outros fatores uma grande variedade na madeira como material. Conseqüentemente, indústrias e usuários de produtos de madeira estão constantemente frustrados com o uso desse recurso florestal. Frequentemente os empresários argumentam que a madeira não serve para os processos contínuos devido à grande variação de suas propriedades, e os usuários por sua vez sentem-se frustrados com a performance dos produtos acabados. (PUEHRINGER, 1999).

Neste cenário a avaliação não destrutiva pode contribuir significativamente provendo informações necessárias para caracterizar acuradamente os recursos madeireiros funcionando como peça fundamental no manejo dos recursos florestais assegurando a qualidade do produto final e o seu uso mais adequado.

A avaliação não destrutiva tem sido usada na área florestal para uma série de fins, desde a classificação de vigas de dimensões estruturais até a avaliação *in loco* de partes de madeira em estruturas montadas. (MATOS et all, 2000).

As primeiras pesquisas nesta área focaram o desenvolvimento de técnicas para a classificação de madeiras de dimensões estruturais e avaliação de materiais laminados. Estes trabalhos apoiaram-se nas propriedades fundamentais dos

materiais para estabelecer relações entre os parâmetros encontrados pelas técnicas não destrutivas e as propriedades mecânicas dos produtos de madeira. (MATOS et all, 2000).

O desenvolvimento científico de técnicas de avaliação não destrutiva de materiais se deu a partir de 1959, quando Jayne lançou a hipótese fundamental da teoria de aplicação desses testes para a madeira (PETERSON, 1994). Em seus estudos ele conseguiu demonstrar uma relação entre a energia potencial e as propriedades de dissipação na madeira. Ele propôs que a armazenagem e dissipação de energia e as propriedades da madeira, que podem ser obtidas não destrutivamente por uma grande variedade de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelo mesmo mecanismo que determina o desempenho mecânico desses materiais. Consequentemente relações matemáticas entre essas propriedades mecânicas puderam ser estabelecidas com métodos estatísticos de análise de regressão.

Jayne demonstrou com sucesso as relações entre as propriedades de energia e dissipação e as propriedades de flexão estática de pequenas amostras livres de defeitos. PELLERIN verificou a hipótese com materiais de dimensões estruturais, e HOYLE realizou uma extensa série de testes com uma variedade de produtos de madeira. (PUEHRINGER, 1999).

Essa tecnologia de avaliação não-destrutiva da madeira já é utilizada a nível industrial tanto nos Estados Unidos como em países da Europa e Ásia, e encontra-se no Brasil em fase de testes e divulgação. (PUEHRINGER, 1999).

GALLIGAN(1964) realizou uma revisão sobre os métodos não destrutivos baseados em princípios mecânicos e salientou o método de emissão de ondas acústicas pelos excelentes resultados obtidos em estudos de alguns pesquisadores da época.

ROSS e PELERIN(1997) desenvolveram em seu trabalho uma descrição de alguns métodos de avaliação não destrutivos utilizados para madeira e materiais dela compostos.

Utilizando emissão de ondas acústicas, raios x, tomografia computadorizada e impulsos de radar, SCHAD, SCHAMOLDT e ROSS (1996) continuaram as

avaliações não destrutivas da madeira com ênfase na detecção de defeitos como áreas com madeira degradada, nós e espaços vazios em madeiras macias (soft wood); que afeta a qualidade e o tempo de processamento da madeira.

ROSS e sua equipe de pesquisadores do Laboratório de Produtos Florestais dos Estados Unidos apresentam outras pesquisas que incrementam o uso da avaliação não destrutiva de materiais na detecção do potencial de laminação em toras de pequeno diâmetro, na determinação do MOE dessas toras, ou para determinar sua dureza.

Há ainda a aplicação destes métodos para a inspeção de pontes de madeira e outras estruturas, valorizando a aplicação da técnica diretamente nas estruturas onde estas estiverem construídas. (ROSS, 1999).

### 3.6.1.3 O uso do método não destrutivo na avaliação da árvore

Há grande interesse em determinar a saúde e as características da árvore em pé. Propriedades da árvore como taxa de crescimento, resistência, podridão interna, distribuição de defeitos, variação de densidade estão guiando as atividades de pesquisa no campo dos ensaios não destrutivos. Enquanto algumas dessas propriedades podem ser estimadas pelas assim chamadas medidas pouco intrusivas, como o corte de galhos, a tomada de amostras de incremento do tronco, o uso de resistógrafos, o grande trunfo sempre será predizer as propriedades da madeira por técnicas não intrusivas e não destrutivas. (BUCUR, 1995).

Uma árvore é uma estrutura complexa para ser analisada do ponto de vista dos ensaios não destrutivos. Seu formato varia com a espécie, idade, condições climáticas e práticas silviculturais. Além disso, algumas dessas propriedades variam com a estação do ano. A presença da casca envolvendo a madeira, os galhos e as raízes criam muitas dificuldades geométricas e heterogeneidades para a utilização de um método não destrutivo. (BODIG, 2001).

Esta árvore é forte o suficiente para suportar uma tempestade?, É suficientemente saudável para continuar crescendo ou ela deve ser retirada no próximo desbaste devido à sua condição debilitada? Este tipo de pergunta direciona o desejo de desenvolver ensaios não destrutivos para serem aplicados numa árvore, na floresta, num parque, ou na arborização urbana. (BODIG, 2001).

#### 3.6.1.4 Madeira sólida

Enquanto a madeira sólida é um pouco menos complicada geometricamente e no que diz respeito a sua composição, ainda é complicada o suficiente para proporcionar desafios para os ensaios não destrutivos. Ela pode ser agrupada em duas categorias:

- ◆ Postes e estacas;
- ◆ Tábuas e peças estruturais.

Os postes e estacas mantêm a geometria circular e afilada de uma árvore, porém com a casca, os galhos e raízes removidas. A variação das características de crescimento (taxa de crescimento, densidade, nós, grã espiralada, fendas e outros defeitos) ao longo do comprimento e no sentido radial criam complexidades na sua avaliação. (BODIG, 2001).

Complexidades adicionais surgem com os postes e estacas pois estes são geralmente secos e tratados com preservantes. Além disso, a utilização de ambos é bem distinta. Os postes são utilizados em estruturas onde o esforço requerido é o mesmo da árvore viva. Por outro lado, as estacas podem ser usadas para compor a fundação de construções e para plataformas e marinas. Como os usos são diversos, assim devem ser as análises não destrutivas e os parâmetros utilizados. (BODIG, 2001).



### 3.6.1.5 Painéis laminados

Usualmente a pesquisa dos ensaios não destrutivos foca os seguintes pontos em se tratando de painéis laminados:

- ◆ Interferência das linhas de cola nas leituras dos métodos não destrutivos;
- ◆ Efeito da orientação da grã em alguns painéis como o compensado;
- ◆ Variação da qualidade do material empregado para vigas laminadas coladas;
- ◆ A aplicação do método não destrutivo representa a lâmina mais forte, a mais fraca, ou a de resistência média ao esforço?
- ◆ As propriedades de interesse são controladas pela linha de cola ou pela qualidade da lâmina empregada na construção do painel?

Normalmente, as chapas laminadas são avaliadas quanto ao empenamento, e os laminados longos (como as vigas) necessitam da avaliação da resistência contra a compressão e flexão. Desta forma pode-se afirmar que um método não destrutivo de avaliação não pode ser aplicado indiscriminadamente para os diferentes produtos laminados. (BUCUR, 1995).

### 3.6.1.6 Painéis compostos de madeira

Os painéis compostos são definidos como aqueles produtos em que a madeira é encontrada e utilizada na forma de fibras ou partículas solidificados com auxílio de um tipo de adesivo. Este adesivo normalmente não cobre toda a superfície da partícula, por isso elas são unidas apenas por alguns pontos em que o adesivo foi aspergido. (BODIG, 2001).

Entre os principais fatores avaliados por métodos não destrutivos de ensaio estão os seguintes:

- ◆ Tamanho, forma e variabilidade das partículas;

- ◆ Variação da orientação espacial;
- ◆ Distribuição da adesividade e dos adesivos;
- ◆ Tamanho, forma e variação das cavidades;
- ◆ Propriedades da madeira modificadas pelo esmagamento das partículas, por exemplo;
- ◆ Distribuição de camadas e da densidade na espessura do painel.

Como os painéis compostos são muito variados em suas características, os pesquisadores devem ser muito cuidadosos com a escolha do método não destrutivo de ensaio a ser aplicado, para que este corresponda fielmente à variável de interesse (como a resistência da linha de cola) enquanto minimiza a influência de outras variáveis, o que não é uma tarefa de fácil execução. (BUCUR, 1995).

Assim como na madeira sólida, a emissão acústica em compostos de madeira é um processo complexo. Para chapas de partículas e outros compostos de madeira sob carga estática, as emissões acústicas se iniciam com uma carga menor do que aquela apresentada para a madeira sólida, muito provavelmente pela presença das resinas adesivas como um dos principais componentes da estrutura. (BUCUR, 1995).

### 3.6.2 Tipos de aplicação dos ensaios não destrutivos

#### 3.6.2.1 Pesquisa básica e coleta de dados

Esta atividade é conduzida quando há pouca ou nenhuma informação sobre a aplicação de ensaios não destrutivos. Por exemplo, o pesquisador pode querer saber as características de um apodrecimento da madeira de um poste utilizando um dos diversos métodos de ensaio não destrutivo. Ele deve selecionar então uma seção da madeira que esteja saudável, e coletar as informações disponíveis. A partir daí, coletas de dados adicionais são realizadas a medida que se

forma a cavidade pelo apodrecimento. Ao relacionar os dados encontrando as correlações, o pesquisador pode inferir as necessidades para a aplicação desta metodologia para este fim. (BODIG, 2001).

Outro enfoque pode ser dado utilizando-se de um número reduzido de amostras de material ensaiando-as com os diversos métodos de ensaio não destrutivo. As amostras normalmente representam as situações extremas, como a mais saudável e a mais degradada condição em que se pode encontrar determinada espécie, por exemplo. A efetividade dos métodos não destrutivos é determinada de acordo com sua correlação com os dados obtidos pelos métodos destrutivos. Desta maneira um ou dois métodos não destrutivos podem ser escolhidos para o estudo mais aprofundado. (BODIG, 2001).

A pesquisa básica é necessária para uma enorme quantidade de materiais e componentes estruturais. O nível de avaliação pode variar desde características macroscópicas até o nível anatômico. Necessita-se definir os mecanismos de falhas, com fatores identificáveis de controle. Desta maneira, as pesquisas devem basear-se nos métodos não destrutivos mais promissores para a predição destas variáveis. (BODIG, 2001).

Infelizmente, a maioria das pesquisas são caracterizadas pela coleta de uma enorme quantidade de variáveis, e pela tomada de decisão com base estatística no nível de significância das mesmas. Isto é especialmente verdadeiro quando se utiliza a análise de regressão múltipla na qual são selecionadas meia dúzia ou mais variáveis. Este procedimento torna o uso do sistema não destrutivo de análise muito complicado e questionável. (BODIG, 2001).

#### 3.6.2.2 Avaliação da qualidade de produtos

A avaliação da qualidade de materiais ou produtos é uma importante aplicação dos ensaios não destrutivos que muitas vezes tornam-se a ferramenta para tal fim. Como a maioria das atividades relacionadas ao controle de qualidade, o

método de ensaio não destrutivo deve ser fidedigno e rápido o suficiente para acompanhar a velocidade de produção. (BUCUR, 1995).

Alguns dos requisitos mais importantes para que um método não destrutivo seja aplicado ao controle de qualidade podem ser:

- ◆ Parâmetros para determinação de rejeitos;
- ◆ Rastreamento do produto como um todo, ou pelo menos dos pontos críticos;
- ◆ Aplicação rápida e fornecimento de resultados para que as peças possam ser aceitas ou rejeitadas “on-line”;
- ◆ O método não destrutivo não precisa ser aplicável com a mesma confiança para o mais alto e para o mais baixo nível de qualidade;
- ◆ No caso de seleção de múltiplas classes de qualidade, como classificação mecânica por aplicação de carga, o método não destrutivo deve ser capaz de fornecer resultados claros nos limites das classes;

Em alguns casos, o ensaio do produto acabado pode não ser possível pelos ensaios não destrutivos, como no caso de uma viga laminada colada. Nestas situações, os componentes, como tábuas ou lâminas, são classificados individualmente, sendo montados organizadamente de modo que se possa esperar determinada resistência do produto final. (BODIG, 2001).

### 3.6.2.3 Predição da estabilidade química

Estabilidade e compatibilidade químicas são propriedades de considerável importância na produção de diversos produtos derivados de madeira. A existência de ensaios para determinar a estabilidade química, que deve ser compreendida como a estabilidade da composição ao longo do tempo e da exposição aos agentes climáticos, não está clara ainda. (GALLIGAN, 1964).

O segundo campo de interesse químico é a compatibilidade. Entenda-se compatibilidade a capacidade de uma superfície de madeira receber um acabamento ou um adesivo, ou ser utilizada em contato com um metal em particular, ou ainda estar exposta diretamente ou indiretamente a um produto químico. (GALLIGAN, 1964).

Poucos ensaios com o objetivo de detectar a degradação química da madeira foram realizados até hoje, a não ser com respeito à adesão; ainda assim os ensaios não destrutivos podem ser aplicados a este fim.

#### 3.6.2.4 Avaliação de componentes estruturais “in-situ”

A maior aplicação dos métodos de ensaio não destrutivos é a avaliação do grau de deterioração de componentes estruturais. Esta avaliação é necessária para quantificar a expectativa de resistência do material, afirmar sobre a confiabilidade, segurança e expectativa de vida da estrutura. Há grandes dificuldades na aplicação dos métodos não destrutivos tanto para pesquisa quanto para avaliação de estruturas “in-situ”. (BUCUR, 1988).

Entre estas dificuldades pode-se citar:

- ◆ Dificuldade de acesso à porção em que a deterioração é mais crítica (seção escondida de uma viga, porção enterrada de uma coluna);
- ◆ Distribuição variada da umidade, dependendo da localização da peça;
- ◆ Interferência causada pelas peças vizinhas, principalmente se estas estiverem conectadas;
- ◆ Descontinuidades localizadas causadas por apodrecimentos, galerias de insetos ou danos mecânicos;
- ◆ Maior dificuldade existe quando vários componentes encontram-se em diferentes estágios de degradação ou quando ocorrem rompimentos ou separações;

- ◆ Superfícies erodidas tornam difícil a fixação dos sensores e a aplicação do método.

### 3.6.2.5 Métodos de avaliação não destrutiva das propriedades mecânicas da madeira

Quase todos os métodos de ensaio não destrutivos usados normalmente para diversos materiais podem ser aplicados para a avaliação da madeira e de produtos compostos de madeira. A escolha depende da aplicação específica e da adaptabilidade. (ROSS, 1998).

Comercialmente utiliza-se o método de propagação de ondas acústicas, porém há inúmeros outros que podem ser citados como testes não destrutivos: desde a simples avaliação visual até a utilização de ultra-som ou raio X.

As vantagens que esses métodos não destrutivos apresentam sobre o método tradicional são: a possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores apresentados que permitem o sortimento peça a peça e uma garantia das suas propriedades físico-mecânicas individuais e do conjunto de peças com um limite de segurança mais adequado, contribuindo todos esses fatores para uma economia financeira e de matéria-prima.

Os métodos podem ser baseados em princípios auditivos: propagação do som, ultra-som, infra-som; em medidas: instrumentos de medidas, células fotoelétricas, radiação, campo eletromagnético, condutividade elétrica, testes eletromagnéticos, testes vibracionais, além da penetração de líquidos

A exigência por materiais de alta confiabilidade, técnicas de ensaios e equipamentos tem aumentado no dia-a-dia. Desenvolvimentos nos setores industriais, aeroespaciais, nucleares e transportes, requerem materiais de maior confiabilidade e isentos de descontinuidades. O aumento constante do grau de sofisticação, com ênfase na tecnologia, faz com que os meios industriais atuais requeiram ferramentas de qualidade inigualáveis, confiáveis e precisas; pondo assim

em teste os conceitos físicos de materiais assim como avaliação dos mesmos através dos ensaios não destrutivos.

Da mesma forma há a demanda por níveis de produção mais altos a custos baixos, que por sua vez requer a implementação de sistemas automatizados para exame e controle, sejam eles incorporados à linha de produção ou fora dela. Através de lógica computadorizada, gráficos interativos, armazenamento e comparação de dados, são aplicados nos métodos de ensaio de materiais, capazes de avaliar a qualidade do produto tanto em tempo real como muito próximo ao mesmo.

Ao estudar a madeira do ponto de vista acústico, faz-se imprescindível o estudo da propagação do som através deste meio.

#### 3.6.2.6 Ondas sonoras

Chama-se de ondas sonoras aquelas produzidas por vibrações mecânicas de um meio elástico desde 16 Hz a 20Khz. Pode ser calculada a velocidade média do som através do material:

$$V = d/t$$

onde  $d$  = distância percorrida, e  $t$  = tempo total gasto.

Deste modo determina-se o módulo de elasticidade, utilizando-se a seguinte equação apresentada por KOLLMAN, 1950:

$$V = ( E / \rho )^{1/2}$$

onde  $V$  é a velocidade do som através do material em  $\text{cm} / \text{s}$ ,  $E$  o módulo de elasticidade em  $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ ,  $\rho$  a densidade da madeira em  $\text{g} / \text{cm}^3$ .

### 3.6.2.7 Ultra som

SANDOZ, 1989, concluiu que o método de classificação pelo ultra som mostrou-se muito útil para caracterização de peças madeira.

Segundo ele este método tem a vantagem de integrar os parâmetros essenciais de caracterização pelas médias das variáveis módulo de elasticidade e densidade fornecendo estimativas aceitáveis dos módulos de ruptura e elasticidade. Além disso diminui custos com material obtendo medidas diretas das peças que serão utilizadas.

Utiliza uma complexa instrumentação eletrônica. Qualquer material capaz de transmitir vibrações mecânicas pode ser testado. Ultra som detecta tanto descontinuidades lineares como não lineares, permitindo a configuração tridimensional dos corpos avaliados.

O aparelho ultra-sônico converte pulsos elétricos em vibrações mecânicas ou ondas. Estas propagam através das áreas sendo testada e são refletidas quando encontram descontinuidades com impedâncias acústicas diferentes do material sendo testado.

As ondas refletidas, ao retornar, são convertidas em energia elétrica novamente sendo seus sinais mostrados num tubo de televisão. A posição e tamanho destes sinais correspondem a posição e tamanho das descontinuidades. (BUCUR, 1995).

### 3.6.2.8 Observações Visuais

È o mais simples e mais antigo método de ensaio não destrutivo. Muitas avaliações atualmente ainda baseiam-se inteiramente na avaliação visual e nas interpretações subjetivas dessas observações. (BODIG, 2001).



Em muitas situações as observações visuais são necessárias para a tomada de decisão sobre a gravidade das condições dos componentes de determinado produto. Alguns dos pontos observados para este fim são:

- ◆ Pedacos quebrados;
- ◆ Danos mecânicos;
- ◆ Deterioração avançada;
- ◆ Danos extensos de insetos;
- ◆ Partes torcidas ou empenadas.

As decisões tomadas com base na observação visual normalmente são “passa” e “não passa”, o que significa que o produto é rejeitado ou julgado como aceitável para o uso. Em alguns casos, reparos ou reforços podem ser recomendados. (ROSS, 1998).

#### 3.6.2.9 Métodos pseudo não destrutivos

São os utilizados em conjunto com a observação visual. Podem ser assim classificados os seguintes métodos:

- ◆ Uso do martelo para detectar ocos internos pela diferença do som produzido em comparação com a madeira sadia;
- ◆ Uso de objeto cortante para retirada de superfície degradada a fim de determinar a profundidade do dano;
- ◆ Uso do resistógrafo para localização de seções internas degradadas.

Mesmo podendo ajudar aumentando a quantidade de informações obtidas pelas observações visuais, estes métodos muitas vezes ainda dependem de uma interpretação subjetiva. (BODIG, 2001).

### 3.6.2.10 Acústicos

#### 3.6.2.10.1 Ondas sonoras de impacto

Este é um dos métodos mais populares utilizados para madeira e compostos de madeira. As ondas sonoras são geradas a partir de um impacto ou de vibração forçada. Devido à dificuldade de induzir uma vibração forçada ao objeto de avaliação, a maioria das pesquisas é conduzida com base no método de impacto. (Thomson, 1981 in BODIG, 2001).

Mesmo sendo verdade que uma amostra pode vibrar sem contato físico pela ação de uma fonte emissora de ondas sonoras, uma grande quantidade de energia é perdida nesse processo. Desta maneira, esta técnica em que há a ausência de contato físico possui aplicações limitadas e poucas pesquisas realizadas. (BODIG, 2001).

O método de ondas sonoras de impacto é normalmente utilizado com base na velocidade de propagação da onda no material ou utilizando o espectro da vibração. (BUCUR, 1995).

A quantificação da velocidade do som através do material, que é muitas vezes usada para expressar o módulo de elasticidade dinâmico, é muito comum para produtos de madeira. Isto é explicado pela simplicidade dos equipamentos e pela facilidade de análise de dados. A velocidade do som é comumente convertida para o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd). Apesar da simplicidade, o uso dessa conversão acarreta algumas considerações:

- ◆ Normalmente considera-se apenas a velocidade de onda mais alta;
- ◆ Esta onda mais rápida atravessa o material na sua porção de mais alta qualidade desviando das áreas mais fracas (madeira juvenil, nós, camadas de baixa densidade, etc);
- ◆ O cálculo do MOEd requer o conhecimento da massa específica do material que não pode ser facilmente determinada não destrutivamente.

Por outro lado, usando o espectro da onda de tensão criada pelo impacto de onde parâmetros não destrutivos podem ser escolhidos superando as desvantagens que a velocidade de propagação apresenta: (BUCUR, 1987).

- ◆ O espectro da onda de tensão fornece a representação das condições e características do material como um todo;
- ◆ Um grande número de variáveis pode ser selecionado de um único espectro de frequência de onda (energia máxima, frequência dominante, variação de frequência, atenuação, etc);
- ◆ Parâmetros não destrutivos múltiplos podem aumentar a correlação com os parâmetros destrutivos;
- ◆ Estas variáveis são menos susceptíveis às condições ambientais (temperatura, umidade, etc).

#### 3.6.2.10.2 Ultra som

O ultra som como método não destrutivo é similar às ondas sonoras porém, aplicado com frequências mais altas. É um método muito utilizado para materiais homogêneos e não porosos para detecção de falhas. Usado para madeira e produtos compostos de madeira o método é menos efetivo devido às características de porosidade e descontinuidade desses materiais. (BUCUR, 1985).

Sabe-se bem que os produtos compostos de madeira são criados e fabricados com o objetivo de fornecer chapas com propriedades mecânicas determinadas e adequadas a usos específicos. A estimativa da anisotropia destes compostos é um ponto a ser estudado. A anisotropia e a heterogeneidade das camadas das chapas de dimensões comerciais podem ser expressadas em termos de classes de velocidades de propagação das ondas acústicas. Com os recentes avanços tecnológicos dos transdutores, a produção e inspeção de qualquer tipo de produto requer um entendimento do fenômeno de propagação acústica no material em ensaio. A influência da variedade da frequência das ondas, a propagação nas vigas

de diversas formas geométricas, a pressão de contato dos transdutores, a intensidade de impacto para emissão da onda podem ser controlados simultaneamente e muitos parâmetros passageiros da forma e velocidade da onda podem ser verificados. (BUCUR, 1999 in BODIG, 2001).

Assim, este método tem seu uso mais efetivo no controle de qualidade industrial para detectar delaminações em painéis laminados e bolhas nos painéis de partículas, graças a sua característica de poder ser concentrado em pequenas áreas de aplicação de onda. Pode ser usado ainda em dois sistemas diferentes: com a passagem da onda através do material (pass-trough) ou, com a emissão da onda e a captação de retorno (pulse-eco). (BODIG, 2001).

Nas primeiras vezes em que o ultra som foi utilizado, o sinal era enviado através da espessura do material sendo recebido do outro lado do painel. O uso do sistema de captação do retorno da onda, que é baseado na captação do eco criado nas superfícies internas do painel, onde este por ventura esteja separado, permite determinar a profundidade em que a falha na lâmina ocorre, bem como no caso dos painéis de partículas, determinar a profundidade da bolha de ar formada na abertura da prensa, ou ainda a profundidade em que ocorre o apodrecimento em um poste. (BODIG, 2001).

BARADIT e FUENTEALBA, 2000, estudaram o *Pinus radiata* no Chile à luz dos ensaios não destrutivos com a aplicação da técnica do ultra-som para determinação dos valores dos módulos de elasticidade e ruptura.

### 3.7 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS NO USO DE TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE MADEIRAS

#### 3.7.1 Métodos mecânicos

IWAKIRI (1988) avaliou não destrutivamente vigas de madeiras tropicais para fins estruturais com a aplicação de uma carga pré definida abaixo do limite proporcional. Das equações desenvolvidas, a que melhor se ajustou com os parâmetros destrutivos foi a que relacionava o MOE e a massa específica da madeira avaliada.

MATSUNAGA (1995), através da máquina pneumática de classificação mecânica Stress Grading MK III, Polak Engineering, África do Sul, pré classificou tábuas de *Pinus taeda* com o objetivo de combinar diferentes qualidades de madeira na seção transversal de vigas laminadas coladas para compensar a diminuição dos esforços internos.

NIELSEN (1998) utilizou de método de ensaio não destrutivo mecânico para a avaliação de tábuas de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* através da máquina pneumática de classificação com carga controlada manualmente denominada Stress Grading Machine, modelo MK III da empresa Polak Engineer, África do Sul.

Através das deformações medidas, da carga aplicada, e das dimensões das peças, determinou-se o módulo de elasticidade medido na porção média das tábuas que foram utilizadas na montagem de vigas laminadas coladas.

### 3.7.2 Métodos acústicos

MATOS (1997) utilizou a aplicação de ondas acústicas para avaliar lâminas de *Pinus taeda* para a fabricação de painéis de lâminas paralelas (PLP), classificando-as em duas categorias distintas, previamente à montagem destes, chegando a resultados favoráveis ao método de avaliação o que comprova a sua viabilidade técnica.

MATOS e KEINERT Jr (1998) avaliaram a viabilidade de utilização de lâminas de *Pinus taeda* para produção de painéis estruturais de lâminas paralelas, através da classificação preliminar das lâminas, em classes de qualidade, utilizando método não destrutivo, pela aplicação de ondas acústicas.

PUEHRINGER (1999), avaliando tábuas de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com o método de ensaio não destrutivo da aplicação de ondas de tensão, base de funcionamento do aparelho denominado Stress Wave Timer, modelo 239 A, da METRIGUARD, determinou elevadas correlações entre os resultados deste ensaio e os resultados das avaliações destrutivas com a confecção de corpos de prova.

Comparou ainda o autor os valores das avaliações destrutivas com outro método de ensaio não destrutivo, através da máquina pneumática de classificação com carga controlada manualmente denominada Stress Grading Machine, modelo MK III da empresa Polak Engineer, África do Sul. Através das deformações medidas, da carga aplicada, e das dimensões das peças, determinou-se o módulo de elasticidade medido na porção média das tábuas.

MATOS e PUEHRINGER (2000) utilizaram o aparelho denominado Stress Wave Timer, modelo 239 A, da METRIGUARD para determinação da velocidade de propagação da onda acústica, que no caso foi de 338 microsegundos em média para tábuas de *Eucalyptus sp* de 2,5 cm de espessura, 10 cm de largura e 180 cm de comprimento.

MICHELOTTI (2000), usando a técnica de ensaio não destrutivo da aplicação de ondas de tensão do aparelho denominado Stress Wave Timer, modelo 239 A, da METRIGUARD, avaliou cinco espécies de Pinus tropicais, entre elas *Pinus caribaea hondurensis*, *Pinus chiapensis*, *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* e *Pinus tecumumanii* com idade de 10 anos estabelecendo diferenciações claras entre as espécies.

ROSA (2000), procurou relações entre os métodos de avaliação não destrutiva e tradicional para painéis compensados classificando-os por classes de qualidade.

CALORI e DIAS (2000) empregaram o ultra-som na determinação da densidade básica da madeira na árvore em pé visando a redução de custos e operações.

PIO (2002) lançou mão da técnica de ensaios não destrutivos de aplicação de ondas de tensão para classificação de lâminas de *Eucalyptus grandis*. As lâminas foram agrupadas, previamente à montagem dos painéis, por classes de rigidez para as idades de 15 e 20 anos das árvores. Os resultados obtidos atestam que a utilização da pré-classificação das lâminas gera diferenças em termos de qualidade e resistência dos painéis.

## 3.8 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM MEIO ELÁSTICO

### 3.8.1 Madeira como meio elástico

Um material é considerado elasticamente anisotrópico se está espacialmente orientado em uma escala “e” menor que o comprimento da onda elástica “ $\lambda$ ” que o percorre. Se “ $\lambda$ ” é igual ou menor que “e”, a onda elástica se depara com um meio heterogêneo.

Deste modo, anisotropia e heterogeneidade não são características absolutas de um material, mas relativas capazes de se relacionar com propriedades físicas e com os fenômenos físicos correspondentes (como o comprimento da onda  $\lambda$  de propagação). Em outras palavras, as características elásticas anisotrópicas de um meio devem ser associadas à escala de observação.

A madeira é um composto natural e possui uma estrutura hierarquizada desde a escala molecular até as estruturas macroscópicas. Os principais constituintes da madeira são a celulose, as hemiceluloses, lignina e extrativos. O material celulósico tem um componente básico, o cristal de celulose. A matéria lenhosa produzida por uma árvore é um maravilhoso exemplo de composto natural com um componente cristalino básico. A arquitetura hierárquica da madeira é a principal responsável por seu elevado comportamento anisotrópico e elástico.

### 3.8.2 Determinação do módulo dinâmico de elasticidade

#### 3.8.2.1 Método acústico

Este método é o princípio de funcionamento da máquina Stress Wave Timer, modelo 239 A da empresa Metriguard, Estados Unidos da América.

As propriedades do material a ser medido afetam a forma da onda de tensão, e deste modo, o tempo de detecção da passagem da onda (METRIGUARD, 1997). Os tempos registrados em microsegundos são então, utilizados no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

Através das velocidades de propagação das ondas de tensão medidas, e da densidade do material, determina-se o módulo de elasticidade. calculando-o pelas fórmulas:

$$MOEd = \delta \times V^2 \times \left( \frac{1}{g} \right)$$

Onde:



MOEd = Módulo de Elasticidade Dinâmico (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\delta$  = Massa Específica da Lâmina (kg/m<sup>3</sup>)

g = Aceleração da Gravidade (9,804m/s<sup>2</sup>)

V = Velocidade da Onda Longitudinal (cm/s)

A velocidade é obtida pela equação:

$$V = d/t$$

Onde:

V = Velocidade (cm/s)

d = Distância Entre os Transdutores (cm)

t = Tempo de Propagação (s)

### 3.8.2.2 Método mecânico

Este método é o princípio de funcionamento da máquina Stress Grading Machine, modelo MK III da empresa Polak Engineer, África do Sul.

Através das deformações medidas, da carga aplicada, e das dimensões das peças, determina-se o módulo de elasticidade medido na porção média das tábuas. calculando-o pelas fórmulas:

$$MOE = Cl_p \times L^3 / 48 \times DEF_{lp} \times I$$

$$I = b \times h^3 / 12$$

$$MOE = C_{lp} \times L^3 / 4 \times DEF_{lp} \times b \times h^3$$

Onde:

$C_{lp}$  = carga no limite proporcional (Kgf)

L = comprimento do vão (cm)

$DEF_{lp}$  = deformação do corpo no limite proporcional (cm)

B = largura do corpo de prova (cm)

H = altura do corpo de prova (cm)

I = momento de inércia da seção da tábua (cm<sup>4</sup>)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL ESTUDADO

A espécie utilizada foi o *Pinus taeda* L.

Na primeira fase de campo, o material de estudo originou-se dos plantios da Pisa Norske Skog, estando identificado como: *Pinus taeda*, Fazenda Mocambo, Projeto Mocambo 3, talhão 23, com idade de 30 anos na data da coleta dos dados. (Julho de 2001).

A segunda fase contou com material da mesma fazenda, do Projeto Mocambo 8, talhão 10308-1, com idade de 28 anos em Outubro de 2001, quando se iniciou a coleta de dados.

### 4.2 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

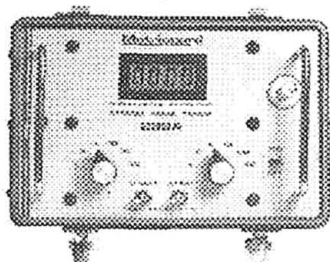
A avaliação não destrutiva do material deste trabalho deu-se por meio da utilização do aparelho denominado Stress Wave Timer, modelo 239-A, fabricado pela Metriguard. (Figura 1), com seus acessórios para aplicação de ondas de tensão.

Para as árvores e toras utilizou-se o método de impacto com o martelo e transdutor de chegada para aplicação das ondas de tensão. Nas lâminas e tábuas utilizou-se o sistema de garras e pêndulo de impacto.

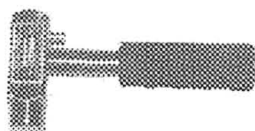
Inicialmente procedeu-se a avaliação do método mais eficiente de aplicação das ondas de tensão ao material. (Fase 1).

Selecionados os métodos procedeu-se a aplicação e avaliação dos tempos e velocidades de propagação acústica no material. (Fase 2).

FIGURA 1: aparelho Stress Wave Timer para ensaios não destrutivos e acessórios.



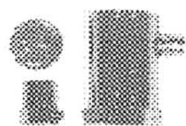
martelo de impacto



sistema de garras e pêndulo



transdutores



### 4.3 SELEÇÃO PRELIMINAR DO MÉTODO DE APLICAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM ÁRVORES EM PÉ

Foram utilizadas 13 árvores para realização das medidas de propagação de ondas acústicas.

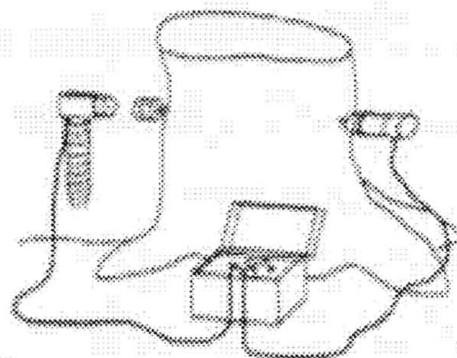
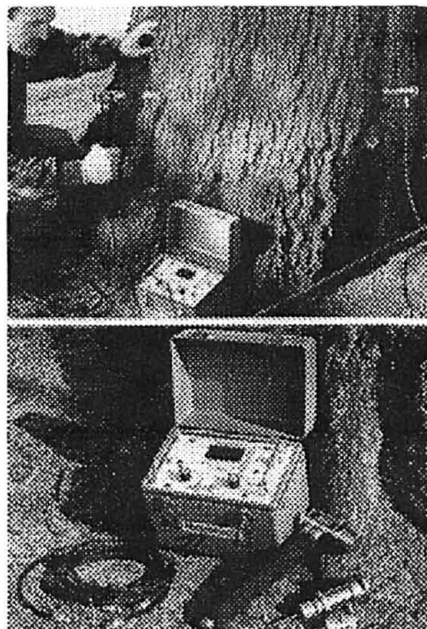
O objetivo principal desta fase foi fornecer parâmetros de ensaio, quanto à melhor maneira de utilização do método não destrutivo de avaliação.

Testou-se para as árvores em pé, três possibilidades:

- a) aplicação do impacto do martelo sobre a casca da árvore;
- b) aplicação do impacto do martelo sobre um prego cravado na madeira;
- c) aplicação do impacto do martelo diretamente na madeira, retirada a casca.

A avaliação com SWT ocorreu nas árvores em pé conforme a figura demonstrativa abaixo (Figura 2), porém na altura do DAP:

FIGURA 2 : utilização do martelo para propagação de ondas de tensão



## 4.4 AVALIAÇÃO EFETIVA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO

### 4.4.1 Em árvores em pé

Foram utilizadas 25 árvores para realização das medidas de propagação de ondas acústicas.

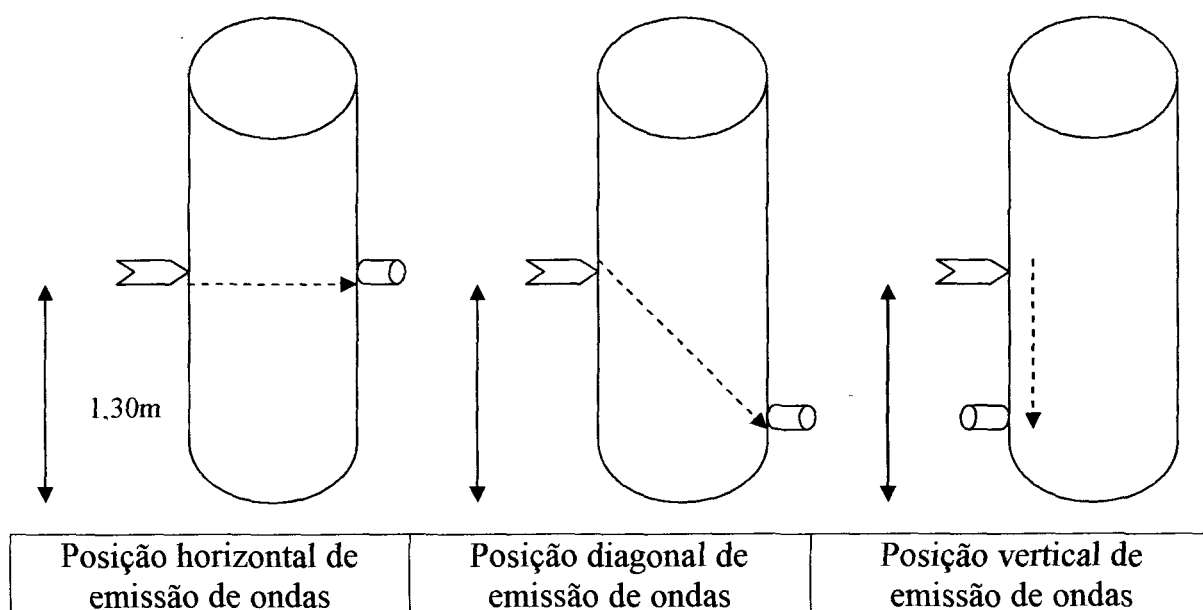
Adotou-se com base na fase 1 do experimento os seguintes procedimentos:

1. construção e utilização de aparato com objetivo de padronizar o impacto para emissão da onda de tensão;
2. realização da aplicação e recepção das ondas de tensão nas árvores em pé na altura do DAP diretamente na madeira, procedendo à prévia retirada da casca; (FOTOS 1, 2, ANEXO 4).
3. realização da tomada da onda de tensão em três posições: “horizontal”, “diagonal” e “vertical”. (FOTOS 3, 4, 5, ANEXO 4).
4. proceder à retirada de duas toras por árvore, destinando a primeira tora à confecção de lâminas, e a segunda tora à de tábuas. (FOTO 6, ANEXO 4).
5. nas toras traçadas, proceder à aplicação da onda de tensão no sentido de seu comprimento (longitudinal), em duas faixas: próximo à medula, e próximo à casca. (FOTO 9, ANEXO 4).
6. tomada nas lâminas das leituras de propagação das ondas de tensão nos sentidos longitudinal e transversal às fibras, posicionando os transdutores no ponto médio do comprimento e largura. (FOTO 16, ANEXO 4).
7. tomada, nas tábuas, das leituras de propagação das ondas de tensão no sentido longitudinal às fibras.

Testou-se para as árvores em pé, três sentidos de aplicação da onda de tensão:

- a) Sentido horizontal (FOTO 3, ANEXO 4)
- b) Sentido diagonal (FOTO 4, ANEXO 4)
- c) Sentido vertical (FOTO 5, ANEXO 4)

FIGURA 3: pontos de emissão e recepção das ondas de tensão aplicadas nas árvores.



#### 4.4.2 Seleção do método de aplicação de ondas de tensão nas toras

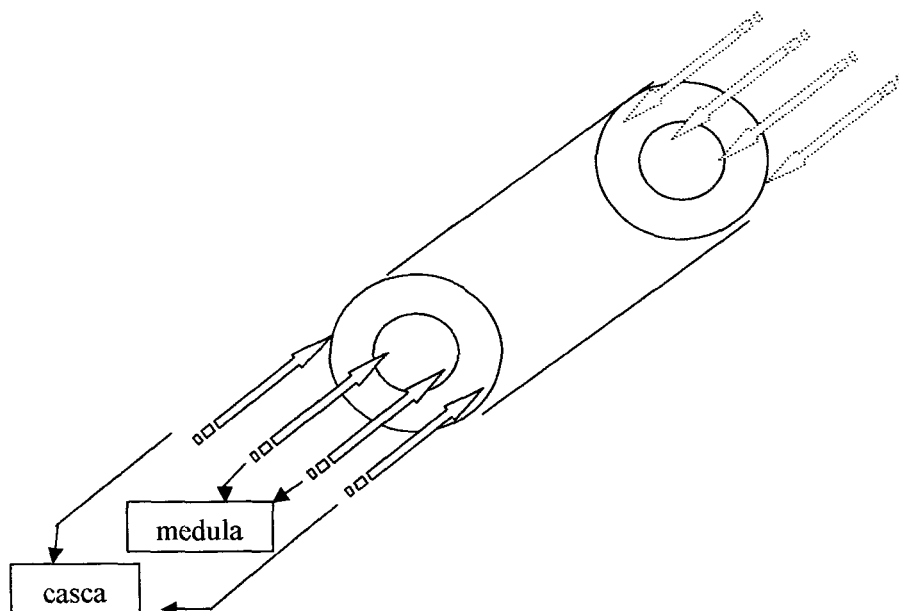
As árvores avaliadas foram derrubadas, seccionadas em toras e realizou-se também a avaliação com SWT nas toras com 2,60 m retiradas da base dos troncos.

As alternativas avaliadas para realização das medidas foram, no sentido longitudinal do tronco:

- a) aplicação, com martelo, do impacto na madeira na região próxima à medula;
- b) aplicação, com martelo, do impacto na madeira na região próxima à casca.

Estas medidas foram realizadas em dois raios opostos tomados a partir da medula, em cada uma das faces transversais da tora, ou seja, em seus topos. (Figura 3a).

FIGURA 3a: pontos de emissão e recepção das ondas de tensão aplicadas nas toras.



As alternativas avaliadas para realização das medidas foram, no sentido transversal do tronco no mesmo ponto de avaliação da árvore em pé:

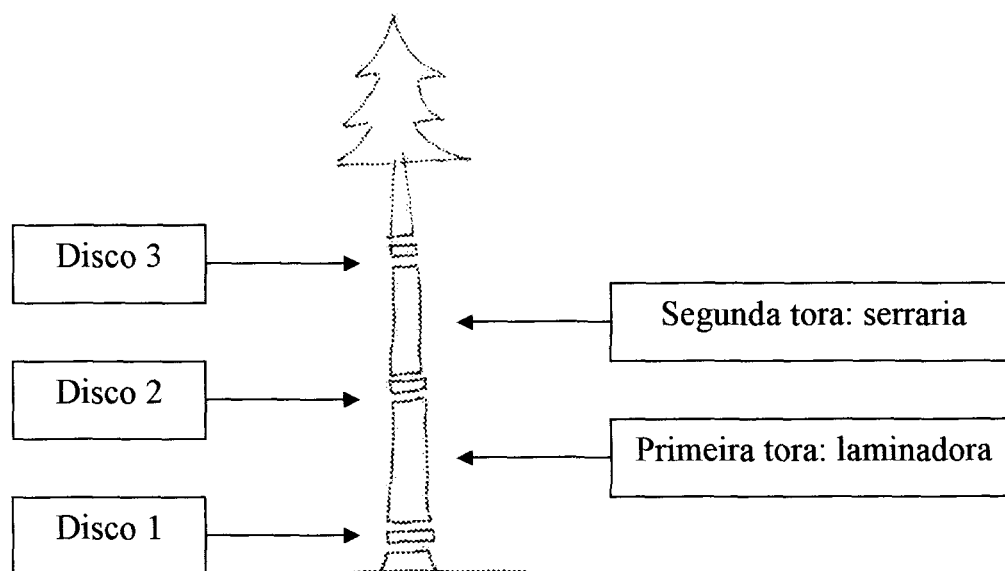
- a) aplicação do impacto do martelo sobre um prego cravado na madeira;
- b) aplicação do impacto do martelo diretamente na madeira, retirada a casca.

#### 4.4.3 Avaliação efetiva em toras

As árvores avaliadas foram derrubadas, traçadas em duas toras de 2,60 m realizando-se a avaliação com SWT, e a retirada de três discos transversais ao tronco, (FOTO 8, ANEXO 4) cada um com aproximadamente 10 centímetros de

altura, respectivamente da base da árvore, entre as duas toras, e do topo da segunda tora conforme o esquema a seguir:

FIGURA 4: Diagrama esquemático da retirada de amostras das árvores.



As alternativas avaliadas para realização das medidas foram, no sentido longitudinal das toras:

- a) Aplicação do impacto com martelo na madeira na região próxima à medula;
- b) Aplicação do impacto com martelo na madeira na região próxima à casca.

A primeira tora foi encaminhada para a confecção de lâminas e a segunda tora para a de tábuas.

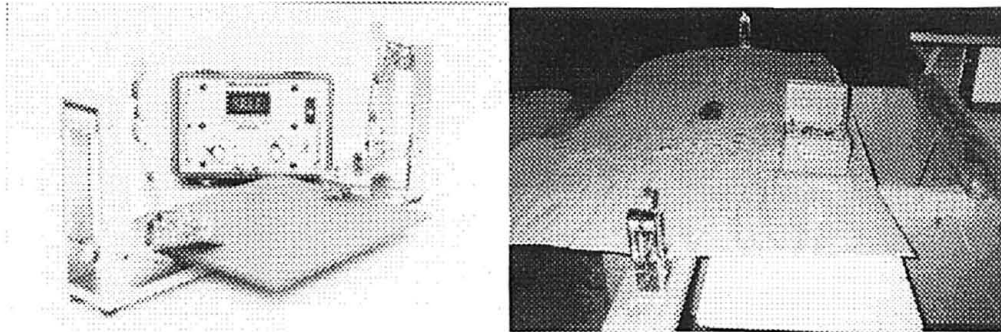
#### 4.4.4 Avaliação efetiva em lâminas

Por fim avaliou-se a propagação acústica nos sentido longitudinal e transversal às fibras nas lâminas, produzidas a partir das toras de base. A espessura das lâminas foi de 2,2 mm, sua largura de 1,40m e seu comprimento de 2,60 m; além da



propagação acústica no sentido longitudinal das tábuas de 2,23 m de comprimento, 2,5 cm de espessura, e larguras variadas.

FIGURA 5 - aspecto do SWT e acessórios para avaliação de lâminas e painéis.



Nas lâminas da fase 1 a distância entre os sensores no sentido transversal foi de 1,12 m, e no sentido longitudinal, de 2,29 m.

Nas lâminas da fase 2 a distância entre os sensores no sentido transversal foi de 1,135 m, e no sentido longitudinal, de 2,30 m.

#### 4.4.5 Avaliação efetiva nas tábuas

As tábuas originárias das segundas toras foram avaliadas somente na fase 2, sendo aplicada a onda de tensão ao material no sentido longitudinal das mesmas, acompanhando o sentido das fibras.

### 4.5 PROCEDIMENTOS DE CONVERSÃO DO MATERIAL

#### 4.5.1 Derrubada e retirada das árvores do talhão

A operação de derrubada das árvores do talhão foi realizada por uma equipe da empresa utilizando duas motosserras, uma para a derrubada e outra para o desgalhamento.

Para a retirada das árvores do talhão e seu reposicionamento no acero utilizou-se um trator de arraste, com os implementos necessários a esta atividade. (FOTO 6, ANEXO 4)

#### 4.5.2 Seccionamento das árvores

Com as árvores todas colocadas em uma área mais limpa, procedeu-se a operação de traçamento em toras de 2,60 m e retirada de fatias para análises.

As fatias foram retiradas das árvores em três posições: uma da base da primeira tora, outra intermediária entre primeira e segunda toras, e a última do topo da segunda tora. (FOTO 8, ANEXO 4)

#### 4.5.3 Identificação do material

Utilizou-se de marcas de tinta sobre as cascas para identificar as primeiras toras destinadas à produção das lâminas para o ensaio. (FOTOS 10, 11, ANEXO 4)

As marcas de tinta nos topos foram utilizadas para identificar as segundas toras destinadas à serraria para produção das tábuas para o ensaio.

Além da identificação pela cor, todas as toras possuem uma numeração, sendo que os números pares correspondem às segundas toras, e a numeração ímpar, às primeiras toras do experimento.

#### 4.5.4 Conversão em lâminas

As toras com umidade natural destinadas à produção das lâminas foram levadas ao pátio da laminadora e posicionadas no torno de laminação, sem nenhum tipo de pré tratamento como, por exemplo, o aquecimento com vapor.

Após a obtenção das lâminas, estas formaram pilhas numeradas de acordo com as toras das quais eram provenientes. (FOTOS 17, 18, 19, ANEXO 4).

#### 4.5.5 Conversão em tábuas

As toras destinadas à produção das tábuas foram levadas ao pátio da serraria e o descarregamento do caminhão feito com um trator adaptado com pás de empilhadeira. (FOTOS 12, 13, 14, ANEXO 4).

Após a obtenção e processamento das tábuas, estas formaram uma pilha na qual todas as tábuas foram numeradas de acordo com as toras das quais eram originárias. (FOTOS 15, 16, ANEXO 4).

#### 4.5.6 Classificação das lâminas

Na fase 1 as lâminas foram classificadas visualmente pelas funcionárias da laminadora em duas classes: A e B.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO EM ÁRVORES EM PÉ, TORAS, LÂMINAS E TÁBUAS

Para as árvores em pé, os tempos médios de propagação acústica em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ) obtidas, na altura do DAP, foram:

TABELA 1: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão em 13 árvores

	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Prego	413,63	32,73	8,01
Madeira	1198,45	59,25	4,93
Casca	4454,27	1281,20	27,33

Com base nos valores acima, a opção natural seria a utilização do método pelo qual a aplicação e recebimento da onda de tensão pelos transdutores se dão diretamente na madeira, já que apresenta o menor coeficiente de variação para as leituras.

A aplicação da onda de tensão diretamente na madeira ocorreu procedendo-se apenas a retirada da casca nos pontos de aplicação e recepção da onda de tensão.

Apesar de a aplicação do impacto e a recepção da onda com os transdutores diretamente sobre a casca da árvore, parecer a solução mais adequada por possibilitar maior rapidez e menor custo na operação, esta pôde ser descartada por apresentar o maior coeficiente de variação dentre as três metodologias inicialmente propostas. Ainda a grande diferença entre os valores de tempos de propagação existente entre as leituras na casca e no prego ou madeira, pode ser explicada lembrando-se que a casca exerce naturalmente a função de isolante térmico, físico e acústico da árvore, protegendo desta maneira o câmbio.

Para as toras, as medidas de propagação acústica em micro segundos obtidas no sentido longitudinal, foram:

TABELA 2: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão em 13 árvores

	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Próximo à Medula	1284,8	124,77	9,7
Próximo à Casca	1195,1	131,53	11,0

Os valores numéricos das leituras realizadas tanto próximo à casca quanto à medula foram muito próximos. Desta maneira, a opção tomada foi a repetição da metodologia aplicada anteriormente nas toras da segunda fase.

Para as toras, as medidas de propagação acústica em micro segundos obtidas no sentido transversal, foram:

TABELA 3: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão em 13 árvores

	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Prego	419,18	38,89	9,54
Madeira	1157,08	52,24	4,50
Casca	2059,9	171,96	8,01

A realização destas medições tornou-se complicada à medida que estando as toras traçadas e estaleiradas à beira do caminho, umas sobre as outras, por momentos não era possível alcançar a região de interesse para realização do ensaio. Tal dificuldade fez com que fossem realizadas apenas as medições possíveis, ou seja, nas toras às quais era permitido o acesso.

Em todas as situações anteriores o impacto foi produzido pelo martelo do aparelho impulsionado pelo braço do operador. Houve grande variação nas leituras de tempo de propagação de onda observadas, o que se torna compreensível considerando a variação da intensidade de impacto causada pela fadiga muscular,

pelo posicionamento diferenciado entre uma aplicação e outra, entre outras variáveis.

Para as lâminas observou-se a distância dos sensores no sentido transversal igual a 1,12 m; a distância dos sensores no sentido longitudinal igual a 2,29 m, e espessura igual a 2,2 mm.

As medidas de propagação acústica das lâminas em micro segundos obtidas, foram:

TABELA 4: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão em lâminas obtidas das 13 árvores da Fase 1

Classe / sentido	Média das leituras $\mu$ s	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
A / transversal	3108,03	2189,75	70,45
A / longitudinal	2847,59	2288,44	60,05
B / transversal	2384,23	1431,95	80,36
B / longitudinal	3571,44	2272,41	63,62

Obteve-se ainda o rendimento de cada tora na produção de lâminas com seu correspondente volume em metros cúbicos de madeira, conforme a tabela a seguir:

TABELA 5: Valores de rendimento em lâminas obtidas das 13 árvores da Fase 1

Tora	Tora			Vol total lâminas	
	Diâmetro 1	Diâmetro 2	Volume (cm <sup>3</sup> )	Classe A	Classe B
1	46,0	37,0	4298,66	0,128128	0,16016
2	45,5	49,0	7539,14	0,048048	0,112112
3	47,5	40,0	5024,00	0,208208	0,016016
4	34,0	27,0	2289,06	0,00000	0,064064
5	45,0	28,0	2461,76	0,00000	0,048048
6	41,0	57,0	10201,86	0,136136	0,12012
7	33,0	28,0	2461,76	0,048048	0,032032
8	45,0	37,0	4298,66	0,112112	0,064064
9	26,0	22,0	1519,76	0,00000	0,008008
10	41,0	36,0	4069,44	0,12012	0,056056
11	41,0	32,0	3215,36	0,12012	0,00000
12	49,5	40,0	5024,00	0,088088	0,152152
13	44,0	33,0	3419,46	0,088088	0,112112

Finalmente, utilizando o programa estatístico “Statistica for Windows”, procedeu-se a análise de correlação dos valores de tempo de propagação em micro segundos entre as variáveis em questão.

TABELA 6 Correlações das médias de leituras em micro-segundos

variáveis	Prego	Madeira	Casca	Pmedula	Pcasca	Along	Blong	Atran	Btran	Avol	Bvol
Prego	1	0,55	0,12	0,49	0,36	0,23	-0,28	-0,55	0,32	0,79	-0,16
Madeira		1	-0,17	0,42	0,03	0,25	-0,40	-0,63	0,13	0,79	0,23
Casca			1	0,28	0,15	0,05	-0,63	-0,36	0,32	-0,18	0,31
Pmedula				1	0,88	-0,39	-0,84	-0,92	-0,23	0,52	0,15
Pcasca					1	-0,53	-0,57	-0,64	-0,40	0,29	-0,10
Along						1	0,15	0,19	0,72	0,28	-0,07
Blong							1	0,90	-0,03	-0,33	-0,41
Atran								1	-0,05	-0,62	-0,36
Btran									1	0,35	0,02
Avol										1	-0,21
Bvol											1

N=8, p=0,05

Analisando as correlações dos tempos de propagação em micro segundos referentes à primeira fase de coleta de dados, observa-se um valor de 0,88 entre as leituras realizadas nas primeiras toras nas regiões próximo à medula e próximo à casca, porém sem muita aplicação prática pois ambas referem-se à mesma situação

material: a tora. Com relação à leitura realizada próxima à medula, há correlações altas com as leituras realizadas nas lâminas classe B sentido longitudinal e com as leituras nas lâminas classe A transversal (-0,84 e -0,92). Há ainda correlação de 0,90 entre as lâminas de classe B no sentido longitudinal e de classe A no sentido transversal; e de 0,72 entre as lâminas de classe B sentido transversal e classe A longitudinal sem muita aplicação prática pelos mesmos motivos apresentados anteriormente. As correlações mais interessantes do ponto de vista prático são as existentes entre as leituras na árvore em pé através do prego e diretamente na madeira e o volume de lâminas classe A em metros cúbicos (0,79).

## 5.2 AVALIAÇÃO EFETIVA DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO

### 5.2.1 Para as árvores em pé

Para as árvores em pé, as medidas de propagação acústica em micro segundos obtidas com o auxílio do aparato construído, foram:

TABELA 7: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão nas árvores em pé

	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Horizontal	1.065,67	181,22	17,01
Diagonal	1.879,43	150,85	8,03
Vertical	1.474,32	476,37	32,31

Observa-se nos valores acima que a realização das medidas de tempo de propagação de ondas de tensão no sentido diagonal é o mais homogêneo, já que apresenta o menor coeficiente de variação para as leituras.

A aplicação da onda de tensão diretamente na madeira ocorreu procedendo-se apenas a retirada da casca nos pontos de aplicação e recepção da onda de tensão.



### 5.2.2 Para as primeiras toras

Para as primeiras toras, as medidas de propagação acústica em microssegundos obtidas no sentido longitudinal, foram:

TABELA 8: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão nas primeiras toras

Sentido	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Longitudinal	1.161,30	87,25	7,51
Cruzado	1.161,39	65,73	5,66

Os valores numéricos das leituras realizadas tanto no sentido longitudinal quanto no sentido cruzado, através da medula, foram muito próximos. Porém, nota-se que o sentido cruzado apresenta maior homogeneidade nas leituras, apresentando o menor coeficiente de variação.

### 5.2.3 Para as segundas toras

Para as segundas toras, as medidas de propagação acústica em microssegundos obtidas, foram:

TABELA 9: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão nas segundas toras

Sentido	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Longitudinal	1.114,47	77,14	6,92
Cruzado	1.156,33	73,78	6,38

Observa-se que as leituras realizadas permanecem próximas numericamente, apresentando mais uma vez o sentido cruzado o menor coeficiente de variação, com valores mais homogêneos.

Comparando-se as leituras apresentadas nas tabelas anteriores para as primeiras e segundas toras, observa-se que estas se encontram numericamente muito próximas, bem como apresentam coeficientes de variação também próximos; o que leva a dizer que estas variações de metodologia podem ser aplicadas independentemente sem prejuízo para os resultados de avaliação.

#### 5.2.4 Para as lâminas

Para as lâminas observou-se a distância dos sensores no sentido transversal igual a 1,135 m; a distância dos sensores no sentido longitudinal igual a 2,30 m, e espessura igual a 2,2 mm.

As medidas de propagação acústica das lâminas em micro segundos obtidas, foram:

TABELA 10: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão nas segundas toras

Sentido	Média das leituras $\mu\text{s}$	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
Longitudinal	4.581,44	2144,84	46,82
Transversal	4.853,70	1851,87	38,15

#### 5.2.5 Para as tábuas

As medidas de propagação acústica das tábuas em micro segundos obtidas, foram:

TABELA 11: Valores médios do tempo de propagação de ondas de tensão nas segundas toras

sentido	Média das leituras $\mu$ s	Desvio padrão médio	Coefficiente de variação médio
longitudinal	599,24	28,61	4,78

As correlações entre as variáveis estudadas assim se apresentaram:

TABELA 12 Correlações das médias de leituras em micro-segundos

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,42	0,16	0,08	0,05	0,00	0,14	-0,11	0,46	0,06
Arvdiag		1	0,48	0,27	0,17	0,41	0,74	0,23	0,42	0,06
Arvvert			1	-0,09	-0,10	0,16	0,18	0,17	0,55	0,32
Ptlong				1	0,73	0,35	0,16	0,09	-0,14	-0,07
Ptcruz					1	0,31	0,16	-0,04	-0,27	-0,07
Stlong						1	0,61	0,19	-0,07	0,28
Stcruz							1	0,20	0,08	0,08
Lamlong								1	0,39	0,24
Lamcruz									1	0,32
Tablong										1

N=23, p=0,05

variáveis	
Arvhoriz	Leitura na árvore em pé no sentido horizontal.
Arvdiag	Leitura na árvore em pé no sentido diagonal.
Arvvert	Leitura na árvore em pé no sentido vertical.
Ptlong	Leitura na primeira tora no sentido longitudinal.
Ptcruz	Leitura na primeira tora no sentido cruzado.
Stlong	Leitura na segunda tora no sentido longitudinal.
Stcruz	Leitura na segunda tora no sentido cruzado.
Lamlong	Leitura na lâmina no sentido longitudinal às fibras.
Lamcruz	Leitura na lâmina no sentido transversal às fibras.
Tablong	Leitura na tábua no sentido longitudinal.

Observa-se correlação significativa entre os tempos de propagação das ondas de tensão entre as leituras na árvore em pé feitas no sentido horizontal e no sentido diagonal (0,42); e entre os sentidos diagonal e vertical (0,48). Essas correlações, entretanto, não tem utilidade prática pois dizem respeito à mesma condição de avaliação, ou seja, a árvore em pé. O mesmo ocorre entre as leituras realizadas nas primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado através da medula (0,73) e entre as leituras nas segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,61). Por outro lado, é de utilidade prática a correlação existente entre a leitura

diagonal da árvore em pé e a leitura na segunda tora no sentido cruzado (0,74), o que significa dizer que é possível estabelecer, a partir da árvore em pé, uma relação com seu produto, a tora. O mesmo acontece com as leituras horizontal diagonal e vertical e as lâminas no sentido perpendicular às fibras (0,46; 0,42; 0,55 respectivamente).

TABELA 13 Correlações da velocidade de propagação em m/s

variáveis	Arvhoriz	Arvdia g	Arvvert t	Ptlong g	Ptcruz z	Stlong g	Stcruz z	Lamlong g	Lamcruz z	Tablong g
Arvhoriz	1	0,58	0,50	0,34	0,12	0,52	0,17	-0,15	0,20	0,37
Arvdia g		1	0,72	0,39	0,16	0,77	0,46	0,03	0,16	0,41
Arvvert t			1	0,25	0,07	0,58	0,35	-0,02	0,34	0,37
Ptlong g				1	0,70	0,37	0,09	0,05	0,18	-0,04
Ptcruz z					1	0,28	0,12	0,07	-0,07	-0,06
Stlong g						1	0,58	0,15	0,03	0,31
Stcruz z							1	0,15	0,14	0,10
Lamlong g								1	0,20	0,22
Lamcruz z									1	0,07
Tablong g										1

N=23, p=0,05

Considerando as correlações estabelecidas entre as velocidades de propagação pode-se observar o destaque dado àquelas entre as árvores em pé no sentido horizontal e nos sentidos diagonal e vertical (0,58 e 0,50) e entre as árvores em pé nos sentidos diagonal e vertical (0,72) não sendo estes, entretanto, valores de utilidade prática. Novamente há correlação entre as velocidades nas primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,70) as velocidades nas segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,58). Os valores interessantes do ponto de vista da aplicação prática dessas correlações surgem entre as leituras na árvore em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e as segundas toras no sentido longitudinal (0,52; 0,77; 0,58 respectivamente) e ainda as velocidades nas árvores em pé no sentido diagonal e as segundas toras no sentido cruzado (0,46).

TABELA 14 - Correlações das médias de velocidades m/s

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong	Numlam
Arvhoriz	1	0,64	0,61	0,47	0,27	0,69	0,28	0,04	0,03	0,36	0,30
Arvdiag		1	0,77	0,43	0,26	0,79	0,47	0,32	0,16	0,43	0,80
Arvvert			1	0,41	0,18	0,65	0,26	0,27	0,37	0,39	0,60
Ptlong				1	0,71	0,33	0,13	0,02	0,27	0,04	0,02
Ptcruz					1	0,24	0,13	-0,09	0,02	0,09	-0,10
Stlong						1	0,59	0,25	0,08	0,38	0,47
Stcruz							1	0,38	0,20	0,11	0,25
Lamlong								1	0,62	0,45	0,53
Lamcruz									1	-0,02	0,18
Tablong										1	0,52
Númlam											1

N=17, p=0,05

variáveis	
Arvhoriz	Leitura na árvore em pé no sentido horizontal.
Arvdiag	Leitura na árvore em pé no sentido diagonal.
Arvvert	Leitura na árvore em pé no sentido vertical.
Ptlong	Leitura na primeira tora no sentido longitudinal.
Ptcruz	Leitura na primeira tora no sentido cruzado.
Stlong	Leitura na segunda tora no sentido longitudinal.
Stcruz	Leitura na segunda tora no sentido cruzado.
Lamlong	Leitura na lâmina no sentido longitudinal às fibras.
Lamcruz	Leitura na lâmina no sentido transversal às fibras.
Tablong	Leitura na tábua no sentido longitudinal.
Númlam	Rendimento em número de lâminas.

As correlações apresentadas neste quadro correspondem àquelas obtidas através da análise das velocidades médias de propagação de ondas de tensão, estas obtidas das repetições das leituras realizadas em cada situação variante. As correlações significativas entre as posições na árvore em pé nos sentidos horizontal e diagonal (0,64), horizontal e vertical (0,61), e diagonal e vertical (0,77) não apresentam valor prático pois dizem respeito à mesma situação: árvore em pé. O mesmo se observando quanto às leituras nas primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,71), nas segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,59), nas lâminas nos sentidos longitudinal e transversal (0,62). Por outro lado, com aplicação prática têm-se as correlações entre as segundas toras e respectivamente as árvores em pé no sentido horizontal, diagonal e vertical (0,69; 0,79; 0,65); e ainda entre o rendimento em número de lâminas e as leituras na árvore em pé sentido diagonal (0,80) e na árvore em pé sentido vertical (0,60).

TABELA 15 - Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, densidade da árvore

variáveis	Arvhoriz	Arvdia	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
	z	g	t	g	z	g	z	g	z	g
Arvhoriz	1	0,63	0,64	0,53	0,38	0,61	0,33	-0,15	0,25	0,49
Arvdia		1	0,80	0,58	0,46	0,80	0,58	-0,04	0,35	0,58
Arvvert			1	0,54	0,40	0,70	0,50	-0,07	0,46	0,50
Ptlong				1	0,82	0,64	0,51	0,09	0,45	0,50
Ptcruz					1	0,66	0,66	0,16	0,27	0,61
Stlong						1	0,79	0,13	0,25	0,69
Stcruz							1	0,12	0,31	0,69
Lamlong								1	0,06	0,17
Lamcruz									1	0,19
Tablong										1

N=23, p=0,05

Com os valores de densidade obtidos das amostras dos discos retirados das árvores, a velocidade de propagação da onda de tensão e a distância percorrida por esta onda foi possível calcular os Módulos de Elasticidade Dinâmicos (MOEd) do material em estudo. Analisando as correlações entre os valores de MOEd observa-se que elas aparecem entre um número maior de variáveis. Para as variações de leituras nas árvores em pé há correlação significativa entre as variáveis árvore em pé sentido horizontal e sentidos diagonal e vertical (0,63 e 0,64) e entre árvore em pé sentido diagonal e vertical (0,80) sem entretanto serem estes valores de aplicação prática. Relações práticas existem entre os MOEd das árvores em pé e nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e as primeiras toras (0,53; 0,58; 0,54). Há correlação significativa e de aplicação prática ainda entre os MOEd das árvores em pé no sentido diagonal e as primeiras toras no sentido cruzado através da medula (0,46). Correlação de 0,82 aparece entre os MOEd das primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado, porém sem utilidade do ponto de vista prático. Com as segundas toras no sentido longitudinal há correlação significativa dos MOEd das árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical (0,61; 0,80; 0,70), e com

os MOEd das primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,64 e 0,66). As segundas toras no sentido cruzado apresentam correlação com as árvores em pé no sentido diagonal e vertical (0,58 e 0,50); e com as primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,51 e 0,66), estas sim com utilidade prática. Há ainda correlação das segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,79) sem aplicação prática. Com as lâminas no sentido transversal às fibras há correlações significativas com as árvores em pé no sentido vertical (0,46) e com as primeiras toras no sentido longitudinal (0,45). Os MOEd das tábuas no seu sentido longitudinal apresentaram correlação com os MOEd das árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical (0,49; 0,58; 0,50), com as primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,50 e 0,61) sem valor prático pois destas produziram-se as lâminas do experimento, e ainda com as segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,69 e 0,69) material do qual se processaram as tábuas.

TABELA 16 - Correlações entre módulos de elasticidade individuais

variáveis	Velarvhor	Velardia	Velarver	Vel1tlon	Vel1tcru	Vellamlon	Vellamtra	Vel2tlon	Vel2tcru	Veltablon	Moelalda	Moelatda	Moelld1t	Moeltd1t	Moeltda	Moeltd2t
Velarvhor	1	0,58	0,53	0,34	0,13	-0,17	-0,06	0,53	0,17	0,24	-0,19	-0,09	-0,19	-0,10	0,38	0,25
Velardia		1	0,72	0,40	0,18	0,01	0,01	0,77	0,46	0,23	-0,08	-0,04	-0,09	-0,04	0,39	0,27
Velarver			1	0,38	0,10	-0,02	0,10	0,59	0,36	0,15	-0,07	-0,01	-0,08	-0,02	0,25	0,24
Vel1tlon				1	0,79	0,08	0,02	0,37	0,09	0,11	0,07	0,04	0,07	0,04	0,23	0,24
Vel1tcru					1	0,09	0,01	0,28	0,12	0,03	0,13	0,07	0,13	0,07	0,17	0,13
Vellamlon						1	0,21	0,08	0,08	-0,02	0,94	0,12	0,94	0,12	-0,01	-0,01
Vellamtra							1	0,05	0,09	-0,07	0,13	0,96	0,13	0,89	-0,02	-0,01
Vel2tlon								1	0,58	0,25	0,03	0,04	0,02	0,04	0,33	0,29
Vel2tcru									1	0,01	0,03	0,04	0,02	0,04	0,23	0,15
Veltablon										1	-0,04	-0,08	-0,04	-0,08	0,92	0,94
Moelalda											1	0,06	1,00	0,06	-0,03	-0,04
Moelatda												1	0,06	1,00	-0,05	-0,06
Moelld1t													1	0,06	-0,03	-0,04
Moeltd1t														1	-0,06	-0,06
Moeltda															1	0,97
Moeltd2t																1

N=113, p=0,05

variáveis	
Velarvhor	Velocidade de propagação da onda na árvore no sentido horizontal.
Velardia	Velocidade de propagação da onda na árvore no sentido diagonal.
Velarver	Velocidade de propagação da onda na árvore no sentido vertical.
Vel1tlon	Velocidade de propagação da onda na primeira tora no sentido longitudinal.
Vel1tcru	Velocidade de propagação da onda na primeira tora no sentido cruzado.
Vellamlon	Velocidade de propagação da onda lâmina no sentido longitudinal.
Vellamtra	Velocidade de propagação da onda lâmina no sentido transversal.
Vel2tlon	Velocidade de propagação da onda na segunda tora no sentido longitudinal.
Vel2tcru	Velocidade de propagação da onda na segunda tora no sentido cruzado.
Veltablon	Velocidade de propagação da onda na tábua no sentido longitudinal.
Moelalda	Módulo de elasticidade das lâminas sentido longitudinal, calculado com a densidade da árvore.
Moelatda	Módulo de elasticidade das lâminas sentido transversal, calculado com a densidade da árvore.
Moelld1t	Módulo de elasticidade das lâminas sentido longitudinal, calculado com a densidade da primeira tora.
Moeltd1t	Módulo de elasticidade das lâminas sentido transversal, calculado com a densidade da primeira tora.

Moeltda	Módulo de elasticidade das lâminas sentido transversal, calculado com a densidade da árvore.
Moeltd2t	Módulo de elasticidade das lâminas sentido longitudinal, calculado com a densidade da segunda tora.

As correlações apresentadas correspondem àquelas entre os cálculos de MOEd considerando todas as leituras de tempo de propagação das ondas de tensão, e conseqüentemente, as velocidades de propagação de todas as repetições das leituras. Com esses dados, obteve-se correlações significativas entre as velocidades de propagação da onda de tensão nas árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e a velocidade nas segundas toras sentido longitudinal (0,53; 0,77; 0,59); e nos sentidos diagonal e vertical e nas segundas toras no sentido cruzado através da medula (0,46; 0,36). Com as velocidades nas tábuas no sentido longitudinal as correlações existentes foram com as velocidades nas árvores em pé nos sentidos horizontal e diagonal (0,24; 0,23). Outra correlação útil e de aplicação prática é a existente entre o MOEd das lâminas no sentido longitudinal considerando a densidade média da árvore e a velocidade de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal (-0,19). O mesmo valor (-0,19) aparece correlacionando a velocidade de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal e o MOEd das lâminas no sentido longitudinal considerando a densidade da primeira tora. Há ainda correlações entre as velocidades de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal e os MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore e da segunda tora (0,28; 0,25). A velocidade de propagação de onda nas segundas toras no sentido longitudinal e cruzado através da medula correlacionam-se com os MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore e da segunda tora (0,33; 0,29); e finalmente, a velocidade de propagação de onda nas segundas toras no sentido cruzado através da medula correlaciona-se com o MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore (0,23).



## 6 CONCLUSÕES

Metodologia de aplicação de ondas de tensão:

- a melhor forma de aplicar a onda de tensão é diretamente na madeira;
- para as toras, no seu sentido longitudinal, a região próxima à medula apresenta leituras mais homogêneas;
- as leituras realizadas nas lâminas apresentaram valores numéricos muito próximos tanto no sentido longitudinal quanto no transversal às fibras;
- é necessária a padronização do impacto do martelo emissor de ondas acústicas.

Com relação à aplicação do impacto na árvore em pé do martelo emissor da onda de tensão, a melhor alternativa é fazê-lo no sentido diagonal por este apresentar menor coeficiente de variação, e conseqüentemente medidas mais homogêneas.

- Nas toras, a emissão da onda de tensão pelo impacto é recomendada no sentido cruzado, através da medula, entre a emissão e recepção da onda.
- Observou-se novamente a igualdade de valores de tempo de propagação em micro segundos da onda de tensão nas lâminas nos dois sentidos avaliados: longitudinal e transversal às fibras; sendo o sentido transversal o mais homogêneo quanto às leituras. Tal observação está em desacordo com os resultados obtidos por MATOS, 1997, o que faz ressaltar-se que há influência da umidade nas avaliações, já que no presente estudo as leituras foram realizadas em lâminas totalmente úmidas, ao contrário do estudo anterior no qual as lâminas foram trabalhadas secas.

- O método não destrutivo de emissão de ondas acústicas é eficiente na avaliação de propriedades de madeiras e no estabelecimento de classes de qualidade para elas.
- Há eficiência no sortimento em classes de qualidade das árvores primeiramente, pelo método não destrutivo, resultando na correlação entre estas e seus produtos: toras, tábuas e lâminas.
- Há também eficiência no sortimento em classes de qualidade das toras pelo método não destrutivo, resultando na correlação entre elas e seus produtos: tábuas e lâminas.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Em vista das baixas correlações observadas recomenda-se a realização da amostragem de um maior número de indivíduos (árvores) para as análises; bem como de uma maior amplitude de qualidades de material, já que os materiais disponíveis para este estudo foram de qualidade excelente.

Recomenda-se ainda que seja realizado o estudo com o material após secagem (tábuas e lâminas), para verificar a influência da umidade neste processo e método de avaliação de qualidade da madeira.

E, finalmente, que se procure estabelecer correlações entre os valores de Módulo de elasticidade dinâmicos calculados a partir do método não destrutivo de ensaio, e os valores de Módulo de elasticidade obtidos pelos ensaios tradicionais com a utilização de corpos de prova.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Normas Técnicas NBR7190**, Rio de Janeiro, 1998.
- 2 ASTM – American Society for Testing and Materials. **Annual Book of ASTM standards**. Philadelphia, 1999.
- 3 BARADIT, E, FUENTEALBA, C. **Determinacion de las constantes elasticas del Pinus radiata D. Don por ultrasonido. Parte 1**. ANAIS 7º EBRAMEM Encontro brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira. São Carlos, SP2000
- 4 BECHTEL, F.K. **Use of the Metriguard Model 239A Stress Wave Timer**, Metriguard Inc. Pullman, WA, Junho 1986.
- 5 BERALDO, A.L., ZOULALIAN, A. BUCUR, V. **Appllication des ultrasons à un composite bois ciment: mise en évidence du rôle inhibiteur des sucres sur la prise et le durcissement du ciment** Textes des communications présentées au: Séminaire annuel de l'Ecole Doctorale PROMEN "La Matière Divisée", Nancy, France, 26-27 Mai, 1994.
- 6 BODIG, J. **The process of NDE research for wood and wood composites**, 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood March, 2001, VOL.6, n° 3, NDT.net - <http://www.ndt.net/articlle/v06n03/bodig/bodig.htm> (em 03/04/2002)
- 7 BUCUR, V. **Acoustics of Wood**, Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Recherches Forestières, Nancy, França, 1995.
- 8 BUCUR, V., PERRIN, J.R. **Slope of grai ultrasonic measurements in living trees and timber**. Kurz Originalia, Alemanha, 1989.
- 9 BUCUR, V. BÖHNKE, I., **Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood** ULTRASONICS, vol 32, n5, p385-390, 1994.

- 10 BUCUR, V. **Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock** Ultrasonics, n36, p813-824, 1998.
- 11 BUCUR, V., GARROS, S., NAVARRETE, A., TROYA, M.T.de, GUYONNET, R., **Kinetics of wood degradation by fungi with X-ray microdensitometric technique**, Wood Science and Technology, n31, p383-389, 1997.
- 12 BUCUR, V. **Les Proprietes acoustiques du bois pour violons AEL** – European Association of Violin and Bow Makers – Congress, Siena, Italia, 9-12 octobre, 1999.
- 13 BUCUR, V. **Ultrasonic, hardness and x-ray densitometric analysis of wood** ULTRASONICS, p 269-275, November, 1985.
- 14 BUCUR, V. **Varieties of Resonance wood and their Elastic Constants** Journal of the catgut acoustical society, n47, p 42-48, May, 1987.
- 15 BUCUR, V. **Wood Structural anisotropy estimated by acoustic invariants** IAWA Bulletin, vol 9 (1), p67-74, 1988.
- 16 CALORI, JV., DIAS, GL., **Emprego do Ultra-som na determinação expedita da densidade básica da madeira. ANAIS 7º EBRAMEM Encontro brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira.** São Carlos, SP, 2000
- 17 CHAZELAS, J.L. VERGNE, A., BUCUR, V., **Analyse de la variation des proprietes physiques et mecaniques locales du bois autour des noueds** Actes du Colloque “Comportement Mecanique du Bois”, G.S. Rhéologie du Bois, Bordeaux, p376-386, 8-9 Juin, 1988.
- 18 COPANT – **Norma Panamericana**, Abril, 1972.
- 19 DAKAK, J.E. KELLER, R., BUCUR, V., **Rays in Juvenile Wood of Acer** IAWA Journal, Vol 20 (4), p 361-373, 1999.
- 20 FOLHA FLORESTAL, **Novos Usos para a madeira**, Viçosa – Minas Gerais, Editora Suprema, Número 90, Março/ Abril 98.

- 21 GALLIGAN, W.L.A. **A status report nondestructive testing in wood**, Forest Products Journal, Madison, v14, n5, p.221-227, 1964.
- 22 IBGE, Página da Internet: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)
- 23  
**INFORMATIVO STCP, Certificação Nacional de painéis de compensado**, Curitiba: Edição STCP, Número 3, 1999.
- 24 IWAKIRI, S. **Classificação de Madeiras Tropicais Através do Método Mecânico não Destrutivo**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1982.
- 25  
IWAKIRI, S. **Classificação mecânica não destrutiva em vigas de madeiras tropicais**. Acta Amazônica. V. 18 (1-2), p. 113-146, 1988.
- 26 KAISERLIK, J. **Nondestructive testing methods to predict effect of degradation on wood: a critical assessment**, US Forest Products Laboratory. General Technical Report, FPL-GTR-19, Madison, 1978.
- 27  
KLOCK, U. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- 28  
KOLLMAN, F., **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones**, 1950, Gráficas Reunidas AS, Hermosilla 110, Madrid, Espanha
- 29  
LARSON,P.R., KRETSCHMANN, D.E., CLARK III, A., ISEBRANDS, J.G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines – a synopsis**. US Forest Products Laboratory. General Technical Report, FPL-GTR-129, Madison, 2001.
- 30 LISBOA, C.D.J., MATOS, J.L.M., MELO, J.E., **Amostragem e Propriedades Físico-Mecânicas de Madeiras Amazônicas** IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Coleção Meio Ambiente, Série Estudos – Floresta, n1, Brasília, 1993.

- 31 MADEIRA E TECNOLOGIA, **Especial: SIMATEC 98**, Curitiba: Editora Setorial, Número 12, Ano 2.
- 32 MADEIRA E TECNOLOGIA, **MDF da TAFISA**, Curitiba: Editora Setorial, Número 9, Ano 2.
- 33 MATOS, J.L.M & KEINERT Jr, S. **Uso de emissão de ondas acústicas para classificação de lâminas e produção de painéis estruturais de lâminas paralelas** Trabalho apresentado nos Anais do VI EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e Em Estruturas de Madeira - Florianópolis 22 a 24 de julho de 1998. V4. p-332 a 341.
- 34 MATOS, J.L.M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de Lâminas Paralelas de Pinus taeda L**, Tese de Doutorado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1997.
- 35 MATOS, JLM, PUEHRINGER, CA, **Caracterização de propriedades de madeiras de Eucalyptus pelo uso de emissão de ondas acústicas** ANAIS 7º EBRAMEM Encontro brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira. São Carlos, SP, 2000.
- 36 MATSUNAGA, D. K. **Avaliação da utilização de madeira comercial de Pinus taeda L. e da adequabilidade da norma européia unificada (CEN), à construção de vigas laminadas coladas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR 1995
- 37 METRIGUARD INC. **Metriguard Model 239A Stress Wave Timer – Manual Care and Instructions, theory and data reduction**. Pullman, 1997.
- 38 MICHELOTTI, J., **Uso de Emissão de ondas acústicas para classificação de madeiras de Pinus tropicais** ANAIS 8º EVINCI – Evento de Iniciação Científica, UFPR, 2000.
- 39 NATERRER, J., SANDOZ, J.L. **Stand Der Technik Von Sylvatest**, EPFL – IBOIS, GC (Ecublens), CH – 1015 Lausane, Publication IBOIS 97:09 (D).

- 40 NIELSEN, I.R. **Utilização da madeira comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na confecção de vigas laminadas coladas.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 1998
- 41 PETERSON, K.R. **Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**, Madison, Wisconsin, 1993, Published by Conferences & Institutes, Washington State University, 1994.
- 42 PFEIL, W. **Estruturas de madeira**, Editora LTC, 5<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, RJ, 1994.
- 43 PIO, N. S., **Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.** Tese de doutorado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR 2002
- 44 PUEHRINGER, C.A. **Caracterização de propriedades de madeira pelo uso de emissão de ondas acústicas** ANAIS 7<sup>o</sup> EVINCI – Evento de Iniciação Científica, UFPR. 1999
- 45 REVISTA DA MADEIRA, **Investimentos estimulam a produção de painéis de madeira**, Curitiba: Editora Menegaz & Associados, Número 36, Ano 6.
- 46 REVISTA DA MADEIRA., **Inchamento e tensões em painéis compensados**, Curitiba: Editora Menegaz & Associados, Número 34, Ano 6.
- 47 ROSA, G.M. **Uso de métodos de emissão acústica para determinação não destrutiva de propriedades de painéis compensados de madeira.** ANAIS Pesquisa Florestal On Line UFPR. 2000
- 48 ROSS, R.J. e PELLERIN, R.F. **Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures – A Review.** US Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-GTR-70, Julho, 1997.

- 49 ROSS, R.J. WILLITS, S.W., VON SEGEN, W., BLACK, T., BRASHAW, B.K., PELLERIN, R.F., **A stress wave based approach to NDE of logs for assessing potential veneer quality. Part 1. small-diameter Ponderosa pine.** Forest Products Journal. Vol. 49, n° 11/12 – 1999.
- 50 ROSS, R.J. **Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools – A guide for use and interpretation.** Forest Products Laboratory, General Technical Report 114. Abril, 1999
- 51 ROSS, R.J. BRASHAW, B.K., PELLERIN, R.F. **Nondestructive Evaluation of Wood.** Forest Products Journal. Vol. 48, n° 1 – 1998.
- 52 ROSS, R.J. **Nondestructive evaluation of civil structures and materials.** Proceedings, University of Colorado, Boulder-Colorado, Maio, 1992.
- 53 SANDOZ, J.L., **Grading of construction timber by ultrasound,** Wood Science and Technology 23:95-108(1989), Lausanne, Switzerland
- 54 SCHAD, K.C. SHAMOLDT, D.L., ROSS, R.J., **Nondestructive methods for detecting defects in softwoods logs.** US Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-RP-546, Madison, 1996.
- 55 SUNLEY, J.G. **Grade Stresses for structural timbers** Ministry of Technology, Forest Products Research, Bulletin n47, third edition, metric units, London, 1968.
- 56 SYLVATEST, **Wood Quality Control by Non Destructive Testing – Sylvatest products line**
- 57 VETAS, **Arquitetura na Finlândia: tecnologia da construção de painéis,** Curitiba: Editora Vetas, Número 202, Ano 19, Maio 1999.
- 58 WANG, X. ROSS, R.J., MATTSON, J.A., ERICKSON, J.R., FORSMAN, J.W., GESKE, E.A., WEHR, M.A., **Several Nondestructive Evaluation Techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs.** Forest Products Laboratory, Research Paper 600.



## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### FASE 1 - Estudo Preliminar para Definição da Metodologia de Pesquisa

Espécie: P. taeda

Idade: 30 anos

Local coleta: Faz. Mocambo, Projeto Mocambo 03, talhão 86A

Data coleta dados: 30 e 31/07/01

#### Árvores em pé:

TABELA 1.1: Avaliação com SWT (Stress Wave Timer) - altura do DAP; leituras dos tempos de propagação da onda de tensão em micro-segundos: aplicação da onda de tensão sobre Pregos

Árvore	CAP	DAP	SWT D1	SWT D2	SWT D3	SWT D4	SWT D5	Média SWT	Desvio Padrão	Coef. Variação
1	127,5	40,6	452	441	389			427,3	33,65	7,87
2	139,5	44,4	456	426	457			446,3	17,61	3,95
3	139,0	44,2	601	505	550	563	526	549	36,62	6,67
4	102,0	32,5	462	391	316	333	414	383,2	59,69	15,58
5	104,0	33,1	293	328	307	313	312	310,6	12,58	4,05
6	144,3	45,9	544	491	479	437	431	476,4	45,83	9,62
7	96,7	30,8	380	385	398	413	320	379,2	35,47	9,36
8	126,0	40,1	463	475	451	499	493	476,2	20,07	4,22
9	79,0	25,1	343	261	300	373	346	324,6	44,12	13,59
10	118,5	37,7	405	360	409	362	443	395,8	35,03	8,85
11	112,0	35,7	427	353	381	343	380	376,8	32,62	8,66
12	138,5	44,1	529	432	427	481	459	465,6	41,59	8,93
13	119,0	37,9	366	382	352	365	366	366,2	10,63	2,91

Para todas as amostras:

média	413,64
Desv. Pad	32,74
Coef. Var	8,02

TABELA 1.2: Avaliação com SWT (Stress Wave Timer) - altura do DAP; leituras dos tempos de propagação da onda de tensão em micro-segundos: aplicação da onda de tensão sobre Madeira

Árvore	CAP	DAP	SWT D1	SWT D2	SWT D3	SWT D4	SWT D5	Média SWT	Desvio Padrão	Coef. Variação
1	127,5	40,6	1396	1432	1465			1431,0	34,51	2,41
2	139,5	44,4	1380	1447	1489	1571		1471,8	79,95	5,43
3	139,0	44,2	1556	1469	1405	1503	1495	1485,6	49,23	3,31
4	102,0	32,5	987	1058	1160	1030	1022	1051,4	58,83	5,60
5	104,0	33,1	861	852	866	865	857	860,2	5,19	0,60
6	144,3	45,9	1271	925	1049	1329	1409	1196,6	180,95	15,12
7	96,7	30,8	919	972	1002	985	1029	981,4	36,56	3,73
8	126,0	40,1	1177	1142	1184	1226	1195	1184,8	27,18	2,29
9	79,0	25,1	907	926	921	1018	1029	960,2	52,17	5,43
10	118,5	37,7	1222	1217	1284	1266	1292	1256,2	31,16	2,48
11	112,0	35,7	1259	1128	1140	1101	1162	1158	54,20	4,68
12	138,5	44,1	1239	1249	1335	1347	1331	1300,2	46,29	3,56
13	119,0	37,9	1163	1281	1276	1223	1270	1242,6	44,85	3,61

Para todas as amostras:

média	1198,5
Desv pad	59,26
Coef. Var	16,5

TABELA 1.3: Avaliação com SWT (Stress Wave Timer) - altura do DAP; leituras dos tempos de propagação da onda de tensão em micro-segundos: aplicação da onda de tensão sobre Casca

Árvore	CAP	DAP	SWT D1	SWT D2	SWT D3	Média SWT	Desvio Pad	Coef. Var
1	107	34,1	2382	2210	.	2296,00	121,62	5,30
2	129	41,1	7976	8546	.	8261,00	403,05	4,88
3	94	29,9	2133	2123	.	2128,00	7,07	0,33
4	109	34,7	2832	2013	.	2422,50	579,12	23,91
5	133	42,3	6793	6431	.	6612,00	255,97	3,87
6	87	27,7	8800	2375	.	5587,50	4543,16	81,31
7	100	31,8	2078	2225	.	2151,50	103,94	4,83
8	113	36,0	2866	9246	7892	6668,00	3361,51	50,41
9	99	31,5	2340	2119	.	2229,50	156,27	7,01
10	131	41,7	6349	3635	6146	5376,67	1511,74	28,12
11	97	30,9	6564	2783	1936	3761,00	2464,13	65,52
12	111	35,3	7470	6451	.	6960,50	720,54	10,35
13	113	36,0	6331	2688	2560	3859,67	2141,19	55,48
14	115	36,6	5314	3460	2327	3700,33	1507,93	40,75
15	140	44,6	6294	3701	4405	4800,00	1340,87	27,93

Para todas as amostras:

Média SWT	4454,28
Desvio Pad	1281,21
Coef. Var	27,33

## ANEXO 2

TABELA 2.1: **Toras** Avaliação longitudinal com SWT em toras de 2,60 m - região próximo à medula e próximo à casca; leitura direto na madeira.

Árvore	Diâmetro			
	Raio 01		Raio 02	
	Casca	Medula	Medula	Casca
1	964	1121	1252	955
2	1340	1330	1381	1301
3	1330	1449	1255	1001
4	1259	1308	1362	1359
5	1242	1307	1256	1202
6	1401	1482	1509	1410
7	1141	1057	1109	1161
8	1061	1134	1210	1074
9	1086	1263	1455	1259
10	1132	1266	1370	1289
11	1132	1085	1170	1049
12	1259	1413	1283	1123
13	1270	1350	1228	1272

	casca	medula
média	1195,1	1284,8
Des pad	131,54	124,78
CV	11,01	9,71

TABELA 2.2: Toras Avaliação transversal com SWT em toras de 2,60 m - com prego, direto na madeira, direto na casca:

Tora	Método	SWT 1	SWT 2	SWT 3	SWT 4	SWT 5	média	Desv pad	CV
1	Prego	374	388	456	379	383	396,00	33,93	8,57
	Madeira	856	849	1241	1222	1255	1.084,60	212,22	19,57
	Casca	2142	2073	1901			2.038,67	124,11	6,09
2	Prego	602	430	456	517	530	507,00	67,42	13,30
	Madeira	1433	1463	1463	1586	1517	1.492,40	60,46	4,05
	Casca	2923	2989	2561			2.824,33	230,43	8,16
3	Prego	441	478	513	432	514	475,60	38,66	8,13
	Madeira	1526	1584	1562	1651	1674	1.599,40	61,75	3,86
	Casca	1981	2031	2326			2.112,67	186,44	8,82
4	Prego	418	460	339	436	441	418,80	47,05	11,23
	Madeira	1008	987	1015	1075	1039	1.024,80	33,65	3,28
	Casca	2198	2263	2170			2.210,33	47,71	2,16
5	Prego	409	393	413	353	390	391,60	23,74	6,06
	Madeira	1252	1122	1043	1083	1087	1.117,40	80,28	7,18
	Casca	1702	2324	2286			2.104,00	348,66	16,57
6	Prego	577	528	561	537	563	553,20	20,13	3,64
	Madeira	1243	1308	1248	1301	1341	1.288,20	41,84	3,25
	Casca	2169	2454	2139			2.254,00	173,85	7,71
7	Prego	297	391	401	323	357	353,80	44,15	12,48
	Madeira	926	913	963	923	968	938,60	25,09	2,67
	Casca	1363	1512	1463			1.446,00	75,94	5,25
8	Prego	424	419	462	428	383	423,20	28,12	6,64
	Madeira	889	959	1022	1067	1030	993,40	70,10	7,06
	Casca	1755	2231	2361			2.115,67	319,04	15,08
9	Prego	336	296	296	377	295	320,00	36,34	11,36
	Madeira	825	802	847	869	862	841,00	27,56	3,28
	Casca	1355	1372	1392			1.373,00	18,52	1,35
11	Prego	369	428	310	348	308	352,60	49,44	14,02
	Madeira	1003	1003	1026	959	1062	1.010,60	37,61	3,72
	Casca	1908	1689	1721			1.772,67	118,29	6,67
12	Prego								
	Madeira	1317	1304	1314	1272	1118	1.265,00	84,09	6,65
	Casca	2549	2162	2448			2.386,33	200,73	8,41

Para todas as amostras:

	média	CV	DP
prego	419,18	17,55	73,57
madeira	1157,08	20,71	235,94
casca	2025,13	20,30	411,18

**TABELA 2.3:Lâminas:**

Rendimento em lâminas de primeira (classe A) e lâminas de segunda (classe B)

Espessura = 2,2 mm; comprimento = 2,60 m

Tora	Tora			Nº Lâm 1,40 m				Nº Lâm 0,70 m				Volume total lâminas (m <sup>3</sup> )	
	Diâmetro 1	Diâmetro 2	Volume (cm <sup>3</sup> )	Classe A		Classe B		Classe A		Classe B		Classe A	Classe B
				Nº	Vol (m <sup>3</sup> )	Nº	Vol (m <sup>3</sup> )	Nº	Vol (m <sup>3</sup> )	Nº	Vol (m <sup>3</sup> )		
1	46,0	37	4298,66	5	0,0400	5	0,0400	11	0,0881	15	0,1201	0,1281	0,1602
2	45,5	49	7539,14	0	0,0000	14	0,1121	6	0,0480	0	0,0000	0,0480	0,1121
3	47,5	40	5024,00	26	0,2082	2	0,0160	0	0,0000	0	0,0000	0,2082	0,0160
4	34,0	27	2289,06	0	0,0000	2	0,0160	0	0,0000	6	0,0480	0,0000	0,0641
5	45,0	28	2461,76	0	0,0000	6	0,0480	0	0,0000	0	0,0000	0,0000	0,0480
6	41,0	57	10201,86	8	0,0641	15	0,1201	9	0,0721	0	0,0000	0,1361	0,1201
7	33,0	28	2461,76	6	0,0480	4	0,0320	0	0,0000	0	0,0000	0,0480	0,0320
8	45,0	37	4298,66	9	0,0721	8	0,0641	5	0,0400	0	0,0000	0,1121	0,0641
9	26,0	22	1519,76	0	0,0000	1	0,0080	0	0,0000	0	0,0000	0,0000	0,0080
10	41,0	36	4069,44	13	0,1041	6	0,0480	2	0,0160	1	0,0080	0,1201	0,0561
11	41,0	32	3215,36	13	0,1041	0	0,0000	2	0,0160	0	0,0000	0,1201	0,0000
12	49,5	40	5024,00	10	0,0801	16	0,1281	1	0,0080	3	0,0240	0,0881	0,1522
13	44,0	33	3419,46	11	0,0881	9	0,0721	0	0,0000	5	0,0400	0,0881	0,1121

**TABELA 2.4:Lâminas:**

Avaliação com SWT em lâminas classe A e B - sentido transversal e longitudinal

Distância dos sensores no sentido transversal = 1,12 m

Distância dos sensores no sentido longitudinal= 2,29 m

Espessura lâmina = 2,2 mm

Tora	Lâmina	Longitudinal			Transversal		
	Classe	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3
1	A	5244	4718	4954	4805	3513	3219
	B	5874	5732	5738	3711	3242	3516
2	A						
	B	2069	3420	3287	2940	2409	2428
3	A	3533	3614	3380	1015	1756	1381
	B	2969	4005	4196	2022	1932	1713
4	A						
	B	5094	3948	4898	1801	1215	2084
5	A						
	B	1587	1355	1431	2383	2111	1592
6	A	1620	1894	1231	268	511	816
	B	1012	1517	1625	1056	5416	3657
7	A	1035	1039	822	8578	7105	7863
	B	9962	8962	8993	938	789	580
8	A	7596	8424	7422	4734	5154	4744
	B	4161	4647	5063	4546	5045	5507
9	A						
	B	2894	3131	3187	2384	4039	3815
10	A	2032	2227	2288	2724	3230	3013
	B	2176	2957	2684	3078	3039	3188
11	A	807	673	732	2066	2213	2011
	B						
12	A	734	398	791	1897	916	1029
	B	1124	1124	1126	814	466	1312
13	A	3983	2559	3135	2555	3315	3486
	B	1966	2331	2327	923	611	505

Avaliação com SWT em lâminas classe A - sentido transversal e longitudinal

	média	CV	DP
long	2800,33	12,23	223,53
trans	3106,71	21,25	420,01

Avaliação com SWT em lâminas classe B - sentido transversal e longitudinal

	média	CV	DP
long	3571,44	11,27	360,52
trans	2411,31	23,38	501,04



Quadro 2.1: análise das correlações, software “Statistica for Windows”.

<b>Código da variável</b>	<b>Variável estudada</b>
Prego	Aplicação da onda de tensão sobre pregos, na altura do DAP.
Madeira	Aplicação da onda de tensão diretamente na madeira, na altura do DAP.
Casca	Aplicação da onda de tensão sobre a casca, na altura do DAP.
Pmedula	Aplicação da onda de tensão na madeira, no sentido longitudinal das toras, próximo à medula.
Pcasca	Aplicação da onda de tensão na madeira, no sentido longitudinal das toras, próximo à casca.
Along	Aplicação da onda de tensão nas lâminas classificadas visualmente na classe A, no sentido longitudinal das fibras.
Blong	Aplicação da onda de tensão nas lâminas classificadas visualmente na classe B, no sentido longitudinal das fibras.
Atran	Aplicação da onda de tensão nas lâminas classificadas visualmente na classe A, no sentido transversal das fibras.
Btran	Aplicação da onda de tensão nas lâminas classificadas visualmente na classe B, no sentido transversal das fibras.
Vola	Número de lâminas classe A
Volb	Número de lâminas classe B

TABELA 2.5: análise das correlações, software “Statistica for Windows”.

Variável	Prego	Madeira	Casca	Pmedula	Pcasca	Along	Blong	Atrans	Btrans	Vola	Volb
Prego	1	0,55	0,12	0,49	0,36	0,23	-0,28	-0,55	0,32	0,79	-0,16
Madeira		1	-0,17	0,42	0,03	0,25	-0,40	-0,63	0,13	0,79	0,23
Casca			1	0,28	0,15	0,05	-0,63	-0,36	0,32	-0,18	0,31
Pmedula				1	0,88	-0,39	-0,84	-0,92	-0,23	0,52	0,15
Pcasca					1	-0,53	-0,57	-0,64	-0,40	0,29	-0,10
Along						1	0,15	0,19	0,72	0,28	-0,07
Blong							1	0,90	-0,03	-0,33	-0,41
Atrans								1	-0,05	-0,62	-0,36
Btrans									1	0,35	0,02
Vola										1	-0,21
Volb											1

N=8, p=0,05

### ANEXO 3

#### FASE 2 – AVALIAÇÃO EFETIVA

25 toras de base e 25 segundas toras

Fazenda Mocambo, Projeto Mocambo 8, talhão 10308-1

idade 28 anos

distância transversal entre sensores nas toras = diâmetro

distância longitudinal entre sensores nas toras = 2,6 m

distância entre sensores nas lâminas longitudinal = 2,3 m

distância entre sensores nas lâminas transversal = 1,135 m

espessura das lâminas = 2,2 mm

TABELA 3.1: Características das árvores

árvore	toras	dap cm	dap m	Densidade g/cm <sup>3</sup>		
				árvore	1 tora	2 tora
1	1-2	34,06	0,34	0,528	0,533	0,530
2	3-4	35,97	0,36	0,500	0,513	0,484
3	5-6	41,70	0,42	0,492	0,512	0,470
4	7-8	39,95	0,40	0,512	0,517	0,498
5	9-10	35,17	0,35	0,507	0,504	0,493
6	11-12	34,06	0,34	0,525	0,532	0,512
7	13-14	45,52	0,46	0,424	0,478	0,387
8	15-16	35,49	0,35	0,568	0,600	0,540
9	17-18	35,81	0,36	0,412	0,415	0,405
10	19-20	39,47	0,39	0,501	0,509	0,498
11	21-22	45,52	0,46	0,482	0,492	0,467
12	23-24	35,97	0,36	0,497	0,520	0,464
13	25-26	40,90	0,41	0,527	0,539	0,511
14	27-28	33,42	0,33	0,490	0,516	0,453
15	29-30	37,24	0,37	0,533	0,546	0,546
16	31-32	39,79	0,40	0,529	0,536	0,513
17	33-34	34,38	0,34	0,513	0,555	0,489
18	35-36	39,95	0,40	0,647	0,546	0,510
19	37-38	36,13	0,36	0,454	0,467	0,453
20	39-40	27,22	0,27	0,518	0,506	0,519
21	41-42	41,38	0,41	0,577	0,591	0,564
22	43-44	36,76	0,37	0,509	0,526	0,475
23	45-46	35,65	0,36	0,463	0,482	0,450
24	47-48	53,16	0,53	0,496	0,493	0,481
25	49-50	48,70	0,49	0,518	0,519	0,498

TABELA 3.2: Leituras em micro segundos, velocidades e módulos de elasticidade calculados para as árvores

árvore	SWT micro-segundos			Velocidade m/s			MOE kgf/cm <sup>2</sup>		
	árvore			árvore			dens árv		
	swt horizon	swt diag	swt vert	horiz	diag	vert	horiz	diag	vert
1	1.010,00	1.952,00	1.510,33	337,22	174,48	225,51	612,68	164,02	273,99
2	1.176,33	1.862,33	1.390,33	305,77	193,14	258,71	476,80	190,23	341,32
3	1.030,00	1.878,33	1.505,33	404,84	222,00	277,01	822,89	247,44	385,25
4	1.077,33	1.850,00	1.704,33	370,80	215,93	234,39	717,38	243,28	286,64
5	848,33	1.740,00	1.128,00	414,61	202,14	311,82	888,52	211,20	502,55
6	975,67	1.625,33	1.206,00	349,09	209,55	282,41	652,02	234,95	426,74
7	893,67	1.985,67	1.421,50	509,34	229,23	320,21	1121,90	227,24	443,41
8	1.172,00	1.723,67	1.030,67	302,83	205,91	344,35	530,95	245,47	686,56
9	1.180,50	2.269,67	1.431,00	303,34	157,78	250,24	386,74	104,62	263,19
10	1.135,20	1.687,33	999,00	347,69	233,92	395,10	618,14	279,79	798,18
11	1.530,75	2.061,33	2.158,33	297,36	220,82	210,90	434,53	239,62	218,57
12	1.108,00	1.894,80	1.209,00	324,63	189,83	297,51	533,80	182,53	448,34
13	1.009,25	1.762,00	1.431,67	405,28	232,14	285,70	882,15	289,42	438,38
14	1.036,20	1.935,75	1.565,67	322,55	172,66	213,47	519,51	148,86	227,55
15	845,33	1.766,00	1.175,75	440,56	210,88	316,75	1055,59	241,86	545,66
16	1.012,29	1.863,00	1.384,00	393,06	213,57	287,49	834,25	246,30	446,30
17	1.204,00	1.967,67	1.638,50	285,53	174,71	209,81	426,94	159,85	230,52
18	942,83	1.775,67	1.214,40	423,70	224,97	328,95	1185,42	334,20	714,52
19	1.205,67	2.172,33	1.692,33	299,65	166,31	213,48	415,85	128,09	211,06
20	832,00	1.786,67	1.397,67	327,11	152,33	194,72	565,09	122,54	200,24
21	985,20	1.684,67	1.010,50	420,02	245,63	409,50	1037,50	354,82	986,20
22	883,83	1.979,67	3.370,00	415,97	185,71	109,09	899,03	179,19	61,83
23	1.180,33	1.922,67	1.577,33	302,04	185,42	226,02	430,79	162,35	241,23
24	1.495,60	1.947,50	1.600,50	355,43	272,95	332,13	638,94	376,82	557,93
25	871,33	1.891,67	1.105,75	558,93	257,45	440,44	1651,69	350,43	1025,61
média	1.065,67	1.879,43	1.474,32	368,69	205,98	279,03	733,56	226,60	438,47
Desvio padrão	177,56	147,80	466,74	68,10	30,24	73,13	299,78	73,30	241,70
cv	16,66	7,86	31,65	18,47	14,68	26,21	40,86	32,34	55,12

TABELA 3.3: Leituras em micro segundos, velocidades e módulos de elasticidade calculados para as primeiras toras

árvore	SWT micro-segundos		velocidade m/s		MOE kgf/cm <sup>2</sup>	
	primeira tora		primeira tora		dens árv	
	swt long	swt cruz	long	cruz	long	cruz
1	1.206,00	1.170,00	2.155,89	2.222,22	25041,92	26606,67
2	1.237,00	1.279,00	2.101,86	2.032,84	22529,63	21074,27
3	1.267,33	1.213,00	2.051,55	2.143,45	21132,05	23067,56
4	1.098,00	1.049,00	2.367,94	2.478,55	29255,57	32052,52
5	1.111,67	1.118,00	2.338,83	2.325,58	28273,46	27954,04
6	1.191,33	1.178,00	2.182,43	2.207,13	25484,64	26064,80
7	1.285,00	1.275,00	2.023,35	2.039,22	17704,18	17982,98
8	1.192,33	1.171,67	2.180,60	2.219,06	27530,89	28510,67
9	1.271,33	1.182,00	2.045,10	2.199,66	17578,46	20335,96
10	1.181,67	1.182,00	2.200,28	2.199,66	24754,35	24740,39
11	1.040,00	1.104,00	2.500,00	2.355,07	30714,36	27256,49
12	1.118,67	1.059,33	2.324,20	2.454,37	27362,30	30513,26
13	1.119,67	1.073,00	2.322,12	2.423,11	28960,55	31534,42
14	1.185,00	1.197,00	2.194,09	2.172,10	24039,32	23559,75
15	1.245,00	1.168,00	2.088,35	2.226,03	23718,75	26949,14
16	1.060,00	1.171,67	2.452,83	2.219,06	32487,88	26590,40
17	1.137,00	1.112,33	2.286,72	2.337,43	27384,19	28612,18
18	1.158,00	1.106,67	2.245,25	2.349,40	33287,86	36447,64
19	1.309,00	1.264,67	1.986,25	2.055,88	18271,36	19574,83
20	1.174,00	1.248,00	2.214,65	2.083,33	25903,09	22922,32
21	1.006,33	1.107,00	2.583,64	2.348,69	39256,92	32441,78
22	1.087,67	1.114,67	2.390,44	2.332,54	29690,07	28269,16
23	1.182,00	1.166,67	2.199,66	2.228,57	22848,58	23453,12
24	1.200,75	1.220,33	2.165,31	2.130,57	23713,98	22958,98
25	967,67	1.103,67	2.686,88	2.355,78	38169,12	29341,88

MÉDIA	1.161,30	1.161,39	2.251,53	2.245,57	26.603,74	26.352,61
DESVPAD	85,49	64,40	172,57	124,07	5435,37	4358,36
CV	7,36	5,54	7,66	5,52	20,43	16,53

TABELA 3.4: Leituras em micro segundos, velocidades e módulos de elasticidade calculados para as primeiras toras

árvore	segunda tora		velocidade m/s		MOE kgf/cm <sup>2</sup>			
	swt long	swt cruz	segunda tora		dens árv		dens seg tora	
			long	cruz	long	cruz	long	cruz
1	1.191,00	1.206,33	2.183,04	2.155,29	25676,67	25028,09	25744,65	25094,34
2	1.181,67	1.178,67	2.200,28	2.205,88	24689,00	24814,84	23909,58	24031,44
3	1.004,67	1.122,33	2.587,92	2.316,60	33626,32	26945,09	32133,20	25748,64
4	1.159,00	1.241,33	2.243,31	2.094,52	26257,07	22889,50	25560,55	22282,31
5	1.175,33	1.188,33	2.212,14	2.187,94	25293,33	24742,96	24607,22	24071,78
6	1.023,33	1.039,33	2.540,72	2.501,60	34539,08	33483,85	33688,41	32659,16
7	1.093,67	1.153,67	2.377,32	2.253,68	24440,62	21964,51	22316,86	20055,91
8	1.100,67	1.088,67	2.362,20	2.388,24	32307,55	33023,70	30715,25	31396,11
9	1.245,00	1.300,67	2.088,35	1.998,97	18329,94	16794,52	18004,31	16496,17
10	1.047,00	1.085,00	2.483,29	2.396,31	31531,76	29361,76	31294,46	29140,79
11	1.044,00	1.167,67	2.490,42	2.226,66	30479,45	24365,22	29540,50	23614,62
12	1.105,00	1.124,67	2.352,94	2.311,80	28043,32	27071,12	26229,01	25319,72
13	1.054,00	1.087,33	2.466,79	2.391,17	32681,58	30708,52	31711,25	29796,77
14	1.144,67	1.193,00	2.271,40	2.179,38	25763,26	23718,00	23845,08	21952,10
15	1.083,00	1.099,33	2.400,74	2.365,07	31345,39	30420,88	32068,75	31122,90
16	1.169,33	1.136,33	2.223,49	2.288,06	26696,63	28269,72	25878,17	27403,04
17	1.117,33	1.166,33	2.326,97	2.229,21	28356,67	26024,08	27015,14	24792,90
18	1.036,33	1.044,00	2.508,85	2.490,42	41562,74	40954,54	32746,60	32267,42
19	1.235,33	1.349,33	2.104,70	1.926,88	20515,49	17195,37	20451,14	17141,44
20	1.253,00	1.183,33	2.075,02	2.197,18	22739,74	25496,09	22772,78	25533,13
21	1.066,67	1.095,00	2.437,50	2.374,43	34941,58	33156,73	34204,71	32457,51
22	1.126,67	1.128,00	2.307,69	2.304,96	27670,18	27604,80	25824,69	25763,68
23	1.169,67	1.184,00	2.222,86	2.195,95	23332,97	22771,45	22655,74	22110,53
24	1.074,33	1.115,33	2.420,11	2.331,14	29623,17	27485,28	28763,41	26687,58
25	961,00	1.230,33	2.705,52	2.113,25	38700,53	23611,20	37207,94	22700,57

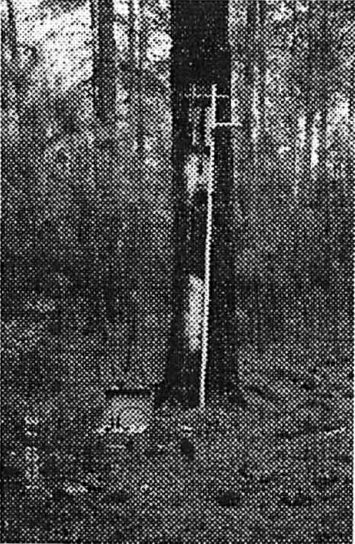
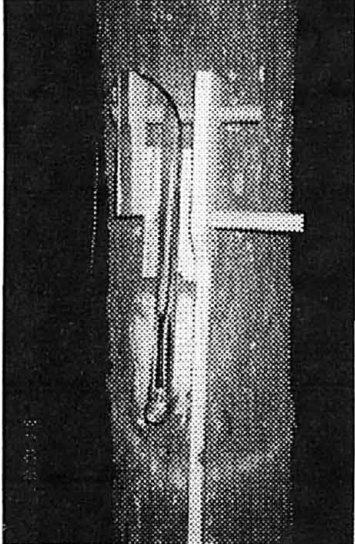
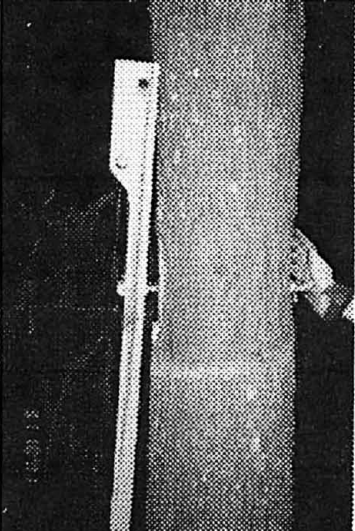
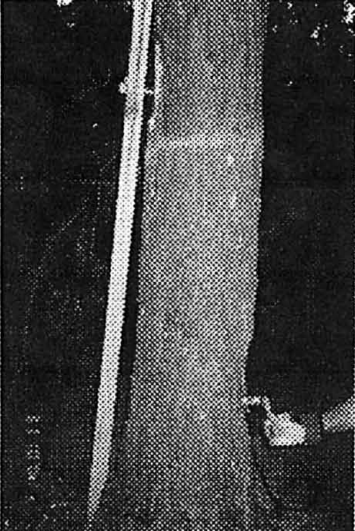
MÉDIA	1.114,47	1.156,33	2.343,74	2.256,98	28.765,76	26.716,07	27.555,58	25.585,62
DESVPAD	75,58214	72,29614	159,5491	136,3989	5383,762	5094,249	4719,298	4380,984
CV	6,781911	6,252193	6,807447	6,043418	18,71587	19,06811	17,12647	17,12283

Quadro3.1: Análises de correlação entre as velocidades de propagação

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,58	0,53	0,34	0,13	0,53	0,17	-0,17	-0,06	0,24
Arvdiag		1	0,72	0,40	0,18	0,77	0,46	0,01	0,01	0,23
Arvvert			1	0,28	0,10	0,59	0,36	-0,02	0,1	0,15
Ptlong				1	0,70	0,37	0,09	0,08	0,02	0,11
Ptcruz					1	0,28	0,12	0,09	0,01	0,03
Stlong						1	0,58	0,08	0,05	0,25
Stcruz							1	0,08	0,09	0,01
Lamlong								1	0,21	-0,02
Lamcruz									1	-0,07
Tablong										1

N=113, p=0,05

## Anexo 4: documentação fotográfica

	
<p>Foto 1 : Aparato desenvolvido para aplicação padronizada da onda de tensão por meio de um pêndulo, à exata altura do DAP, 1,30 m.</p>	<p>Foto 2 : Detalhe do transdutor de partida da onda no aparato.</p>
	
<p>Foto 3 : Posição "horizontal" de aplicação e recepção da onda de tensão por meio dos transdutores de partida e chegada.</p>	<p>Foto 4 : Posição "diagonal" de aplicação e recepção da onda de tensão por meio dos transdutores de partida e chegada.</p>

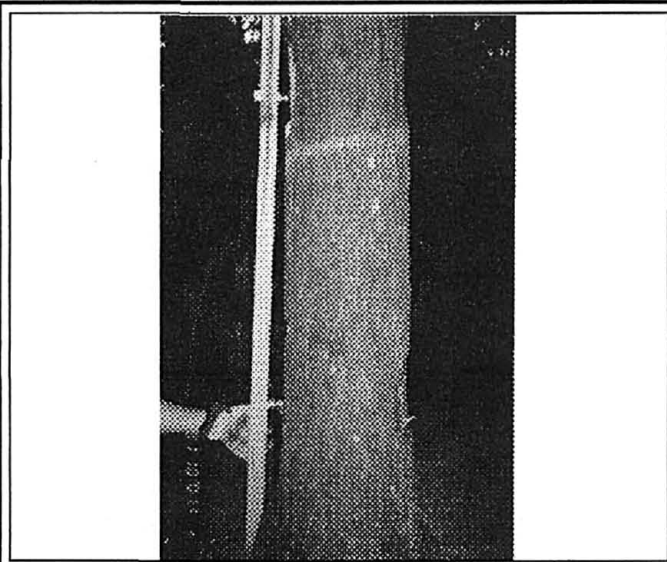


Foto 5 : Posição "vertical" de aplicação e recepção da onda de tensão por meio dos transdutores de partida e chegada.

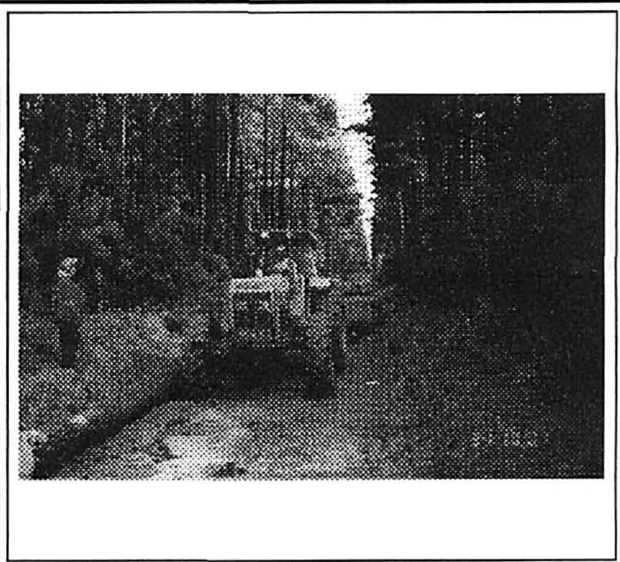


Foto 6 : Operação de retirada das árvores do talhão por meio de trator de arraste.

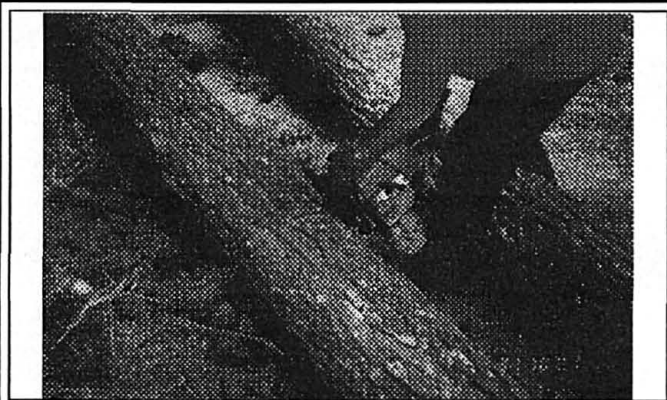


Foto 7 : Operação de traçamento das árvores em toras de 2,60 m e retirada de fatias para análises.

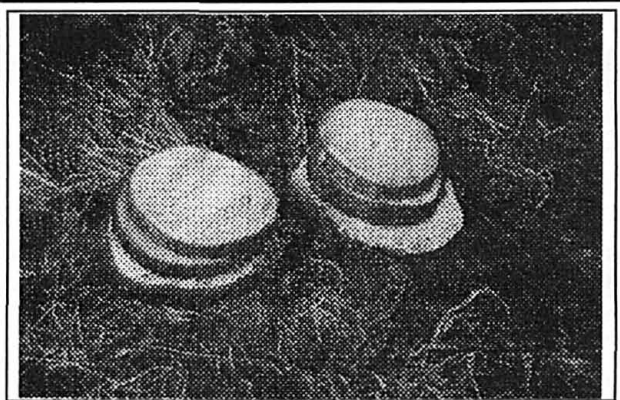


Foto 8 : Fatias retiradas das árvores em três posições: base da primeira tora, intermediária entre primeira e segunda toras, e topo da segunda tora.

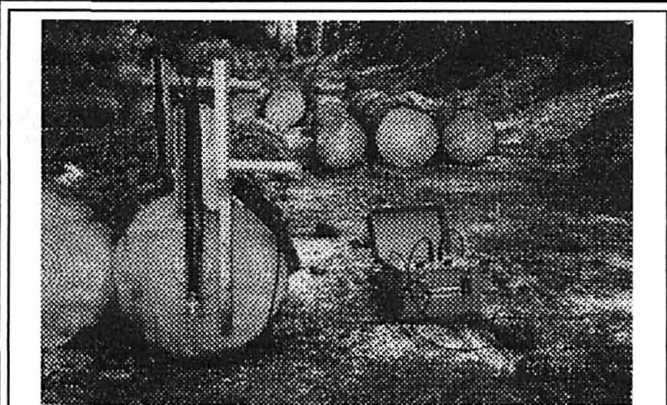


Foto 9 : Aplicação da onda de tensão no sentido longitudinal das toras .



Foto 10 : Marcas de tinta sobre as cascas, utilizadas para identificar as primeiras toras destinadas à produção das lâminas para o ensaio..





Foto 11 : Marcas de tinta nos topos, utilizadas para identificar as segundas toras destinadas à serraria para produção das tábuas para o ensaio.



Foto 12 : Descarregamento do caminhão com as toras no pátio da serraria.



Foto 13 : Empilhamento das toras no pátio da serraria.

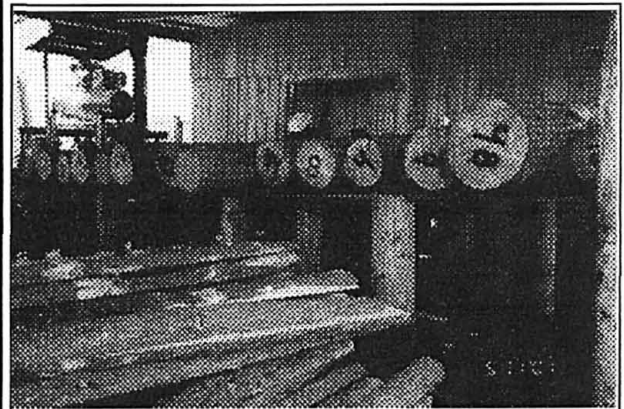


Foto 14 : Destaque à identificação pela cor e pela numeração par das segundas toras seguida no experimento.

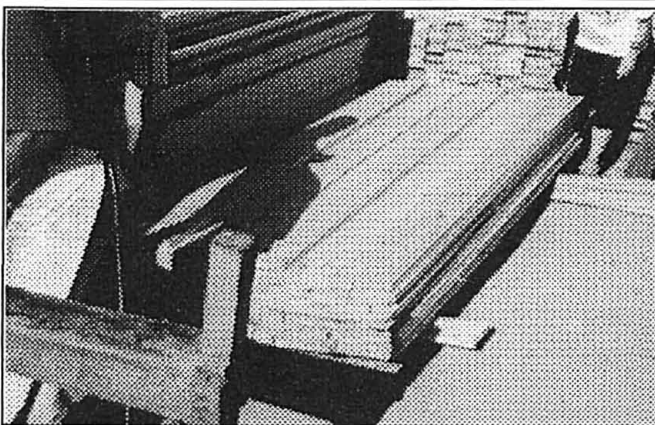


Foto 15 : Empilhamento de todas as tábuas numeradas.

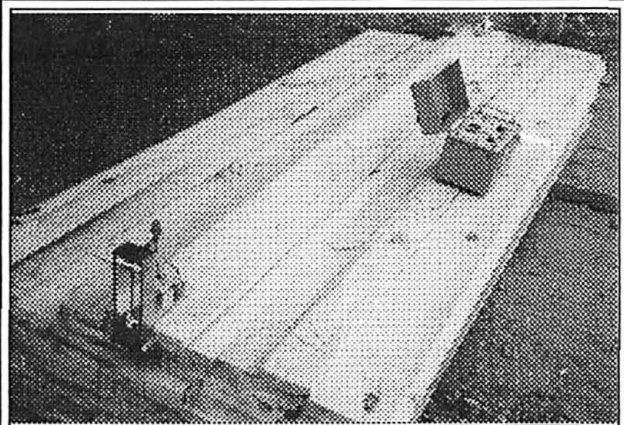


Foto 16 : Aplicação da onda de tensão através dos transdutores de partida e chegada no sentido longitudinal das tábuas.



Foto 17 : Toras : Destaque à identificação pela cor e pela numeração ímpar das primeiras toras seguida no experimento

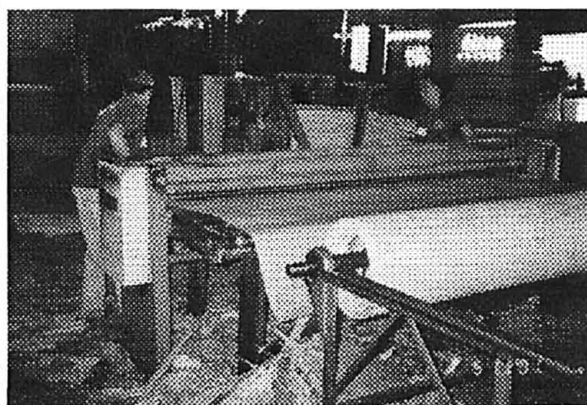


Foto 18 : Confeção e processamento das lâminas produzidas a partir das toras seleccionadas para o experimento.



Foto 19 : Aplicação da onda de tensão através dos transdutores de partida e chegada no sentido longitudinal das lâminas.

## ANEXO 5

QUADRO 5.1 Correlações das médias de leituras em micro-segundos

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,42	0,16	0,08	0,05	0,00	0,14	-0,11	0,46	0,06
Arvdiag		1	0,48	0,27	0,17	0,41	0,74	0,23	0,42	0,06
Arvvert			1	-0,09	-0,10	0,16	0,18	0,17	0,55	0,32
Ptlong				1	0,73	0,35	0,16	0,09	-0,14	-0,07
Ptcruz					1	0,31	0,16	-0,04	-0,27	-0,07
Stlong						1	0,61	0,19	-0,07	0,28
Stcruz							1	0,20	0,08	0,08
Lamlong								1	0,39	0,24
Lamcruz									1	0,32
Tablong										1

N=23, p=0,05

## QUADRO 5.2

Correlações das médias de velocidade de propagação em m/s 2,6

Correlações das médias de velocidade de propagação em m/s 2,6 e 2,7

Correlações das médias de velocidade de propagação em cm/s 2,6

Correlações das médias de velocidade de propagação em cm/s 2,6 e 2,7

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,58	0,50	0,34	0,12	0,52	0,17	-0,15	0,20	0,37
Arvdiag		1	0,72	0,39	0,16	0,77	0,46	0,03	0,16	0,41
Arvvert			1	0,25	0,07	0,58	0,35	-0,02	0,34	0,37
Ptlong				1	0,70	0,37	0,09	0,05	0,18	-0,04
Ptcruz					1	0,28	0,12	0,07	-0,07	-0,06
Stlong						1	0,58	0,15	0,03	0,31
Stcruz							1	0,15	0,14	0,10
Lamlong								1	0,20	0,22
Lamcruz									1	0,07
Tablong										1

N=23, p=0,05

Considerando as correlações estabelecidas entre as velocidades de propagação pode-se observar o destaque dado àquelas entre as árvores em pé no sentido horizontal e nos sentidos diagonal e vertical (0,58 e 0,50) e entre as árvores em pé nos sentidos diagonal e vertical (0,72) não sendo estes, entretanto, valores de utilidade prática. Novamente há correlação entre as velocidades nas primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,70) as velocidades nas segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,58). Os valores interessantes do ponto de vista da aplicação prática dessas correlações surgem entre as leituras na árvore em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e as segundas toras no sentido longitudinal (0,52; 0,77; 0,58 respectivamente) e ainda as velocidades nas árvores em pé no sentido diagonal e as segundas toras no sentido cruzado (0,46).

#### QUADRO 5.3

Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6, dens árvore

Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6 e 2,7, dens árvore

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,63	0,64	0,53	0,38	0,61	0,33	-0,15	0,25	0,49
Arvdiag		1	0,80	0,58	0,46	0,80	0,58	-0,04	0,35	0,58
Arvvert			1	0,54	0,40	0,70	0,50	-0,07	0,46	0,50
Ptlong				1	0,82	0,64	0,51	0,09	0,45	0,50
Ptcruz					1	0,66	0,66	0,16	0,27	0,61
Stlong						1	0,79	0,13	0,25	0,69
Stcruz							1	0,12	0,31	0,69
Lamlong								1	0,06	0,17
Lamcruz									1	0,19
Tablong										1

N=23, p=0,05

Com os valores de densidade obtidos das amostras dos discos retirados das árvores, a velocidade de propagação da onda de tensão e a distância percorrida por esta onda foi possível calcular os Módulos de Elasticidade Dinâmicos (MOEd) do material em estudo. Analisando as correlações entre os valores de MOEd observa-se que elas aparecem entre um número maior de variáveis. Para as variações de leituras nas árvores em pé há correlação significativa ente as variáveis árvore em pé sentido horizontal e sentidos diagonal e vertical (0,63 e 0,64) e entre árvore em pé sentido diagonal e vertical (0,80) sem entretanto serem estes valores de aplicação prática. Relações práticas existem entre os MOEd das árvores em pé e nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e as primeiras toras (0,53; 0,58; 0,54). Há correlação significativa e de aplicação prática ainda entre os MOEd das árvores em pé no sentido diagonal e as primeiras toras no sentido cruzado através da medula (0,46). Correlação de 0,82 aparece entre os MOEd das primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado, porém sem utilidade do ponto de vista prático. Com as segundas toras no sentido longitudinal há correlação significativa dos MOEd das árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical (0,61; 0,80; 0,70), e com os MOEd das primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,64 e 0,66). As segundas toras no sentido cruzado apresentam

correlação com as árvores em pé no sentido diagonal e vertical (0,58 e 0,50); e com as primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,51 e 0,66), estas sim com utilidade prática. Há ainda correlação das segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,79) sem aplicação prática. Com as lâminas no sentido transversal às fibras há correlações significativas com as árvores em pé no sentido vertical (0,46) e com as primeiras toras no sentido longitudinal (0,45). Os MOEd das tábuas no seu sentido longitudinal apresentaram correlação com os MOEd das árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical (0,49; 0,58; 0,50), com as primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,50 e 0,61) sem valor prático pois destas produziram-se as lâminas do experimento, e ainda com as segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,69 e 0,69) material do qual se processaram as tábuas.

#### QUADRO 5.4

Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6, dens 1 tora

Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6 e 2,7, dens 1 tora

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,60	0,60	0,45	0,26	0,56	0,24	-0,16	0,25	0,42
Arvdiag		1	0,79	0,53	0,36	0,77	0,53	-0,05	0,36	0,53
Arvvert			1	0,50	0,34	0,68	0,47	-0,08	0,46	0,47
Ptlong				1	0,80	0,59	0,44	0,12	0,46	0,39
Ptcruz					1	0,58	0,56	0,23	0,28	0,45
Stlong						1	0,75	0,16	0,26	0,61
Stcruz							1	0,14	0,33	0,58
Lamlong								1	0,05	0,24
Lamcruz									1	0,20
Tablong										1

N=23, p=0,05

**QUADRO 5.5**

**Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6, dens referenciada**  
**Correlações MOE calculado com velocidade em cm/s, 2,6 e 2,7, dens referenciada**

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong
Arvhoriz	1	0,60	0,60	0,45	0,26	0,53	0,21	-0,16	0,25	0,36
Arvdiag		1	0,79	0,53	0,36	0,77	0,52	-0,05	0,36	0,49
Arvvert			1	0,50	0,34	0,70	0,48	-0,08	0,46	0,46
Ptlong				1	0,80	0,61	0,44	0,12	0,46	0,39
Ptcruz					1	0,56	0,53	0,23	0,28	0,40
Stlong						1	0,74	0,09	0,30	0,59
Stcruz							1	0,08	0,37	0,58
Lamlong								1	0,05	0,13
Lamcruz									1	0,24
Tablong										1

N=23, p=0,05

**QUADRO 5.6 Correlações das médias de leituras em micro-segundos**

variáveis	Prego	Madeira	Casca	Pmedula	Pcasca	Along	Blong	Atran	Btran	Avol	Bvol
Prego	1	0,55	0,12	0,49	0,36	0,23	-0,28	-0,55	0,32	0,79	-0,16
Madeira		1	-0,17	0,42	0,03	0,25	-0,40	-0,63	0,13	0,79	0,23
Casca			1	0,28	0,15	0,05	-0,63	-0,36	0,32	-0,18	0,31
Pmedula				1	0,88	-0,39	-0,84	-0,92	-0,23	0,52	0,15
Pcasca					1	-0,53	-0,57	-0,64	-0,40	0,29	-0,10
Along						1	0,15	0,19	0,72	0,28	-0,07
Blong							1	0,90	-0,03	-0,33	-0,41
Atran								1	-0,05	-0,62	-0,36
Btran									1	0,35	0,02
Avol										1	-0,21
Bvol											1

N=8, p=0,05

Analisando as correlações dos tempos de propagação em micro segundos referentes à primeira fase de coleta de dados, observa-se um valor de 0,88 entre as leituras realizadas nas primeiras toras nas regiões próximo à medula e próximo à casca, porém sem muita aplicação prática pois ambas referem-se à mesma situação material: a tora. Com relação à leitura realizada próxima à medula, há correlações altas com as leituras realizadas nas lâminas classe B sentido longitudinal e com as leituras nas lâminas classe A transversal (-0,84 e -0,92) estas sim de valor prático relacionando duas fases do processo produtivo: a tora e as lâminas. Há ainda correlação de 0,90 entre as lâminas de classe B no sentido longitudinal e de classe A no sentido transversal; e de 0,72 entre as lâminas de classe B sentido transversal e classe A longitudinal sem muita aplicação prática pelos mesmos motivos apresentados anteriormente. As correlações mais interessantes do ponto de vista prático são as existentes entre as leituras na árvore em pé através do prego e diretamente na madeira e o volume de lâminas classe A em metros cúbicos (0,79).

QUADRO 5.7 Correlações das médias de velocidades m/s

variáveis	Arvhoriz	Arvdiag	Arvvert	Ptlong	Ptcruz	Stlong	Stcruz	Lamlong	Lamcruz	Tablong	Numlam
Arvhoriz	1	0,64	0,61	0,47	0,27	0,69	0,28	0,04	0,03	0,36	0,30
Arvdiag		1	0,77	0,43	0,26	0,79	0,47	0,32	0,16	0,43	0,80
Arvvert			1	0,41	0,18	0,65	0,26	0,27	0,37	0,39	0,60
Ptlong				1	0,71	0,33	0,13	0,02	0,27	0,04	0,02
Ptcruz					1	0,24	0,13	-0,09	0,02	0,09	-0,10
Stlong						1	0,59	0,25	0,08	0,38	0,47
Stcruz							1	0,38	0,20	0,11	0,25
Lamlong								1	0,62	0,45	0,53
Lamcruz									1	-0,02	0,18
Tablong										1	0,52
Númlam											1

N=17, p=0,05

As correlações apresentadas neste quadro correspondem àquelas obtidas através da análise das velocidades médias de propagação de ondas de tensão, estas obtidas das repetições das leituras realizadas em cada situação variante. As correlações significativas entre as posições na árvore em pé nos sentidos horizontal e diagonal (0,64), horizontal e vertical (0,61), e diagonal e vertical (0,77) não apresentam valor prático pois dizem respeito à mesma situação: árvore em pé. O mesmo se observando quanto às leituras nas primeiras toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,71), nas segundas toras nos sentidos longitudinal e cruzado (0,59), nas lâminas nos sentidos longitudinal e transversal (0,62). Por outro lado, com aplicação prática têm-se as correlações entre as segundas toras e respectivamente as árvores em pé no sentido horizontal, diagonal e vertical (0,69; 0,79; 0,65); e ainda entre o rendimento em número de lâminas e as leituras na árvore em pé sentido diagonal (0,80) e na árvore em pé sentido vertical (0,60).



QUADRO 5.8 Correlações entre as velocidades de propagação de onda e as densidades

variáveis	Densárv	Denspt	Densst	Vellalong	Vellatran	Veltab	Velárvhor	Velárvdia	Velárvver	Velptlong	Velptcru	Velstlong	Velstcru
Densárv	1	0,82	0,82	0,05	0,14	0,14	0,18	0,28	0,32	0,38	0,38	0,34	0,62
Denspt		1	0,83	0,10	0,24	0,02	0,15	0,28	0,32	0,38	0,33	0,36	0,63
Densst			1	0,03	0,19	0,02	0,05	0,19	0,29	0,39	0,27	0,19	0,46
Vellalong				1	0,21	-0,02	-0,17	0,01	-0,02	0,08	0,09	0,08	0,08
Vellatran					1	-0,07	-0,06	0,01	0,10	0,02	0,01	0,05	0,09
Veltab						1	0,24	0,23	0,15	0,11	0,03	0,25	0,01
Velárvhor							1	0,58	0,53	0,34	0,13	0,53	0,17
Velárvdia								1	0,72	0,40	0,18	0,77	0,46
Velárvver									1	0,28	0,10	0,59	0,36
Velptlong										1	0,70	0,37	0,09
Velptcru											1	0,28	0,12
Velstlong												1	0,58
Velstcru													1

N=113, p=0,05



QUADRO 5.9 Correlações entre módulos de elasticidade médios

variáveis	Arvhorda	Arvdiada	Arvverda	Arvhord1t	Ardiad1t	Arvverd1t	Ptlongda	Pterda	Ptlond1t	Ptcrud1t	Stlonda	Steruda	Stlond2t	Sterud2t	Lamlonda	Lamcruda	Lamlond1t	Lacrud1t	Tablonda	Tablond2t
Arvhorda	1	0,63	0,64	0,99	0,61	0,61	0,53	0,38	0,47	0,30	0,61	0,33	0,57	0,26	-0,15	0,25	-0,16	0,24	0,49	0,43
Arvdiada		1	0,80	0,59	0,98	0,78	0,58	0,46	0,53	0,39	0,80	0,58	0,79	0,55	-0,04	0,35	-0,06	0,35	0,58	0,55
Arvverda			1	0,61	0,79	0,99	0,54	0,40	0,50	0,36	0,70	0,50	0,72	0,50	-0,07	0,46	-0,08	0,45	0,50	0,50
Arvhord1t				1	0,60	0,60	0,47	0,29	0,45	0,26	0,55	0,25	0,53	0,21	-0,15	0,25	-0,16	0,25	0,39	0,36
Ardiad1t					1	0,79	0,54	0,38	0,53	0,36	0,75	0,51	0,77	0,52	-0,04	0,37	-0,05	0,36	0,49	0,49
Arvverd1t						1	0,51	0,35	0,50	0,34	0,66	0,45	0,70	0,48	-0,07	0,47	-0,08	0,46	0,43	0,46
Ptlongda							1	0,82	0,97	0,80	0,64	0,51	0,63	0,49	0,09	0,45	0,08	0,44	0,50	0,47
Pterda								1	0,75	0,94	0,66	0,66	0,58	0,58	0,16	0,27	0,14	0,26	0,61	0,50
Ptlond1t									1	0,80	0,57	0,42	0,61	0,44	0,13	0,47	0,12	0,46	0,36	0,39
Ptcrud1t										1	0,58	0,55	0,56	0,53	0,23	0,29	0,23	0,28	0,44	0,40
Stlonda											1	0,79	0,95	0,73	0,13	0,25	0,10	0,24	0,69	0,59
Steruda												1	0,71	0,95	0,12	0,31	0,09	0,29	0,69	0,57
Stlond2t													1	0,74	0,11	0,31	0,09	0,30	0,57	0,59
Sterud2t														1	0,10	0,38	0,08	0,37	0,58	0,58
Lamlonda															1	0,06	1,00	0,06	0,17	0,15
Lamcruda																1	0,05	1,00	0,19	0,25
Lamlond1t																	1	0,05	0,14	0,13
Lacrud1t																		1	0,17	0,24
Tablonda																			1	0,92
Tablond2t																				1

N=23, p=0,05

QUADRO 5.10 Correlações entre módulos de elasticidade individuais

variáveis	Velarvhor	Velardia	Velarver	Vel1tlon	Vel1tcru	Vellamlon	Vellamtra	Vel2tlon	Vel2tcru	Veltablou	Moelalda	Moelatda	Moelld1t	Moeltd1t	Moeltda	Moeltd2t
Velarvhor	1	0,58	0,53	0,34	0,13	-0,17	-0,06	0,53	0,17	0,24	-0,19	-0,09	-0,19	-0,10	0,28	0,25
Velardia		1	0,72	0,40	0,18	0,01	0,01	0,77	0,46	0,23	-0,08	-0,04	-0,09	-0,04	0,29	0,27
Velarver			1	0,28	0,10	-0,02	0,10	0,59	0,36	0,15	-0,07	-0,01	-0,08	-0,02	0,25	0,24
Vel1tlon				1	0,70	0,08	0,02	0,37	0,09	0,11	0,07	0,04	0,07	0,04	0,23	0,24
Vel1tcru					1	0,09	0,01	0,28	0,12	0,03	0,13	0,07	0,13	0,07	0,17	0,13
Vellamlon						1	0,21	0,08	0,08	-0,02	0,94	0,12	0,94	0,12	-0,01	-0,01
Vellamtra							1	0,05	0,09	-0,07	0,13	0,90	0,13	0,89	-0,02	-0,01
Vel2tlon								1	0,58	0,25	0,03	0,04	0,02	0,04	0,33	0,29
Vel2tcru									1	0,01	0,03	0,04	0,02	0,04	0,23	0,15
Veltablou										1	-0,04	-0,08	-0,04	-0,08	0,92	0,94
Moelalda											1	0,06	1,00	0,06	-0,03	-0,04
Moelatda												1	0,06	1,00	-0,05	-0,06
Moelld1t													1	0,06	-0,03	-0,04
Moeltd1t														1	-0,06	-0,06
Moeltda															1	0,97
Moeltd2t																1

N=113, p=0,05

As correlações apresentadas correspondem àquelas entre os cálculos de MOEd considerando todas as leituras de tempo de propagação das ondas de tensão, e conseqüentemente, as velocidades de propagação de todas as repetições das leituras. Com esses dados, obteve-se correlações significativas entre as velocidades de propagação da onda de tensão nas árvores em pé nos sentidos horizontal, diagonal e vertical e a velocidade nas segundas toras sentido longitudinal (0,53; 0,77; 0,59); e nos sentidos diagonal e vertical e nas segundas toras no sentido cruzado através da medula (0,46; 0,36). Com as velocidades nas tábuas no sentido longitudinal as correlações existentes foram com as velocidades nas árvores em pé nos sentidos horizontal e diagonal (0,24; 0,23). Outra correlação útil e de aplicação prática é a existente entre o MOEd das lâminas no sentido longitudinal considerando a densidade média da árvore e a velocidade de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal (-0,19). O mesmo valor (-0,19) aparece correlacionando a velocidade de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal e o MOEd das lâminas no sentido longitudinal considerando a densidade da primeira tora. Há ainda correlações entre as velocidades de propagação de onda na árvore em pé no sentido horizontal e os MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore e da segunda tora (0,28; 0,25). A velocidade de propagação de onda nas segundas toras no sentido longitudinal e cruzado através da medula correlacionam-se com os MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore e da segunda tora (0,33; 0,29); e finalmente, a velocidade de propagação de onda nas segundas toras no sentido cruzado através da medula correlaciona-se com o MOEd das lâminas no sentido transversal considerando a densidade da árvore (0,23).