

**VANILDA ROSÂNGELA DE SOUZA SHIMOYAMA**

**ESTIMATIVAS DE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE *Pinus taeda* ATRAVÉS  
DO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO, VISANDO  
A GERAÇÃO DE PRODUTOS DE ALTO VALOR AGREGADO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais.

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

**CURITIBA**

**2005**

À Deus e todas as forças superiores que nos fortalecem, sustentando-nos em momentos difíceis.

Meus Agradecimentos.

À minha mãe Nercina, que me ensinou a importância de trilhar todos os caminhos com amor, dignidade e perseverança, incentivando-me a iniciar mais esta luta, sem, entretanto, ver o final...

Saudades...

Ao meu pai João que, com sua riqueza de espírito, pôde prosseguir me apoiando.

Ao meu esposo Alberto, minha filha Juliana, minhas irmãs Vera, Valderês e Vandecilce, meu cunhado Sinésio e as minhas sobrinhas Gianna e Jaqueline, que tanto me incentivaram nesta luta...

Dedico

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade.

Ao Professor Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos, pela orientação e confiança.

Ao Engenheiro Dr. Admir Lopes Mora, pelo apoio e colaboração prestados em todas as fases do trabalho, pela dedicação profissional e amizade.

Ao Professor Dr. Osmir José Lavoranti, pela co-orientação e dedicação.

À Pesquisadora da Embrapa, Dra. Valderês Aparecida de Sousa, pelo apoio e sugestões.

Ao Engenheiro Carlos Puehringer, pelo valioso auxílio e empenho na coleta do material e de dados.

Aos componentes da banca examinadora, Prof. Dr. Luiz E. G. Barrichelo, Dr. José Carlos D. Pereira, Dr. Admir Lopes Mora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Graciela Bolzon de Muñiz, pelas valiosas contribuições ao trabalho durante a defesa de tese.

À empresa Florestal Vale do Corisco, pelo fornecimento do material.

À Norske Skog Pisa e aos colegas Irene Dobins, Letícia D. de Souza e João L. da Rosa, pela colaboração na coleta de dados e análises laboratoriais.

À empresa Valor Florestal – Gestão de Ativos Florestais Ltda, pelo apoio na coleta do material e informações fornecidas.

Aos colegas Marlene Paoli Oliveira, pela elaboração da apresentação, Márcio Gonçalves, pelo apoio na elaboração do “Abstract” e Engenheiro João Carlos Mancini de Oliveira, pelas preciosas informações.

À Maria Aparecida Bonato, pelo incentivo, estímulo e amizade.

Aos Professores Dr. Setsuo Iwakiri, componente do Comitê de orientação, e Dr. Umberto Klock, pelos ensinamentos durante o curso.

Ao Departamento de Engenharia Florestal, Setor de Tecnologia de Produtos Florestais, demais professores, alunos e colegas que direta ou indiretamente colaboraram na execução do trabalho.

## BIOGRAFIA

**VANILDA ROSÂNGELA DE SOUZA SHIMOYAMA**, filha de João Ferreira de Souza e Nercina Martins Fontes de Souza, nasceu em Brasitânia, Estado de São Paulo, em 15 de abril de 1964.

Concluiu o Curso de Ensino de Primeiro Grau em 1978 e o Ensino de Segundo Grau em 1981, na Escola Estadual de 1º e 2º Graus "Líbero de Almeida Silveiras", em Fernandópolis – SP.

Em 1983 iniciou o curso de Engenharia Florestal na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, em Piracicaba (SP), graduando-se em dezembro de 1986.

Entre 1987 e 1990 desempenhou atividades como Engenheira Autônoma junto ao IPEF, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, em Piracicaba (SP).

Em 1988 ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, em Piracicaba (SP), onde obteve, em 1990, o título M.Sc. em Ciências Florestais.

Entre os anos de 1991 e 1996 atuou como Engenheira Florestal pela Pisa Florestal S.A, desempenhando atividades no setor de tecnologia da madeira – Adequação matéria-prima x processo.

Em janeiro de 1997 tornou-se Sócio-gerente da empresa TECMAD – Estudos de Madeira, Processos e Serviços Ltda, desempenhando, até o presente momento, atividades de Consultoria e Prestação de Serviços em diversas áreas do setor florestal e industrial, coordenando trabalhos nas áreas Técnica e Operacional, como tecnologia, ambiência, colheita e preparo de madeira, planejamento florestal, etc.

Em 2001 iniciou o Programa de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, concluindo o presente trabalho.

Paralelamente, em 2003 iniciou trabalhos de auditoria em Manejo de Plantações Florestais e Cadeia de Custódia para padrões FSC (Forest Stewardship Council), como Auditor pela SCS (Scientific Certification Systems).

## SUMÁRIO

	continua
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	vii
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	5
2.1 PROPRIEDADES ANATÔMICAS.....	5
2.1.1 Dimensões das Fibras .....	5
2.1.2 Relações entre as Dimensões de Fibras.....	11
2.2 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS.....	13
2.2.1 Percentual de Lenhos.....	13
2.2.2 Ângulo de Grã.....	15
2.3 DENSIDADE BÁSICA.....	16
2.4 NÓS.....	19
2.5 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	20
2.6 TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA POR EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO.....	25
2.6.1 Aplicação de Ondas Acústicas em Produtos Sólidos e Compostos de Madeira.....	26
2.6.2 Aplicação de Ondas Acústicas em Toras.....	28
2.6.3 Aplicação de Ondas Acústicas em Árvores em Pé.....	29
2.7 INFLUÊNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA SOBRE A PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS.....	30
2.7.1 Direção de Propagação da Onda.....	30
2.7.2 Dimensões de Fibras e suas Relações.....	30
2.7.3 Densidade Básica.....	32
2.7.4 Percentual de Lenhos.....	32
2.7.5 Madeira Juvenil e Adulta.....	33
2.7.6 Ângulo de Grã.....	33
2.7.7 Teor de Umidade.....	34
2.7.8 Nós.....	35
2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	36
2.8.1 Análise de Componentes Principais.....	37
2.8.2 Análise Fatorial.....	40
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	43
3.1- MATERIAL.....	43
3.2- MÉTODOS.....	45
3.2.1- Avaliação nas Árvores em Pé.....	47
3.2.2- Avaliação nas Toras.....	50
3.2.3- Avaliação nos Discos.....	51
3.2.4- Avaliação nas Lâminas.....	55
3.2.5- Avaliação nas Tábuas.....	58

3.3- ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
4.1 DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES.....	64
4.1.1 Árvores.....	64
4.1.2 Toras.....	65
4.2 PERCENTUAL DE LENHOS.....	67
4.3 DENSIDADE BÁSICA.....	70
4.4- VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO.....	72
4.4.1 Velocidade das Ondas para as Árvore em Pé e Toras.....	73
4.4.2 Velocidade das Ondas para as Tábuas.....	74
4.4.3 Velocidade das Ondas para as Lâminas.....	76
4.4.4 Correlações da Velocidade das Ondas entre Árvores, Toras, Tábuas e Lâminas.....	79
4.5 DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS.....	81
4.5.1 Toras 1.....	82
4.5.2 Toras 2.....	85
4.6 ÂNGULO DE GRÃ.....	85
4.7 DENSIDADE APARENTE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	88
4.8 INTER-RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS AVALIADAS.....	89
4.8.1 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Árvores.....	89
4.8.2 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Toras 1.....	99
4.8.3 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Toras 2.....	105
4.8.4 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Tábuas.....	109
4.8.5 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Lâminas.....	117
4.9 Regressão para as Variáveis Avaliadas.....	123
4.9.1 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Árvores.....	123
4.9.2 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Toras 1.....	125
4.9.3 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Toras 2.....	126
4.9.4 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Tábuas.....	127
4.9.5 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Lâminas.....	130
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>132</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>136</b>

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 -	INFORMAÇÕES SOBRE O POVOAMENTO.....	44
QUADRO 2 -	DIÂMETRO DAS ÁRVORES SELECIONADAS, TORAS E DISCOS AMOSTRADOS.....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	VALORES MÉDIOS DAS DIMENSÕES DAS FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA A SECÇÃO DE TRONCO AVALIADA.....	64
TABELA 2 -	VALORES DAS DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA AS TORAS 1.....	65
TABELA 3 -	VALORES DAS DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA AS TORAS 2.....	66
TABELA 4 -	VALORES DE $t$ PARA AS MÉDIAS DAS DIMENSÕES DE FIBRAS DAS TORAS 1 E 2.....	66
TABELA 5 -	PERCENTUAL DE LENHO INICIAL E TARDIO PARA A SECÇÃO DE TRONCO AVALIADA E TORAS.....	68
TABELA 6 -	VALORES MÉDIOS DOS PERCENTUAIS DE LENHO INICIAL E TARDIO PARA A MADEIRA JUVENIL E ADULTA E TESTE DE NORMALIDADE SEGUNDO SHAPIRO-WILK.....	69
TABELA 7 -	RESULTADO DO TESTE $t$ (STUDENT) PARA OS PERCENTUAIS DE LENHO INICIAL E TARDIO.....	70
TABELA 8 -	VALORES MÉDIOS PARA DENSIDADE BÁSICA DAS SEÇÕES DE TRONCO, TORAS E DISCOS.....	71
TABELA 9 -	VALOR DE $t$ PARA AS MÉDIAS DA DENSIDADE BÁSICA ENTRE AS TORAS 1 E 2.....	72
TABELA 10 -	VALORES DA VELOCIDADE MÉDIA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO PARA AS ÁRVORES EM PÉ E TORAS.....	73
TABELA 11 -	VALORES MÉDIOS PARA A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO DAS TÁBUAS ÚMIDAS (RECÉM DESDOBRADAS) E SECAS AO AR, OBTIDAS DAS TORAS 2.....	75
TABELA 12 -	VALORES MÉDIOS DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO PARA AS LÂMINAS OBTIDAS DAS TORAS 1.....	77
TABELA 13 -	VALORES DE $t$ PARA AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS, TÁBUAS E LÂMINAS.....	78
TABELA 14 -	CORRELAÇÕES DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO ENTRE OS GRUPOS ÁRVORES, TORAS, TÁBUAS E LÂMINAS.....	80
TABELA 15 -	VALORES MÉDIOS DO DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS, OBTIDOS NAS LÂMINAS DAS TORAS 1.....	82
TABELA 16 -	VALORES DE $t$ PARA AS PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DAS TORAS 1.....	84
TABELA 17 -	VALORES MÉDIOS DO DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS OBTIDOS NAS TÁBUAS DAS TORAS 2.....	85
TABELA 18 -	VALORES MÉDIOS DO ÂNGULO DE GRÃ DOS TRÊS PONTOS AVALIADOS E DA TÁBUA INTEIRA.....	85
TABELA 19 -	VALORES DE $t$ PARA OS ÂNGULOS DE GRÃ DETERMINADOS NOS DIFERENTES PONTOS DA TÁBUA.....	87
TABELA 20 -	VALOR MÉDIO DO ÂNGULO DE GRÃ DETERMINADO NA TÁBUA INTEIRA.....	87
TABELA 21 -	VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE APARENTE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS SECAS AO AR.....	89
TABELA 22 -	CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ.....	91
TABELA 23 -	AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ.....	93

TABELA 24 -	FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ.....	94
TABELA 25 -	CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 1.....	100
TABELA 26 -	AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 1.....	102
TABELA 27 -	MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 1.....	102
TABELA 28 -	CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 2.....	106
TABELA 29 -	AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TORAS 2.....	107
TABELA 30 -	MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 2.....	107
TABELA 31 -	CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TÁBUAS.....	110
TABELA 32 -	AUTOVALORES DAS SETE PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TÁBUAS.....	112
TABELA 33 -	MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TÁBUAS.....	113
TABELA 34 -	CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS.....	118
TABELA 35 -	AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS.....	120
TABELA 36 -	MATRIZ DE FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS.....	120
TABELA 37 -	MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NA ÁRVORE EM PÉ.....	124
TABELA 38 -	MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 1.....	125
TABELA 39 -	MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 2.....	127
TABELA 40 -	MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TÁBUAS.....	128
TABELA 41 -	MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS LÂMINAS.....	130

#### LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	ESQUEMA DE UMA FIBRA.....	6
FIGURA 2 -	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS NO SENTIDO RADIAL PARA ÁRVORES DE <i>Pinus</i> .....	7
FIGURA 3 -	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS DE <i>P. taeda</i> E <i>P. elliottii</i> AO LONGO DO TRONCO.....	8
FIGURA 4 -	VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA PAREDE DAS FIBRAS DE <i>P. taeda</i> E <i>P. elliottii</i> O LONGO DO TRONCO.....	10
FIGURA 5 -	VARIAÇÃO DO PERCENTUAL DE LENHO TARDIO DENTRO DE ÁRVORES DE <i>P. taeda</i> e <i>P. elliottii</i> .....	14
FIGURA 6 -	VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NO SENTIDO RADIAL.....	16
FIGURA 7 -	ESQUEMA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DENTRO DA ÁRVORE - <i>P. radiata</i> .....	18
FIGURA 8 -	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE ONDAS ACÚSTICAS EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DA GRÃ.....	34
FIGURA 9 -	VARIAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.....	35
FIGURA 10 -	ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA.....	36
FIGURA 11 -	AUTOVALORES DAS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ÁRVORES EM PÉ.....	39

FIGURA 12 -	MAPA DE LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA REGIÃO DE COLETA DAS AMOSTRAS.....	43
FIGURA 13 -	VISTA PARCIAL DA ÁREA DE COLETA DO MATERIAL ESTUDADO.....	44
FIGURA 14 -	ESQUEMA DA ÁRVORE MÉDIA UTILIZADA PARA O ESTUDO.....	46
FIGURA 15 -	FLUXOGRAMA REPRESENTANDO O MATERIAL ESTUDADO DESDE A ÁRVORE EM PÉ.....	47
FIGURA 16 -	APARELHO “STRESS WAVE TIMER” E ACESSÓRIOS.....	48
FIGURA 17 -	APARATO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS ÁRVORES EM PÉ.....	49
FIGURA 18 -	PONTOS DE EMISSÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS ÁRVORES EM PÉ.....	49
FIGURA 19 -	ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DAS TORAS.....	50
FIGURA 20 -	PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TORAS.....	51
FIGURA 21 -	ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TORAS.....	51
FIGURA 22 -	ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DOS DISCOS PARA ANÁLISE DA DENSIDADE BÁSICA.....	53
FIGURA 23 -	ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DOS DISCOS PARA DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DAS FIBRAS.....	54
FIGURA 24 -	ESQUEMA DE AMOSTRAGEM NA LÂMINA PARA DETERMINAÇÃO DOS NÓS.....	56
FIGURA 25 -	ESQUEMA DE APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS LÂMINAS.....	57
FIGURA 26 -	APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS LÂMINAS.....	57
FIGURA 27 -	PONTOS DE CONTAGEM E MEDIÇÃO DOS DIÂMETROS DE NÓS NAS TÁBUAS DISPOSTAS LADO A LADO.....	58
FIGURA 28 -	ESQUEMA DE APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TÁBUAS.....	59
FIGURA 29 -	INSTRUMENTO RISCADOR USADO PARA MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ..	60
FIGURA 30 -	ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NOS 3 PONTOS DA TÁBUA.....	61
FIGURA 31 -	ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NA TÁBUA INTEIRA.....	61
GRÁFICO 1 -	DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS ÁRVORES NO PONTO DE COLETA....	45
GRÁFICO 2 -	VARIAÇÃO DO LENHO INICIAL AO LONGO DOS ANÉIS ANUAIS DE CRESCIMENTO.....	53
GRÁFICO 3 -	TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DAS FIBRAS NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA.....	67
GRÁFICO 4 -	TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DO PERCENTUAL DE LENHOS NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA.....	68
GRÁFICO 5 -	TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA.....	72
GRÁFICO 6 -	FREQUÊNCIA DE NÓS NA MADEIRA JUVENIL E ADULTA, OBTIDA NAS LÂMINAS DAS TORAS 1.....	83
GRÁFICO 7 -	DIÂMETRO DOS NÓS DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA, OBTIDOS NAS LÂMINAS DAS TORAS 1.....	83
GRÁFICO 8 -	ÁREA TOTAL DE NÓS POR METRO QUADRADO DE LÂMINA DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DAS TORAS 1.....	84
GRÁFICO 9 -	COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ.....	93
GRÁFICO 10 -	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS E ÁREAS DE NÓS E A RIGIDEZ DAS FIBRAS.....	97
GRÁFICO 11 -	RELAÇÃO ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS E ÁREA DE NÓS E OS PERCENTUAIS DE LENHOS.....	98
GRÁFICO 12 -	COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES DAS TORAS 1.....	101
GRÁFICO 13 -	RELAÇÕES ENTRE OS FATORES NÓS E PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA.....	104

GRÁFICO 14 - COMPONENTES PRINCIPIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TORAS 2.....	107
GRÁFICO 15 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS TÁBUAS.....	112
GRÁFICO 16 - RELAÇÕES ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA – CONDIÇÃO ÚMIDA E ÂNGULO DE GRÃ.....	116
GRÁFICO 17 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS LÂMINAS.....	119
GRÁFICO 18 - RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS DOS FATORES PERCENTUAIS DE LENHOS E NÓS COM AS PROPRIEDADES ACÚSTICAS LONGITUDINAIS DA MADEIRA – LÂMINAS.....	122

## RESUMO

Para atender às exigências do mercado em relação à produção e qualidade dos produtos de madeira e, ao mesmo tempo, utilizar as plantações florestais de forma adequada é importante o conhecimento prévio de suas propriedades. Para isso é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem maior facilidade e rapidez na obtenção dos resultados, com um menor custo possível. Dentro desse contexto, esse trabalho teve como objetivo geral testar a técnica não destrutiva de aplicação de ondas de tensão para estimativa das propriedades da madeira, verificando a viabilidade de utilização da mesma como ferramenta para seleção de árvores em pé e toras. Para tanto, a técnica foi empregada nas árvores em pé de *P. taeda*, aos 28 anos de idade, utilizando-se o equipamento “Stress Wave Timer”. Posteriormente, foi aplicada nas toras, tábuas e lâminas obtidas das mesmas árvores, determinando-se, para cada grupo avaliado, o tempo e a velocidade de propagação das ondas de tensão. A checagem das relações entre as variáveis do método e a densidade básica, dimensões de fibras e suas relações, percentuais de lenhos inicial e tardio, ângulo de grã, diâmetro, frequência e área de nós foi realizada com a determinação destas propriedades, através de análises laboratoriais convencionais. Correlações significativas entre o tempo e a velocidade de propagação das ondas e as demais propriedades avaliadas nas árvores em pé, toras e produtos foram detectadas, indicando que a técnica pode ser empregada para determinação indireta destas propriedades, com precisão, eficiência e rapidez na obtenção dos resultados. Estas determinações podem ser realizadas através das equações obtidas, considerando-se o tempo e a velocidade de propagação das ondas como variáveis independentes. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a qualidade dos produtos pode ser estimada através da aplicação da técnica de propagação de ondas de tensão em árvores em pé e em toras, podendo ser utilizada como ferramenta na seleção do melhor material para diversas finalidades, dentre elas, a produção de celulose, pastas, papel, madeira serrada e laminados.

## ABSTRACT

The previous knowledge of wood properties is necessary to attend the needs of wood market in relation to production, product quality and also to adequately use of forest resources. New technologies need to be developed to obtain the fastest and cheapest results. Within this context and as a general goal, this study aimed at testing the nondestructive technique of using stress wave to estimate the wood properties, verifying the feasibility of the stress wave usage as a tool to select standing trees and logs. So, the technique was applied to *Pinus taeda* standing trees, 28 years old, by using the "Stress Wave Timer" equipment. Later, it was applied to the logs, boards and veneers obtained from the same trees, determining the stress wave time and velocity for each group assessed. The checking of the relationships between the method variables and the basic density, fiber dimensions and their relations, percentage of the earlywood and latewood, grain angle, diameter, frequency and knot area was carried out with the determination of these properties, through conventional laboratory analyses. Significant correlations between wave time and velocity variables and the others evaluated properties from the standing trees, logs and products were detected, indicating that the technique can be employed for indirect determination of these properties, with accuracy, efficiency and swiftness in obtaining results. These determinations can be performed through the equations obtained, considering the stress wave time and velocity as independent variables. According to the results obtained, it was concluded that the quality of the products can be estimated through the application of the stress wave technique to standing trees and logs, and it can be used as a tool to select the best material for several purposes such as the production of pulp, paper, sawn wood and veneers.

## 1- INTRODUÇÃO

A população mundial cresce aproximadamente 1,5 % a cada ano e em paralelo aumenta o consumo de madeira, aliado à melhoria de renda dessa população. De acordo com as estimativas, o consumo é da ordem de 0,67 m<sup>3</sup>/pessoa/ano, com uma taxa variando de 1,2 a 3,4 %. Segundo as previsões, em 2010 deverão ser consumidos 5,9 bilhões de metros cúbicos de madeira. No Brasil, o consumo médio anual por pessoa é aproximadamente 0,83 metro cúbico, a uma taxa de 3 % ao ano e um crescimento industrial setorial variando entre 6 e 8 %. O país consome, atualmente, 350 milhões de m<sup>3</sup>/ano, o que significa 8 % do consumo mundial de madeira (SILVA, 2000).

Os reflorestamentos no Brasil correspondem a 6 milhões de hectares, sendo 4,8 milhões com *Pinus* e eucalipto, que se concentram nas regiões sul e sudeste do país. Desta área, 1,6 milhões são povoamentos de *Pinus*, sendo que 57 % encontra-se nos estados do Paraná e Santa Catarina (SBS, 1996), podendo fornecer 40 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Estes povoamentos estão comprometidos com o setor de celulose, pasta e papel e atualmente, com a redução significativa do uso de madeiras nativas, estão atendendo também o setor de madeira sólida. Nos últimos anos, a demanda brasileira por *Pinus* cresceu 10 % ao ano. O consumo de madeira desse gênero em 2004 foi de aproximadamente 45 milhões de metros cúbicos, sendo os estados do Paraná e Santa Catarina os maiores consumidores, com um volume de 32 milhões de m<sup>3</sup>/ano (com casca). As estatísticas mostram uma demanda significativamente superior à oferta e se intensificará nos próximos dois anos. Mantendo-se a demanda atual dos dois estados, o déficit de madeira de *Pinus* será acentuado entre 2007 e 2016, alcançando seu pico máximo em 2011 com um déficit de 12 milhões de metros cúbicos com casca (VALOR FLORESTAL, 2004), dado preocupante para as indústrias de base florestal.

Além da falta de matéria-prima, outro fator que preocupa os consumidores é a variada qualidade da madeira produzida que, em geral, não atende aos padrões exigidos pelos produtos. O tronco de algumas espécies apresenta forma inadequada, elevada frequência e diâmetro de galhos, gerando considerada quantidade e diâmetro de nós, grande região medular, acentuados canais e bolsas de resina, além de outras variáveis que afetam as características dessa madeira.

Soma-se a essas questões o problema da madeira juvenil, onde aproximadamente 48 % dos povoamentos de *Pinus* disponíveis apresentam idade entre 0 e 10 anos e 15 % entre 11 e 15 anos (VALOR FLORESTAL, 2004). A madeira juvenil apresenta limitações no seu uso, devido à menor resistência mecânica, menor qualidade de fibras para determinados produtos, além da maior quantidade de nós. Apenas 22,5 % dos reflorestamentos de *Pinus* apresentam idade superior a 20 anos. Entretanto, parte dessas florestas adultas foi plantada aproveitando-se dos benefícios fiscais do Imposto de Renda, com baixa tecnologia de produção e outra parte foi conduzida para obtenção de produtos menos exigentes quanto a aspectos visuais e defeitos da madeira, apresentando considerável número e diâmetro de nós. Esses defeitos comprometem a utilização destas madeiras para obtenção de produtos mais nobres. As tentativas de uso têm resultado em baixo rendimento, grande perda e alto custo de produção. Para compensar estes problemas o valor da matéria-prima é reduzido, ou estas indústrias acabam optando pelo uso de madeiras nobres, onde a garantia de qualidade é expressiva. Essa é uma atitude esperada dentro de um processo de globalização, onde a produtividade e qualidade são aspectos essenciais para a sobrevivência das indústrias em um mercado cada vez mais competitivo.

Para melhorar a qualidade dos produtos é necessário o conhecimento prévio das propriedades da madeira a ser utilizada. Para isso, as grandes empresas de base florestal e os centros de pesquisas dispõem de laboratórios, onde são realizadas análises convencionais e, em geral, com um número restrito de amostras, uma vez que são demoradas e com um custo considerado, desde a coleta das amostras, em geral de forma destrutiva, até a obtenção dos resultados finais.

Para tornar o processo dinâmico e menos oneroso é necessária a implementação de novas tecnologias. Dentro desse contexto, os métodos de ensaios não destrutivos, como, por exemplo, a aplicação de ondas de tensão, pode fornecer uma indicação de uso. Além da maior rapidez e do baixo custo de análise, permite seu uso posterior, podendo ser aplicado na árvore em pé, em parte do tronco e também no produto final, proporcionando grandes avanços científicos, ganhos econômicos – financeiros e ambientais, destacando-se entre eles:

- Maior qualidade dos produtos

- Uso adequado da madeira nas indústrias, aumentando rendimentos e produção, reduzindo os desperdícios e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos;
- Uso adequado das florestas instaladas, melhorando o aproveitamento, otimizando-as ao máximo, de acordo com os diferentes segmentos de mercado e produtos, colaborando para minimização do processo de exaustão dos povoamentos e, ao mesmo tempo, agregando valor à madeira;
- Fator complementar para planejamentos e decisões econômicas (estudos de viabilidade econômica), que são, em geral, baseadas em características dimensionais (volume, IMA, diâmetro/sortimento);
- Redução dos desperdícios nas diversas fases de preparo da matéria

Essa técnica apresenta influências de várias propriedades da madeira, tais como, densidade básica, dimensões de fibras, percentuais de lenhos, ângulo de grã, freqüência e diâmetro de nós, dentre outros. O conhecimento destas influências é importante para a aplicação do método em qualquer material a ser analisado, como em árvores em pé, toras ou produto final, possibilitando inferências sobre as propriedades desejadas.

Apesar de estar sendo investigada há mais de 30 anos, a aplicação de ondas de tensão tem sido utilizada com maior intensidade dentro das indústrias, nos produtos finais. A aplicação do método em toras e árvores é muito recente, tendo sido realizados poucos estudos com propriedades isoladas.

Este trabalho tem como objetivo geral testar a técnica não destrutiva de aplicação de ondas de tensão para estimativa das propriedades da madeira, verificando a viabilidade técnica de utilização como ferramenta para seleção de árvores em pé e toras. Além disso, tem como objetivos específicos:

- a) Buscar inter-relações entre as propriedades da madeira e as variáveis do método de emissão de ondas de tensão, o tempo e velocidade de propagação das ondas;
- b) Testar as influências das propriedades da madeira sobre os princípios do método proposto;

- c) Desenvolver modelos matemáticos que permitam estimar as propriedades da madeira através da técnica de emissão de ondas de tensão;
- d) Testar a possibilidade de estimar a qualidade do produto final (lâminas, tábuas) com base no uso da técnica em árvores em pé e toras.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A madeira é um material lenhoso, formado por células dispostas nos sentidos radial e axial, ligadas entre si pela lignina, que age como um cimento, conferindo sustentação ao tronco. Estas células passaram por vários estágios de desenvolvimento, como a divisão celular, diferenciação e maturação, sendo influenciadas em cada um desses estágios por fatores genéticos, edáficos, climáticos, silviculturais, geográficos, dentre outros, apresentando variações dimensionais e químicas, resultando em material não uniforme, com alta variabilidade, entre e dentro da árvore (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989). Se por um lado, esta variabilidade torna a madeira um material que pode ser empregado para diferentes tipos de produtos, por outro, torna um grande inconveniente na sua utilização como matéria-prima para produtos específicos, necessitando de um conhecimento prévio de suas propriedades e variações. Seu uso depende da qualidade que pode ser determinada em função dos requisitos exigidos pelo produto final. Vários autores referem-se às propriedades anatômicas, químicas, físicas e morfológicas, como sendo as principais variáveis de qualidade da madeira (LARSON, 1969; BARRICHELO, 1979; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; MOURA, 2000) e às propriedades mecânicas, quando se considera a madeira para fins estruturais (MATOS, 1997).

### 2.1 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

#### 2.1.1 Dimensões das Fibras

As madeiras de coníferas apresentam uma estrutura relativamente simples, constituída por dois tipos de células, as de raio que correspondem de 5 % a 10 % da madeira e as fibras axiais que correspondem de 90 % a 95 % da madeira. As fibras axiais são células longas e delgadas, sendo as mais importantes em termos de utilização da madeira.

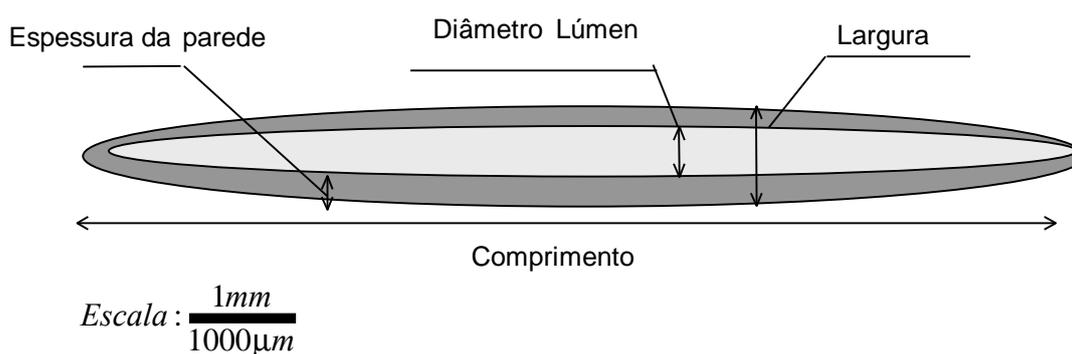
É importante enfatizar que o termo fibras é, tecnicamente, utilizado para espécies de folhosas, sendo denominado de traqueídeos ou traqueóides para coníferas. Entretanto, por ser mais fácil, adota-se o termo fibras em ambas as

situações, principalmente nas indústrias de produtos de base florestal (MEGRAW, 1985). Na presente pesquisa, o termo fibras será utilizado para se referir aos traqueóides de *Pinus taeda* e de outras espécies de coníferas.

As dimensões das fibras são indicadores importantes do potencial de uma madeira para a fabricação de papel. Estas exercem influência direta nas variáveis de processo, principalmente no grau de refino, na qualidade da pasta e, conseqüentemente, nas resistências físicas e mecânicas do papel (FOELKEL, 1976; BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003).

Os parâmetros, usualmente considerados nos estudos de fibras, compreendem quatro medidas fundamentais: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume, esquematizados na Figura 1.

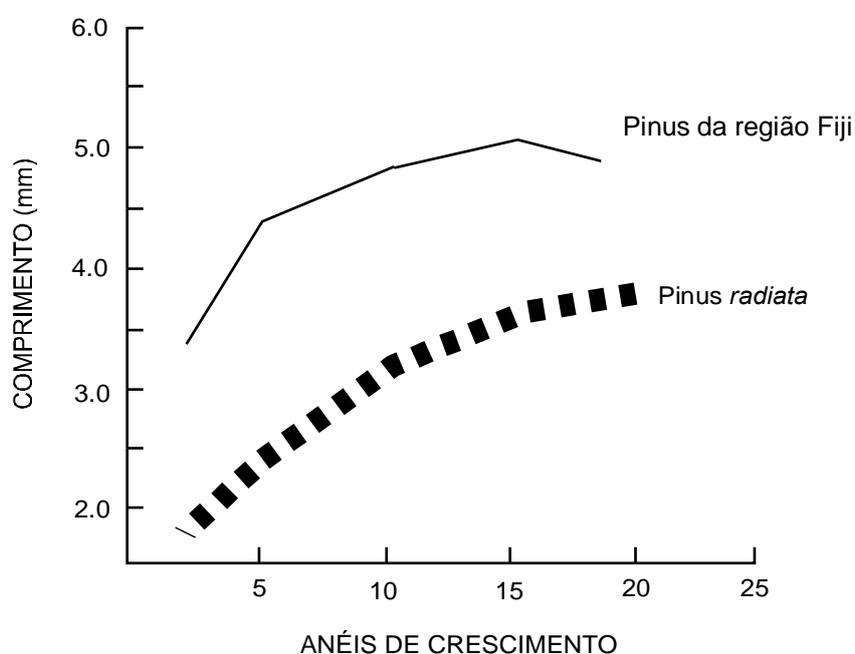
FIGURA 1 - ESQUEMA DE UMA FIBRA



As dimensões das fibras são controladas por diferentes processos fisiológicos, variando dentro da árvore nos sentidos radial e axial, que segundo BARRICHELO (1979) são as variações mais significativas. O comprimento das fibras é diretamente influenciado pelas divisões longitudinais-tangenciais que ocorrem no câmbio. Estas, por sua vez, são controladas pela taxa de hormônios da árvore a qual está ligada à sazonalidade, às condições ambientais e à fatores genéticos, dentre outros. Quando as condições são propícias para um maior crescimento, a taxa de hormônios aumenta, induzindo as células cambiais às rápidas divisões. Assim, não há tempo suficiente para o incremento em comprimento da fibra antes da próxima divisão, sendo observadas fibras mais curtas em períodos de alto ritmo de crescimento (PANSIN; DE ZEEUW, 1980; SHIMOYAMA, 1990). Esta propriedade

também é influenciada pela idade da árvore. Com o aumento da idade, as células cambiais passam a produzir células com maiores dimensões até atingirem a estabilização em idades mais avançadas (COWN, 1975; COWN, 1980; TOMAZELLO FILHO, 1985). Dessa forma, há um aumento do comprimento de fibras no sentido medula-casca (COWN, 1975, COWN, 1992; BARRICHELO, 1979; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1984; CORSON, 1991; MUNIZ, 1993; KLOCK, 2000), com fibras mais curtas na região interna do tronco (madeira juvenil). Esta variação é ilustrada na Figura 2 para *P. radiata*.

FIGURA 2 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS NO SENTIDO RADIAL PARA ÁRVORES DE Pinus

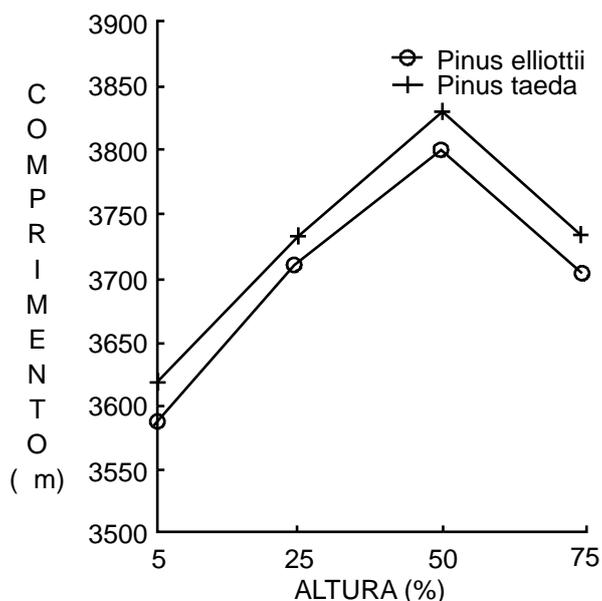


FONTE: adaptado de COWN; McCONCHIE (1980)

De uma maneira geral, o comprimento das fibras de coníferas varia, em média, de 2,5 a 5,0 mm (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980). As espécies do gênero *Pinus* apresentam, no sentido axial, tendência de aumento do comprimento de fibras até o meio do tronco, decrescendo a partir daí, em direção à copa (DINWOODIE, 1965; DADSWELL; NICHOLS, 1960; COWN, 1975; TOMASELLI, 1979; MENDONÇA, 1982; CORSON, 1984; MUÑIZ, 1993). Esta redução axial no comprimento das fibras se deve à alta concentração de hormônios de crescimento (auxinas) nas regiões próximas à copa, induzindo os meristemas apicais,

responsáveis pelo crescimento em altura, a divisões aceleradas das células que antes de atingirem seu comprimento potencial, sofrem nova divisão. A Figura 3 ilustra o esquema de variação do comprimento de fibras ao longo do tronco.

FIGURA 3 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS DE *P. taeda* E *P. elliottii* AO LONGO DO TRONCO.



Fonte: MUÑIZ (1993)

No que diz respeito às relações com as características dos produtos, o comprimento de fibras está diretamente relacionado à resistência ao rasgo da celulose, pasta e papel (DINWOODIE, 1965; LARSON et al., 2001) e em menor grau à tração, podendo também ser importante fator na qualidade da madeira de produtos sólidos. Fibras longas com menores ângulos fibrilares resultam em painéis mais resistentes e mais estáveis (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989).

A largura ou diâmetro externo das fibras e o diâmetro do lume (diâmetro interno), também são propriedades influenciadas pela taxa de crescimento e pela idade das árvores. Em períodos de alto ritmo de crescimento, propiciado por condições edáficas, climáticas ou genéticas, as fibras produzidas pela região cambial são largas, com acentuados diâmetros de lume. Como as árvores apresentam um alto ritmo de crescimento nos primeiros 10 - 12 anos de vida e, posteriormente, tende a estagnar, as fibras mais largas e com maiores diâmetros de lume estão mais restritas à região interna do tronco (COWN, 1975; BARRICHELO,

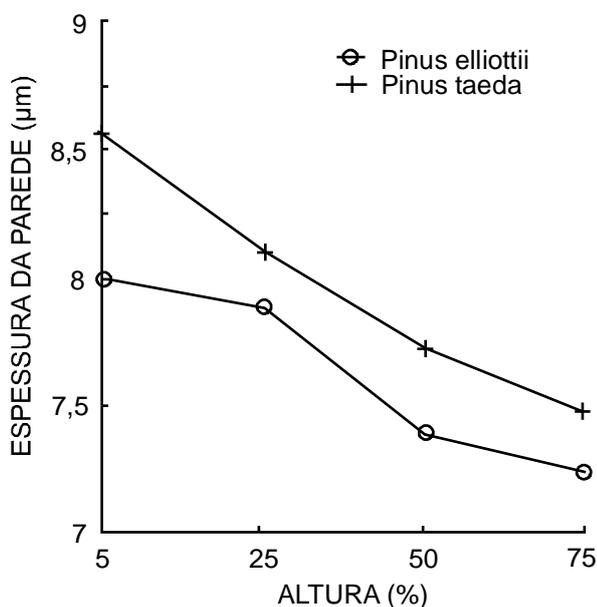
1979; PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; COWN, 1992) mais especificamente na madeira juvenil (CORSON, 1984; CORSON, 1991; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000). No sentido base-topo, há um aumento de ambas as dimensões (COWN, 1975), influenciadas pelo crescimento apical e pela copa da árvore. MUÑIZ (1993) estudando a madeira de *P. taeda* aos 30 anos de idade, observou acréscimos na largura e diâmetro do lume das fibras até o meio do tronco, e à partir desta posição decresceram em direção ao topo. Ambas as dimensões apresentam as mesmas tendências de variação dentro do tronco, estando fortemente correlacionadas, indicando que as fibras mais largas são também as de maior diâmetro de lume (KARTH, 1967; COWN, 1975; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983). Estas correlações são mais fortes ainda na madeira juvenil. Segundo KIBBLEWHITE (1984), fibras largas e com grandes diâmetros de lume são bastante flexíveis, se colapsam e se entrelaçam facilmente na formação de papel, resultando em boa resistência à tração e estouro, além disso, são fáceis de serem trabalhadas durante o refino da celulose/pasta.

De uma maneira geral, o diâmetro das fibras em coníferas varia entre 20  $\mu\text{m}$  e 60  $\mu\text{m}$ , sendo que para *P. taeda* são encontrados valores médios entre 40  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$  e de 25  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$  para o diâmetro do lume (BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000).

Com respeito à espessura da parede, uma fibra é formada pelas paredes primária e secundária. Durante o crescimento em comprimento (crescimento superficial), a fibra apresenta apenas a parede primária, com espessura variando entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 0,2  $\mu\text{m}$ , representando apenas 2 % da parede celular quando comparada à fibra em estágio mais avançado. A parede secundária se forma após o crescimento superficial ter cessado e seu espessamento ocorre com a deposição de carboidratos, principalmente quando o crescimento da árvore é lento (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; SHIMOYAMA, 1990). A parede secundária, que pode representar até 90 % da espessura total, consiste de três camadas, a mais externa, denominada S1, com espessura variando entre 0,2  $\mu\text{m}$  e 0,3  $\mu\text{m}$ ; a intermediária S2, com espessura entre 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  para coníferas e a interna S3, com aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . Igualmente às demais dimensões, a espessura da parede também é influenciada por fatores genéticos e ambientais, especialmente quando estes interferem no ritmo de crescimento. No sentido axial, da base para o topo das

árvores, há uma redução na espessura da parede das fibras (BARRICHELO, 1979; MUÑIZ, 1993) com o aumento na largura e diâmetro do lume, influenciado pelo crescimento em altura. Fibras formadas em períodos de alto crescimento são largas, com significativos diâmetros de lume e baixa espessura da parede (ERICKSON; HARRINSON, 1974). A variação axial da espessura da parede das fibras para espécies de *Pinus* é ilustrada na Figura 4.

FIGURA 4 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA PAREDE DAS FIBRAS DE *P. taeda* e *P. elliottii* AO LONGO DO TRONCO.



Fonte: MUÑIZ (1993)

A espessura da parede celular também é afetada pela idade da árvore, apresentando um aumento linear com o incremento em idade. Conforme mencionado anteriormente, o tecido cambial mais velho, produz também células com características adultas, apresentando maior espessura de parede (COWN, 1980). Dessa forma, as coníferas tendem a aumentar a espessura da parede do centro (madeira juvenil) para a região externa do tronco (madeira adulta) (KARTH, 1967; COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE, 1984; CORSON, 1984; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1991; COWN, 1992; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003).

Tanto no sentido radial, quanto axial, a espessura da parede apresenta variação oposta à largura e diâmetro do lume das fibras, indicando que as fibras mais largas e com os maiores diâmetros de lume apresentam paredes mais delgadas (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990).

Quanto às influências no produto final, a espessura da parede das fibras encontra-se diretamente relacionada às resistências mecânicas da celulose/pasta e papel. Quanto maior a espessura da parede, maior é a resistência ao rasgo (COWN; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; CORSON, 1991), entretanto, fibras espessas, são, em geral, rígidas e não apresentam bom desempenho nos processos de refino e não se colapsam, tendendo a manter sua forma tubular na formação do papel, reduzindo significativamente a resistência à tração (KIBBLEWHITE, 1972; KIBBLEWHITE, 1974; KIBBLEWHITE, 1980). Em termos de produtos estruturais, a espessura da parede também influencia as resistências mecânicas da madeira.

### 2.1.2 Relações Entre as Dimensões de Fibras

Muitas vezes, as dimensões de fibras, isoladamente, podem não apresentar correlações significativas com a qualidade do produto final, especialmente da celulose, pasta e do papel. Porém, ao agrupá-las as influências são mais acentuadas, podendo ser obtidas correlações significativas. Este agrupamento sob diversas formas resulta em índices que auxiliam na interpretação da qualidade da madeira e da pasta. Segundo FOELKEL (1976), as relações entre as dimensões das fibras têm sido de considerável interesse na interpretação da qualidade da celulose e papel, podendo auxiliar na explicação dos resultados para as resistências do produto final e, inclusive, na identificação e seleção de madeiras.

Os principais índices são: índice de Runkel, fração parede, coeficiente de flexibilidade e índice de enfiamento.

O índice de Runkel (IR) é definido como sendo a relação entre a espessura da parede (EP) e o respectivo diâmetro do lume da fibra (DL), conforme expressão que segue.

$$IR = \frac{2 \times EP}{DL}$$

Este índice apresenta alta correlação negativa com a largura das fibras devido à relação inversa entre a espessura da parede e a largura das fibras. Fibras mais largas apresentam, em geral, menor espessura da parede e conseqüentemente menor índice de Runkel (KARTH, 1967; COWN, 1975; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983).

A fração parede (FP) é definida pela relação percentual entre a espessura da parede (EP) e a largura da fibra (L):

$$FP = \frac{2 \times EP}{L} \times 100$$

O índice de Runkel e a fração parede encontram-se relacionados à rigidez da fibra, isto é, quanto maior os seus valores, mais rígida pode se tornar a fibra. Dependendo do grau, a rigidez das fibras pode exercer influências sobre as propriedades mecânicas do papel. Considera-se que uma fibra apresenta boa qualidade para produção de papel e celulose, com boa resistência à tração, se o índice de Runkel for abaixo de 0,5 e a fração parede abaixo de 40 (FOELKEL; BARRICHELO, 1975; FOELKEL, 1976).

O coeficiente de flexibilidade (CF) relaciona o diâmetro do lume (DL) e a largura da fibra (L), sendo calculado pela expressão:

$$CF = \frac{DL}{L} \times 100$$

Finalmente, o índice de enfiamento é o quociente entre o comprimento e a largura das fibras. O coeficiente de flexibilidade e o índice de enfiamento medem o quão flexíveis são as fibras e a sua capacidade de entrelaçamento, sendo, portanto, índices importantes para fabricação de celulose e papel (FOELKEL, 1976; KLOCK, 2000), e se correlacionam de forma negativa com a espessura da parede das fibras. Segundo DINWOODIE (1965), a flexibilidade das fibras exerce influência direta e positiva na resistência à tração e ao estouro da celulose/pasta. A mesma influencia é exercida pelo índice de enfiamento.

De acordo com a fórmula de determinação, o índice de enfiamento apresenta relação inversa com a largura da fibra. Como a largura é altamente relacionada ao diâmetro do lume, conseqüentemente há uma correlação negativa entre índice de enfiamento e diâmetro do lume.

## 2.2 PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS

### 2.2.1 Percentual de Lenhos

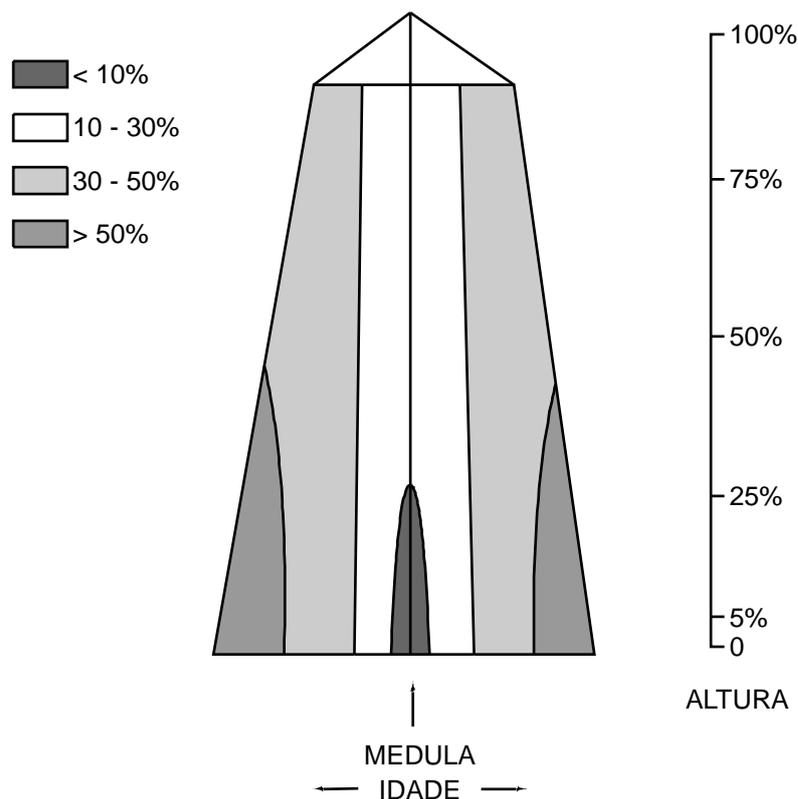
A cada ano, são depositadas duas camadas de madeira entre a casca e a madeira propriamente dita (xilema). Estas camadas são denominadas de anéis de crescimento. Quando formadas no outono-inverno são chamadas de lenho tardio ou outonal, e na primavera-verão são denominadas de lenho inicial ou primaveril. Nas estações primavera e verão, período com maior disponibilidade de luz, calor e água no solo, a taxa hormonal aumenta e a planta apresenta um intenso crescimento vegetativo, induzindo as células cambiais a rápidas divisões, sem tempo suficiente para aumentos em comprimento e em espessura da parede antes da próxima divisão. Dessa forma, as fibras do lenho inicial são mais curtas, mais largas, com acentuados diâmetros de lume e paredes finas, apresentando menores índice de Runkel, fração parede e índice de enfeltramento e maior coeficiente de flexibilidade. No final do período vegetativo (outono-inverno) a planta reduz sua atividade vegetativa, produzindo lenho tardio com fibras espessas, menos largas, com diâmetro de lume significativamente inferior e aspecto mais escuro (WATSON; DADSWELL, 1961; COWN, 1975; FOELKEL, 1976; PANSIN; DE ZEEUW, 1980; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON, et al., 2001; HASSEGAWA, 2003). Essas fibras apresentam também maior índice de Runkel, índice de enfeltramento e fração parede e menor coeficiente de flexibilidade.

Os percentuais de lenhos também são influenciados pela idade da árvore. Nos primeiros anos o ritmo de crescimento é elevado, formando-se maior percentual de lenho inicial. Quando a árvore tende à maturidade, há um aumento relativo no percentual de lenho tardio. Dessa forma, a madeira juvenil apresenta maior percentual de lenho inicial e a madeira adulta, maior percentual de lenho tardio, com fibras mais longas e mais espessas (COWN, 1980; KIBBLEWHITE, 1982; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; COWN et al., 1983; COWN; MCCONCHIE, 1983; CORSON, 1984; CORSON, 1991). Dessa forma, há uma tendência de redução no percentual de lenho inicial e aumento no lenho tardio no sentido medula-casca.

Os percentuais de lenhos inicial e tardio também variam no sentido axial, aumentando o lenho inicial em direção à copa da árvore (MENDONÇA, 1982;

MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON, et al., 2001; HASSEGAWA, 2003), o que explica a maior largura, maior diâmetro do lume e menor espessura da parede das fibras em alturas mais elevadas do tronco. A Figura 5 ilustra a tendência de variação para o lenho tardio no sentido axial.

FIGURA 5 – VARIÇÃO DO PERCENTUAL DE LENHO TARDIO DENTRO DE ÁRVORES DE *P. taeda* E *P. elliotii*



Fonte: MUÑIZ (1993)

Os percentuais de lenho inicial e tardio são propriedades importantes, tanto na produção de celulose e papel, quanto na obtenção de produtos, como laminados, componentes de portas e janelas, etc. Na produção de celulose/pasta e papel, uma maior porcentagem de lenho tardio proporciona maior resistência ao rasgo e menor tração (KIBLLEWHITE, 1972; KIBLLEWHITE, 1974, COWN; McCONCHIE, 1982). Além disso, quanto maior o percentual de lenho tardio, maior é o rendimento destes produtos (BARRICHELO, 1979; KLOCK, 2000). Se a característica mais importante for a resistência à tração, maior porcentagem de lenho inicial é desejável. Para serrados e laminados a relação lenho inicial/lenho tardio pode apresentar problemas

na resistência mecânica, na dureza do material e, inclusive problemas durante a secagem.

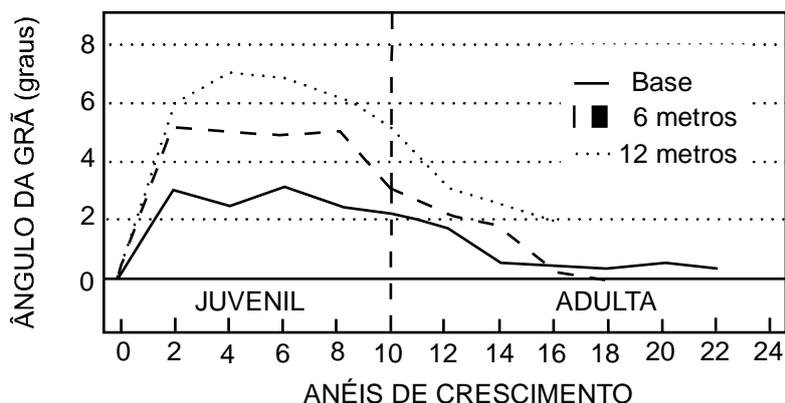
### 2.2.2 Ângulo de Grã

O ângulo de inclinação da grã é a medida do desvio dos tecidos componentes da madeira, especialmente das fibras, em relação ao eixo longitudinal do tronco ou de peças de madeira. Esta propriedade tem principal efeito sobre o valor e utilidade da madeira, sendo especialmente importante para produtos sólidos. Quando o ângulo é alto, praticamente impossibilita a manufatura de determinados produtos devido a empenamentos, rachaduras ou quebras. Em produtos estruturais, exerce influências sobre as resistências mecânicas. Madeiras com maiores inclinações de grã são mais frágeis, aumentando a tendência para empenamento com a variação no teor de umidade (CURRY; COVINGTON, 1974), além de prejudicar a aparência dos produtos acabados.

A grã espiralada ocorre comumente em coníferas e, freqüentemente, segue uma espiral à esquerda, isto é, inclina-se à esquerda em relação ao eixo axial das árvores. É comum no gênero *Pinus*, aparecendo em muitas espécies, porém, em algumas, como o *Pinus taeda* tem pouca importância (BAMBER; BURLEY, 1983). DADSWELL; NICHOLLS (1960) determinaram um ângulo de grã de 7° como sendo o limite aceitável para a qualidade de produtos sólidos. Freqüentemente, algumas coníferas excedem esse valor. COWN et al. (1983) encontraram ângulo de grã excedendo 5° em *P. caribaea* var. *hondurensis*. Quanto à tendência de variação da grã, BAMBER; BURLEY (1983) verificaram que o ângulo é maior na região central do tronco.

As variações para grã foram estudadas em *P. radiata* por COWN et al. (1991). No sentido radial, os autores verificaram que os maiores ângulos são observados na região próxima à medula, na madeira juvenil (Figura 6) e esta propriedade também aumenta com a altura da árvore. Os autores relatam que a grã espiral é um problema sério nas toras jovens.

FIGURA 6 - VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NO SENTIDO RADIAL



Fonte: COWN (1992)

HALSLETT et al. (1991) salientam que há chance de seleção através de melhoramento para reduzir os impactos do ângulo de grã em produtos serrados, trazendo, inclusive, ganhos econômicos.

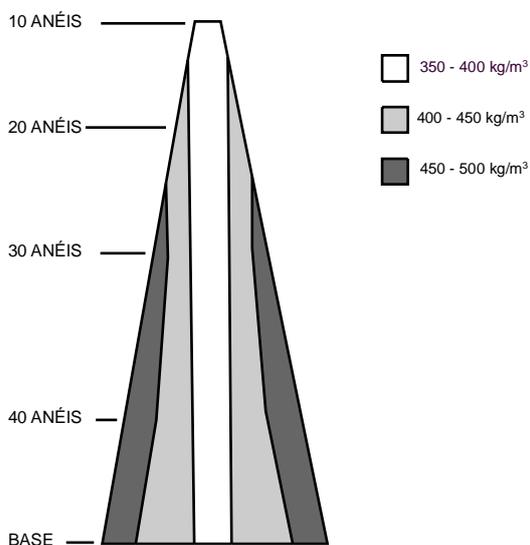
### 2.3 DENSIDADE BÁSICA

A densidade básica da madeira, também denominada de massa específica básica, é tida, pelas indústrias de base florestal, como uma das mais importantes propriedades por ser de fácil determinação e por estar correlacionada com rendimentos e características de diversos produtos, além de ser alterada através de tratamentos silviculturais e manipulada geneticamente (WILLIAMS; HAMILTON, 1961; ZOBEL, 1961). Esta propriedade física, definida como a relação entre o peso seco da madeira e o seu volume obtido acima do ponto de saturação das fibras, é resultante das características químicas, anatômicas e morfológicas, tais como as dimensões das fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume); teor de lignina, holocelulose e extrativos; percentuais de lenho inicial e tardio; teor de madeira juvenil, adulta, dentre outros (KARTH, 1967; BARRICHELO, 1979; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; SHIMOYAMA, 1990; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000). Portanto, a densidade básica também é influenciada pelas condições de crescimento da árvore, considerando-se o solo, clima, práticas silviculturais, variando entre espécies, povoamentos, entre e dentro das árvores, no sentido radial e axial.

A densidade básica apresenta forte relação positiva com a espessura da parede das fibras (KARTH, 1967; COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; KIBBLEWHITE, 1980; LARSON, et al., 2001). Os carboidratos que são depositados na parede da fibra, durante seu espessamento, possuem alto grau de polimerização e alto peso molecular, tornando a madeira mais densa. Por outro lado, esta propriedade apresenta forte relação negativa com a largura e diâmetro do lume (BARRICHELO, 1979; SHIMOYAMA, 1990), onde as fibras mais largas, com maior diâmetro do lume apresentam maiores espaços vazios por unidade de área e, conseqüentemente, são menos densas. Como conseqüência destas correlações com as dimensões das fibras, a densidade básica se relaciona positivamente com o índice de Runkel e negativamente com o coeficiente de flexibilidade e índice de enfeltramento. No sentido radial, a densidade básica tende a aumentar com o aumento da espessura da parede e redução do diâmetro do lume (COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; TOMASELLI, 1979; CORSON, 1984; PANSIN; DE ZEEUW, 1980; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; SHIMOYAMA, 1990; CORSON, 1991; COWN, 1992; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000) e diminui da base para o topo das árvores (COWN; McCONCHIE, 1980; COWN; McCONCHIE, 1983; CORSON, 1984; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003). Estas tendências são ilustradas nas Figuras 7.

No que diz respeito às relações entre a densidade básica e o comprimento de fibras, SMITH (1959) verificou que ambas as propriedades são independentes. DINWODIE (1965) e LARSON et al. (2001) observaram fraca correlação negativa. Entretanto, a maior parte das pesquisas sobre o assunto detectou correlação positiva entre a densidade básica e o comprimento das fibras (KOCH, 1972; KIBBLEWHITE, 1980; KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983). Muitas vezes, as correlações positivas observadas entre duas propriedades, mostram apenas que as mesmas possuem um aumento paralelo dentro da árvore (CARPIM, et al., 1985), podendo ser o caso desta relação.

FIGURA 7 - ESQUEMA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DENTRO DA ÁRVORE – *P. radiata*



Fonte: COWN; McCONCHIE (1980)

Quanto à variação da densidade básica nos lenhos inicial e tardio, como mencionado no item 2.2.1, as fibras do lenho tardio são significativamente mais espessas que as do lenho inicial, conferindo-lhe uma maior densidade básica. Vários estudos têm demonstrado esta forte relação direta entre a densidade e o lenho tardio (HIGGINS et al., 1973; BARRICHELO, 1979; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000; LARSON et al., 2001; HASSEGAWA, 2003). A mesma relação é observada entre a densidade básica e a madeira adulta que também apresenta fibras mais espessas que a madeira juvenil (KIBBLEWHITE; LLOYD, 1983; COWN; McCONCHIE, 1983; COWN, 1980; CORSON, 1984; CORSON, 1991; KIBBLEWHITE, 1982). A relação entre a densidade básica e os percentuais de lenho inicial e madeira juvenil é negativa, pois as fibras de ambos os lenhos apresentam paredes finas e acentuado diâmetro de lume, resultando em maior quantidade de espaços vazios, o que reduz significativamente a massa por unidade de volume, ou a densidade da madeira.

No setor de celulose e papel, a densidade básica se relaciona ao rendimento e qualidade dos produtos. Madeira com maiores densidades apresentam maior rendimento em celulose/pasta, maior resistência ao rasgo e menor resistência à tração e estouro (FOELKEL, 1976; KIBBLEWHITE, 1980).

No que diz respeito à madeira estrutural, a densidade básica se relaciona diretamente às propriedades de resistência, tanto da madeira verde, quanto seca, tendo suas resistências aumentadas com incrementos na densidade básica.

## 2.4 NÓS

Uma importante fonte de variação da madeira é a presença dos nós e, sua frequência, tamanho, posição e o tipo (vivo ou morto) determinam a qualidade da madeira, principalmente na obtenção de produtos sólidos. Na indústria de celulose/pastas estes defeitos são, às vezes, menos importantes, sendo separados no início do processo ou mesmo desagregados nos processos químicos. O nó é definido como uma porção de galho incorporado no tronco da árvore e, consiste basicamente de fibras de madeira de compressão, as quais são morfologicamente diferentes das fibras de madeira normal. A madeira que compreende a região de nós apresenta desvios acentuados de suas células, formando alto ângulo de grã, irregularidades nos anéis de crescimento, além de descontinuidade entre o nó e a madeira circundante, resultando em redução da resistência (THUNELL, 1958). Os nós também apresentam baixo teor de umidade, com uma densidade básica duas vezes maior àquela de madeira normal e alto teor de extrativos (SAHLBERG, 1995), influenciando também as características superficiais da madeira. Por esse motivo, BROWN (1979), considerou os nós como o mais sério defeito da madeira de *P. radiata*.

A literatura dispõe de poucos estudos que quantificam os nós da madeira, especialmente para o gênero *Pinus*. Na tentativa de explicar a escassez de bibliografia sobre o assunto, BOUTELJE (1965) mencionou o comentário de um participante em um congresso de genética em Stockholm, que ainda persiste nos dias atuais:

“Nós não sabemos muito sobre nós da madeira, mas nós sabemos que não os queremos...”.

Os nós estão relacionados a fatores genéticos, variando entre espécies, podendo ser controlado por práticas silviculturais, tais como, espaçamentos e

desramas. Estudos buscando técnicas para redução dos nós na madeira têm questionado a qualidade e viabilidade econômica das técnicas de desrama como forma de reduzir o problema. Os povoamentos comerciais plantados em estreitos espaçamentos iniciais apresentam uma desrama natural na parte inferior do tronco. Com o crescimento da árvore em diâmetro os nós ficam restritos à região interna da árvore, ou seja, na madeira juvenil. Segundo COWN (1992) uma das implicações do uso de madeira da região interna do tronco (madeira juvenil) é a presença de grande quantidade de nó. A quantidade de nós aumenta substancialmente com a altura do tronco, na direção da copa da árvore (LARSON et al., 2001), contribuindo para redução do valor das toras obtidas a determinada altura do fuste.

BAMBER; BURLEY (1983), consideram que o principal efeito dos nós é afetar a orientação da grã. Por outro lado, os nós reduzem significativamente as resistências da madeira dependendo da sua dimensão, solidez e localização relativa na peça (IWAKIRI, 1982). De acordo com KOLLMANN; COTÉ (1968), os nós reduzem o valor do módulo de ruptura das vigas de madeira sólida, submetida à flexão, principalmente se eles estiverem localizados na área tracionada, próximo à secção transversal crítica. Além disso, eles prejudicam a aparência e qualidade da maioria dos produtos acabados, reduzindo, muitas vezes, o rendimento final.

## 2.5 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

A avaliação não destrutiva tem sido usada na área florestal para uma série de finalidades, desde a matéria-prima bruta até a classificação de produtos dentro das indústrias, além de outras aplicações como avaliação “in loco” de partes de madeira ou estruturas montadas, postes e, até mesmo, árvores ornamentais. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com técnicas não destrutivas para avaliação das propriedades da madeira, especialmente para propriedades físicas, mecânicas e defeitos. Por definição, avaliação não destrutiva é uma técnica de identificação das propriedades de um determinado material sem alterar sua capacidade de uso futuro, utilizando as informações para tomadas de decisões com relação às aplicações apropriadas do material avaliado (ROSS, et al., 1998). As vantagens dos métodos não destrutivos sobre os métodos tradicionais são significativas, destacando-se a

possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores obtidos; redução das perdas de material; classificação de peças em classes de qualidade e resistência; detecção de defeitos internos antes do beneficiamento, além das vantagens financeiras proporcionadas pelo conjunto de vantagens citadas.

Todo método não destrutivo usa alguma forma de propagação de energia através ou em volta de um material para deduzir algumas características importantes do material examinado. Esta energia pode resultar de cargas estáticas ou dinâmicas ou ser geradas por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD et al., 1996).

A hipótese fundamental para avaliação não destrutiva de produtos de madeira foi inicialmente proposta por JAYNE em 1959, ao verificar que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira, que podem ser medidas de forma não destrutiva, através de uma série de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Estas propriedades, especialmente o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são relacionados, nesta teoria, com a energia armazenada e com a dissipação de energia, respectivamente (MATOS, 1997). Dessa forma, relações matemáticas entre essas propriedades puderam ser estabelecidas. A medição dos fatores de dissipação sob condições de baixa tensão torna possível a estimativa das propriedades de resistência, que são, normalmente, determinadas pela complexa ruptura do material, no caso dos métodos destrutivos (PELLERIN, 1965).

Várias técnicas são classificadas como métodos não destrutivos, tais como:

a) Métodos visuais

Os métodos visuais, uns dos mais simples, mais antigos e mais utilizados métodos não destrutivos para classificação de madeiras, permitem identificar facilmente características como a cor e presença de defeitos, tais como podridões e nós, considerando-se o tamanho, número e localização dos mesmos. Esse método ainda é muito utilizado para uma classificação geral, com objetivo de eliminar problemas e defeitos graves da madeira que possam interferir significativamente nos processos de obtenção de produtos. Apesar de bastante útil, o mesmo apresenta algumas limitações, identificando apenas valores

qualitativos, sendo que as reais condições do material podem não ser detectadas, uma vez que a avaliação fica limitada às faces externas da madeira, não garantindo sua performance durante o uso. Além disso, os parâmetros são bastante subjetivos, o que exige treinamento para realização das avaliações.

#### b) Métodos químicos

Esses métodos consistem na avaliação da composição química da madeira ou de outros materiais e eficiência de tratamentos como preservativos e retardantes de fogo. Além da avaliação residual de produtos, estes testes propiciam também a avaliação da degradação química de madeira atacada por fungos decompositores.

#### c) Método mecânico

Trata-se de um método pioneiro e um dos mais populares métodos não destrutivos utilizados para madeira. A avaliação das madeiras está baseada no princípio de correlação entre a resistência, representada pelo módulo de ruptura (MOR) e a elasticidade, obtida em teste de flexão estática, representada pelo módulo de elasticidade (MOE). Neste método, a peça de madeira é flexionada por poucos instantes na máquina de classificação, o necessário para medir seu valor de rigidez, que permite estimar a resistência à flexão da peça através da correlação entre o MOE e o MOR (GORNIAK; MATOS, 2000). O parâmetro não destrutivo mais utilizado tem sido o MOE, algumas vezes associado à densidade aparente. O método apresenta como ponto negativo, a complexidade e custo desta tecnologia, não sendo acessível a pequenas indústrias madeireiras.

#### d) Métodos físicos

Entre os diversos testes físicos de avaliação não destrutiva inclui-se de resistência elétrica, propriedades dielétricas, resistência física (à penetração de materiais), raio-x, propriedades ópticas, vibracionais e acústicas, destacando-se as técnicas:

- Pilodyn

O Pilodyn é um equipamento que mede a resistência da madeira à penetração de materiais. Este método fornece informações como as condições

físicas de postes, árvores, toras, elementos estruturais, etc. A aplicação consiste na introdução gradual de um pino no material. A resistência oferecida pelo material durante a introdução é registrada em um computador e descrita na forma de gráfico, cujas coordenadas são a medida de penetração (mm) e unidades arbitrárias de resistência (%). Com as informações obtidas, é possível calcular a densidade da madeira (GORNIAK; MATOS, 2000).

- Técnicas vibracionais

A teoria da técnica de vibração prediz que todos os materiais possuem uma frequência natural de vibração. Um significativo desvio desta vibração teórica natural é um indicador de possível dano ou defeito neste material. A relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a frequência natural de vibração pode ser expressa pela equação apresentada por GÖRLACHER (1984):

$$MOEd = \frac{4\pi^2 \times L^4 \times f^2 \times \delta}{m_n^4 \times i^2} \times \frac{1 + i^2}{L^2 \times k_1}$$

em que,

MOEd: módulo de elasticidade dinâmico

$\delta$  : massa específica

L : comprimento da peça de madeira biapoiada

f : frequência natural

$m_n, k_1$  : constante de vibração em módulo 1

- Técnicas ópticas

Entre as técnicas ópticas, destaca-se o UVvis (ultravioleta visível), scanner, laser e os infra-vermelhos espectros, infravermelho fundamental (IR) e próximo (NIR), especialmente o NIR (near infrared).

A espectroscopia de infravermelho próximo é baseada na absorção pelo material de luz infravermelho próximo (comprimento de ondas de 750 a 2500 nm). Quando um material é irradiado com luz infravermelha há vibrações moleculares. A energia absorvida é específica para diferentes tipos e intensidades de vibrações e depende do meio químico dos grupos moleculares. Portanto, diferentes moléculas e grupos moleculares absorvem radiação com energia diferente, isto é, com diferentes

comprimentos de ondas. A refletância da luz para cada comprimento de onda é medida com um espectrômetro e é utilizada para o cálculo da absorção. O espectro de absorção obtido dá informação sobre as moléculas ou grupos moleculares envolvidos (SO et al., 2004). O espectro na região infravermelho próximo não é de fácil interpretação, pois contém um alto número de bandas de fortes sobreposições. Entretanto, o mesmo contém informação sobre a molécula toda ou o sistema molecular. A energia absorvida pelo material é correlacionada com a propriedade desejada. Entretanto, este método apresenta alguns aspectos que dificultam determinadas análises, tais como:

- ∅ Necessidade de uma curva do espectro para associar a cada material a ser analisado e no caso da madeira varia de acordo com a espécie, idade, ritmo crescimento, tipo de amostra (sólida, serragem, disco, bagueta, etc);
  - ∅ Qualquer erro de determinação da variável para formação da curva de calibragem é levado para o método;
  - ∅ Necessidade de ajustes/calibração (associação de espectros) para cada propriedade a ser avaliada;
  - ∅ Proporciona uma avaliação superficial e pontual na madeira, apenas onde a luz penetra, não detectando defeitos ou variações internas.
- Técnicas acústicas (ultra-som e ondas acústicas ou de tensão)

Uma onda sonora pode ser propagada dentro de um material por diversas formas. Primeiramente, o som pode ser produzido pelo próprio material como resultado do movimento rápido da porção estressada. Os sons emitidos e sua propagação estão relacionados ao efeito dinâmico de qualquer defeito dentro do material. Nesta técnica, referida como emissão acústica de inspeção, é utilizado um transdutor piezoelétrico para detectar o som. De outra maneira, o som pode ser produzido externamente pelo contato de um transdutor piezoelétrico onde as ondas geradas são recebidas por um segundo transdutor ou são refletidas para o transdutor que as produziu. As mesmas possuem frequências superiores às audíveis e, por isso, o método é referido como teste acústico-ultra-sônico ou teste ultra-sônico. Em uma terceira forma, as ondas podem ser produzidas através de impacto com um instrumento, tal como um martelo, que gera uma onda elástica ou de tensão

dentro do material. A frequência desta onda pode, ou não, ser ultra-sônica. Um “timer” conectado no ponto de impacto e no ponto de recebimento da onda, na superfície do material testado pode medir o tempo de transmissão e através deste, a velocidade das ondas de tensão (SCHAD, et al., 1996). Este método é referido como transmissão de ondas sonoras, ou emissão de ondas sonoras ou acústicas ou, ainda, de tensão. Este método é mais detalhado no item 2.6.

A maioria dos métodos não destrutivos, usados para diversos materiais, pode ser empregada para avaliação da madeira e compostos de madeira. A escolha depende da aplicação específica e da adaptabilidade (ROSS et al., 1998). Essas técnicas têm sido empregadas com sucesso para avaliação da madeira em diferentes etapas de processamento, desde a árvore em pé até os diferentes produtos obtidos.

## 2.6 TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA POR EMISSÃO DE ONDAS DE TENSÃO

A técnica de avaliação não destrutiva de ondas de tensão vem sendo investigada há mais de 30 anos e tem sido utilizada para diversas aplicações na indústria de produtos florestais. É o método acústico mais utilizado, onde as ondas sonoras são geradas a partir de um impacto ou de vibração forçada. Devido à dificuldade de induzir uma vibração forçada ao objeto, a maioria das avaliações é conduzida com base no método de impacto (PUEHRINGER, 2002). Neste método, a aplicação e medição das ondas de tensão consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. Uma onda acústica é induzida ao material através do choque de um martelo, pêndulo ou outros materiais. Quando a onda alcança o acelerômetro de partida, uma contagem de tempo, em microssegundos, é iniciada no instrumento. Quando esta atinge o acelerômetro de parada, a contagem de tempo cessa e o aparelho registra e mostra o tempo decorrido de trânsito da onda de tensão, entre os acelerômetros, através do material (SCHAD et al., 1996; MATOS, 1997). Os tempos registrados em microssegundos são utilizados para o cálculo da velocidade de propagação das ondas, conforme expressão:

$$V = \frac{d}{t}$$

em que,

V : velocidade de propagação das ondas (m/s)

d : distância entre os transdutores ou acelerômetros (m)

t : tempo de propagação das ondas (s)

A velocidade de propagação das ondas é, muitas vezes, utilizada para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (METRIGUARD, 1997), através da expressão:

$$MOEd = \delta \times V^2 \times \frac{1}{g}$$

em que,

MOEd : módulo de elasticidade dinâmico

$\delta$  : massa específica do material

g : aceleração da gravidade (9,804 m/s<sup>2</sup>)

V : velocidade da onda

A técnica de avaliação das propriedades da madeira, através de propagação de ondas de tensão, apresenta algumas vantagens sobre os outros métodos acústicos, especialmente no que diz respeito ao equipamento utilizado nas avaliações que é bem mais simples, portátil, facilitando a avaliação em qualquer local, inclusive no campo, com baixo custo, possibilitando a aquisição do mesmo por pequenas indústrias para avaliação não destrutiva de vários produtos de madeira.

Este método pode ser empregado para diferentes situações, desde a árvore em pé até os produtos finais obtidos (WANG et al., 2001).

### 2.6.1 Aplicação de Ondas Acústicas em Produtos Sólidos e Compostos de Madeira

Os ensaios não destrutivos, em especial a emissão de ondas de tensão, são importantes ferramentas para avaliação da qualidade de produtos de madeira, que, em função de sua eficiência e rapidez, é capaz de acompanhar a velocidade de uma linha de produção (BUCUR, 1995).

Vários estudos têm sido desenvolvidos para verificação de propriedades e classificação de produtos de madeira, incluindo pequenas amostras, como madeira “clear” (sem defeitos), madeira serrada (tábuas), madeira estrutural (vigas), lâminas e produtos compostos de madeira. Em alguns casos, a avaliação do produto acabado pode não ser possível pelos ensaios não destrutivos, como no caso de viga laminada colada. Nestas situações, os seus componentes como tábuas e lâminas, são classificados individualmente, e o produto é montado de modo que se obtenha determinadas propriedades mecânicas.

SANDOZ (1989) realizou estudos de classificação de madeiras para construção, através da técnica de ultra-som, obtendo excelentes resultados na caracterização mecânica de vigas com 3 classes de resistência, baseadas em níveis de velocidade de propagação das ondas acústicas.

MATOS (1997) estudando a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. verificou que a aplicação de ondas sonoras para classificação de lâminas através do módulo de elasticidade dinâmico, mostrou-se altamente eficaz, contribuindo para o aumento significativo das propriedades de resistência mecânica dos painéis de lâminas paralelas testados. Outras pesquisas para classificação das propriedades mecânicas de lâminas de madeira, através de emissão acústica para produção de painéis de lâminas paralelas, obtiveram resultados similares (JUNG, 1982; CHA; PEARSON, 1994; RASMUSSEN, 1994).

MATOS et al. (2000) avaliaram as propriedades mecânicas de painéis compensados de *Pinus* spp. através de emissão de ondas de tensão e concluíram que o uso desta técnica não destrutiva permite a avaliação das propriedades de painéis compensados, mostrando-se viável e adequada, tendo apresentado bons índices de correlação entre o módulo de elasticidade estático, obtido através da técnica destrutiva, e dinâmico determinado de forma não destrutiva.

Os painéis compostos de madeira, tais como OSB, MDF e aglomerados apresentam características bastante variáveis, onde a emissão de ondas acústicas torna-se um processo mais complexo. Nestes produtos, as emissões acústicas se iniciam com uma carga menor à apresentada pela madeira sólida, provavelmente, devido à presença de resinas adesivas, um dos principais componentes da estrutura destes materiais (BUCUR, 1995).

Avaliações não destrutivas, através de emissão de ondas acústicas, têm sido utilizadas também em postes, pontes de madeiras e em outras estruturas, valorizando a aplicação direta no local onde estão montados (ROSS, 1999).

### 2.6.2 Aplicação de Ondas Acústicas em Toras

As pesquisas sobre a técnica de aplicação de ondas de tensão se estenderam para as toras. Estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de selecionar toras com propriedades desejadas para determinados produtos. Um dos primeiros trabalhos (GALLIGAN et al., 1967) classificou toras de “Douglas-fir” (*Pseudotsuga menziesii*) com relação às propriedades mecânicas, com excelentes resultados. Utilizando a técnica de aplicação de ondas de tensão, vários outros estudos mostraram boas correlações ( $R^2 = 0,44$  a  $0,89$ ) para o módulo de elasticidade entre toras e pequenas amostras retiradas das mesmas toras (ROSS, et al., 1997; SANDOZ; LORIN, 1994).

SCHAD et al. (1996) testando métodos não destrutivos em toras de “Balsam-fir” (*Abies balsamea*, L.) e “White spruce” (*Picea glauca*, Moench) concluiu que a emissão ou transmissão de ondas acústicas é uma técnica eficiente na detecção de defeitos da madeira, sendo obtidas longas ondas com menores velocidades para as toras defeituosas. JANG (2000) verificou uma razoável correlação entre os parâmetros não destrutivos das toras (velocidade de propagação das ondas de tensão e módulo de elasticidade dinâmico) com as propriedades não destrutivas e destrutivas (velocidade das ondas, módulo de elasticidade dinâmico e estático) da madeira obtida das mesmas toras. ROSS et al. (1999) estudando métodos de avaliação não destrutivos na madeira de *Pinus ponderosa*, obtiveram correlação significativa ( $R^2$  igual a  $0,86$ ) entre o tempo de propagação das ondas de tensão determinados nas toras com os valores obtidos nas lâminas, após processo de laminação, indicando que é possível estimar a qualidade potencial das lâminas através da avaliação não destrutiva das propriedades das toras. Resultado semelhante foi observado por RIPPY et al. (2000) estudando toras e lâminas de “Douglas-fir”, porém com menores coeficientes de correlação.

### 2.6.3 Aplicação de Ondas Acústicas em Árvores em Pé

Há um grande interesse por parte dos pesquisadores no desenvolvimento de método adequado de avaliação das propriedades de árvores em pé. Considerável economia, tanto em matéria-prima, quanto em processo, pode ser obtida se as propriedades da madeira fossem determinadas em árvores em pé, através de métodos não destrutivos, podendo-se prever e antecipar a qualidade do produto final. Entretanto, sabe-se que uma árvore apresenta uma estrutura bastante complexa e com grandes variações no formato, tamanho e propriedades. Além disso, a presença da casca, galhos e raízes criam muitas dificuldades geométricas e heterogeneidades para a utilização dos métodos não destrutivos. Segundo WANG et al. (2001), as árvores em pé tendem a apresentar variáveis externas e condições adversas que podem interferir com maior intensidade na avaliação das propriedades da madeira através da aplicação de ondas de tensão, quando comparadas com produtos acabados. Entretanto, os autores salientam que é possível adaptar o método para uma avaliação mais eficiente e eficaz. Em sua pesquisa com árvores de “Western hemlock” (*Tsuga heterophylla*) e “Sitka spruce” (*Picea sitchensis*), foi observada alta correlação entre a velocidade de propagação das ondas de tensão e módulo de elasticidade, determinados na árvore em pé, com aqueles obtidos em amostras retiradas das mesmas árvores após o abate, indicando que a avaliação das propriedades na árvore em pé é eficiente e confiável.

CALORI; DIAS (2000) utilizaram equipamento de ultra-som para a determinação expedita da densidade básica da madeira em árvore em pé de *Eucalyptus grandis*, aos 14 anos de idade. Foram obtidas altas correlações da densidade determinada na árvore em pé com a obtida em discos retirados das mesmas árvores, demonstrando que a metodologia pode ser aplicada efetivamente no processo de seleção de árvores em pé para a propriedade densidade básica, reduzindo custos de operações e análises comparados aos métodos tradicionais de determinação desta propriedade.

## 2.7 INFLUÊNCIAS DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA SOBRE A PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS

Assim como os métodos acústicos, a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pelas propriedades anatômicas (BUCUR, 1988), físicas e mecânicas deste material (WANG et al., 2001). Além destas propriedades, a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pela direção de propagação e por defeitos presentes no material como degradação, nós, entre outros.

### 2.7.1 Direção de Propagação da Onda

Diferentes tipos de ondas podem se propagar pela estrutura da madeira como longitudinais, transversais e superficiais. Destas, as longitudinais se propagam mais rapidamente e são comumente usadas para avaliar as propriedades da madeira (WANG et al., 2001). GERHARDS (1981), verificou que as ondas de tensão emitidas no sentido transversal (perpendicularmente à direção da grã) não mantêm seu curso normal, aumentando seu tempo em um determinado percurso e reduzindo sua velocidade. McDONALD (1978) observou que a velocidade de ondas acústicas foi de 2 a 3 vezes mais rápida no sentido longitudinal do que radialmente ou tangencialmente e, BUCUR (1988) determinou velocidade 2,5 vezes menor no sentido radial e 3,5 vezes no sentido tangencial, quando comparados com o longitudinal.

### 2.7.2 Dimensões de Fibras e suas Relações

Segundo BUCUR (1988), avaliação das propriedades acústicas da madeira pode dar indicação da anisotropia deste material que está relacionada às variações nos elementos anatômicos.

As ondas acústicas se propagam através da massa ou substância madeira presente em maior quantidade na parede celular. Quanto maior a espessura celular, maior a área ou caminho contínuo para propagação das ondas que se dissipam rapidamente. Esta relação é mais acentuada se a emissão das ondas for realizada

no sentido longitudinal ou axial, direção de disposição das fibras. Em madeiras porosas, compostas por fibras com acentuados diâmetros de lume, os espaços vazios tornam-se barreiras para a propagação das ondas, reduzindo significativamente a velocidade e aumentando o tempo de propagação em um determinado percurso. Quanto às relações entre a largura das fibras e a propagação das ondas, em geral, as fibras que com maior diâmetro de lume são as mais largas e, conseqüente, se relacionam de forma negativa com a velocidade e positiva com o tempo de propagação de ondas de tensão.

No que diz respeito ao de comprimento de fibras, sua relação com o tempo e velocidade de propagação das ondas depende da direção de emissão. Se a mesma é realizada no sentido longitudinal, as ondas percorrem a parede da fibra, ao longo de seu comprimento, e ao final apresentam leve queda entre uma fibra e outra, quando então tomam a direção de percurso. Dessa forma, quanto maior o comprimento da fibra, maior o caminho contínuo da parede a ser percorrido, propiciando maior velocidade e menor tempo de propagação da onda (BUCUR, 1988). POELGE (1984) detectou forte correlação entre o comprimento de fibras e a velocidade das ondas acústicas, sendo determinado um coeficiente de correlação de 0,90. Porém, se a emissão das ondas se dá no sentido transversal às fibras, há a barreira do diâmetro do lume e as mesmas se desviam em cada fibra, percorrendo a parede até o final de seu comprimento para retomar o percurso na fibra seguinte. Com este desvio, há um aumento acentuado no tempo do percurso, reduzindo significativamente a velocidade de propagação das ondas. Além disso, no sentido transversal, as ondas cruzam a lignina existente entre a microfibrilas, que é mais amorfa e inelástica, podendo colaborar para reduções na velocidade das ondas (MATOS, 1997).

No que diz respeito às relações entre as dimensões das fibras com a propagação das ondas, em função da relação positiva da parede celular com a velocidade de propagação, o índice de Runkel e a fração parede também se correlacionam positivamente com a velocidade e negativamente com o tempo de propagação das ondas. O contrário ocorre com o coeficiente de flexibilidade que tem uma relação direta com o diâmetro do lume. A relação do índice de enfiamento (quociente entre comprimento e largura das fibras) com a propagação das ondas também depende da direção da emissão das ondas.

### 2.7.3 Densidade Básica

As madeiras mais densas são as que apresentam maior teor de substância madeira, portanto menores espaços vazios, propiciando maior velocidade de propagação das ondas de tensão em um menor tempo para determinado percurso. As madeiras mais porosas, portanto, menos densas, apresentam menor velocidade de propagação das ondas.

KONARSKI; WAZNY (1977) observou que a velocidade de propagação de ondas acústicas foi reduzida em 25 % devido à perda de 16 % na densidade básica da madeira atacada por microorganismos. SCHAD (1995), determinando a qualidade da madeira de *Quercus rubra* para fins dimensionais, observou um aumento na velocidade de propagação das ondas de tensão com o aumento da densidade básica. BUCUR (1988) obteve uma significativa correlação ( $R^2 = 0,69$ ) entre a densidade da madeira e a velocidade das ondas, indicando que a variação na densidade tem uma correspondente variação na velocidade de propagação das ondas. Outras pesquisas também observaram aumentos na velocidade de propagação das ondas com aumentos na densidade da madeira (GERHARDS; 1978; JANG, 2000).

### 2.7.4 Percentual de Lenhos

A propagação das ondas também varia em função dos percentuais de lenho inicial e tardio. No lenho tardio, a velocidade das ondas de tensão é superior, quando comparado ao lenho inicial, pois é composto por fibras mais espessas, de menores diâmetros de lume, apresentando maior densidade básica. O lenho inicial, mais poroso devido às fibras com acentuados diâmetros de lume, apresenta relação negativa com a velocidade de propagação das ondas de tensão. YIANNOS; TAYLOR (1967) verificaram uma redução de 25 % na velocidade das ondas determinadas no lenho inicial, quando comparadas às do lenho tardio. Resultado semelhante foi observado por BURMESTER (1965), onde as ondas foram mais lentas em 10 % no lenho inicial. GERHARDS (1978) não detectou diferenças significativas da velocidade de propagação das ondas acústicas entre o lenho inicial e tardio.

### 2.7.5 Madeira Juvenil e Adulta

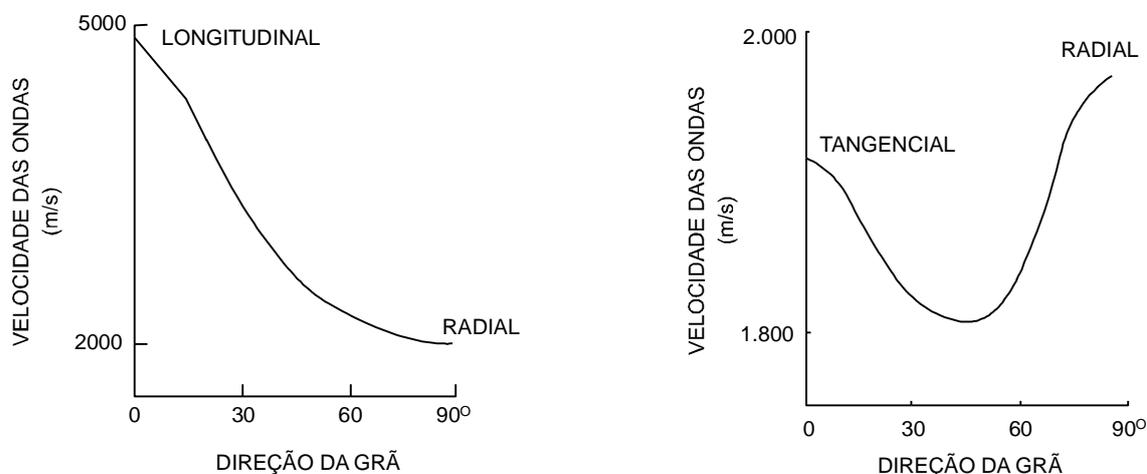
A propagação das ondas de tensão varia no sentido medula-casca. Essa variação se deve às diferenças anatômicas, físicas, morfológicas, entre outras. A madeira adulta, próxima à casca, apresenta maior percentual de lenho tardio, fibras mais espessas, menor diâmetro de lume e é mais densa, proporcionando maior velocidade das ondas de tensão. O contrário ocorre com a madeira juvenil, da região interna do tronco. BUCUR (1995) salientou que a velocidade das ondas é maior na madeira adulta, porém a maior ascensão é verificada na madeira juvenil. JANG (2000) estudando as propriedades de toras através de métodos não destrutivos, observou um aumento na velocidade das ondas do centro (madeira juvenil) para a parte externa da tora (madeira adulta). Segundo o autor esta variação se deve à maior densidade da madeira adulta.

### 2.7.6 Ângulo de Grã

Pesquisadores têm abordado o pronunciado efeito do ângulo de grã sobre a velocidade de propagação de ondas acústicas na madeira (LEE, 1958; ELVERY; NWOKOYE, 1970). A velocidade das ondas emitidas no sentido longitudinal decresce com o aumento no ângulo de grã. Se as fibras são posicionadas paralelas ao eixo longitudinal do tronco, portanto, com ângulo de grã próximo de  $0^\circ$ , as ondas longitudinais percorrem as fibras também longitudinalmente. Porém, quando as fibras formam ângulos com o eixo longitudinal do tronco, as ondas longitudinais cruzam as fibras e neste caso há influência negativa do diâmetro do lume, reduzindo a velocidade de propagação das mesmas. Quanto maior o ângulo entre a direção da onda e a direção da grã, menor é a velocidade e maior o tempo do percurso. Esta relação é ilustrada na Figura 8.

JUNG (1979), estudando as propriedades de lâminas de madeira, verificou que um ângulo de grã de  $5^\circ$  resulta numa velocidade 4 % menor que a obtida a  $0^\circ$ . Para um ângulo de  $10^\circ$  o autor observou um decréscimo de 19 % na velocidade das ondas. Resultados semelhantes também foram observados por outros pesquisadores, como McDONALD (1978), BUCUR (1995), e WANG et al. (2001).

FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE ONDAS ACÚSTICAS EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DE GRÃ



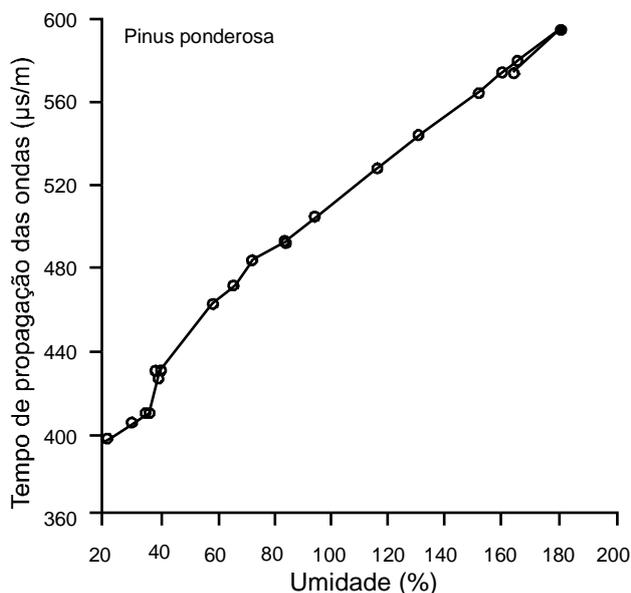
Fonte: McDONALD (1978)

### 2.7.7 Teor de Umidade

Outro fator que afeta a propagação de ondas de tensão é o teor de umidade do material avaliado. Quanto maior o teor de umidade, menor é a velocidade de propagação de ondas acústicas. JAMES (1961) avaliando os efeitos da umidade da madeira sobre a técnica de propagação de ondas acústicas, verificou um decréscimo na velocidade das ondas em função de aumentos na umidade. SIMPSON; WANG (2001) estudando a madeira de *Pinus ponderosa*, observaram decréscimo no tempo e, conseqüentemente, aumento na velocidade de propagação de ondas de tensão com decréscimos na umidade da madeira, durante o processo de secagem em estufa, conforme mostra a Figura 9. Mesmo resultado foi obtido por GERHARDS (1982b).

ROSS; PELLERIN (1991), estudaram a viabilidade de aplicação das ondas em material verde, com umidade acima do ponto de saturação das fibras para determinação do módulo de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade determinados no material verde mostraram-se correlacionados àqueles determinados no material com menor teor de umidade, indicando que a técnica de emissão de ondas de tensão pode ser aplicada em material verde.

FIGURA 9 - VARIAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA

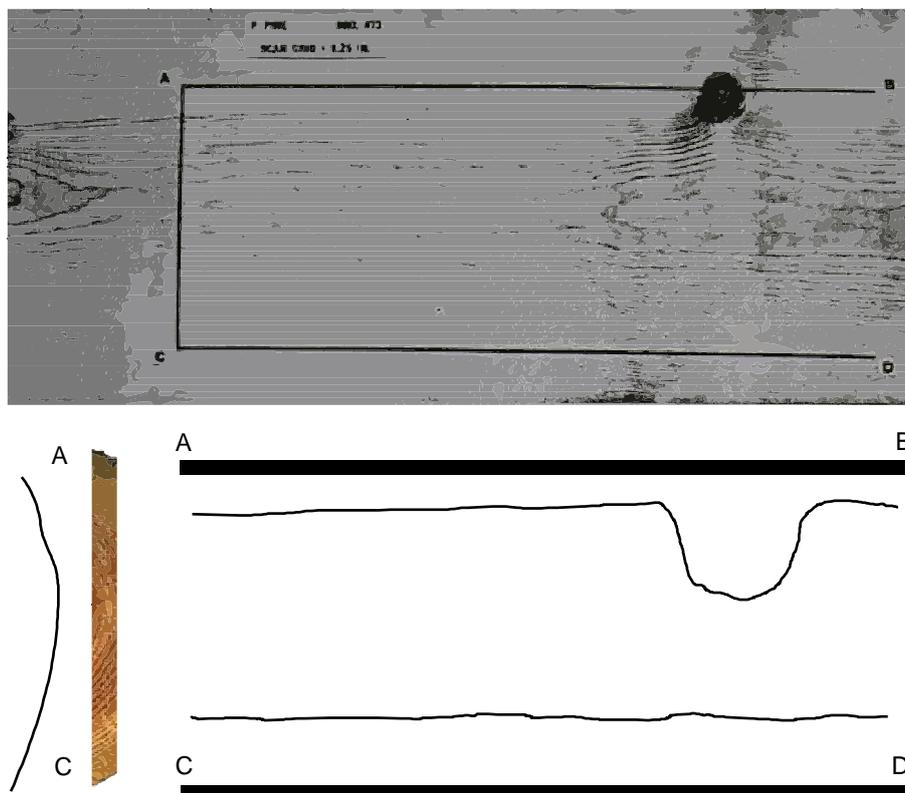


Fonte: SIMPSON; WANG (2001)

### 2.7.8 Nós

Os nós exercem grande influência na propagação de ondas acústicas. GERHARDS (1982a) demonstrou que as ondas de tensão induzidas por impacto na madeira com nó não mantêm seu curso normal, aumentando seu tempo de propagação. Segundo JUNG (1979), ao encontrar as áreas descontínuas dos nós, as ondas de tensão desviam seu curso, contornando-os através da madeira que os circunda, conforme ilustrado na Figura 10. Devido ao aumento no percurso há um aumento no tempo de propagação da onda, reduzindo a velocidade. Além disso, ao se propagar na madeira ao redor dos nós, os altos teores de extrativos e os altos ângulos de grã dessa região colaboram para uma redução ainda maior na velocidade das ondas. Segundo o autor, o tempo de propagação das ondas é mais sensível à área de nós quando comparado com seu diâmetro. Resultados similares foram verificados por BURMESTER (1965) e BETHGE; MATTECK (1994).

FIGURA 10 - ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NA MADEIRA



A-B = curso das ondas em regiões com defeitos; C-D = curso das ondas em região sem defeitos; C-A = curso das ondas no sentido tangencial.

Fonte: Adaptado de McDONALD (1978)

Estas relações permitem localizar nas toras não só os nós, mas também outros defeitos, como a degradação por fungos (SCHAD et al., 1996) e sua influência nas resistências mecânicas (ROSS et al. 2003). Identificando-se os locais de degradação ou nós das toras, ou ainda os locais ocos é possível melhorar o aproveitamento e processamento da madeira (McDONALD, 1978).

## 2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A análise multivariada, técnica utilizada para avaliação dos dados neste trabalho, trata de mensurações do grau de associação, ou da correlação entre variáveis aleatórias. Variáveis aleatórias são aquelas que seguem as leis do acaso. A diferença entre a estatística univariada e a multivariada consiste na quantidade de variáveis que cada uma aborda simultaneamente. Enquanto a estatística univariada

trabalha com somente uma variável aleatória por vez, a multivariada trata de diversas variáveis aleatórias, ao mesmo tempo (JOHNSON; WICHERN, 1998; CLEMENTE, 1990).

Segundo JOHNSON; WICHERN (1998), a análise multivariada apresenta três objetivos principais: eliminar os ruídos presentes nos dados, isto é, excluir as variações devidas a erros não controlados; sumarizar os dados e revelar a estrutura dos mesmos. LUCHESA (2004), destaca como pontos positivos da estatística multivariada a capacidade de lidar com muitas variáveis aleatórias, simultaneamente; a capacidade de proporcionar informações que permanecem invisíveis nos dados originais e a aplicabilidade em muitos campos do conhecimento humano.

As técnicas de análises multivariadas são estatisticamente mais complexas, além de, muitas vezes, necessitarem de softwares específicos para o seu desenvolvimento, ou mesmo uma programação computacional. Por outro lado, os resultados gerados permitem que as interpretações mostrem-se mais coerentes à realidade do material experimental. O uso mais freqüente dessa técnica se deve à comprovada eficiência e eficácia, assim como o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos mais capacitados para trabalhar com grande volume de dados (LAVORANTI, 2003).

São várias as técnicas estatísticas de análises multivariadas utilizadas na pesquisa científica, destacando-se a análise de componentes principais, análise fatorial, análise de correlações canônicas, análise discriminante e análise de agrupamentos. Nesta revisão foram abordadas apenas as duas primeiras técnicas, que foram utilizadas neste trabalho.

### 2.8.1 Análise de Componentes Principais

Análise de componentes principais é uma técnica estatística que transforma, linearmente, um conjunto de variáveis em outro conjunto com um número menor de variáveis não-correlacionadas, chamadas de componentes principais. Estas componentes explicam uma parcela substancial das informações do conjunto original, tornando-se um sistema mais simples para análise, podendo-se identificar relacionamentos que, em geral, não seriam possíveis com as coordenadas originais

das variáveis. Assim, a partir de um conjunto de dados com  $n$  variáveis, são obtidas  $n$  componentes principais. Segundo BARROSO; ARTES (2003), os principais objetivos da análise de componentes principais são:

- redução da dimensionalidade dos dados;
- obtenção de combinações interpretáveis das variáveis;
- descrição e entendimento da estrutura de correlação das variáveis.

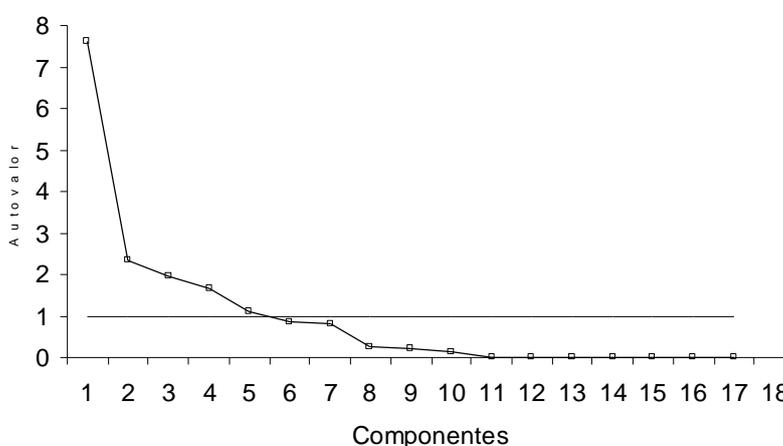
Algebricamente, as componentes principais são combinações lineares das variáveis originais. Geometricamente, são as coordenadas dos pontos amostrais em um sistema de eixos originais, na direção de variabilidade máxima dos dados. A análise depende somente da matriz de covariância ou da matriz de correlação das variáveis e não requer qualquer suposição sobre a forma da distribuição multivariada das mesmas.

A importância de cada componente principal é estabelecida em função da variância contida em cada uma delas, onde reside a sua capacidade de explicação da estrutura de variância/covariância. Assim, para que se possa estabelecer este ordenamento, ou ranqueamento das componentes é preciso analisar quanto cada uma delas explica a variação total do conjunto de dados. Segundo BARROSO; ARTES (2003), na literatura existem vários critérios que auxiliam na tomada de decisão com relação ao número de componentes principais a ser retida ou considerada na análise, tais como:

- Critério de Kaiser, que sugere manter na análise as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que a média dos autovalores, se a análise é baseada na matriz de covariância, ou as componentes principais correspondentes aos autovalores maiores que 1, se for usada a matriz de correlação;
- Reter o número de componentes principais que acumulem pelo menos certa porcentagem da variabilidade total dos dados (de preferência, acima de 70 %);
- Reter as componentes principais que acumulem pelo menos uma certa porcentagem da variabilidade de cada uma das variáveis originais (de preferência, acima de 50 %).

De acordo com BARROSO; ARTES (2003), uma ferramenta que pode auxiliar na escolha do número de componentes principais a reter é o “screen plot”, gráfico que representa os autovalores. Comumente, a diferença entre os primeiros autovalores é grande e diminui em direção aos últimos. Sugere-se o corte quando a variação passa a ser pequena. A Figura 11 ilustra o escalonamento dos autovalores da matriz de correlação, utilizado no capítulo 4 desta pesquisa.

FIGURA 11 - AUTOVALORES DAS COMPONENTES PRINCIPAIS OBTIDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ÁRVORES EM PÉ



Fonte: o autor

A interpretação das componentes principais é feita com base nas correlações entre as variáveis originais e as componentes obtidas e nos coeficientes dados pelas combinações lineares que levam às componentes principais. As correlações são medidas das contribuições individuais de cada variável e não consideram a contribuição multivariada das demais variáveis e, os coeficientes são medidas das contribuições multivariadas. Como, em geral, se utiliza somente as primeiras componentes, a magnitude das demais determina se as primeiras se ajustam bem às observações. Quanto menor for a parte desprezada, melhor é o ajuste.

Muitas vezes, a análise estatística prossegue após a obtenção das componentes principais e técnicas que exigem a suposição de normalidade, por exemplo, podem ser empregadas. Gráficos do tipo “Q-Q plot” das primeiras componentes principais podem auxiliar neste sentido. Para tentar detectar observações com comportamentos diferenciados, pode-se recorrer a gráficos de

dispersão das últimas componentes principais (BARROSO; ARTES, 2003). Segundo LAVORANTI (2003), a representação gráfica “biplot” é uma técnica bastante útil na análise de componentes principais, pois o gráfico utilizado para representar simultaneamente as linhas e colunas de uma matriz de dados, pode indicar a existência de agrupamentos entre as observações, assim como mostrar as variâncias e correlações entre as variáveis.

## 2.8.2 Análise Fatorial

Análise fatorial é uma técnica estatística que descreve a estrutura de dependência de um conjunto de variáveis, através da criação de fatores, que são variáveis que, supostamente, medem aspectos comuns. Uma situação comum pode ser descrita como aquela na qual observa-se para cada elemento amostral, um grande número de variáveis. BARROSO; ARTES (2003) definem análise fatorial como “um conjunto de técnicas estatísticas, cujo objetivo é representar ou descrever um número de variáveis iniciais a partir de um menor número de variáveis hipotéticas”. Trata-se de uma técnica que, a partir da estrutura de dependência existente entre as variáveis de interesse (em geral representada pelas correlações ou covariâncias entre essas variáveis), permite a criação de um conjunto menor de variáveis (variáveis latentes ou fatores), obtidas a partir das originais. Além disso, a técnica possibilita saber o quanto cada fator está associado a cada variável e o quanto o conjunto de fatores explica da variabilidade total dos dados originais.

Os modelos de análise fatorial buscam explicar o comportamento das variáveis observadas em relação ao comportamento de um conjunto de variáveis não observadas (variáveis latentes ou fatores), podendo ser expresso por:

$$X_j = \sum_{r=1}^p a_{jr} f_r + e_j$$

em que,

$X_j$ : variáveis originais, existindo “m”  $x_j$

p : número pré-estabelecido de fatores

$a_{jr}$ : coeficiente que representa o carregamento da j’ésima variável sobre o r’ésimo fator

$f_r$ : r'ésimo fator

$e_j$ : variação casual única relativa das variáveis originais  $X_j$

As variáveis são expressas em termos de vetores num sistema de coordenadas ortogonais, em que o comprimento representa a magnitude, agrupam-se conforme o relacionamento entre si. Por esses agrupamentos de vetores passam-se eixos, denominados fatores, que acusam, pelo valor da projeção dos vetores sobre os eixos, a carga fatorial das variáveis sobre si. Esses fatores representam o número mínimo de causas que condicionam um máximo de variabilidade existente. A comunalidade (representada por  $h^2$ ), isto é, a soma dos quadrados das cargas fatoriais das variáveis sobre cada fator indica a eficiência dos mesmos na explicação da variabilidade total (LUCHESA, 2004).

Os fatores são encontrados fazendo-se com que o primeiro eixo esteja em tal posição que a soma dos quadrados dos pesos fatoriais, em relação a ele, seja maximizada, o que equivale a colocá-lo paralelamente ao principal agrupamento de vetores. O segundo eixo é colocado ortogonalmente, de modo que a soma de quadrados dos pesos fatoriais para este segundo eixo também seja maximizada, e assim por diante em relação aos demais fatores.

Uma das dificuldades resultantes deste procedimento é que o padrão de carregamento para cada componente pode não fornecer dimensões facilmente interpretáveis. Por exemplo, em uma matriz de coeficientes de correlação em que nenhum deles é particularmente alto, o padrão de carregamento que pode ocorrer com respeito ao primeiro fator pode ser da mesma ordem relativa de magnitude que o existente em relação ao segundo fator, ao terceiro fator, etc. Há necessidade, então, de uma rotação dos eixos fatoriais. A finalidade dessa rotação é a maximização, colocando os eixos fatoriais numa única posição tal que cada fator possa ser interpretado pelos maiores carregamentos possíveis, relacionados com o menor número de variáveis possível (BARROSO; ARTES, 2003).

Há vários métodos para a obtenção dos fatores, entretanto os mais utilizados são o das componentes principais e o da máxima verossimilhança. Quando se está interessado no relacionamento entre variáveis, é comum se utilizar a obtenção dos fatores através do método das componentes principais e o cálculo dos autovalores e autovetores é feito a partir de uma matriz padronizada de variância-

covariância, isto é, uma matriz de coeficientes de correlação entre “p” variáveis, tendo todas o mesmo peso.

Os autovalores e, conseqüentemente, os fatores representam a proporção da variância total explicada pelo respectivo autovetor e cada fatorial e cada carga fatorial é proporcional à raiz quadrada da quantia de variância atribuída pela respectiva variável ao vetor.

As comunalidades ( $h_j^2$ ) indicam quanto da variabilidade total está sendo explicada pelo conjunto de fatores. Portanto, é a parcela da variância de uma determinada variável  $X_i$ , dada por uma equação, explicada pelos fatores comuns. As comunalidades podem assumir valores entre +1 e -1, quanto mais próximas a 1, melhor é o ajuste do modelo. A parcela da variância não explicada é denominada especificidade. Variáveis com baixa comunalidade devem ser excluídas da análise (BARROSO; ARTES, 2003).

Para que os “p” fatores ortogonais situados no espaço “m” dimensional sejam mais facilmente entendidos é necessário que estejam em tal posição, de modo que as projeções de cada variável sobre o eixo fatorial, situem-se o melhor possível, seja junto à extremidade, seja junto à origem. Em outras palavras, haverá necessidade de um critério de maximização da variância dos carregamentos sobre os fatores, o que é conseguido pela rotação dos eixos fatoriais. Existindo diversos algoritmos à disposição, o mais comum é o critério “Varimax”. Esse método minimiza o número de variáveis, com altas cargas sobre o fator, reforçando a interpretação dos mesmos (HAIR et al., 1998).

Depois de encontrada a matriz fatorial rotacionada, o passo seguinte é a escolha do número de fatores que é uma das tarefas mais importantes de uma análise fatorial. HAIR et al. (1998) menciona que, se o pesquisador opta por um número reduzido de fatores, poderá não identificar estruturas importantes existentes nos dados. Por outro lado, se o número é excessivo, poderá vir a ter problemas de interpretação dos fatores.



QUADRO 1 - INFORMAÇÕES SOBRE O POVOAMENTO.

VARIÁVEIS	DADOS
Área do talhão (ha)	10,9
Manejo	2º desbaste
Poda	Não realizada
Densidade (Árvores / ha)	360
DAP médio (cm)	35,4
Altura média (m)	25,2
Altura média dominante (m)	26,0
Área basal	33,6
Volume / ha	345,2
Volume / árvore (stcc)	1,52

FONTE: VALOR FLORESTAL (2004)<sup>1</sup>

FIGURA 13 - VISTA PARCIAL DA ÁREA DE COLETA DO MATERIAL ESTUDADO

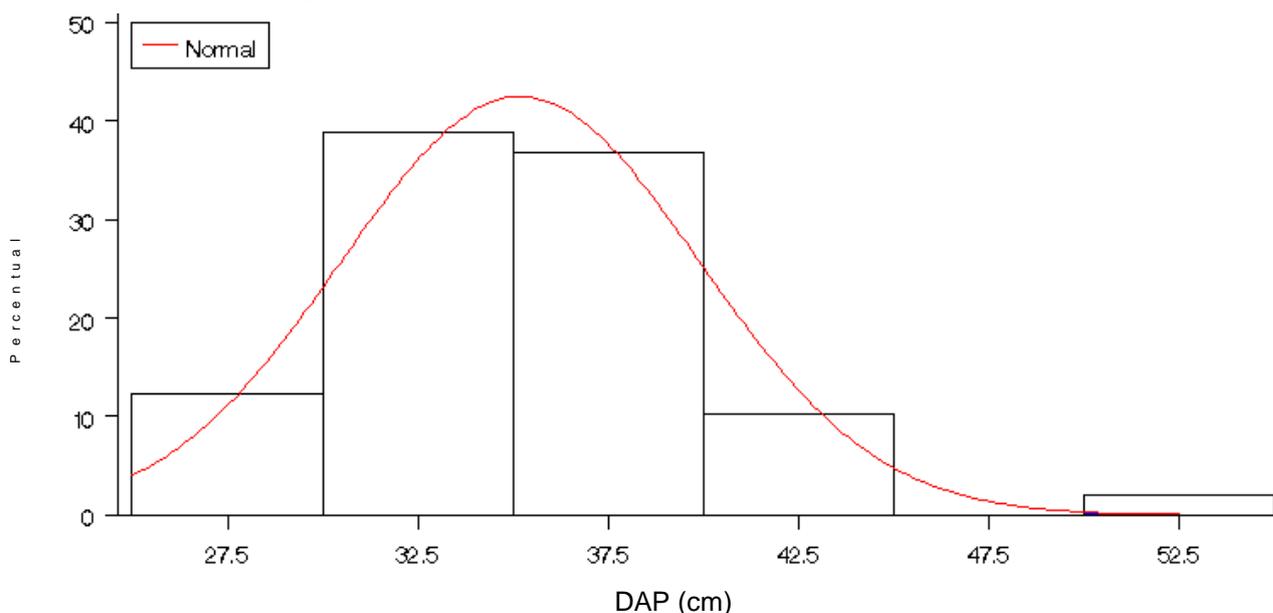


<sup>1</sup> Valor Florestal – Gestão de Ativos Florestais. Informações cedidas em dezembro de 2004.

### 3.2 MÉTODOS

Para seleção das árvores, realizou-se previamente a classificação diamétrica do ponto de coleta do material. A distribuição de diâmetros deste levantamento encontra-se no Gráfico 1.

GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS ÁRVORES NO PONTO DE COLETA



As árvores amostradas representaram as classes intermediária e superior, uma vez que estas produzem o maior volume de madeira destinado à obtenção de produtos de maior valor agregado. Por essa razão, apenas uma árvore apresentou diâmetro pertencente à classe inferior.

Os valores para os diâmetros das árvores, das toras e dos discos estudados são apresentados no Quadro 2.

QUADRO 2 - DIÂMETROS DAS ÁRVORES SELECIONADAS, TORAS E DISCOS AMOSTRADOS

ÁRVORE	DAP	TORA 1	TORA 2	DISCO 1	DISCO 2	DISCO 3
Média (cm)	38,5	39,2	35,6	42,1	36,4	34,7
Coeficiente Variação (%)	14,2	12,6	14,2	11,9	14,0	14,6

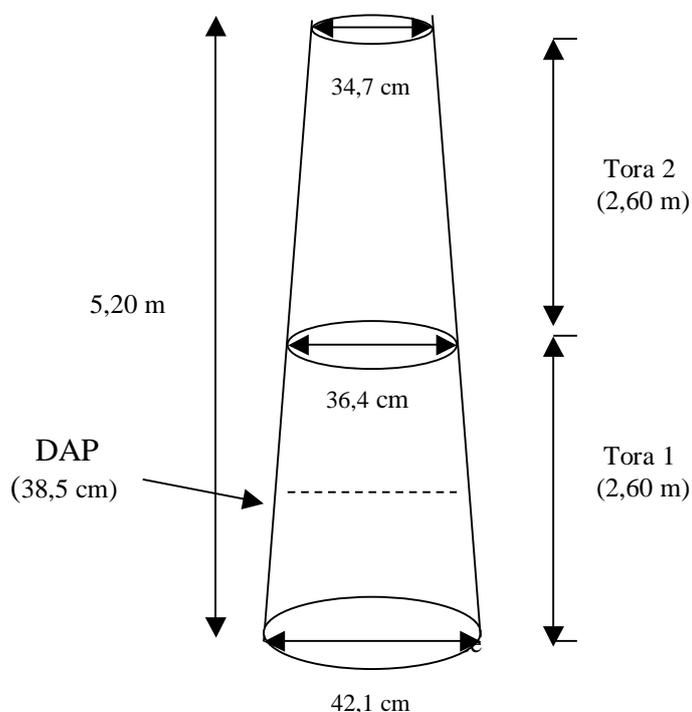
DAP: diâmetro à altura do peito

Inicialmente, as propriedades da madeira foram determinadas nas árvores em pé. Posteriormente, as mesmas foram abatidas, desgalhadas e identificadas. De

cada árvore, retiraram-se três discos para o estudo das propriedades da madeira, sendo um na base, o outro a 2,60 m de altura e o último a 5,20 m. Este seccionamento deu origem a duas toras de 2,60 m de comprimento.

As primeiras toras (toras 1), destinadas à laminação, apresentaram diâmetro médio de 39,2 cm, sendo 42,1 cm na extremidade mais grossa (disco 1) e 36,4 cm na extremidade mais fina (disco 2). As segundas toras (toras 2), destinadas à serraria, apresentaram diâmetro médio de 35,6 cm, sendo 36,4 cm na extremidade mais grossa (disco 2) e 34,7 cm na extremidade mais fina (disco 3). A árvore média utilizada no estudo encontra-se esquematizada na Figura 14.

FIGURA 14 - ESQUEMA DA ÁRVORE MÉDIA UTILIZADA PARA O ESTUDO

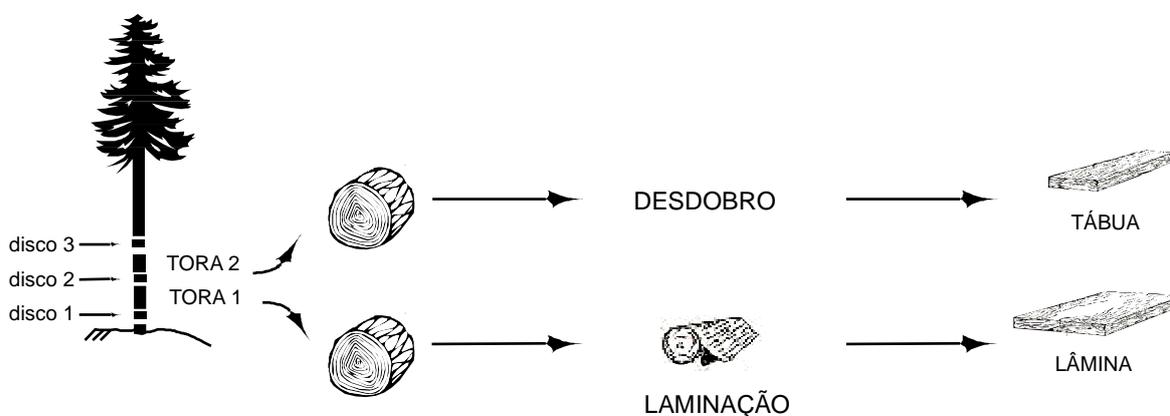


As toras foram desdobradas para avaliação de outras propriedades, tais como, diâmetro, frequência de nós e propriedades acústicas. A primeira tora foi laminada em torno, resultando lâminas de 2,60 m de comprimento, com 2,2 mm de espessura e 1,40 m de largura, e lâminas com larguras inferiores. Para o presente estudo, utilizaram-se apenas as lâminas mais largas, com 1,40 m, as quais foram devidamente numeradas, sendo as primeiras correspondentes à região externa da tora (próxima à casca) e as últimas à região interna (próxima à medula).

A segunda tora, de menor diâmetro, foi serrada em serra fita e múltipla, resultando em tábuas de 2,53 m de comprimento por 2,5 cm de espessura e larguras variadas (7,4 a 22,2 cm, com média de 16,7 cm). Todo material foi devidamente identificado, desde as árvores até os produtos obtidos.

A Figura 15 ilustra o esquema de coleta das amostras para o estudo das ondas de tensão e determinação das propriedades da madeira.

FIGURA 15 - FLUXOGRAMA REPRESENTANDO O MATERIAL ESTUDADO DESDE A ÁRVORE EM PÉ ATÉ OS PRODUTOS FINAIS OBTIDOS



As toras apresentavam umidade média de 55,6 % (base úmida) durante a análise não destrutiva. Não foi possível determinar a umidade exata das árvores em pé mas somente após o abate quando já havia ocorrido uma certa perda de umidade. Contudo, estima-se que a umidade inicial das árvores variava entre 60 e 65 %.

### 3.2.1 Avaliação nas Árvores em Pé

#### a) Circunferência à altura do peito (CAP)

Após seleção das árvores, mensurou-se, com fita métrica, o CAP (cm) de cada uma delas. Posteriormente o CAP foi transformado em DAP (diâmetro à altura do peito, em cm), conforme a fórmula:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

b) Tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão

Para determinação do tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, utilizou-se o aparelho Stress Wave Timer, modelo 239-A (Figura 16).

FIGURA 16 - APARELHO "STRESS WAVE TIMER" E ACESSÓRIOS



Stress Wave Timer



Martelo de impacto



Sistema de garras e pêndulo

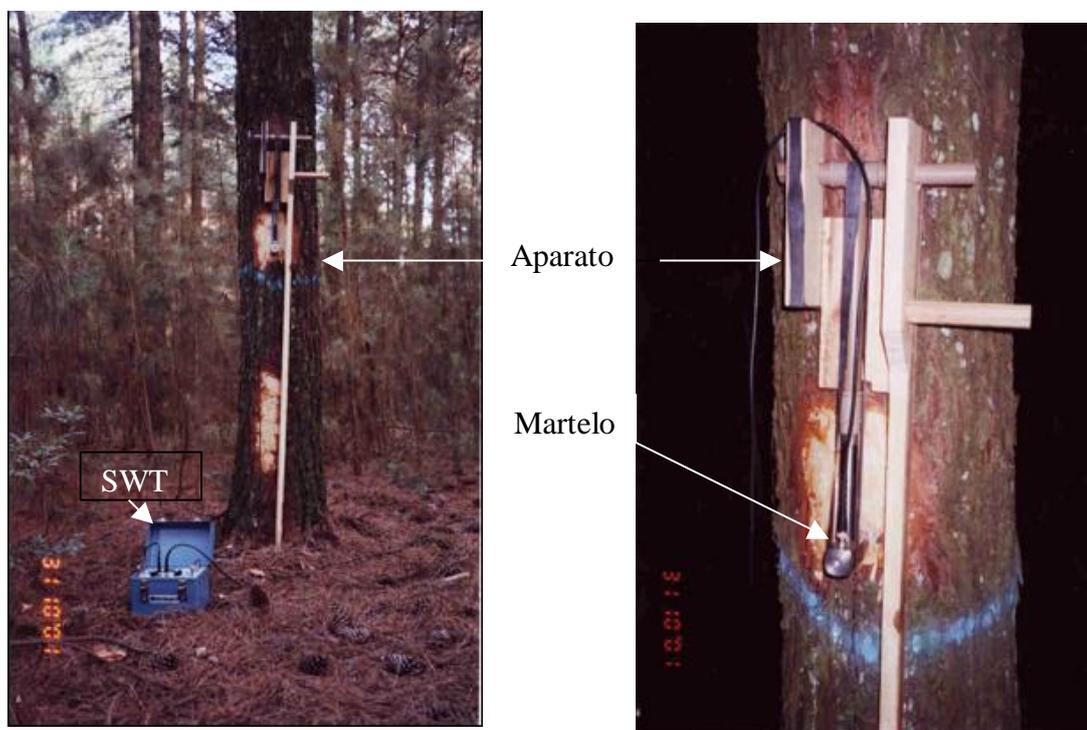


Transdutores

As ondas de tensão foram aplicadas empregando-se o método de impacto com o martelo e transdutor de chegada das ondas (acessórios do equipamento). Visando a padronização do impacto do martelo, utilizou-se um aparato (Figura 17). A recepção da onda se deu próximo à base da árvore (cerca de 10 cm do solo), no lado oposto à batida, portanto em diagonal (Figura 18), pois segundo PUEHRINGER (2002), neste sentido há menor variação na transmissão das ondas de tensão. Foram efetuadas cinco batidas por árvore, para posterior cálculo da média. Conforme recomendação do autor, tanto o impacto, quanto a recepção das ondas,

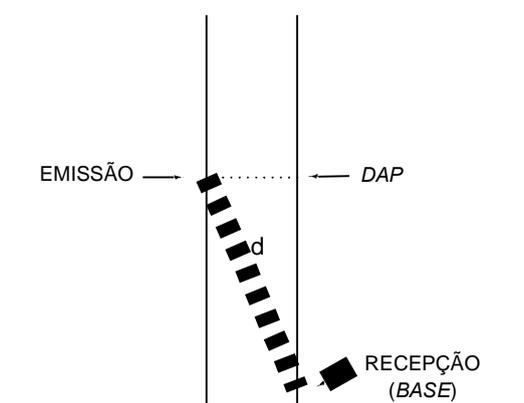
foram realizados diretamente na madeira. Ressalta-se que a casca foi retirada destes pontos para evitar interferência da mesma sobre as ondas de tensão.

FIGURA 17 - APARATO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO NAS ÁRVORES EM PÉ



Fotos: C. A. PUEHRINGER, 2001

FIGURA 18 - PONTO DE EMISSÃO E RECEPÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS ÁRVORES EM PÉ



A velocidade de propagação das ondas de tensão foi determinada através da expressão:

$$V = \frac{d}{t}$$

em que,

$V$  : velocidade de propagação da onda de tensão (m/s)

$d$  : distância entre o ponto de partida e o de chegada da onda de tensão (distância entre os transdutores) (m)

$t$  : tempo de propagação da onda de tensão (s)

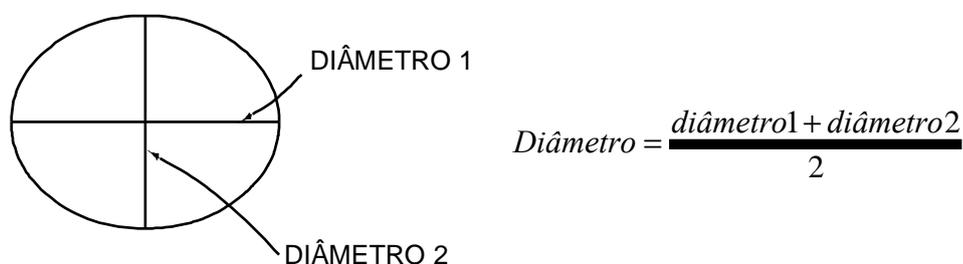
A distância entre os transdutores ( $d$ ) foi calculada em função do diâmetro de cada árvore.

### 3.2.2 Avaliação nas Toras

#### a) Diâmetro

Foram mensurados os diâmetros com casca das duas extremidades das toras, tomando-se duas medidas perpendiculares entre si. O diâmetro das toras foi calculado pela média aritmética entre os dois valores (Figura 19).

FIGURA 19 - ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DAS TORAS



#### b) Tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão

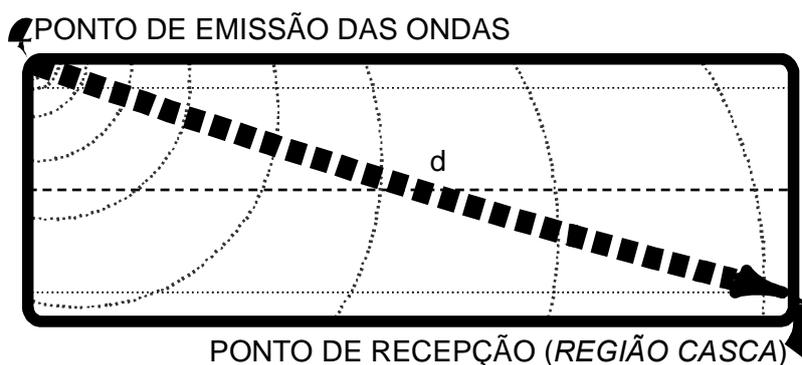
Utilizando-se o aparato já apresentado na Figura 17, efetuou-se a medição do tempo de propagação das ondas de tensão em ambas as toras (Figura 20), dispostas sobre o chão. A medição foi realizada longitudinalmente, tendo como ponto de partida a base da tora e o ponto de chegada, o topo do lado oposto à emissão da onda, conforme Figura 21.

FIGURA 20 - PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TORAS



Foto: C. A. PUEHRINGER, 2001

FIGURA 21 - ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TORAS



Foram realizadas cinco medições em cada ponto para posterior cálculo da média aritmética. A velocidade também foi calculada em função da distância entre os transdutores ( $d$ ), que variou em função do diâmetro da tora, e do tempo determinado no “Stress Wave Timer”.

### 3.2.3 Avaliação nos Discos

Os discos, retirados de cada árvore nas posições da base, 2,60 m e 5,20 m de altura, foram acondicionados em sacos plásticos até as medições. Após esse procedimento, determinaram-se as características físicas, morfológicas e anatômicas da madeira. Através dos valores das propriedades da madeira obtidos nos discos,

foram calculados os valores médios ponderados para as toras (área dos discos das extremidades de cada tora) e para a secção (5,6 m) estudada por árvore (volume das duas toras).

#### a) Diâmetros

Determinou-se o diâmetro (cm) de cada disco tomando-se duas medidas perpendiculares entre si, seguindo o mesmo procedimento utilizado para as toras. Tomou-se como valor diamétrico, a média aritmética entre as duas medidas.

#### b) Percentual de lenhos

Para o estudo do percentual de lenho, lixou-se o disco traçando-se uma linha ao longo do diâmetro do disco, passando-se pela medula. Nos dois raios obtidos, os anéis de crescimentos, formados pelo lenho inicial e lenho tardio, foram identificados, numerados e medidos com uma régua. Cada raio foi considerado uma repetição. Os percentuais de lenhos foram calculados pelas expressões:

$$%LI = \frac{\sum li}{R} \times 100\%$$

$$%LT = \%LI - 100\%$$

em que,

$\%LI$  : percentual de lenho inicial

$\%LT$  : percentual de lenho tardio

$\sum li$  : somatória das faixas de lenho inicial de um raio do disco

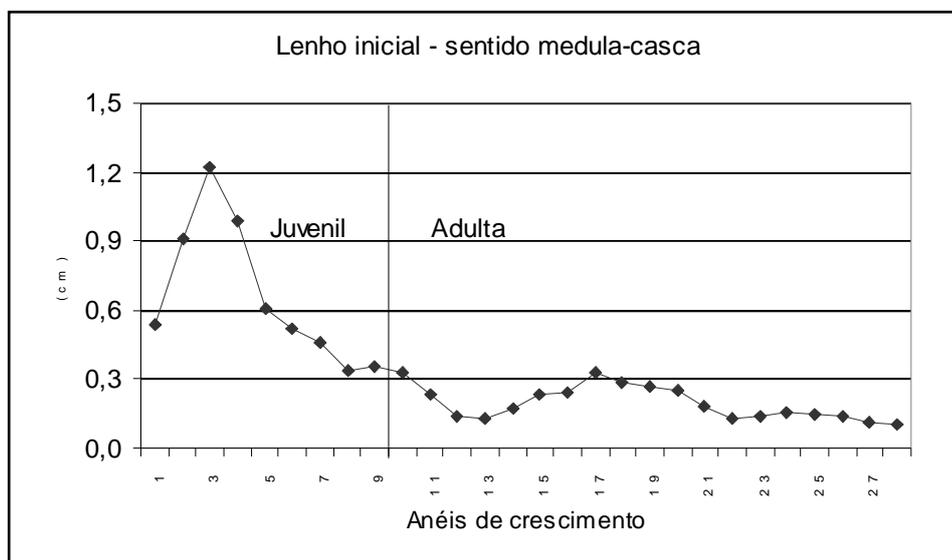
$R$  : raio do disco

Calculou-se o teor de lenho inicial e tardio para a secção de tronco avaliada de cada árvore e para cada tora.

Através das medições obtidas para o lenho inicial no disco 1 (base da árvore), definiu-se o ponto limite entre a madeira juvenil e o início da madeira adulta como sendo o décimo anel de crescimento, tendo-se uma estabilização na largura do lenho, conforme mostra o Gráfico 2. De acordo com COWN (1980), a madeira juvenil

pode ser identificada como aquela que se encontra até o décimo anel anual de crescimento, podendo se estender até o décimo quinto.

GRÁFICO 2. VARIAÇÃO DO LENHO INICIAL AO LONGO DOS ANÉIS ANUAIS DE CRESCIMENTO

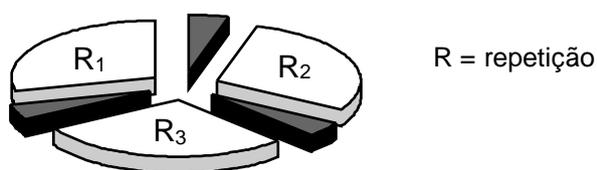


Foi calculado o percentual de lenho inicial e tardio para madeira juvenil e adulta.

### c) Densidade básica

Para determinação da densidade básica, foram utilizadas três cunhas, de acordo com a Figura 22.

FIGURA 22 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DOS DISCOS PARA ANÁLISE DA DENSIDADE BÁSICA



A densidade básica (relação entre a massa seca em estufa e o volume saturado) foi determinada em cada cunha (repetição), sem a casca, através do método da balança hidrostática (Norma ABCP M14/70). O método consta de:

- saturação completa da amostra em água;
- determinação do peso imerso da amostra (PI) em balança hidrostática;
- determinação do peso úmido da amostra (PU), removendo-se a água superficial;
- secagem da amostra em estufa a  $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$  até peso constante;
- determinação do peso seco da amostra (PS).
- cálculo da densidade básica (DB) através da expressão:

$$DB = \frac{PS}{PU - PI}$$

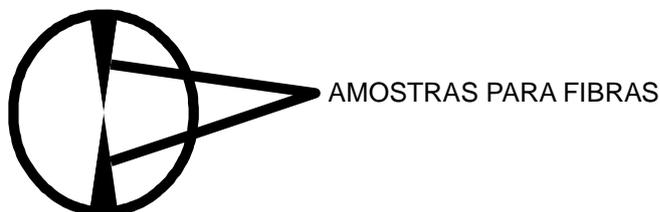
A densidade do disco foi calculada através da média aritmética dos valores obtidos para as três repetições.

Através da densidade dos discos obteve-se a densidade média ponderada das toras e da secção total de tronco analisada para cada árvore (5,6 m).

#### d) Dimensões de fibras

Para estudo das dimensões das fibras, duas cunhas estreitas foram retiradas dos discos, em sentidos opostos do disco (Figura 23), e transformadas em palitos (similares a palito de fósforo).

FIGURA 23 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DOS DISCOS PARA DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DAS FIBRAS



Para separação das fibras, o material sofreu uma maceração através do processo nítrico-acético, conforme BARRICHELO; FOELKEL (1983), sendo colocado em tubos de ensaio.

A determinação das dimensões das fibras foi conduzida através do preparo de cinco lâminas com o material macerado, coloridas com solução aquosa de safranina a 1%. Tomou-se o cuidado, na montagem das lâminas, de efetuar a agitação do material macerado para manter as fibras em suspensão, evitando assim, erros de amostragem devido à formação de extratos nos tubos de ensaios que continham o material macerado.

O comprimento de fibras foi obtido através da medição de 50 fibras de cada amostra com o auxílio de um projetor Carl Zeiss Jena. Já a largura das fibras e diâmetro do lume foram mensurados em um microscópio óptico, binocular, marca Labophot. A espessura da parede foi obtida por diferença entre a largura e o diâmetro do lume, conforme expressão:

$$EP = \frac{L - DL}{2}$$

em que,

EP : espessura da parede das fibras

L : largura das fibras

DL : diâmetro do lume das fibras

Através dos valores obtidos para as dimensões de fibras calculou-se a média ponderada em função do volume para as toras e para a secção (5,6 m) avaliada por árvore, bem como as relações entre as dimensões das fibras:

- Índice de Runkel (IR) = (2EP/DL)
- Fração parede (FP) = (2EP/L)x100
- Coeficiente de flexibilidade (CF) = (DL/L)x100
- Índice de enfiletramento (IE) = (C/Lx1000) (C = comprimento das fibras)

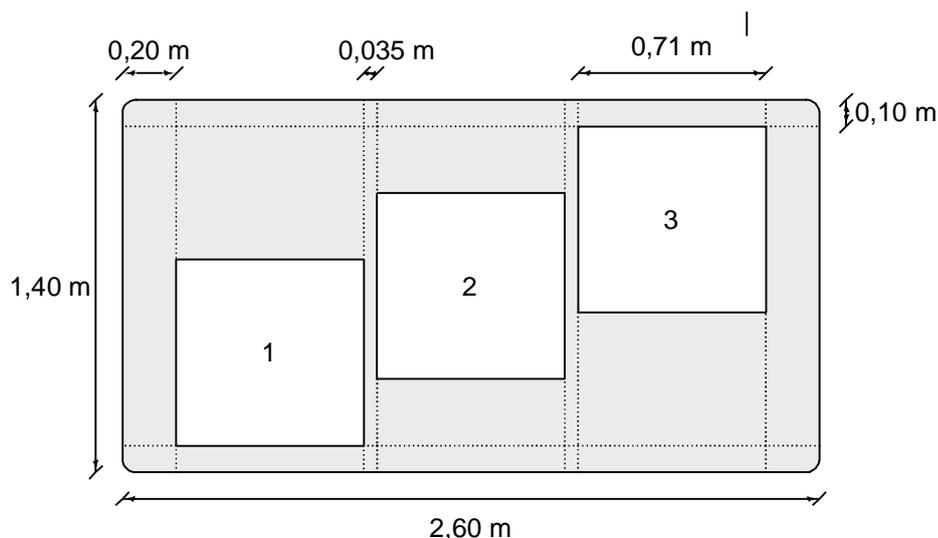
### 3.2.4 Avaliação nas Lâminas

#### a) Diâmetro e frequência de nós

Para estudo dos nós, as lâminas de cada tora foram dispostas uma sobre a outra, na seqüência de laminação, sendo que as colocadas por último correspondiam

à região interna da tora (próxima à medula) ou a madeira juvenil. O estudo foi realizado por amostragem, medindo-se uma a cada cinco lâminas. A área amostrada foi determinada através de um gabarito de  $0,50 \text{ m}^2$  ( $0,71 \times 0,71 \text{ m}$ ), sendo analisados três pontos no sentido diagonal da lâmina, deixando-se espaço de  $0,20 \text{ m}$  de borda e de  $0,035 \text{ m}$  entre os pontos, conforme mostra a Figura 24.

FIGURA 24 - ESQUEMA DE AMOSTRAGEM NA LÂMINA PARA DETERMINAÇÃO DOS NÓS



Cada ponto foi considerado uma repetição, tendo sido contado o número de nós e determinado o diâmetro através da média geométrica entre o diâmetro maior e o menor de cada nó por repetição, conforme expressão que segue.

$$DN = \sqrt{D1 \times D2}$$

em que,

DN : diâmetro médio do nó

D1 : diâmetro maior do nó

D2 : diâmetro menor do nó

Determinou-se também a área de nós através da expressão:

$$\text{Área} = \pi \times \text{Raio1} \times \text{Raio2}$$

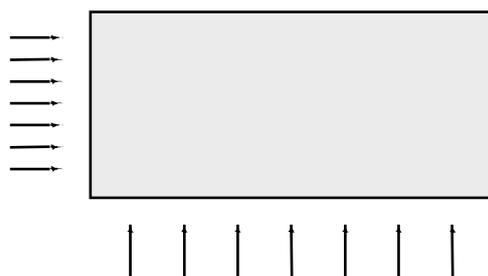
Com os dados obtidos, calculou-se frequência de nós por metro quadrado, diâmetro médio e área dos nós, considerando a repetição, lâmina, e região (lenho juvenil e lenho adulto) e também a tora. Considerou-se como madeira adulta as 10

primeiras lâminas obtidas da região próxima à casca e como madeira juvenil as últimas 8 lâminas obtidas próximo a 5cm do centro da tora, considerando o diâmetro médio do rolete (sobra do centro da tora) de 10 cm.

b) Tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão

O tempo de propagação das ondas de tensão foi determinado em cinco lâminas seqüenciais, tomando-as na faixa da região externa ou interna da tora. A emissão de ondas foi realizada nos sentidos longitudinal e transversal da lâmina, efetuando-se sete leituras em cada sentido (Figura 25), considerando-se para cada lâmina a média das leituras.

FIGURA 25 - ESQUEMA DE APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS LÂMINAS



A Figura 26 ilustra o processo de aplicação das ondas de tensão no sentido longitudinal.

FIGURA 26 - APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS LÂMINAS

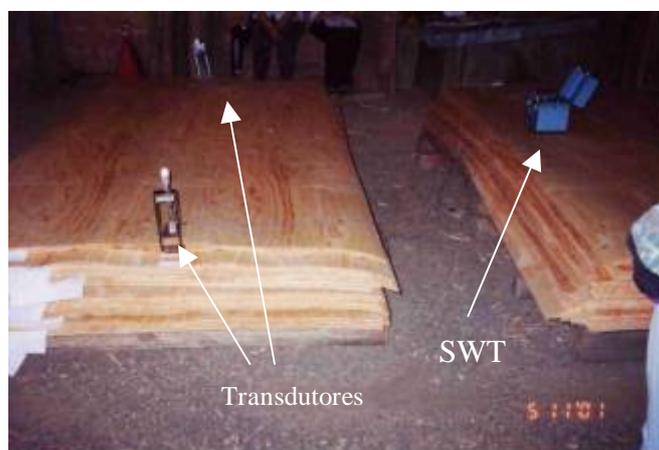


Foto: C. A. PUEHRINGER, 2001

A velocidade de propagação das ondas de tensão foi calculada através da divisão entre a distância percorrida pela onda, correspondente a 2,30 m no sentido longitudinal e 1,135 m transversal, e o tempo gasto em cada percurso.

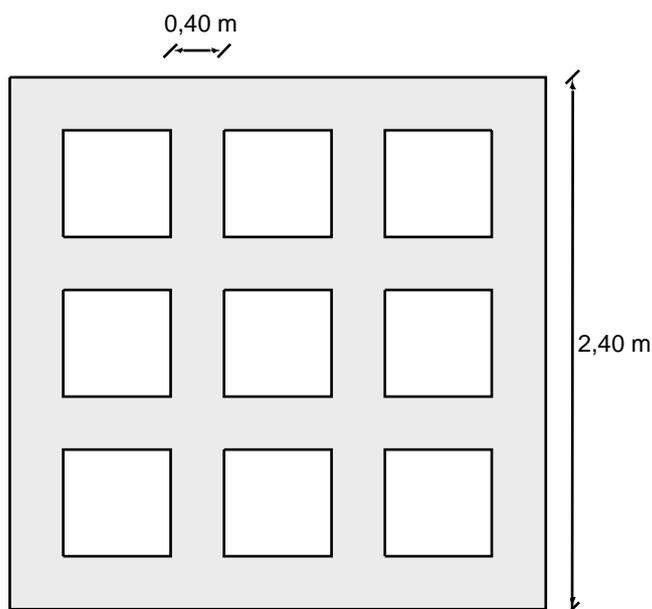
### 3.2.5 Avaliação nas Tábuas

#### a) Diâmetro e frequência dos nós

Para avaliação dos nós as tábuas foram estendidas lado a lado, formando-se um tapete de madeira. Quando o total de tábuas por tora foi inferior ou igual a dez, analisou-se a área toda. Para mais de 10 toras, utilizou-se o gabarito, medindo-se três pontos (repetições) ao longo do comprimento das tábuas, deixando-se uma faixa de aproximadamente 40 – 50 cm entre as linhas de medição, conforme Figura 27.

Em cada ponto contou-se o número de nós dentro da área do gabarito e determinou-se o diâmetro de cada nó (valor médio dos dois diâmetros), da mesma forma que foi determinado nas lâminas.

FIGURA 27 - PONTOS DE CONTAGEM E MEDIÇÃO DOS DIÂMETROS DE NÓS NAS TÁBUAS DISPOSTAS LADO A LADO



b) Tempo de propagação das ondas de tensão nas tábuas úmidas

O tempo de propagação das ondas de tensão foi determinado em cinco tábuas de cada tora, tomadas ao acaso, logo após o desdobro das mesmas. As ondas foram emitidas no sentido longitudinal da tábua (Figura 28), sendo considerada a média de quatro leituras para cada tábua. Nas tábuas úmidas, a distância entre os transdutores foi padronizada em 2,27 m. Com os valores do tempo gasto e distância percorrida pelas ondas de tensão calculou-se a velocidade das mesmas, conforme descrito anteriormente.

FIGURA 28 - ESQUEMA DE APLICAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO NAS TÁBUAS

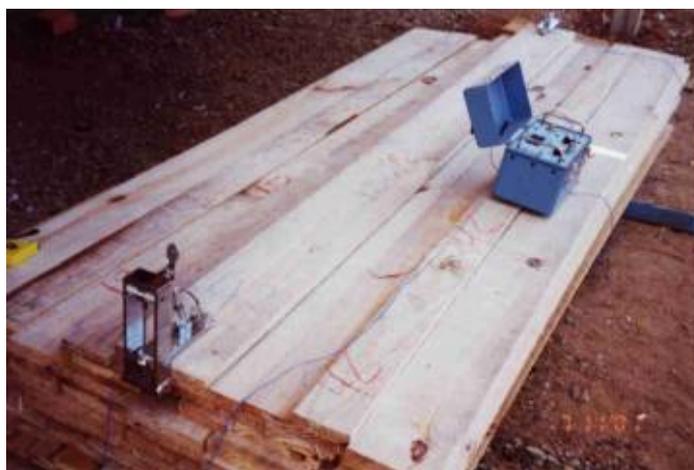


Foto: C. A. PUEHRINGER, 2001

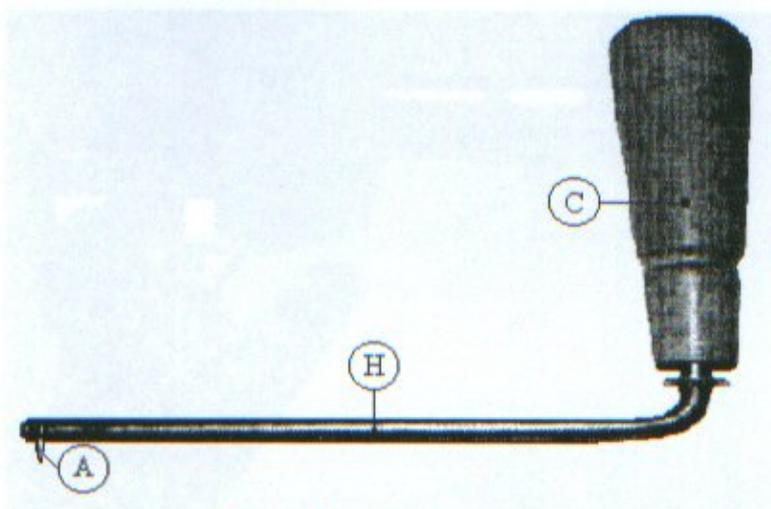
c) Tempo de propagação das ondas de tensão nas tábuas secas ao ar

Após secagem ao ar (umidade de aproximadamente 15 %), foram determinados o tempo e velocidade de propagação das ondas em todas as tábuas obtidas de cada tora, obedecendo ao mesmo esquema de emissão das ondas. A distância entre os transdutores foi determinada para o comprimento exato de cada tábua, variando de 2,25 a 2,32 m.

## d) Ângulo de grã

O ângulo de grã foi determinado em cinco tábuas de cada tora, tomadas ao acaso, utilizando-se um instrumento riscador, ilustrado na Figura 29. Esse instrumento foi confeccionado a partir de uma haste de aço, curvada em um ângulo de 90° e fixada na extremidade da mesma, uma agulha de gramofone para riscar a madeira. Na outra extremidade, foi colocado um cabo de madeira, com movimento pivotante em relação à haste.

FIGURA 29 - INSTRUMENTO RISCADOR USADO PARA MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ



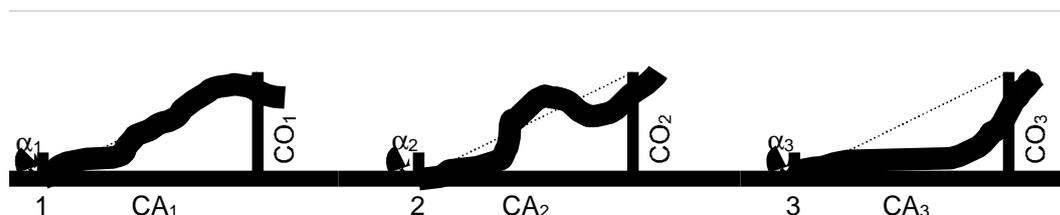
A= agulha de gramofone, H= haste em aço, C= cabo de madeira com movimento pivotante.

Fonte: SILVA (2002)

A determinação foi realizada na face tangencial externa da tábua, que representa a possibilidade de confronto com medições executadas na árvore em pé. Na face tangencial externa de cada tábua traçou-se uma linha longitudinal, dividindo-se a largura ao meio. O comprimento da tábua também foi dividido em três segmentos de setenta centímetros de comprimento, deixando-se uma borda nas duas extremidades de vinte centímetros. A agulha do equipamento foi cravada sobre o ponto inicial de cada segmento a determinada profundidade e puxada através do aparato mantido sobre a linha central, acompanhando a grã da madeira, deixando uma marca utilizada para a análise. O procedimento foi realizado para cada ponto, conforme ilustra a Figura 30.

De acordo com metodologia utilizada por IWAKIRI (1982) e SILVA (2002), os valores de ângulo da grã foram obtidos através do arco tangente obtido entre a linha central, traçada paralela à aresta da tábua, e o risco executado pela agulha cravada no ponto de partida desta linha, que acompanhou o sentido da grã da madeira.

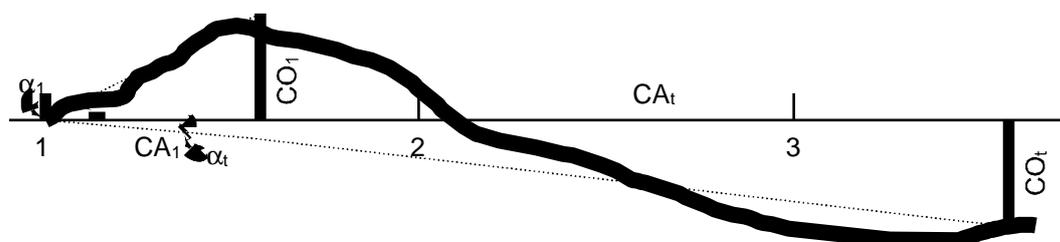
FIGURA 30 - ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NOS TRÊS PONTOS DA TÁBUA



CO: cateto oposto; CA: cateto adjacente;  $\alpha$ : ângulo de grã; 1,2,3: pontos 1, 2 e 3, respectivamente

Como exemplo, no ponto 1 foram realizadas duas determinações, uma para o segmento 1 e outra para a tábua inteira, conforme exemplo apresentado na Figura 31.

FIGURA 31 - ESQUEMA DE DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE GRÃ NA TÁBUA INTEIRA



CO<sub>t</sub>: cateto oposto tábua inteira; CA<sub>t</sub>: cateto adjacente tábua inteira;  $\alpha_t$ : ângulo de grã Tábua inteira

#### e) Densidade aparente

A metodologia para determinação da densidade aparente das tábuas consistiu na pesagem individual de cada uma das tábuas secas ao ar, determinação das espessuras, largura e comprimento. A densidade foi determinada através da relação entre o peso e volume para cada tábua.

#### f) Módulo de elasticidade dinâmico

O cálculo do módulo de elasticidade das tábuas foi realizado através dos valores medidos individualmente para cada lâmina, a partir da equação apresentada pelo fabricante do aparelho Stress Wave Timer (METRIGUARD, 1997) utilizando-se a velocidade de propagação de ondas de tensão e a densidade aparente da madeira, apresentada a seguir:

$$MOEd = Da \times V^2 \times \frac{1}{g}$$

em que,

MOEd : Módulo de elasticidade dinâmico

Da : densidade aparente da tábua

g : aceleração da gravidade (9,804 m/s<sup>2</sup>)

V : velocidade da onda

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A análise dos dados foi realizada com a utilização de análises estatísticas básicas, também chamadas de univariadas, e análises multivariadas.

A estatística básica foi empregada para calcular as médias, desvio padrão, coeficiente de variação e intervalos de confiança. Para a comparação das propriedades médias entre árvores, toras, lenho juvenil e lenho adulto, utilizou-se o teste t de Student. Para os dados expressos em porcentagem ou contagem, como é o caso do percentual de lenho inicial e tardio e a frequência de nós, o teste t foi aplicado após realização do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (ROYSTON, 1992).

Calculou-se a matriz de correlação para cada situação estudada: árvores, toras 1 e 2, tábuas e lâminas. A análise destas matrizes foi feita seguindo os seguintes passos:

- Análise das correlações;
- Análise de componentes principais e,
- Análise fatorial.

Para seleção das componentes principais foram utilizados dois critérios: retenção daquelas que acumularam uma porcentagem da variabilidade total superior a 70 % e que apresentaram, ao mesmo tempo, autovalores iguais ou superiores a 1.

As análises foram realizadas através do sistema estatístico SAS, licenciado para o Departamento de ciências exatas da Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo.

Além dos testes mencionados, foi realizado estudo de regressão através de modelos polinomiais. Os modelos foram ajustados através do procedimento Stepwise, o qual testa variáveis simples, combinadas, transformadas, etc. (DRAPER; SMITH, 1966). As propriedades físicas, anatômicas, morfológicas e defeitos, incluindo as variáveis transformadas, foram as variáveis dependentes. As propriedades avaliadas de forma não destrutiva, tais como, o tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão e também o DAP, foram as variáveis independentes nos modelos. Os modelos polinomiais, no caso do presente trabalho, por não possuírem as constantes, apresentam condição de regularidade, onde as variáveis dependentes devem apresentar valores superiores a zero. O objetivo principal da análise de regressão foi definir modelos para estimar as propriedades da madeira através do método não destrutivo, emissão de ondas de tensão, o que possibilitaria a seleção de árvores e de toras para usos nobres, para obtenção de produtos de alto valor agregado. Na seleção dos modelos foram considerados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) erros padrões de estimativas, coeficientes de variações, critério de informação de Akaike e análise de resíduos. A geração dos modelos foi realizada através do sistema estatístico SAS, através do procedimento `proc reg / selection=stepwise`.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para facilitar a apresentação e discussão dos resultados, os mesmos foram divididos em itens, de acordo com as propriedades avaliadas. A análise estatística foi realizada separadamente, considerando os seguintes grupos: árvores, toras, tábuas e lâminas.

### 4.1 DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES

#### 4.1.1 Árvores

Os valores médios obtidos para as dimensões de fibras e suas relações para a secção avaliada das árvores são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - VALORES MÉDIOS DAS DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA A SECÇÃO DE TRONCO AVALIADA

PARÂMETRO	L	DL	C	EP	IR	FP	CF	IE
Média	47,4	32,3	3,8	7,5	0,470	32	68	80
s	2,3274	2,5312	0,1439	0,5627	0,0626	2,8240	2,8240	4,7151
CV (%)	4,9	7,8	3,8	7,5	13,3	8,9	4,1	5,9
n	1	3	1	3	7	3	1	2

L: largura das fibras ( m); DL: diâmetro do lume ( m); C: comprimento (mm); EP: espessura da parede ( m); IR: índice de Runkel; FP: fração parede (%); CF: coeficiente de flexibilidade (%); IE: Índice de enfiamento; s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação, n: número de árvores necessárias para análise.

As dimensões das fibras apresentaram baixa variação entre as secções de tronco avaliadas, com coeficientes de variação inferiores a 8,0 %. Esse comportamento pode ser explicado pela padronização do diâmetro das árvores na classe intermediária e superior, podendo ter reduzido a variabilidade. Observa-se que a amostragem de sete árvores seria suficiente para análise destas variáveis. MUÑIZ (1993) também encontrou baixos coeficientes de variação das dimensões de fibras para esta espécie, que variaram de 1,3 a 5,8 %. Para o gênero *Pinus*, os coeficientes de variação destas propriedades podem variar de 10 a 30% (SHIMOYAMA; WIECHETEC, 1993).

Os valores obtidos para a largura, diâmetro do lume, espessura da parede e comprimento das fibras estão dentro dos padrões esperados para a espécie aos 28

anos. Valores similares foram verificados por MUÑIZ (1993), estudando a região próxima ao DAP desta espécie aos 30 anos de idade. Já KLOCK (2000) e HASSEGAWA (2003) obtiveram valores inferiores para as características morfológicas de árvores da mesma espécie, com idades de 13 e 25 anos, respectivamente.

O índice de Runkel apresentou valor inferior a 0,5 e a fração parede foi inferior a 40 %, relatados pela bibliografia como limites para boas resistências à tração da celulose/pasta. As fibras dos troncos avaliados também apresentaram boa flexibilidade e capacidade de entrelaçamento.

#### 4.1.2 Toras

Na Tabela 2 são apresentados os valores das dimensões de fibras para as toras 1 e suas relações.

TABELA 2 - VALORES DAS DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA AS TORAS 1

TORA	L	DL	C	EP	IR	FP	CF	IE
Média	46,2	31,1	3,7	7,5	0,490	33	67	81
Desvio Padrão	2,553	2,602	0,143	0,624	0,068	2,988	2,991	5,031
CV (%)	5,5	8,4	3,9	8,3	14,0	9,1	4,5	6,2

L: largura das fibras (  $\mu\text{m}$ ); DL: diâmetro do lume (  $\mu\text{m}$ ); C: comprimento (mm); EP: espessura da parede (  $\mu\text{m}$ ); IR: índice de Runkel; FP: fração parede (%); CF: coeficiente de flexibilidade (%); IE: Índice de entrelaçamento; CV: coeficiente de variação.

As dimensões das fibras das toras 1 apresentam valores superiores à média da árvore ou secção de tronco estudada, pelo fato de estarem posicionadas próximo à base da árvore. Estas propriedades apresentaram baixos coeficientes de variação. Os valores observados para esta região do tronco estão dentro dos padrões esperados e de acordo com resultados observados por MUÑIZ (1993), que verificou para a mesma espécie, aos 30 anos de idade, um comprimento de fibras de aproximadamente 3,6 mm, largura de 48,0  $\mu\text{m}$  e diâmetro do lume de 30,8  $\mu\text{m}$ . A espessura de parede, verificada pelo autor, foi de 8,56  $\mu\text{m}$ , sendo superior àquela determinada no presente trabalho e o coeficiente de variação destas propriedades determinado pelo autor variou de 1,3 a 5,8 %.

As relações entre as dimensões de fibras, verificadas para as primeiras toras (Tabela 2), estão dentro dos padrões esperados para tais características de fibras, conforme dados verificados na bibliografia citada.

Quanto às dimensões de fibras obtidas para as toras 2 (Tabela 3), observam-se maiores largura, diâmetro de lume e comprimento das fibras, quando comparadas às toras 1 (Tabela 2) e se devem às diferentes posições no tronco. Estas diferenças são estatisticamente significativas (Tabela 4). TOMASELLI (1979) e MUÑIZ (1993), estudando posições ao longo do tronco de árvores da mesma espécie, verificaram variações semelhantes para estas propriedades.

TABELA 3 - VALORES DAS DIMENSÕES DE FIBRAS E SUAS RELAÇÕES PARA AS TORAS 2

TORA	L	DL	C	EP	IR	FP	CF	IE
Media	48,9	33,9	3,9	7,5	0,447	31	69	79
Desvio Padrão	2,252	2,619	0,178	0,571	0,062	2,869	2,899	4,617
Coefficiente de Variação	4,6	7,7	4,6	7,6	14,0	9,3	4,2	5,8

L: largura das fibras (  $\mu\text{m}$ ); DL: diâmetro do lume (  $\mu\text{m}$ ); C: comprimento (mm); EP: espessura da parede (  $\mu\text{m}$ ); IR: índice de Runkel; FP: fração parede (%); CF: coeficiente de flexibilidade (%); IE: Índice de enfiamento; CV: coeficiente de variação.

No presente trabalho, não houve diferença estatística significativa para a média da espessura da parede das fibras entre ambas as toras (Tabela 4).

As relações entre as dimensões de fibras índice de Runkel, fração parede e índice de enfiamento são menores para as toras 2, estando de acordo com a tendência geral de aumento da largura e diâmetro do lume com a altura da árvore. Já o coeficiente de flexibilidade, tende a aumentar no sentido base-topo, apresentando, portanto, maior valor para as toras 2.

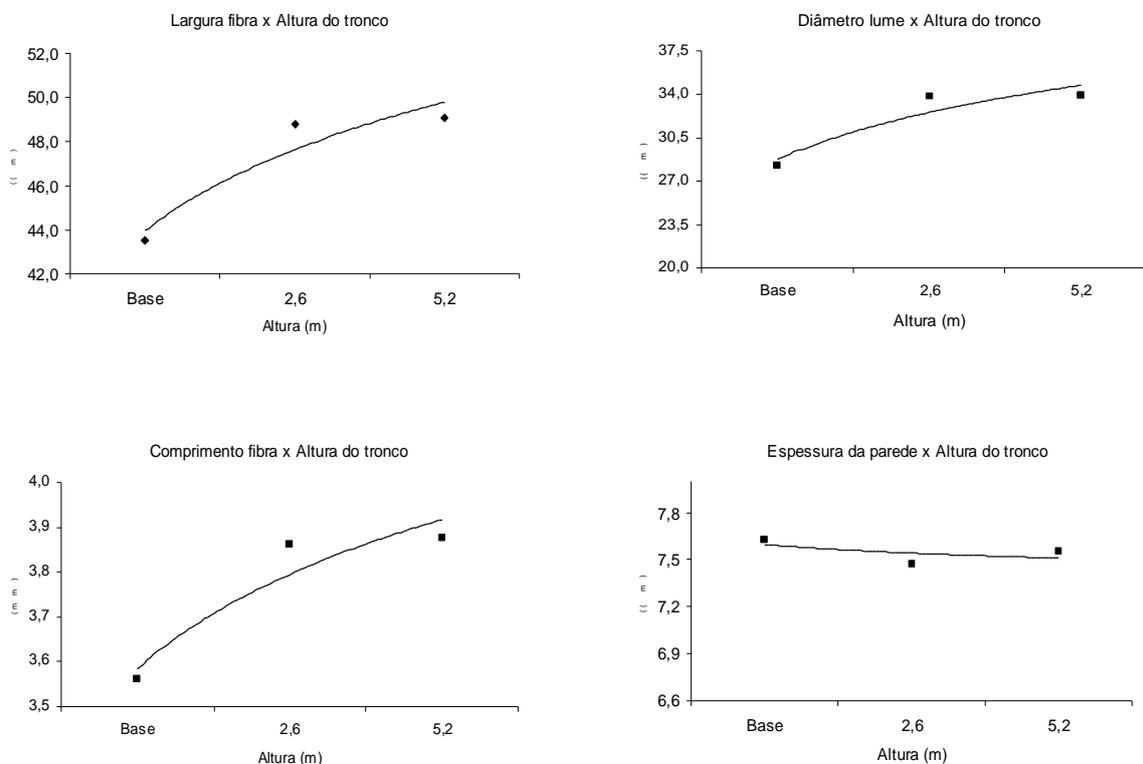
TABELA 4 - VALORES DE t PARA AS MÉDIAS DAS DIMENSÕES DE FIBRAS DAS TORAS 1 E 2

VARIÁVEL	TESTE DE NORMALIDADE		PROBABILIDADE	VALOR DE t
	Tora 1	Tora 2		
Largura	W = 0,96 (p $\leq$ 0,4408)	W = 0,97 (p $\leq$ 0,7130)	9,09.10 <sup>-5</sup>	-4,06
Diâmetro do lume	W = 0,96 (p $\leq$ 0,3776)	W = 0,97 (p $\leq$ 0,7636)	1,81.10 <sup>-4</sup>	-3,84
Comprimento	W <sup>(1)</sup> =0,93 (p $\leq$ 0,1253)	W <sup>(1)</sup> =0,98 (p $\leq$ 0,9489)	5,67.10 <sup>-4</sup>	-3,42
Espessura parede	W = 0,94 (p $\leq$ 0,1271)	W = 0,95 (p $\leq$ 0,2957)	0,42078	0,20 <sup>ns</sup>

Graus de liberdade = 48; W: Teste de Shapiro-Wilk; (1): variáveis transformadas em  $\sqrt{X}$ ; ns: não significativo

O Gráfico 3 ilustra a tendência de variação das dimensões das fibras ao longo da secção de tronco avaliada.

GRÁFICO 3 - TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DE FIBRAS NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA



Verifica-se tendência de aumento da largura, diâmetro do lume e comprimento das fibras da base até 5,6 m de altura e a espessura da parede tende a reduzir neste sentido. Estas tendências são comuns para o gênero *Pinus*. Observações similares foram feitas por COWN (1975); TOMASELLI (1979); CORSON (1984) e MUÑIZ (1993).

#### 4.2 PERCENTUAL DE LENHOS

O percentual médio de lenho inicial e tardio para a secção do tronco avaliada (Tabela 5) apresentou, em média, 57,8% de lenho inicial e 42,2% de lenho tardio. Estes valores dependem do ritmo de crescimento, especialmente nos primeiros dez anos, e da idade da planta.

Como pode ser observado, o percentual de lenhos varia também com a posição na árvore (toras 1 e 2). Há um aumento no percentual médio de lenho inicial de 54,7% para 61,4% e redução do lenho tardio médio de 45,3% para 38,6% da tora 1 para a tora 2. Tendência semelhante foi verificado por KLOCK (2000) que apontou

uma redução no percentual de lenho tardio de 40,1 da base para 15,7 % no topo de árvores de *P. taeda* aos 13 anos de idade e MUÑIZ (1993) encontrou redução de 52,0 para 32,5 % do DAP até 75 % da altura comercial de árvores da mesma espécie, aos 30 anos de idade.

TABELA 5 - PERCENTUAL DE LENHO INICIAL E TARDIO PARA A SECÇÃO DO TRONCO AVALIADA (5,6 m) E TORAS

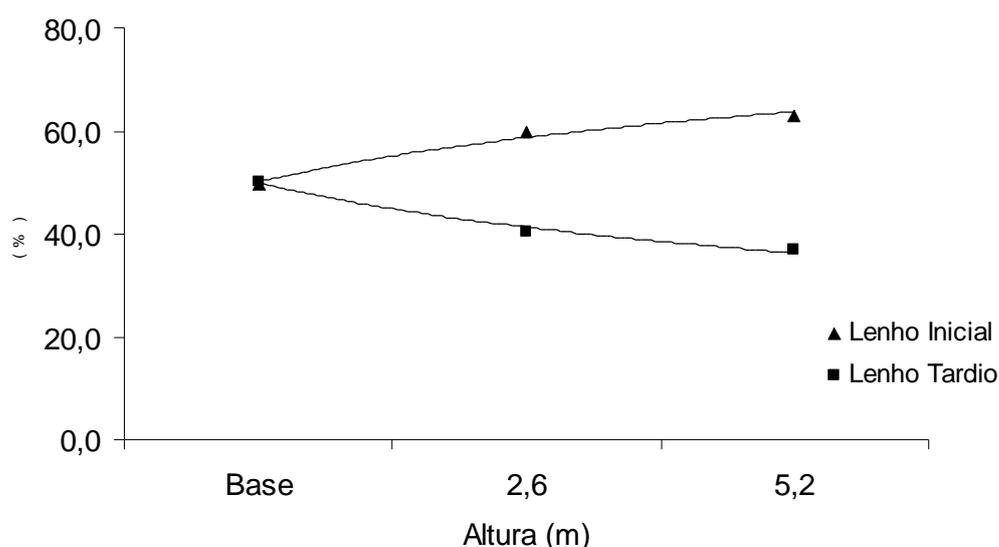
PARÂMETROS	TRONCO		TORA 1		TORA 2	
	Lenho Inicial (%)	Lenho Tardio (%)	Lenho Inicial (%)	Lenho Tardio (%)	Lenho Inicial (%)	Lenho Tardio (%)
Média	57,8	42,2	54,7	45,3	61,4	38,6
S	4,2175	4,2175	5,073	5,073	4,399	4,399
CV (%)	7,3	10,0	9,3	11,2	7,2	11,4
Teste de Normalidade	-	-	W = 0,93 (p ≤ 0,1061)	W = 0,93 (p ≤ 0,0934)	W = 0,95 (p ≤ 0,3196)	W = 0,95 (p ≤ 0,3192)
n	2	4	4	5	2	6

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; W: teste de Shapiro-Wilk; n: número de amostras necessárias.

O lenho tardio apresentou, no presente trabalho, maior variação entre toras quando comparado ao lenho inicial, observado através dos coeficientes de variação.

O Gráfico 4 ilustra a tendência de variação da porcentagem de lenho inicial e tardio na secção de tronco estudada.

GRÁFICO 4 - TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DO PERCENTUAL DE LENHOS NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA



Verificou-se tendência de decréscimo do percentual de lenho tardio ao longo da secção de tronco avaliada. Este resultado é esperado para espécies do gênero

*Pinus*, sendo influenciado pelo meristema apical, responsável pelo crescimento em altura. Resultado semelhante foi relatado por MUÑIZ (1993); MENDONÇA (1982); KLOCK (2000); HASSEGAWA (2003).

Determinou-se também o percentual de lenho inicial e tardio na madeira juvenil e adulta. Os valores apresentados na Tabela 6 apontam maior percentual de lenho inicial na madeira juvenil, comparado à madeira adulta, sendo esta diferença significativa a 1 % de probabilidade, conforme teste t (Tabela 7).

TABELA 6 - VALORES MÉDIOS DOS PERCENTUAIS DE LENHO INICIAL E TARDIO PARA A MADEIRA JUVENIL E ADULTA E TESTE DE NORMALIDADE SEGUNDO SHAPIRO-WILK.

MADEIRA	LENHO INICIAL		LENHO TARDIO	
	(%)	Teste normalidade	(%)	Teste normalidade
Juvenil	69,6	W=0,96 (p≤0,5077)	30,4	W=0,96 (p≤0,5678)
Adulta	46,0	W=0,98 (p≤0,8855)	54,0	W=0,97 (p≤0,8700)

W: teste de Shapiro-Wilk

Este resultado pode ser explicado pelo acelerado ritmo de crescimento inicial da planta, produzindo maior percentual de lenho inicial nos dez primeiros anos. O crescimento tende a estabilizar com a idade, e muitas vezes a estagnar com a competição entre árvores, propiciando a predominância do lenho tardio na região externa do tronco (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; LARSON et al., 2001). Os valores obtidos estão de acordo com MUÑIZ (1993), que verificou 22,7 % de lenho tardio na madeira juvenil e 60,8 % na adulta. Outros trabalhos (BENDTSEN 1978; TOMASELLI, 1979; MENDONÇA, 1982; CORSON, 1991; FUJIWARA; YANG, 2000) também apontam percentual de lenho tardio significativamente menor na madeira juvenil.

As diferenças observadas para os percentuais de lenho inicial e tardio entre as toras 1 e 2 são significativas ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 7).

TABELA 7 - RESULTADO DO TESTE t (STUDENT) PARA PERCENTUAIS DE LENHO INICIAL E TARDIO

Teste	Variável	Probabilidade	Valor de t*
Madeira Juvenil x Adulta	Lenho Inicial	$1,66.10^{-24}$	19,24
Madeira Juvenil x Adulta	Lenho tardio	$1,66.10^{-24}$	-19,24
Lenho Inicial x Tardio	Madeira Juvenil	$1,81.10^{-36}$	35,60
Lenho Inicial x Tardio	Madeira Adulta	$8,32.10^{-07}$	-5,46
Lenho Inicial x Tardio	Tora 1	$1,42.10^{-08}$	6,62
Lenho Inicial x Tardio	Tora 2	$1,18.10^{-23}$	18,37
Tora 1 x Tora 2	Lenho Inicial	$4,4.10^{-06}$	4,97
Tora 1 x Tora 2	Lenho Tardio	$4,4.10^{-06}$	-4,97

\* graus de liberdade = 48.

### 4.3 DENSIDADE BÁSICA

A densidade básica média ponderada da secção de tronco avaliada para cada árvore, a densidade das toras 1 e 2 e dos discos amostrados, bem como seus desvios padrão e coeficientes de variação são apresentados na Tabela 8.

A densidade básica média apresentou valor dentro dos padrões esperados para *P. taeda*, aos 28 anos de idade. A amplitude de variação foi de  $0,150 \text{ g/cm}^3$  (entre a árvore 9 e 21). De uma maneira geral, a amplitude de valores médios obtidos assemelha-se aos resultados verificados para espécies do gênero *Pinus*, apresentados por CHOONG; FOGG (1989) e KOCH (1972), dentre outros. Observou-se um baixo coeficiente de variação, que se encontra dentro dos padrões esperados para a característica, que normalmente varia entre 5,0 e 12,0 %. Em função desta baixa variação, apenas tronco de duas árvores seriam necessários para determinação desta propriedade. MUÑIZ (1993) estudando árvores da mesma espécie, aos 30 anos de idade, verificou um valor de  $0,516 \text{ g/cm}^3$  para a região do DAP. Valores inferiores para a densidade desta espécie, relacionados à idade, foram obtidos por HASSEGAWA (2003) e KLOCK (2000), aos 25 e 13 anos, respectivamente.

No que se refere às toras, observa-se que as toras 1 apresentaram densidade média 6,4 % superior às toras 2, variando de  $0,428$  a  $0,593 \text{ g/cm}^3$ . A densidade das toras 2 variou de  $0,415$  a  $0,545 \text{ g/cm}^3$  e, em ambas, o menor valor foi verificado para a árvore 9 e o maior para a árvore 21. Estas diferenças são significativas ao nível de 1% de probabilidade, conforme teste t de Student, realizado

para as médias (Tabela 9). O coeficiente de variação de aproximadamente 7,0 % entre as primeiras toras é baixo e valor similar é apresentado pelas segundas toras. KLOCK (2000), comparando os coeficientes de variação para esta propriedade em posições relativas da árvore, verificou variação de 4,2 a 6,4 % entre árvores.

TABELA 8 - VALORES MÉDIOS PARA DENSIDADE BÁSICA DAS SECÇÕES DE TRONCO, TORAS E DISCOS

ÁRVORE	TRONCO	TORA 1	TORA 2	DISCO 1	DISCO 2	DISCO 3
1	0,529	0,540	0,534	0,519	0,562	0,506
2	0,500	0,516	0,483	0,535	0,496	0,469
3	0,499	0,519	0,477	0,543	0,495	0,460
4	0,507	0,515	0,490	0,541	0,490	0,489
5	0,490	0,501	0,472	0,527	0,476	0,468
6	0,509	0,520	0,498	0,532	0,509	0,487
7	0,463	0,477	0,447	0,497	0,457	0,436
8	0,560	0,589	0,539	0,601	0,577	0,501
9	0,422	0,428	0,415	0,437	0,419	0,410
10	0,500	0,510	0,499	0,503	0,517	0,482
11	0,473	0,484	0,455	0,508	0,460	0,451
12	0,493	0,514	0,461	0,556	0,472	0,449
13	0,531	0,545	0,515	0,563	0,527	0,503
14	0,493	0,517	0,457	0,566	0,469	0,445
15	0,520	0,541	0,522	0,517	0,566	0,478
16	0,515	0,538	0,488	0,571	0,505	0,471
17	0,490	0,515	0,452	0,568	0,463	0,441
18	0,534	0,553	0,509	0,583	0,523	0,496
19	0,452	0,463	0,445	0,465	0,461	0,429
20	0,496	0,504	0,484	0,519	0,490	0,479
21	0,565	0,593	0,545	0,605	0,581	0,509
22	0,513	0,530	0,484	0,571	0,489	0,478
23	0,465	0,480	0,454	0,487	0,473	0,435
24	0,480	0,490	0,463	0,512	0,468	0,458
25	0,514	0,518	0,491	0,560	0,477	0,505
Média	0,501	0,516	0,483	0,535	0,497	0,469
s	0,0318	0,0358	0,0324	0,0405	0,0407	0,0273
CV (%)	6,3	6,9	6,7	7,6	8,2	5,8
n	2	2	2	-	-	-

Valores em g/cm<sup>3</sup>; s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; n: número de amostras necessárias.

A variabilidade da densidade da madeira entre e dentro das árvores, no sentido longitudinal e radial, é característica reconhecida nas espécies do gênero *Pinus*, sendo atribuída principalmente à fatores genéticos, ambientais, silviculturais, dentre outros (BARRICHELO, 1979; ZOBEL, 1981; SHIMOYAMA, 1990).

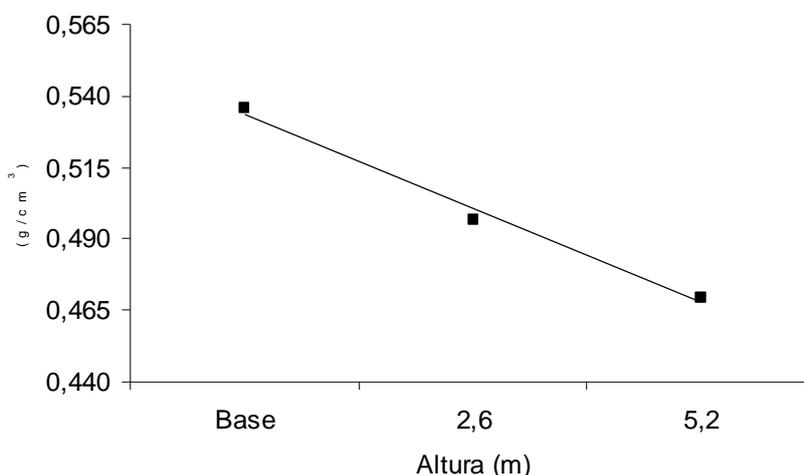
TABELA 9. VALOR DE t PARA AS MÉDIAS DA DENSIDADE BÁSICA ENTRE AS TORAS 1 E 2

TESTE	TESTE NORMALIDADE		PROBABILIDADE	VALOR DE t*
	Tora 1	Tora 2		
Densidade básica Tora 1xTora 2	W=0,96 (p≤0,4486)	W=0,97 (p≤0,7888)	6,6. 10 <sup>-4</sup>	3,41

\*: graus de liberdade = 48; W: Teste de Shapiro-Wilk

O Gráfico 5 apresenta a tendência de variação da densidade básica na secção de tronco estudada.

GRÁFICO 5 - TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA NA SECÇÃO DE TRONCO ESTUDADA



Observa-se tendência de redução da densidade básica ao longo dos 5,6 m do tronco. Esta tendência é normalmente verificada para o gênero *Pinus*, tendo sido relatada por diversos pesquisadores (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980; MUNER, 1983; KLOCK, 1989; MENDONÇA, 1982; TOMASELLI, 1979; MUÑIZ, 1993; SHIMOYAMA; WIECHETECK, 1993; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003).

#### 4.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO

Os valores obtidos para velocidade de propagação das ondas são apresentados em sub-itens de acordo com as fases avaliadas.

#### 4.4.1- Velocidade das Ondas para as Árvores em Pé e Toras

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios da velocidade de propagação das ondas de tensão avaliadas na árvore em pé e nas toras 1 e 2.

TABELA 10 - VALORES DA VELOCIDADE MÉDIA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE TENSÃO PARA AS ÁRVORES EM PÉ E TORAS

ÁRVORE	ÁRVORE (m/s)	TORAS 1 (m/s)	TORAS 2 (m/s)
1	701	2433	2412
2	731	2163	2159
3	727	2194	2405
4	745	2309	2263
5	778	2458	2325
6	831	2313	2201
7	679	1996	2270
8	775	2266	2412
9	596	1854	2093
10	811	2170	2387
11	667	2314	2371
12	715	2333	2240
13	777	2280	2393
14	702	2162	2453
15	768	2221	2299
16	731	2386	2333
17	687	2494	2227
18	766	2445	2384
19	631	2058	2136
20	745	2354	2355
21	818	2391	2501
22	685	2431	2308
23	705	2270	2234
24	725	2254	2143
25	739	2232	2373
Média	729	2271	2307
s	55,9	151,2	107,4
CV (%)	7,7	6,7	4,7
n	3	2	1
Teste de Normalidade	W=0,98 (p≤0,9130)	W=0,94 (p≤0,1691)	W=0,97 (p≤0,5654)

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; n: número de amostras necessárias; W: Teste de Shapiro-Wilk.

O valor para velocidade média de propagação das ondas de tensão das árvores em pé apresentou-se inferior às toras. Este resultado era esperado, uma vez que as barreiras para propagação do som são maiores na árvore em pé, reduzindo a velocidade e aumentando o tempo de propagação das ondas.

Observa-se que os valores apresentados para as toras 1 e 2 foram semelhantes. A diferença na média de densidade de  $0,033 \text{ g/cm}^3$  ou  $33 \text{ kg/m}^3$  (Tabela 8) não foi suficiente para influenciar na velocidade de propagação das ondas de tensão entre ambas as toras.

No que diz respeito à variação desta propriedade, o valor de 7,7 % para o coeficiente de variação entre árvores; 6,7 % e 4,7 % para as toras 1 e 2, respectivamente, são considerados baixos. A avaliação de apenas três árvores ( $n = 3$ ) seria suficiente para determinação desta propriedade. Não foram encontrados, na literatura, dados referentes à velocidade de propagação de ondas determinadas em árvores em pé e em toras, comparáveis para a espécie estudada neste trabalho. Existe apenas escassa bibliografia a respeito de outras espécies, como, por exemplo, WANG et al. (2001), que em avaliação não destrutiva das propriedades da madeira, utilizou o método de ondas de tensão em árvores em pé de “Sitka spruce” (*Picea sitchensis*) e “Western hemlock” (*Tsuga heterophylla*), observando valores consideravelmente superiores para a velocidade de propagação das ondas, com 3528 m/s para a primeira espécie e de 3373 m/s para a segunda, e coeficientes de variação de 8,5 % e 10,4 %, respectivamente. JANG et al. (2000) utilizando ondas de tensão para estudo das propriedades de toras de “Larch” com idade entre 20 e 25 anos e 25 e 30 cm de diâmetro, obtiveram valores para a velocidade de propagação das ondas de tensão entre 3857 a 4607 m/s, com o valor médio de 4284, para as toras com teor de umidade de 66 %. Estes valores são superiores aos verificados para *P. taeda* no presente trabalho e esta diferença pode ser atribuída ao teor de umidade, à espécie e ao teor de madeira juvenil. O autor verificou um coeficiente de variação de 4,8 % para a variação desta propriedade entre as toras.

#### 4.4.2 Velocidade das Ondas para as Tábuas

Nas tábuas, os valores médios da velocidade de propagação das ondas de tensão na condição úmida e seca ao ar (Tabela 11) são diferentes das toras. Esse comportamento era esperado, uma vez que o processamento da madeira (de toras para tábuas) interfere diretamente nas propriedades acústicas.

TABELA 11 – VALORES MÉDIOS PARA A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO DAS TÁBUAS ÚMIDAS (RECÉM DESDOBRADAS) E SECAS AO AR, OBTIDAS DAS TORAS 2

TORAS	TÁBUAS ÚMIDAS		TÁBUAS SECAS AO AR	
	Velocidade (m/s)	CV (%)	Velocidade (m/s)	CV (%)
1	3627	2,5	4919	7,9
2	3527	2,6	4891	7,4
3	4052	0,8	4891	7,1
4	3966	0,7	5200	3,2
5	3577	2,5	4888	5,4
6	3507	2,6	4674	8,0
7	3859	2,5	5055	5,9
8	3858	1,7	5082	6,4
9	3740	1,0	4942	4,3
10	3793	1,1	4962	4,8
11	4087	0,5	5060	4,3
12	3382	2,3	4689	6,4
13	4121	0,8	5090	6,0
14	3809	6,0	4947	6,0
15	3878	1,4	5060	6,2
16	3988	0,9	4946	6,0
17	3705	1,5	4930	6,1
18	4311	1,4	4907	5,0
19	3868	2,6	4663	4,9
20	3682	2,6	4985	7,1
21	3667	1,5	4865	8,2
22	3682	1,3	5048	5,6
23	3661	1,8	5100	5,3
24	3866	0,5	4847	6,3
25	4249	2,1	5031	5,3
Média	3818	1,8	4947	6,0
s	230,9	1,12	134,3	1,20
CV (%)	6,0	62,2	2,7	20,1
n	3		3	
Teste de Normalidade	W=0,98 (p≤ 0,8875)		W=0,94 (p≤ 0,1362)	

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; n: número de tábuas necessárias por tora; W: Teste de Shapiro-Wilk.

A velocidade de propagação das ondas, determinadas nas tábuas úmidas (recém desdobradas), foi significativamente menor que o valor obtido para as tábuas secas ao ar e se deve à influência que a umidade exerce sobre esta propriedade. SIMPSON; WANG (2001), estudando *Pinus ponderosa*, verificaram um aumento na velocidade de propagação das ondas de tensão de 1680 m/s da madeira com 180 % de umidade (base seca) para aproximadamente 2500 m/s com umidade de 20 %. Resultados similares foram obtidos por SIMPSON (1998). JAMES (1961) e

GERHARDS (1975), observaram um decréscimo na velocidade de propagação de ondas de tensão com aumentos no teor de umidade.

No que diz respeito às variações das tábuas entre toras, a velocidade média das ondas apresenta baixo coeficiente de variação, tanto na condição úmida, quanto seca ao ar. Entre tábuas, obtidas de uma mesma tora, esta variação é relativamente superior, especialmente para a condição seca ao ar e pode ser atribuída à variabilidade das propriedades da madeira dentro da árvore, a exemplo da densidade básica. Apesar disso, o cálculo efetuado para determinação do número de tábuas necessárias para determinação desta variável por tora indica que apenas três tábuas seriam suficientes.

McDONALD (1978), estudando espécies de coníferas, verificou uma velocidade de 4350 m/s em tábuas secas de “Douglas-fir” (*Pseudotsuga manziesii*) e de “Eastern White pine” (*Pinus strobus* L.), e 4390 m/s em tábuas verdes de *Pinus ponderosa* e JANG (2000) determinou para amostras de madeira com idade entre 20 a 25 anos, a um teor de umidade de 15 % (base úmida), velocidade média de propagação das ondas de tensão de 4349 m/s.

As tábuas, de uma maneira geral, apresentaram as mais altas velocidades de propagação das ondas de tensão quando comparadas às árvores e toras.

#### 4.4.3 Velocidade das Ondas para as Lâminas

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios obtidos para a velocidade de propagação de ondas, determinadas nos sentidos longitudinal e transversal ao comprimento das lâminas.

A velocidade de propagação de ondas de tensão avaliada no sentido longitudinal mostrou-se aproximadamente duas vezes superior ao transversal. Sabendo-se que o sentido longitudinal das lâminas corresponde ao comprimento da tora, as ondas de tensão emitidas neste sentido acompanham a direção de grã, resultando em uma maior velocidade de propagação das mesmas. Já no sentido transversal, os anéis de crescimento, especialmente o lenho inicial, com menor densidade e fibras com maior diâmetro de lume, tornam-se barreiras para as ondas de tensão, reduzindo sua velocidade e aumentando o tempo de propagação das mesmas (McDONALD, 1978).

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO PARA AS LÂMINAS OBTIDAS DAS TORAS 1

TORA	VELOCIDADE (m/s)	
	Longitudinal	Transversal
1	274	345
2	1151	265
3	1223	714
4	611	219
5	1145	329
6	440	245
7	428	210
8	258	408
9	300	261
10	1567	512
11	1273	124
12	871	312
13	871	312
14	1402	742
15	569	364
16	928	458
17	2794	954
18	891	333
19	639	432
20	739	407
21	884	870
22	299	140
23	476	230
24	742	252
25	397	228
Média	847	387
s	551,04	217,89
CV (%)	65,1	56,3
n	154	187
Teste de Normalidade	W <sup>(1)</sup> =0,93 (p≤0,1332)	W <sup>(1)</sup> =0,92 (p≤0,0546)

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação;n: número de lâminas necessárias por tora; W: Teste de Shapiro-

Wilk; <sup>(1)</sup>: variáveis transformadas em  $\sqrt{X}$

As variações da velocidade de propagação das ondas de tensão média das lâminas, em ambos os sentidos avaliados, foram extremamente altas entre as toras, variando de 274 a 2794 m/s no sentido longitudinal e de 124 a 954 m/s no transversal, apresentando coeficientes de variação acima de 50 %. Esta variação se deve à fragilidade das lâminas devido à baixa espessura, tornando-as sensíveis ao método de determinação e às interferências do ambiente e também à variabilidade existente no sentido radial. Esse resultado indica a necessidade de se considerar o local, a forma e o número de lâminas a serem avaliadas. Nestas condições de avaliação das lâminas, seria necessário analisar 154 Lâminas por tora no sentido

longitudinal e 187 no sentido transversal. Como as toras avaliadas não fornecem este número de lâminas, seria adequado avaliar todas as lâminas obtidas. Alta variação também foi observada na velocidade das ondas determinadas por JUNG (1979), ao estudar técnicas de classificação de lâminas de madeira, verificando valores entre 1524 e 4318 m/s e ROSS et al. (1999), analisando lâminas de *Pinus ponderosa* aos 37 anos de idade, verificaram variação na velocidade das ondas de 3663 a 5435 m/s.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do teste t de Sudent para as velocidades médias entre as toras 1 e 2, entre as tábuas úmidas e secas, e entre os sentidos longitudinais e transversais das lâminas. Observa-se que a diferença entre da velocidade média de propagação das ondas entre as toras 1 (Tabela 10) não foi estatisticamente significativa. Entretanto, as diferenças verificadas para a velocidade média, determinada nas tábuas úmidas e secas ao ar (Tabela 11), foram estatisticamente significativas. O mesmo ocorre com as diferenças observadas para a velocidade média das lâminas, obtidas nos sentidos longitudinal e transversal (Tabela 12).

TABELA 13 - VALORES DE t PARA PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS, TÁBUAS E LÂMINAS

TESTE	VARIÁVEL	PROBABILIDADE	VALOR DE t*
Tora 1 x Tora 2	VEL	0,16860	-0,97
Velocidade ondas Tensão - Seco x Úmido	Tábuas	$3,03 \cdot 10^{-26}$	-21,1
Velocidade Longitudinal x Transversal	Lâminas	$1,58 \cdot 10^{-4}$	3,88

VEL: velocidade de propagação de ondas de tensão; \*: graus de liberdade = 48.

De uma maneira geral, comparando-se os valores das propriedades acústicas da madeira entre as árvores em pé, toras, tábuas e lâminas, observa-se que a velocidade de propagação muda acentuadamente de acordo com o processamento da madeira, aumentando com a redução do tamanho do material estudado, exceto para as lâminas que apresentaram valores iguais ou, até mesmo, inferiores que as árvores, indicando um nível acentuado de interferências nas propriedades acústicas desse material.

#### 4.4.4- Correlações da Velocidade das Ondas entre Árvores, Toras, Tábuas e Lâminas

As correlações da velocidade de propagação das ondas entre os grupos árvores em pé, toras 1 e 2, tábuas e lâminas são apresentadas na Tabela 14.

Observou-se correlação moderada, entretanto, significativa da velocidade de propagação das ondas avaliadas na árvore em pé e nas toras, indicando que esta propriedade pode ser estimada nas toras através da avaliação na árvore em pé.

Correlações significativas também foram detectadas para a velocidade das ondas entre as toras 1 e 2. Isso significa que esta propriedade apresenta mesma tendência nas duas toras.

Não foram verificadas correlações significativas para a velocidade de propagação das ondas entre a primeira tora e as lâminas obtidas da mesma. Este resultado era esperado devido à grande variação observada nas lâminas. Em função dessa variação um maior número de lâminas deve ser avaliado. Apenas 05 lâminas não são suficientes para representar a tora. Resultado semelhante também foi relatado por RIPPY et al. (2000) que obteve coeficiente de correlação de 0,35 para a velocidade das ondas determinadas em toras e lâminas de “Douglas-fir”. O autor reporta a baixa correlação à alta variabilidade das propriedades da madeira dentro da tora, especialmente no sentido radial e, apesar do resultado obtido, afirma que é possível estimar as propriedades das lâminas através das toras. Por outro lado, ROSS et al. (1999) observaram correlações significativas para as ondas de tensão entre toras e lâminas.

No presente trabalho não foram verificadas correlações significativas entre as velocidades das ondas de tensão avaliadas nas toras 2 e nas respectivas tábuas. Provavelmente, este resultado também esteja relacionado à variabilidade das propriedades da madeira dentro do tronco. Tábuas obtidas da região próxima à medula (madeira juvenil) tendem a apresentar menor velocidade de propagação de ondas de tensão (JANG, 2000; BUCUR et al., 1991). Entretanto, JANG (2000) encontrou correlações significativas para esta propriedade determinada em toras e na madeira serrada, obtida das mesmas toras.

TABELA 14 - CORRELAÇÕES DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO ENTRE OS GRUPOS ÁRVORES, TORAS, TÁBUAS E LÂMINAS

PROPRIEDADES	ÁRVORE	TORAS 1	TORAS 2	TÁBUAS UMIDAS	TÁBUAS SECAS	LÂMINAS LONG.	LÂMINAS TRANSV.
ÁRVORE	1,00						
TORAS 1	<b>0,45</b>	1,00					
TORAS 2	<b>0,48</b>	<b>0,41</b>	1,00				
TÁBUAS ÚMIDAS	-0,02	-0,07	0,33	1,00			
TÁBUAS SECAS	-0,01	0,01	0,31	<b>0,42</b>	1,00		
LÂMINAS – LONGITUDINAL	0,04	0,27	0,09	-0,02	-0,12	1,00	
LÂMINAS - TRANSVERSAL	0,16	0,17	0,37	-0,07	-0,22	<b>0,66</b>	1,00

Coefficientes de correlação destacados em negrito para  $p\text{-valor} \leq 5\%$

No que diz respeito à relação entre a velocidade das ondas avaliada para a árvore em pé e o produto final (tábuas e lâminas) também não houve correlações significativas. Esse resultado era esperado, já que não foram observadas correlações entre esses produtos e as respectivas toras. WANG et al. (2001) verificaram para a elasticidade da madeira, determinada através de emissão de ondas de tensão, relações entre árvore em pé e produtos obtidos das mesmas.

Foi observada correlação da velocidade de propagação de ondas de tensão, determinados nas tábuas úmidas, com os valores obtidos para as tábuas secas ao ar. Este resultado sugere que a análise pode ser realizada nas tábuas úmidas, eliminando-se a fase de secagem da madeira, reduzindo-se, assim, o tempo e custo das análises. BRASHAW et al. (2004) verificaram forte correlação entre para velocidade das ondas determinadas em lâminas verdes e secas de *Pinus* spp. e “Douglas-fir” (*Pseudotsuga menziesii*).

Correlações significativas também foram detectadas entre as velocidades determinadas no sentido longitudinal e transversal da lâmina, indicando um incremento ou redução simultânea em ambos os sentidos, independentemente da disposição das células ou lenhos.

#### 4.5 DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS

A frequência, diâmetro e área dos nós foram determinados nas lâminas obtidas das toras 1, sendo estas últimas correspondentes ao ponto de análise da árvore em pé. Sendo assim, foram considerados para as árvores e toras 1 os mesmos valores obtidos nas lâminas. Não foi possível calcular os valores médios para a secção de tronco avaliada (5,20 m), uma vez que nas toras 1, estas propriedades foram determinadas através das lâminas, e nas toras 2 foram obtidas através das tábuas, portanto, com metodologias distintas.

Nas lâminas, considerou-se cada nó independente dos demais, desconsiderando a possível ocorrência de um nó por mais de uma vez em uma mesma lâmina, o que pode ocorrer no processo de laminação.

Os valores destas propriedades foram divididos em subitens, apresentados a seguir.

#### 4.5.1 Toras 1

Na Tabela 15 são apresentados a frequência, o diâmetro e a área dos nós para a primeira tora, determinados através das lâminas.

TABELA 15 - VALORES MÉDIOS DO DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS, OBTIDOS NAS LÂMINAS DAS TORAS 1

PARÂMETRO	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	FREQUÊNCIA (Nº/m <sup>2</sup> )	ÁREA DOS NÓS (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Média	1,54	14,45	47,10
s	0,5550	4,8070	21,0800
CV (%)	36,0	33,3	44,7
n	52	45	80

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; n: número de árvores ou toras necessárias.

O diâmetro médio dos nós de 1,54 cm pode ser considerado normal para povoamentos comerciais não podados. A bibliografia é escassa sobre este assunto, não oferecendo valores para comparação com os dados obtidos neste trabalho. Observa-se alta variação desta propriedade entre as árvores, onde o cálculo mostra que seriam necessárias cinquenta e duas árvores para determinar esta propriedade com maior precisão.

Verificou-se a presença média de 14,45 nós por metro quadrado de lâmina, sendo que esta frequência pode estar sendo influenciada pelo processo de laminação, pois ao laminar a tora com 2,2 mm de espessura em torno desfolhador, um nó pode ocorrer mais de uma vez em uma única lâmina, dependendo da área de abrangência do mesmo, ao longo do raio da tora. Esta propriedade também apresentou alta variação entre árvores, com coeficiente de variação de 33,3 %, sendo necessária avaliação de pelo menos 45 árvores.

A área total média coberta por nós correspondeu, em média, a 0,45% da área total da lâmina. Apesar de não atingir 1 % da área total da lâmina, estes nós podem exercer influência sobre as propriedades físicas e anatômicas, bem como nas propriedades químicas da madeira. Como esta variável é determinada pelo diâmetro e frequência dos nós, também apresentou alto coeficiente de variação e necessidade de avaliação de um número ainda maior de árvores.

Na parte inferior do tronco, especialmente na tora 1, ocorre uma desrama natural das árvores em função do estreito espaçamento inicial utilizados para

plantios comerciais. Com o crescimento em diâmetro, há deposição de camadas de madeira, cobrindo os nós existentes, restringindo-os à região interna da árvore, ou seja, na madeira juvenil (COWN, 1992). Esse processo pode ser verificado nos Gráficos 6, 7 e 8 que apresentam a freqüência, o diâmetro e a área de nós na madeira juvenil e adulta.

GRÁFICO 6 - FREQUÊNCIA DE NÓS NA MADEIRA JUVENIL E ADULTA, OBTIDA NAS LÂMINAS DAS TORAS 1

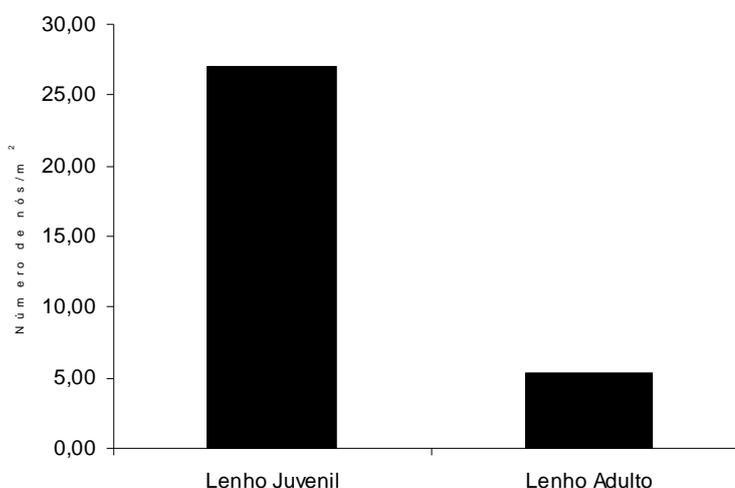


GRÁFICO 7 - DIÂMETRO DOS NÓS DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA, OBTIDO NAS LÂMINAS DAS TORAS 1

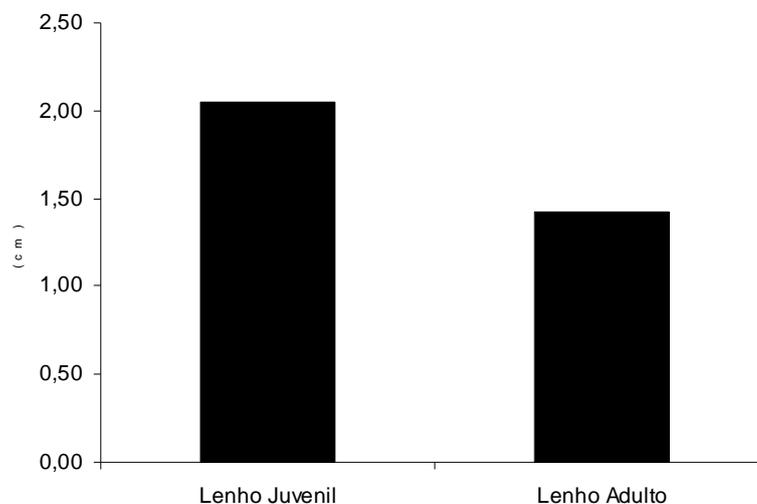
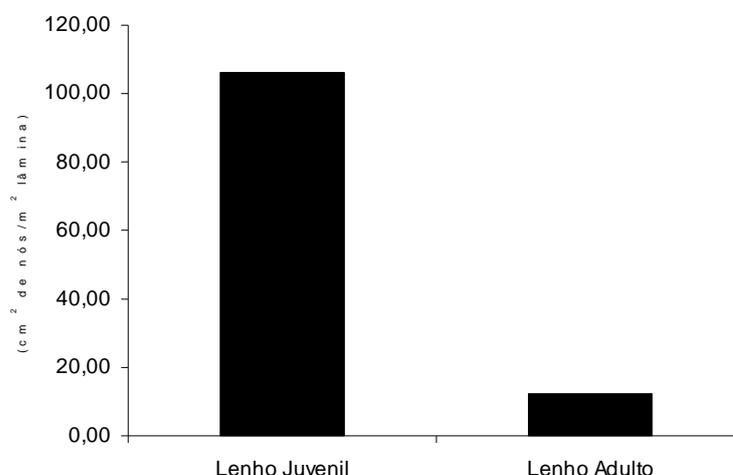


GRÁFICO 8 - ÁREA TOTAL DE NÓS POR METRO QUADRADO DE LÂMINA DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DAS TORAS 1



A freqüência de nós na região interna da tora, próximo à medula, é 6,5 vezes superior à madeira adulta, próxima à casca, sendo esta diferença altamente significativa (Tabela 16). O diâmetro dos nós não apresentou diferença significativa entre a madeira juvenil e adulta.

Para a madeira juvenil a área total de nós é superior à madeira adulta em consequência de maiores diâmetros e freqüência dos nós, sendo esta diferença significativa ao nível de 1% de probabilidade de acordo com o teste de médias (Tabela 16).

TABELA 16 - VALORES DE t PARA AS PROPRIEDADES DA MADEIRA JUVENIL E ADULTA DAS TORAS 1

TESTE	VARIÁVEL	TESTE NORMALIDADE		PROBABILIDADE	VALOR DE t*
		Juvenil	Adulta		
Madeira Juvenil x Adulta	Diâmetro Nó	W <sup>(1)</sup> =0,96 (p≤0,4877)	W <sup>(1)</sup> =0,97 (p≤0,7581)	0,10684	1,26
Madeira Juvenil x Adulta	Freq. de Nó	W <sup>(1)</sup> =0,91 (p≤0,0525)	W <sup>(1)</sup> =0,95 (p≤0,3055)	2,86.10 <sup>-14</sup>	10,46
Madeira Juvenil x Adulta	Área de Nó	W <sup>(2)</sup> =0,97 (p≤0,8404)	W <sup>(2)</sup> =0,91 (p≤0,0673)	4,31.10 <sup>-11</sup>	8,27

W: Teste de Shapiro-Wilk; \*: graus de liberdade = 48. <sup>(1)</sup>: variáveis transformadas em  $\sqrt{X}$ ; <sup>(2)</sup>: variáveis transformadas em Log(X).

Os nós afetam a rigidez, a resistência estrutural da madeira e também a dureza e aparência, além de outras propriedades.

#### 4.5.2- Toras 2

Os diâmetros, frequência e área de nós das toras 2 (Tabela 17) também apresentam alta variação.

TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DE DIÂMETRO, FREQUÊNCIA E ÁREA DE NÓS OBTIDOS NAS TÁBUAS DAS TORAS 2.

TORA	DIÂMETRO MÉDIO (cm)	FREQUÊNCIA (Nº/m <sup>2</sup> )	ÁREA DE NÓS (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> tábuas)
Média	3,76	10,46	134,5
Desvio Padrão	0,964	4,919	71,702
Coeficiente de variação (%)	25,7	47,0	53,3
n	27	89	114

O diâmetro médio dos nós foi superior ao das toras 1. Já a frequência média dos nós não é comparável ao valor obtido nas lâminas. Apesar disso, a área de nós nas tábuas e, conseqüentemente, nas toras 2 foi superior. Este resultado está de acordo com a tendência geral apresentada pelo gênero *Pinus* que aumenta a frequência, o diâmetro e, conseqüentemente, a área de nós em direção à copa, devido ao maior número de galhos. Também para as toras 2 observou-se alta variação dos nós, sendo necessárias 27 para determinação com maior precisão do diâmetro, 89 para frequência e 114 para área dos nós.

#### 4.6 ÂNGULO DE GRÃ

Os valores médios dos ângulos de grã, avaliados nos três pontos e no comprimento total, na face tangencial externa das tábuas, obtidas das toras 2, são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 - VALORES MÉDIOS DO ÂNGULO DE GRÃ DOS 3 PONTOS AVALIADOS E DA TÁBUA INTEIRA

PARÂMETROS	TÁBUA INTEIRA	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	MÉDIA 3 PONTOS
Média	2,77	3,35	3,30	3,14	3,26
Maior valor	5,14	6,17	6,45	5,18	5,93
Menor valor	1,63	1,77	1,22	1,35	1,58
Desvio padrão	0,810	1,045	1,258	0,975	0,974
CV (%)	29,2	31,2	38,1	31,0	29,9

Ângulo medido em graus (°); CV: Coeficiente de variação

O coeficiente de variação foi alto para esta propriedade. Na literatura, o ângulo de grã é abordado para outras espécies de *Pinus* e outros gêneros, entretanto, alguns comparativos serão realizados com o presente trabalho. COWN et al. (1991), estudando a madeira de *P. radiata*, verificaram uma variação no ângulo de grã entre  $0,5^\circ$  a aproximadamente  $3^\circ$  na posição próxima à base da árvore, sendo os maiores valores verificados na região próxima à medula (madeira juvenil). COWN et al. (1983) observou variação de  $1^\circ$  a  $12^\circ$  para *P. caribaea* var. *hondurensis* de vários locais da região Fiji, entretanto, desta variação apenas 28 % excederam  $5^\circ$ . A variação desta propriedade também foi registrada para espécies de folhosas. SILVA (2002), estudando a inclinação do ângulo de grã em *Eucalyptus grandis*, aos 24 anos de idade, observou que os valores decresceram de  $2,11^\circ$  da região central do tronco para  $1,87^\circ$  na região intermediária, aumentando para  $2,14^\circ$  na região externa, encontrando coeficiente de variação de 69,1 a 81,7 %. Segundo o autor, a grande variação pode ser explicada pela dificuldade de medição que é conduzida num único plano quando na verdade o fenômeno é tridimensional.

Com respeito à variação entre os pontos avaliados, observa-se que o ângulo de grã decresce levemente ao longo da tábua, sendo o menor ângulo verificado para toda extensão da tábua e o maior para o primeiro ponto. Esta tendência de redução ao longo da tábua era esperada, uma vez que o aumento na distância entre o ponto inicial e o ponto final (CA) reduz o ângulo obtido entre a distância horizontal (CA) e a vertical (CO).

De acordo com o teste t, as diferenças entre os três pontos estudados não são significativas. Ao comparar estes pontos e a média deles com o ângulo determinado para a tábua inteira, observou-se diferença significativa a 5 % de probabilidade entre o ponto 1, ponto 2, a média dos três pontos e a tábua inteira (Tabela 19).

TABELA 19 - VALORES DE t PARA OS ÂNGULOS DE GRÃ DETERMINADOS NOS DIFERENTES PONTOS DA TÁBUA

TESTE	PROBABILIDADE	VALOR DE t*
Ângulo de Grã Ponto1 <sup>(1)</sup> x Ponto2 <sup>(2)</sup>	0,44345	0,14
Ângulo de Grã Ponto1 x Ponto3 <sup>(3)</sup>	0,23040	0,73
Ângulo de Grã Ponto1 x Tábua Inteira <sup>(4)</sup>	0,01622	2,20
Ângulo de Grã Ponto2 x Tábua Inteira	0,03980	1,79*
Ângulo de Grã Ponto3 x Tábua Inteira	0,07545	1,46
Ângulo de Grã Média dos pontos <sup>(5)</sup> x Tábua Inteira	0,02799	1,96*

<sup>(1)</sup>: W=0,94 (p≤0,2032); <sup>(2)</sup>: W=0,97 (p≤0,6522); <sup>(3)</sup>: W=0,96; (p≤0,4055); <sup>(4)</sup>: W=0,93 (p≤0,1097); <sup>(5)</sup>: W=0,96 (p≤0,4238); W: Teste de Shapiro-Wilk; \*: graus de liberdade = 48.

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios do ângulo de grã, determinados na tábua inteira.

TABELA 20 - VALOR MÉDIO DO ÂNGULO DE GRÃ DETERMINADO NA TÁBUA INTEIRA

TORA	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
1	2,67	0,39	14,5
2	2,45	0,57	23,4
3	2,02	0,39	19,5
4	2,77	1,98	71,6
5	1,63	0,51	31,1
6	2,60	0,74	28,6
7	1,63	0,65	40,2
8	2,18	0,36	16,6
9	2,81	1,03	36,7
10	1,91	0,79	41,2
11	2,53	1,01	39,8
12	5,14	1,77	34,5
13	2,54	2,28	89,6
14	2,77	0,81	29,3
15	2,14	0,74	34,4
16	3,30	1,04	31,6
17	3,20	0,86	26,9
18	2,47	0,53	21,4
19	3,25	0,59	18,2
20	3,77	1,78	47,0
21	3,23	0,52	16,1
22	3,46	1,06	30,5
23	1,79	0,83	46,3
24	4,10	0,89	33,2
25	2,82	0,24	8,4
n	55	-	-

Valores dos ângulos em graus (°); n:número de tábuas necessárias por tora

Observou-se uma variação do ângulo médio de grã de  $1,63^\circ$  a  $5,14^\circ$ . As árvores 14 e 24 apresentaram os maiores ângulos. Segundo COWN (1992) valores acima de  $4^\circ$  são considerados problemáticos em termos de torção na madeira, podendo acarretar problemas durante a secagem. Verificou-se que a variação entre as tábuas é alta, apresentando coeficiente de variação entre 8,4 % (árvore 25) e 89,6 % (árvore 13). De acordo com o cálculo do número adequado de amostras para avaliação desta propriedade nas condições do material utilizado, seria necessário avaliar 55 tábuas por tora. Como as toras não forneceram esse número de tábuas, seria necessário avaliar todas as tábuas obtidas de cada tora. GERHARDS (1981) analisando tábuas de “Douglas-fir” verificou variação de  $1,9^\circ$  a  $3,5^\circ$  para tábuas classificadas com menores ângulos, e de  $6,7^\circ$  a  $9,5^\circ$  para os maiores valores.

#### 4.7 DENSIDADE APARENTE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os valores médios para a densidade aparente e módulo de elasticidade das tábuas secas ao ar, obtidas das toras 2, com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação são apresentados na Tabela 21.

Os valores médios da densidade aparente das tábuas secas ao ar variaram entre toras. Entretanto, maior variação é observada entre tábuas de uma mesma tora, com coeficientes de variação entre 4,3 e 18,3 %, podendo ser explicada pela variabilidade existente dentro da árvore no sentido medula-casca. Ao serrar as toras, as tábuas produzidas na região próxima à casca são diferentes das produzidas na região interna da tora.

Quanto ao módulo de elasticidade, propriedade importante de resistência à flexão estática da madeira, os valores variaram de 11372 a 16274 kgf/cm<sup>2</sup> entre árvores. Altos coeficientes de variação são registrados entre tábuas, indicando mais uma vez a variabilidade das propriedades da madeira dentro da árvore.

Os resultados de módulo de elasticidade para a madeira de espécies de *Pinus* no Brasil, obtidos por vários pesquisadores, tais como KOCH (1972), MUÑIZ (1993), LARA PALMA (1994) e KLOCK (2000), também apresentam alta variabilidade.

TABELA 21 - VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE APARENTE E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS SECAS AO AR

TORA	DENSIDADE APARENTE			MÓDULO DE ELASTICIDADE		
	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente Variação (%)	Média (kgf/cm <sup>2</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente Variação (%)
1	0,591	0,054	9,2	14538	3395	23,4
2	0,550	0,040	7,2	13332	2797	21,0
3	0,572	0,051	9,0	13881	2940	21,2
4	0,584	0,025	4,3	15845	1636	10,3
5	0,573	0,090	15,7	13840	3219	23,3
6	0,576	0,046	8,1	12730	2685	21,1
7	0,537	0,032	6,0	13835	2178	15,7
8	0,618	0,054	8,7	16147	3360	20,8
9	0,510	0,052	10,2	12539	2129	17,0
10	0,580	0,048	8,2	14372	2335	16,2
11	0,525	0,056	10,6	13469	1849	13,7
12	0,600	0,095	15,8	13411	3567	26,6
13	0,617	0,065	10,5	16168	3271	20,2
14	0,574	0,033	5,7	14207	1219	8,6
15	0,572	0,054	9,5	14830	3039	20,5
16	0,579	0,050	8,6	14312	2634	18,4
17	0,546	0,036	6,6	13367	2271	17,0
18	0,596	0,056	9,4	14483	2559	17,7
19	0,520	0,029	5,5	11372	1671	14,7
20	0,638	0,117	18,3	16274	5369	33,0
21	0,620	0,051	8,2	14939	3602	24,1
22	0,553	0,045	8,1	14255	2710	19,0
23	0,585	0,051	8,8	15328	2484	16,2
24	0,539	0,037	6,8	12751	2099	16,5
25	0,589	0,048	8,1	14950	2050	13,7
Média Geral	0,574	0,053	9,1	14207	2683	18,8
s	0,0328	0,0208	3,26	1219,2	848,0	5,15
CV (%)	5,7	39,6	35,9	8,6	31,6	27,4

s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

#### 4.8 INTER-RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS AVALIADAS

Para estudo das inter-relações entre as variáveis avaliadas foi gerada a matriz de correlação. Posteriormente, foram estudadas as componentes principais, isto é, os grupos de variáveis que explicam a maior parte da variação total. Foram realizadas também análises de fatores, determinando as variáveis mais importantes dentro de cada grupo e suas respectivas relações com as demais propriedades.

##### 4.8.1 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Árvores

Para relacionar as propriedades da madeira, é necessário que todas as variáveis sejam correspondentes a uma mesma região do troco. No caso das

árvores em pé, o tempo e a velocidade de propagação das ondas, determinados na região entre a base e 1,30 m do tronco, foram relacionados às variáveis obtidas na primeira tora.

Na Tabela 22 são apresentadas as relações existentes entre as propriedades estudadas, considerando que duas variáveis possuem associação entre si quando o coeficiente de correlação for significativo a 5 % de probabilidade. As correlações significativas encontram-se destacadas em negrito.

Os altos coeficientes de correlação não destacados correspondem a relações originadas de fórmulas, como, por exemplo, o de correlação entre o tempo e velocidade de propagação das ondas, onde o cálculo da velocidade é realizado em função do tempo, sendo desconsiderados na discussão dos resultados.

Observou-se a existência de correlação significativa entre a densidade básica da madeira e o percentual de lenhos, sendo positiva com o lenho tardio e negativa com o inicial. Há também relação positiva da densidade com a espessura da parede e negativa com o diâmetro do lume e largura das fibras. O diâmetro do lume e a largura das fibras, além de estarem diretamente correlacionados entre si, apresentaram correlação positiva com o percentual de lenho inicial e negativa com o percentual de lenho tardio. Alta correlação positiva foi observada entre a largura e o diâmetro do lume e negativa entre a primeira propriedade com o índice de Runkel e o índice de enfiletramento. A densidade básica e o percentual de lenho inicial e tardio apresentaram correlação com o índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade. Estas correlações mencionadas eram esperadas, conforme visto na revisão de literatura.

TABELA 22 – CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ

PROPRIEDADES	DAP	DB	LI	LT	LF	DL	C	EP	DN	NN	AN	TP	VEL	IR	FP	CF	IE
Diâmetro à Altura do Peito (DAP)	1,00																
Densidade Básica (DB)	-0,05	1,00															
Percentual de lenho Inicial (LI)	0,10	<b>-0,56</b>	1,00														
Percentual de lenho Tardio (LT)	-0,10	<b>0,56</b>	-1,00	1,00													
Largura da Fibra (LF)	0,23	<b>-0,49</b>	<b>0,40</b>	<b>-0,40</b>	1,00												
Diâmetro do Lume (DL)	0,16	<b>-0,73</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,58</b>	<b>0,88</b>	1,00											
Comprimento de Fibras (C)	0,24	-0,12	0,15	-0,15	0,10	0,13	1,00										
Espessura da Parede das Fibras (EP)	0,16	<b>0,51</b>	-0,38	0,38	0,22	-0,26	-0,02	1,00									
Diâmetro de Nós (DN)	-0,28	0,18	0,24	-0,24	-0,07	-0,03	0,21	-0,06	1,00								
Número de Nós (NN)	-0,17	0,26	<b>0,42</b>	<b>-0,42</b>	-0,15	-0,24	-0,21	0,19	-0,34	1,00							
Área de Nós (AN)	-0,29	0,10	0,12	-0,12	-0,02	0,00	0,14	-0,03	0,41	0,37	1,00						
Tempo Propagação Ondas de Tensão (TP)	0,13	<b>-0,73</b>	<b>0,55</b>	<b>-0,55</b>	0,38	<b>0,58</b>	0,23	<b>-0,42</b>	-0,33	-0,38	-0,38	1,00					
Velocidade de Propagação de Ondas de Tensão (VEL)	0,00	<b>0,70</b>	<b>-0,54</b>	<b>0,54</b>	-0,38	<b>-0,59</b>	-0,19	<b>0,43</b>	0,25	0,38	0,33	-0,99	1,00				
Índice de Runkel (IR)	0,01	<b>0,78</b>	<b>-0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>-0,45</b>	-0,81	-0,09	0,77	-0,05	0,28	-0,05	<b>-0,62</b>	<b>0,64</b>	1,00			
Fração Parede (FP)	0,01	<b>0,78</b>	<b>-0,63</b>	<b>0,63</b>	<b>-0,44</b>	<b>-0,81</b>	-0,12	0,78	-0,09	0,31	-0,03	<b>-0,63</b>	<b>0,65</b>	1,00	1,00		
Coeficiente de Flexibilidade (CF)	0,01	<b>-0,76</b>	<b>0,62</b>	<b>-0,62</b>	0,45	0,81	0,09	<b>-0,77</b>	0,11	-0,28	0,07	<b>0,59</b>	<b>-0,61</b>	-0,99	-1,00	1,00	
Índice de Enfeltramento (IE)	-0,05	0,40	-0,27	0,27	-0,80	<b>-0,70</b>	0,51	-0,19	0,16	0,02	0,08	-0,20	0,21	0,34	0,31	-0,32	1,00

Coeficientes de correlação destacados em negrito para p-valor  $\leq 5\%$

A espessura da parede das fibras apresentou correlação positiva com o tempo e negativa com a velocidade de propagação das ondas de tensão. Este resultado era esperado, pois quanto maior a espessura da parede, maior é a área sem barreira disponível para propagação das ondas, as quais se dissipam rapidamente em um determinado percurso, com um tempo menor. Como a espessura da parede interfere positivamente na densidade básica, esta também apresenta alta correlação com as propriedades acústicas, tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão. Madeiras com maior densidade, portanto, maior massa por unidade de volume, possui menor quantidade de espaços vazios, possibilitando uma maior velocidade de propagação de ondas de tensão em um tempo menor em um dado percurso. Sendo assim, o diâmetro de lume das fibras, torna-se uma barreira para a propagação das ondas de tensão, aumentando o tempo e reduzindo a velocidade para um certo percurso.

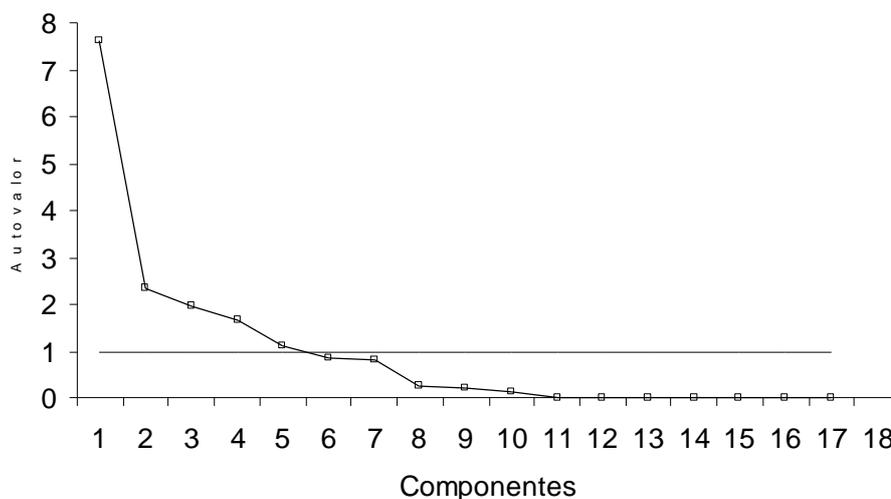
Estas correlações observadas estão de acordo com os resultados obtidos por GERHARDS (1978), KONARSKI; WAZNY (1977) e SCHAD et al. (1996). Também, resultantes da espessura da parede, as relações índice de Runkel e fração parede apresentaram correlações positivas com a velocidade e negativa com o tempo de propagação de ondas de tensão.

O coeficiente de flexibilidade apresentou correlação negativa com a velocidade e positiva com o tempo de propagação das ondas de tensão, pois as fibras mais flexíveis são as menos espessas, com maior diâmetro do lume e com maiores espaços vazios, que reduzem a velocidade e aumentam o tempo para propagação das ondas em um determinado percurso.

Na tabela 22, verificou-se correlação positiva significativa entre o lenho inicial e o número ou frequência de nós. Pode-se dizer que esta relação é indireta e ocorre porque ambas as propriedades diminuem do centro para a região externa da tora.

Na análise das componentes principais (Gráfico 9), foram obtidos os grupos de variáveis que explicam 100 % da variação total.

GRÁFICO 9 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ



As componentes principais obtidas apresentaram autovalores que variaram de zero a 7,6. Verifica-se que as cinco primeiras componentes apresentaram autovalores superiores a 1 e, ao mesmo tempo, explicam 86,4 % da variação total (Tabela 23). Isso significa que as 17 variáveis ou propriedades da madeira estudadas para as árvores em pé podem ser substituídas por estas cinco componentes, com perda de, apenas, 13,6 % de informação. Conforme critérios de seleção das componentes, citados na revisão de literatura, esta pesquisa adotou a retenção das componentes com autovalores superiores a um e que explicam mais de 70 % da variação total. Dessa forma, estas cinco componentes foram retidas para análise de fatores.

TABELA 23 - AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ

FATOR	AUTOVALOR	VARIAÇÃO TOTAL (%)	VARIAÇÃO ACUMULADA (%)
1	7,62836	44,87	44,87
2	2,32276	13,66	58,53
3	1,95792	11,52	70,05
4	1,66199	9,78	79,83
5	1,12362	6,61	86,44

A análise dos fatores rotacionados, obtidos através do método Varimax, permite observar a importância das variáveis dentro de cada fator (Tabela 24).

Foram consideradas importantes as variáveis que apresentaram coeficiente de correlação igual ou acima de 0,7, destacadas em negrito.

TABELA 24 - FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS ÁRVORES EM PÉ

PROPRIEDADE	COMUNALIDADES	FATOR				
		1	2	3	4	5
Índice de Runkel	0,99686	<b>0,91921</b>	-0,29026	-0,21597	0,1146	-0,03522
Fração Parede	0,99640	<b>0,91134</b>	-0,26895	-0,25505	0,12288	-0,05704
Espessura Parede das fibras	0,99448	<b>0,91651</b>	0,37071	-0,13523	0,08435	0,05799
Densidade Básica	0,97314	0,61722	-0,33307	-0,24914	0,32849	-0,06787
Coeficiente de Flexibilidade	0,99799	<b>-0,91884</b>	0,27764	0,25869	-0,06963	0,03874
Largura das Fibras	0,99751	-0,12760	<b>0,95900</b>	0,16406	-0,09910	0,11331
Diâmetro do Lume	0,99543	-0,56021	<b>0,76797</b>	0,23353	-0,14451	0,09124
Índice de Enfeltramento	0,99558	0,08008	<b>-0,85243</b>	-0,11003	0,05633	0,48997
Percentual de lenho Inicial	0,98978	-0,35212	0,18937	<b>0,89361</b>	-0,05707	0,05369
Percentual de lenho Tardio	0,98975	0,35211	-0,18944	<b>-0,89344</b>	0,06187	-0,05160
Velocidade de Prop. de Ondas	0,96775	0,43590	-0,20145	-0,33738	<b>0,74651</b>	-0,17029
Área Total de Nós /m <sup>2</sup>	0,91005	-0,07738	0,01933	0,25068	<b>0,70073</b>	0,22878
Diâmetro de Nós	0,94128	-0,07520	-0,03670	0,23595	0,67470	0,20791
Tempo de Prop.de Ondas	0,99915	-0,41926	0,17844	0,34600	<b>-0,77198</b>	0,19223
Comprimento de fibras	0,98400	-0,04644	-0,04886	0,08314	-0,01441	<b>0,97574</b>
Número de Nós / m <sup>2</sup>	0,94586	0,14679	-0,03447	-0,23930	0,12923	-0,10697
DAP	0,97652	0,05411	0,10531	0,0645	-0,08943	0,11567

Cabe lembrar que comunalidade é a parcela da variância de uma determinada variável  $X_i$ , dada por uma equação, explicada pelos fatores comuns. Quanto mais próxima a 1 (100 %) melhor é o ajuste do modelo. Todas as variáveis apresentaram alta comunalidade, sendo mantidas na análise.

Observou-se que o fator 1 explica 44,3 % da variação total, estando associado às variáveis espessura da parede das fibras, índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade. Cabe lembrar que o índice de Runkel é dado pela relação entre a espessura da parede e o diâmetro do lume da fibra, a fração parede é a divisão entre a espessura da parede e a largura da fibra e o Coeficiente de Flexibilidade é quociente entre a o diâmetro do lume e a largura da fibra. Dessa forma, a espessura da parede é a variável que exerce maior influência ou domínio sobre este primeiro fator. As relações entre essas variáveis foram mencionadas na revisão de literatura e tanto a espessura da parede, quanto o índice de Runkel e a fração parede, apresentam relação direta com a rigidez da fibra, sendo inversamente proporcionais ao coeficiente de flexibilidade. Sendo assim, pode-se denominar este fator de Rigidez das Fibras, estando diretamente ligado à qualidade dos produtos,

principalmente na produção de celulose/pasta e papel. É importante salientar que em análises multivariadas, se uma variável apresenta altas relações com outras, como é o caso das relações entre espessura da parede e diâmetro do lume, densidade básica e percentuais de lenhos, automaticamente, todas estas propriedades são importantes, entretanto apenas uma é indicada dentro de cada fator.

O fator 2, responsável por 13,7 % da variação total, também foi dominado pelas características anatômicas largura da fibra, diâmetro do lume e índice de enfiamento. A largura das fibras apresenta o maior coeficiente de correlação (Tabela 24) comparado às outras duas variáveis, sendo considerada mais importante dentro deste grupo. As três propriedades estão relacionadas à flexibilidade da fibra, conforme mencionado na revisão de literatura. Fibras largas e com maiores diâmetros de lume são, em geral, bastante flexíveis. O índice de enfiamento é o quociente entre o comprimento e a largura da fibra, portanto, possui uma relação negativa com a largura da fibra. Tais constatações permitem chamar este fator de Flexibilidade das Fibras, característica importante para produção de celulose e papel.

O terceiro fator, que compõe 11,5 % da variação total, é dominado pelo lenho inicial e tardio, sendo chamado de Percentual de Lenhos. Os coeficientes de correlação de ambas as variáveis são semelhantes, porém inversos, pois são propriedades inversamente proporcionais na madeira, que juntas somam 100 %.

No quarto fator, responsável por 9,8 % da variação total, verificou-se a dominância da velocidade, tempo de propagação das ondas de tensão e da área de nós, sendo denominado de Propriedades Acústicas e Área de Nós. Cabe lembrar, que a velocidade é o quociente entre a distância e o tempo de percurso da onda, sendo propriedades inversamente proporcionais. Conforme mencionado na revisão de literatura, a relação do tempo e velocidade de propagação das ondas com a área de nós pode ser explicada da seguinte forma: os nós apresentam áreas descontínuas e a madeira em volta dos mesmos apresenta alto teor de extrativo, é rígida e com alto ângulo de grã (grã espiralada ou reversa). Estas características, especialmente as áreas descontínuas e o ângulo de grã tornam-se barreiras para a propagação de ondas de tensão, que acabam por contornar estas regiões, aumentando o tempo do percurso e reduzindo a velocidade das mesmas (JUNG,

1979; GERHARDS, 1982a). Tanto o número, quanto a área de nós, influenciam negativamente na propagação das ondas. Os coeficientes mostraram-se semelhantes para as três propriedades (Tabela 24), apresentando o mesmo grau de importância. Este grupo de fatores relaciona-se ao rendimento e qualidade de produtos, tais como, laminados, faqueados, componentes de portas e janelas, etc.

No que diz respeito às influências das demais variáveis do grupo sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas, a área de nós apresentou maior influência, com coeficiente de correlação de 0,70, seguida do diâmetro dos nós e densidade básica, com coeficientes de 0,67 e 0,33, respectivamente. Como a densidade básica apresenta fortes relações com a espessura da parede, diâmetro de lume e percentuais de lenhos, pode-se dizer que estas propriedades também exerceram influências sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas.

Finalmente, o fator 5 é dominado integralmente pela variável comprimento de fibras. Este fator, responsável por 6,6 % da variação total, devido ao domínio de uma única variável foi chamado pela própria variável, Comprimento de Fibras. Esta propriedade se relaciona diretamente à resistência à tração e em menor grau ao rasgo do papel (KARTH, 1967; CORSON, 1991).

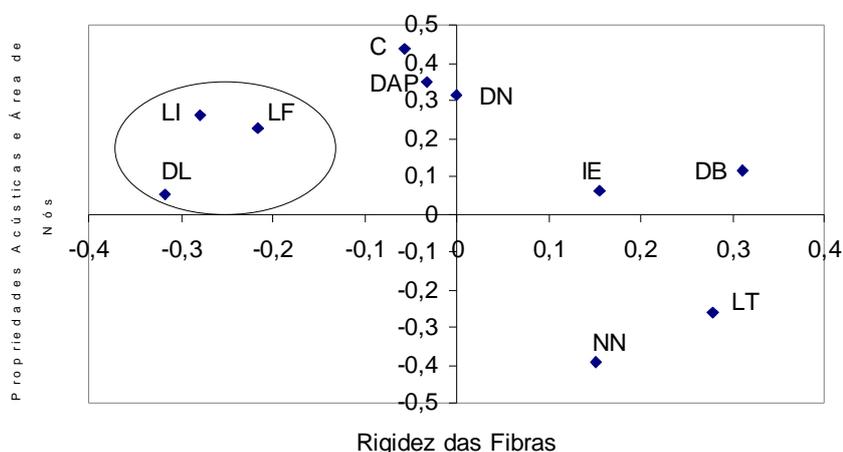
De uma maneira geral, as características anatômicas explicam 65,2 % da variação total, destacando-se a espessura da parede, o diâmetro do lume e o comprimento de fibras, dentro dos fatores Rigidez, Flexibilidade e Comprimento das fibras. O tempo, a velocidade de propagação das ondas de tensão e os nós, representados pela área total, explicam aproximadamente 10 % da variação total, dentro do fator Propriedades Acústicas e Área de nós, ficando bastante clara a relação existente entre eles. Além destes, o fator Percentual de Lenhos se constitui numa propriedade importante na avaliação das árvores.

Visando detectar outras relações entre frequência, diâmetro, área de nós, tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, realizou-se a plotagem, em gráfico (Gráfico 9) das componentes 1 e 4, onde o eixo X é representado pelo Fator Rigidez, composto pela espessura da parede das fibras, índice de Runkel, Coeficiente de Flexibilidade e eixo Y é representado pelo Fator Propriedades Acústicas e Defeitos da madeira, composto pelo tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão e pela área total de nós.

No gráfico “biplot”, as características mais distantes do eixo zero, são as que mais contribuem para a variação total. Aquelas próximas do eixo zero contribuem pouco ou praticamente não contribuem para a variação total. As características quando próximas uma das outras, dentro de um mesmo quadrante, possuem relação entre si, como é o caso da largura da fibra, percentual de lenho inicial e diâmetro do lume destacados no primeiro quadrante negativo do Gráfico 10.

Além de se relacionarem entre si, a largura da fibra, percentual de lenho inicial e diâmetro do lume se correlacionam com as variáveis que compõem os eixos, a espessura da parede, índice de Runkel, Coeficiente de flexibilidade (eixo X) e, tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão e área total de nós (eixo Y). As correlações da largura, diâmetro do lume das fibras e percentual de lenho inicial com as variáveis que compõem o fator rigidez (espessura da parede, índice de Runkel e coeficiente de flexibilidade) foram abordadas na discussão da Tabela 22 e na revisão de literatura.

GRÁFICO 10 - RELAÇÃO ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS E ÁREAS DE NÓS E A RIGIDEZ DAS FIBRAS



LI: percentual de lenho inicial; LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento das fibras; IE: índice de enfiamento; DN: diâmetro dos nós; DB: densidade básica; LT: percentual de lenho tardio; NN: número de nós.

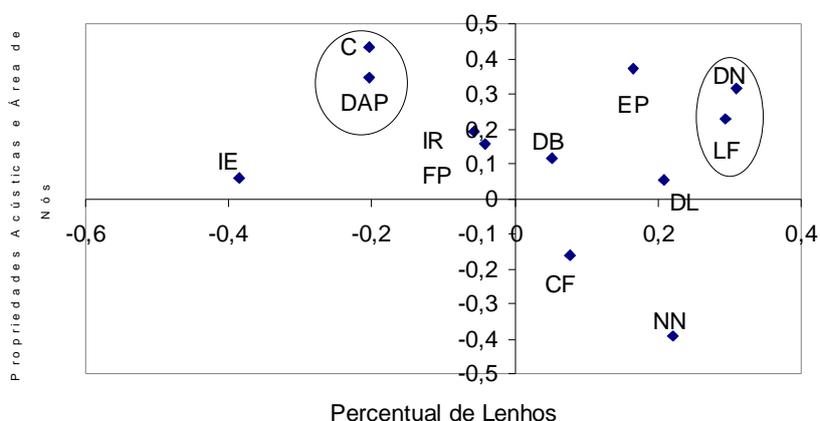
O diâmetro do lume apresentou correlação positiva com o tempo e negativa com a velocidade de propagação de ondas de tensão, relação está já detectada anteriormente na matriz de correlação (Tabela 22). As fibras com maior diâmetro de

lume são também as mais largas, apresentando maior quantidade de espaços vazios na madeira, tornando-se barreiras para a propagação de ondas de tensão. Estas fibras são características do lenho inicial e ocorrem em maior porcentagem na madeira juvenil, região interna do tronco que também possui maior quantidade e conseqüentemente maior área de nós.

O número ou freqüência de nós e o percentual de lenho tardio são as propriedades que estão mais distantes dos eixos e que mais contribuem para a variação total nesta relação. Apesar de estarem isoladas no gráfico, estão relacionados às propriedades que compõem os eixos, conforme mencionado anteriormente.

No Gráfico 11, foi realizado agrupamento dos fatores Propriedades Acústicas e Área de Nós (Y) com o Percentual de lenhos (X), sendo observada a existência de outras relações.

GRÁFICO 11 - RELAÇÃO ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS E ÁREA DE NÓS E OS PERCENTUAIS DE LENHOS



LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento das fibras; IE: índice de enfiamento; DN: diâmetro dos nós; FP: fração parede; DB: densidade básica; NN: número de nós; CF: coeficiente de flexibilidade; EP: espessura da parede; IR: Índice de Runkel.

Neste agrupamento, verifica-se que o comprimento de fibras ficou distante dos eixos e próximo ao DAP. Isso significa que ambas as propriedades estão relacionadas tanto entre si, quanto com as variáveis que compõem os eixos. O comprimento de fibras aumenta do centro do tronco em direção à casca e quanto maior o DAP, maior é a proporção de madeira com fibras mais longas. A relação

entre o comprimento de fibras e o percentual de lenho tardio também é positiva, pois ambos aumentam paralelamente no sentido medula-casca (COWN, 1975; BARRICHELO, 1979; MUÑIZ, 1993; KLOCK, 2000), portanto, o lenho tardio apresenta maior comprimento de fibras.

Com respeito à relação existente entre o comprimento de fibras e as propriedades acústicas da madeira, salienta-se que as ondas emitidas na altura do DAP e recebidas na base da árvore, do lado oposto, fazem um percurso em diagonal, propagando-se rapidamente ao longo do comprimento, através da parede das fibras. Há uma pequena redução na velocidade das ondas ao passarem pela lamela média que liga uma fibra à outra. Portanto, quanto maior o comprimento das fibras, maior é a velocidade de propagação das ondas de tensão. Cabe lembrar que esta propriedade foi a quinta componente mais importante, explicando 6,6 % da variação total. O comprimento de fibras e a área total de nós se relacionam de forma indireta e inversa. O comprimento aumenta e o teor de nós reduz do centro da tora para a região externa, em direção à casca (COWN, 1992).

Observou-se também que o número ou frequência de nós por unidade de área apareceu, novamente, distante dos eixos, quase em diagonal no segundo quadrante negativo e isolado das demais variáveis, confirmando sua importante relação com o tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão e com o percentual de lenhos. Somando-se a isso, verificou-se a presença do diâmetro dos nós próximo à largura das fibras, ambos distantes dos eixos no quadrante positivo, confirmando as relações entre estas propriedades. As relações entre os nós e o tempo e velocidade de propagação das ondas foram abordadas na discussão dos dados da Tabela 24 e na revisão de literatura.

A espessura da parede das fibras também se encontra isolada e distante dos eixos, confirmando sua relação com as propriedades acústicas e percentual de lenho tardio, discutidas anteriormente.

#### 4.8.2 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Toras 1

A Tabela 25 apresenta as correlações entre as propriedades avaliadas para as toras 1.

TABELA 25 - CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 1

PROPRIEDADES	DAP	DB	LI	LT	LF	DL	C	EP	DN	NN	AN	TP	VEL	IR	FP	CF	IE
Diâmetro à Altura do Peito (DAP)	1,00																
Densidade Básica (DB)	-0,06	1,00															
Percentual de lenho Inicial (LI)	0,14	<b>-0,56</b>	1,00														
Percentual de lenho Tardio (LT)	-0,14	<b>0,56</b>	-1,00	1,00													
Largura da Fibra (LF)	0,19	<b>-0,49</b>	0,40	<b>-0,40</b>	1,00												
Diâmetro do Lume (DL)	0,12	<b>-0,73</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,58</b>	<b>0,88</b>	1,00											
Comprimento de Fibras (C)	0,29	-0,12	0,16	-0,16	0,10	0,12	1,00										
Espessura da Parede das Fibras (EP)	0,15	<b>0,51</b>	-0,38	0,38	0,22	-0,26	-0,02	1,00									
Diâmetro de Nós (DN)	-0,27	0,18	0,24	-0,24	-0,07	-0,03	0,21	-0,06	1,00								
Número de Nós (NN)	-0,11	0,26	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>	-0,15	-0,24	-0,21	0,19	-0,34	1,00							
Área de Nós (AN)	-0,26	0,10	0,13	-0,12	-0,02	0,00	0,14	-0,03	0,41	0,37	1,00						
Tempo Propagação Ondas de Tensão (T)	0,18	<b>-0,61</b>	<b>0,41</b>	<b>-0,41</b>	0,11	0,33	0,11	<b>-0,45</b>	-0,32	-0,11	-0,30	1,00					
Velocidade de Propagação de Ondas de Tensão (VEL)	-0,17	<b>0,59</b>	<b>-0,40</b>	<b>0,40</b>	-0,10	-0,32	-0,10	<b>0,45</b>	0,28	0,10	0,27	-1,00	1,00				
Índice de Runkel (IR)	0,04	<b>0,78</b>	<b>-0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>-0,45</b>	-0,81	-0,09	0,77	-0,05	0,28	-0,05	<b>-0,46</b>	<b>0,46</b>	1,00			
Fração Parede (FP)	0,03	<b>0,78</b>	<b>-0,63</b>	<b>0,63</b>	-0,44	<b>-0,80</b>	-0,12	0,77	-0,09	0,31	-0,03	<b>-0,49</b>	<b>0,48</b>	1,00	1,00		
Coeficiente de Flexibilidade (CF)	-0,03	<b>-0,76</b>	<b>0,62</b>	<b>-0,62</b>	0,44	0,80	0,09	<b>-0,77</b>	0,11	-0,28	0,07	<b>0,46</b>	<b>-0,46</b>	-0,99	-1,0	1,00	
Índice de Enfeltramento (IE)	0,03	0,39	-0,26	0,27	-0,80	<b>-0,69</b>	0,51	-0,19	0,16	0,02	0,08	-0,01	0,01	0,34	0,31	-0,32	1,00

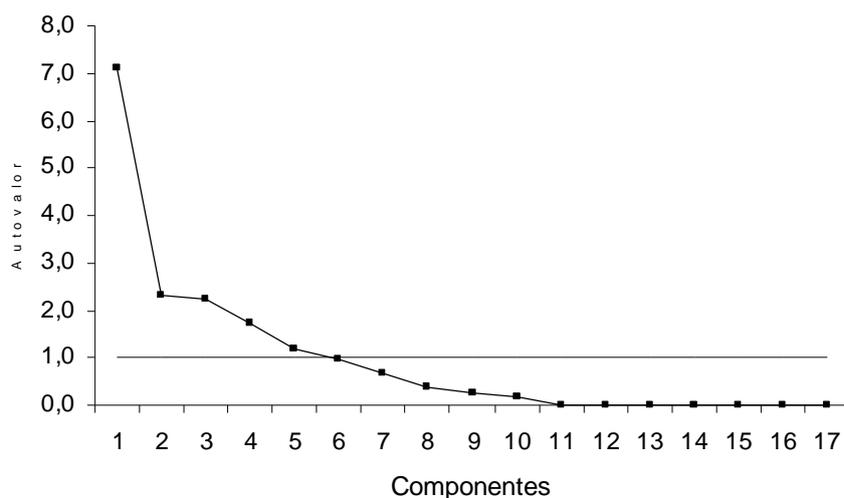
Coeficientes de correlação destacados em negrito para p-valor  $\leq 5\%$

Como foram utilizados os mesmos valores de densidade básica, dimensões de fibras e suas relações e percentuais de lenhos para as primeiras toras e para as árvores, foram observadas as mesmas relações e mesmos coeficientes de correlação para estas características, discutidas na Tabela 22.

Para as toras 1 também foram verificadas correlações das propriedades acústicas da madeira com a espessura da parede e os percentuais de lenho inicial e tardio. Estas correlações também foram discutidas no item 4.8.1. Diferentemente das árvores, não foram detectadas correlações significativas entre diâmetro do lume das fibras e as propriedades acústicas da madeira.

O Gráfico 12 apresenta as componentes principais obtidas através da matriz de correlação das propriedades avaliadas para as toras 1.

GRÁFICO 12 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA AS PROPRIEDADES DAS TORAS 1



As componentes obtidas apresentaram autovalores variando de 7,1 a zero, sendo que para as cinco primeiras componentes os autovalores foram superiores a 1 e ao mesmo tempo acumularam 85,7 % da variabilidade total (Tabela 26), sendo retidas na análise. Isso significa que as 17 variáveis ou propriedades da madeira consideradas para as toras 1 podem ser substituídas por estas cinco componentes, perdendo-se apenas 14,3 % da variação total.

TABELA 26 - AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 1

FATOR	AUTOVALOR	VARIAÇÃO TOTAL (%)	VARIAÇÃO ACUMULADA (%)
1	7,12351	41,90	41,90
2	2,33027	13,71	55,61
3	2,22860	13,11	68,72
4	1,73000	10,04	78,76
5	1,18652	6,98	85,74

Este resultado é bastante semelhante àquele obtido para as árvores em pé.

A Tabela 27 apresenta os fatores rotacionados, obtidos pelo método Varimax, e as variáveis que compõem cada fator com seu respectivo grau de importância.

TABELA 27 - MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 1

PROPRIEDADE	COMUNALIDADES	FATOR				
		1	2	3	4	5
Índice de Runkel	0,99638	<b>0,91409</b>	-0,29724	0,17207	0,19944	0,02721
Fração Parede	0,99394	<b>0,90146</b>	-0,27776	0,19952	0,23414	0,05422
Espessura da Parede	0,99540	<b>0,89387</b>	0,36486	0,19339	0,12811	0,02222
Densidade Básica	0,85315	0,61340	-0,38769	0,36680	0,29098	0,11204
Coefficiente de Flexibilidade	0,99583	<b>-0,90557</b>	0,28314	-0,18338	-0,23008	-0,00988
Largura das Fibras	0,99440	-0,13626	<b>0,96412</b>	-0,01414	-0,15270	-0,02219
Diâmetro do Lume	0,99100	-0,56283	<b>0,77569</b>	-0,10907	-0,21698	-0,03759
Índice de Enfeltramento	0,99393	0,09117	<b>-0,85526</b>	-0,04302	0,12066	0,02549
Velocidade Prop. das Ondas	0,99595	0,29247	-0,01008	<b>0,93180</b>	0,14799	0,06668
Tempo de Prop. das Ondas	0,99701	-0,29293	0,01652	<b>-0,91848</b>	-0,16326	-0,09684
Percentual de lenho Tardio	0,99121	0,34600	-0,20523	0,18517	<b>0,87710</b>	0,04468
Percentual de lenho Inicial	0,99079	-0,34544	0,20506	-0,18574	<b>-0,87691</b>	-0,04223
Número de Nós/m <sup>2</sup>	0,92686	0,18510	-0,04724	-0,04659	0,32971	<b>0,81274</b>
Área de Nós/m <sup>2</sup>	0,91724	-0,06925	-0,02268	0,25327	-0,20013	<b>0,81100</b>
Comprimento de fibras	0,99238	-0,05079	-0,04318	-0,05198	-0,07725	-0,00690
Diâmetro de Nós	0,97006	-0,05404	-0,17810	0,22703	-0,18852	0,00504
Diâmetro das Toras	0,98675	0,08288	0,07793	-0,09427	-0,09893	-0,11307

Todas as variáveis estudadas apresentaram comunalidade superior a 0,8. Os fatores 1 e 2 estão associados às mesmas propriedades que os fatores 1e 2 obtidos para as árvore em pé, e o percentual de participação de cada um sobre a variação total também é semelhante. O fator 1, que explica 41,9% da variação total, está associado com as variáveis espessura da parede das fibras, índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade, tendo sido denominado de Rigidez das

Fibras. As relações entre estas propriedades foram abordadas no item 4.8.1 e na revisão de literatura.

O fator 2, responsável por 13,7 % da variação total, igualmente para as árvores, foi dominado pelas propriedades anatômicas largura da fibra, diâmetro do lume e o índice de enfilamento e foi chamado de Flexibilidade das Fibras.

Diferença foi observada para o terceiro fator, responsável por 13,7 % da variação total, sendo dominado pelo tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão. Estas propriedades são inversamente proporcionais, apresentando coeficientes de correlação semelhantes. As duas características são classificadas como propriedades acústicas da madeira e estão relacionadas à qualidade de produtos de alto valor agregado, tais como laminados, faqueados, componentes de portas e janelas, etc. Dessa forma, este fator foi denominado de Propriedades Acústicas. Analisando os coeficientes de correlação das variáveis presentes neste fator (Tabela 27), observou-se que a densidade básica é a variável que exerce maior influência sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, apresentando coeficiente de correlação de 0,37, seguida da área e diâmetro dos nós, com coeficientes de 0,25 e 0,27, respectivamente.

O quarto fator é responsável por 10,0 % da variação total, sendo dominado pelos percentuais de lenhos inicial e tardio, e foi chamado de Percentuais de Lenhos.

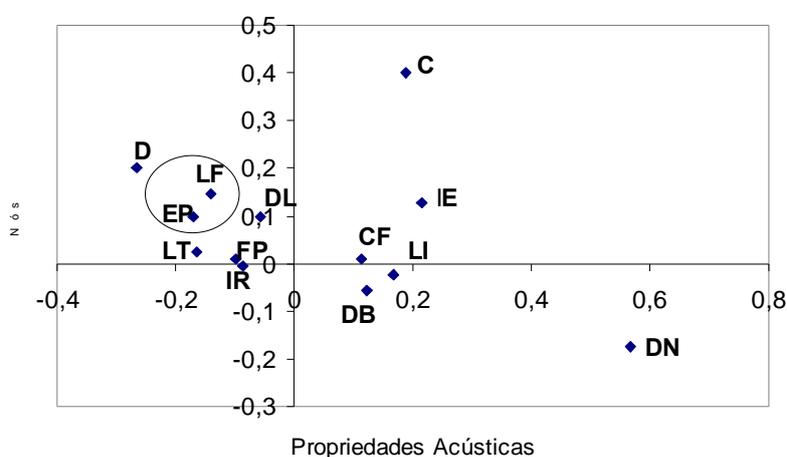
Finalmente, o fator 5 foi responsável por 7,0 % da variação total, tendo sido dominado pelas variáveis número e área de nós. Ambas possuem relação positiva, uma vez que a área total é determinada em função do número e diâmetro dos nós. Este fator foi denominado de Nós. Os nós são defeitos da madeira que influenciam negativamente na produção e qualidade dos produtos de alto valor agregado. Na fabricação de determinados produtos, estes são eliminados da madeira, reduzindo-se o rendimento do processo e em outros produtos, são simplesmente cobertos por outros materiais, interferindo, de certa forma, na qualidade.

De uma maneira geral, as características anatômicas explicaram 55,6 % da variação total no grupo de variáveis avaliadas para as toras 1. Já o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão explicaram 13,1 %, mostrando-se aproximadamente 3,0 % mais importante nas primeiras toras quando comparados às árvores em pé. Os nós, somando-se a frequência e a área total, explicaram 7,0 % da

variação total. Juntos, as propriedades acústicas e os defeitos da madeira, foram responsáveis por 20% da variação total. Isso significa que estas relações são mais facilmente observadas nas primeiras toras do que nas árvores em pé.

Com objetivo de verificar outras relações entre as propriedades estudadas, foram relacionados, em gráfico, os fatores 3 e 5 que correspondem às propriedades acústicas e os nós da madeira, respectivamente. Estas relações podem ser observadas no Gráfico 13.

GRÁFICO 13 - RELAÇÕES ENTRE OS FATORES NÓS E PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA



LI: percentual de lenho inicial; LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento das fibras; IE: índice de enfiamento; DN: diâmetro dos nós; DB: densidade básica; LT: percentual de lenho tardio; D: diâmetro das toras; EP: espessura da parede das fibras; IR: índice de Runkel; CF: coeficiente de flexibilidade.

De uma maneira geral, foram observados agrupamentos de propriedades próximos dos eixos, considerados pouco importantes para a variabilidade total. Um pouco mais distante dos eixos, no primeiro quadrante positivo e negativo, destacou-se o agrupamento entre a espessura da parede e a largura das fibras, confirmando a relação inversa entre ambas. Além de relacionarem entre si, estas duas propriedades exercem influência sobre os fatores que compõem os eixos do gráfico, as propriedades acústicas da madeira (tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão) e os nós (frequência e área). Todas estas relações foram abordadas no item 4.8.1 e na revisão de literatura.

De forma isolada e distante dos eixos estão o comprimento de fibras e o diâmetro dos nós, em quadrantes diferentes. Isso significa que ambos, separadamente, contribuem acentuadamente para a variação total e, portanto apresentam relações importantes dentro do conjunto de variáveis analisado. Estas duas variáveis interferem tanto nas propriedades acústicas (tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão), que compõem o eixo X, quanto na frequência e área de nós, que compõem o eixo Y.

#### 4.8.3 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Toras 2

A Tabela 28 apresenta as correlações entre propriedades avaliadas para as toras 2.

As correlações significativas observadas entre as propriedades da madeira avaliadas para as toras 2 foram semelhantes às obtidas para as árvores em pé e toras 1. Apenas a correlação negativa detectada entre o diâmetro do lume e a espessura da parede não foi observada nos outros grupos analisados. As fibras mais largas e com os maiores diâmetros de lume apresentam paredes mais delgadas, conforme abordado na revisão de literatura.

Diferentemente das árvores em pé, não foram verificadas correlações significativas dos percentuais de lenhos (inicial e tardio) com a largura das fibras, número de nós, tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão. Também não foram observadas correlações da espessura de parede das fibras com a densidade básica, número ou frequência de nós, tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão e ainda, entre velocidade de propagação das ondas e coeficiente de flexibilidade.

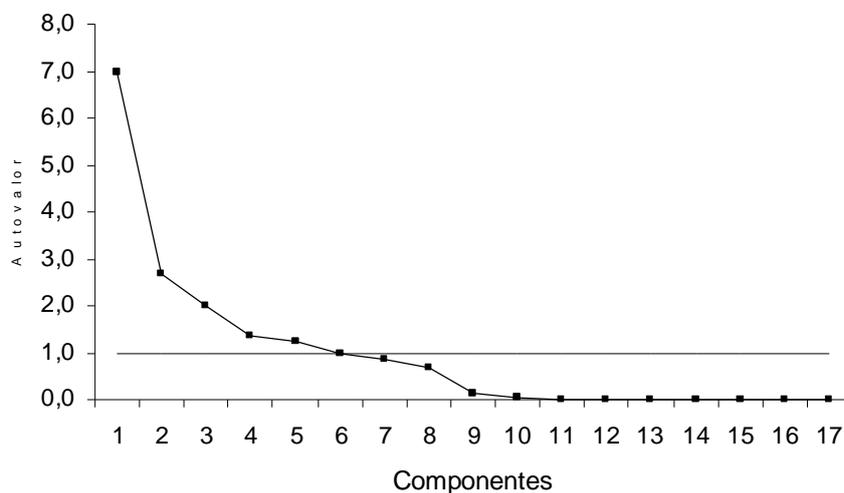
TABELA 28 - CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 2

PROPRIEDADES	DAP	DB	LI	LT	LF	DL	C	EP	DN	NN	AN	TP	VEL	IR	FP	CF	IE
Diâmetro à Altura do Peito (DAP)	1,00																
Densidade Básica (DB)	-0,01	1,00															
Percentual de lenho Inicial (LI)	0,05	<b>-0,69</b>	1,00														
Percentual de lenho Tardio (LT)	-0,05	<b>0,69</b>	-1,00	1,00													
Largura da Fibra (LF)	0,20	<b>-0,64</b>	0,39	-0,39	1,00												
Diâmetro do Lume (DL)	0,22	<b>-0,72</b>	<b>0,47</b>	<b>-0,47</b>	<b>0,90</b>	1,00											
Comprimento de Fibras (C)	0,12	-0,19	0,10	-0,10	0,19	0,31	1,00										
Espessura da Parede das Fibras (EP)	-0,11	0,39	-0,28	0,29	-0,07	<b>-0,49</b>	-0,32	1,00									
Diâmetro de Nós (DN)	-0,01	-0,09	0,07	-0,08	-0,09	-0,12	-0,03	0,10	1,00								
Número de Nós (NN)	-0,30	-0,06	0,17	-0,17	0,12	0,07	-0,01	0,09	-0,22	1,00							
Área de Nós (AN)	-0,20	-0,13	0,30	-0,30	0,07	-0,03	-0,15	0,22	0,44	0,68	1,00						
Tempo Propagação Ondas de Tensão (TP)	0,01	<b>-0,64</b>	0,30	-0,31	0,39	<b>0,46</b>	0,36	-0,30	0,08	0,25	0,21	1,00					
Velocidade de Propagação de Ondas de Tensão (VEL)	0,05	<b>0,64</b>	-0,29	0,30	-0,38	<b>-0,45</b>	-0,36	0,29	-0,08	-0,26	-0,22	-0,98	1,00				
Índice de Runkel (IR)	-0,17	<b>0,65</b>	<b>-0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>-0,56</b>	-0,87	-0,35	0,85	0,13	0,03	0,16	<b>-0,42</b>	<b>0,41</b>	1,00			
Fração Parede (FP)	-0,17	<b>0,67</b>	<b>-0,44</b>	<b>0,44</b>	-0,56	<b>-0,86</b>	-0,35	0,85	0,12	0,01	0,15	<b>-0,44</b>	<b>0,43</b>	1,00	1,00		
Coeficiente de Flexibilidade (CF)	0,19	<b>-0,66</b>	<b>0,46</b>	<b>-0,46</b>	0,58	0,87	0,36	<b>-0,84</b>	-0,13	-0,04	-0,17	<b>0,40</b>	-0,39	-0,99	-1,00	1,00	
Índice de Enfeltramento (IE)	-0,05	0,36	-0,25	0,25	-0,63	<b>-0,46</b>	0,63	-0,19	0,01	-0,11	-0,20	-0,00	-0,01	0,17	0,16	-0,17	1,00

Coeficientes de correlação destacados em negrito para p-valor  $\leq 5\%$

O Gráfico 14 apresenta os grupos de variáveis ou componentes principais obtidos a partir da matriz de correlação,

GRÁFICO 14 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TORAS 2



Os autovalores das componentes obtidas variaram de 6,9 a zero, sendo que as cinco primeiras componentes apresentaram autovalores superiores a 1 e, ao mesmo tempo, explicam 84,1 % da variação total (Tabela 29). Isso significa que as 17 variáveis ou propriedades da madeira consideradas para as segundas toras podem ser substituídas por estas cinco componentes, com perda apenas de 15,9 % de informação. Estas componentes foram retidas na análise para estudo dos fatores.

TABELA 29 - AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TORAS 2

FATOR	AUTOVALOR	VARIAÇÃO TOTAL (%)	VARIAÇÃO ACUMULADA (%)
1	6,95879	40,93	40,93
2	2,67905	15,76	56,69
3	2,01997	11,88	68,57
4	1,38000	8,12	76,69
5	1,25407	7,38	84,07

Na Tabela 30 são apresentados os fatores rotacionados, obtidos pelo método Varimax, e as variáveis que os compõem, com os respectivos níveis de importância.

TABELA 30 - MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS, OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TORAS 2

PROPRIEDADES	COMUNALIDADES	FATOR				
		1	2	3	4	5
Espessura da Parede	0,99408	<b>0,94756</b>	0,10774	0,11441	0,22914	0,07505
Índice de Runkel	0,99673	<b>0,91544</b>	0,17567	0,17895	-0,29017	0,04850
Fração Parede	0,99692	<b>0,91215</b>	0,19277	0,19837	-0,27794	0,04296
Coeficiente de Flexibilidade	0,99657	<b>-0,90447</b>	-0,21962	-0,15162	0,30062	-0,06162
Percentual de lenho Tardio	0,99442	0,22501	<b>0,94710</b>	0,11114	-0,13162	-0,12158
Densidade Básica	0,89811	0,39769	0,55170	0,50699	-0,39207	0,06698
Percentual de lenho Inicial	0,99431	-0,22277	<b>-0,94795</b>	-0,10826	0,13330	0,11993
Velocidade Prop. das Ondas	0,99423	0,21030	0,11552	<b>0,94172</b>	-0,11648	-0,13464
Tempo de Prop. das Ondas	0,99439	-0,21746	-0,12302	<b>-0,94036</b>	0,12136	0,12969
Largura das Fibras	0,99693	-0,24695	-0,19245	-0,20604	<b>0,91718</b>	0,05372
Diâmetro do Lume	0,99677	-0,62911	-0,22254	-0,21755	0,69959	0,01955
Número de Nós/m <sup>2</sup>	0,97527	0,03947	-0,06123	-0,15187	0,04516	<b>0,92736</b>
Área de Nós/m <sup>2</sup>	0,97137	0,17117	-0,21941	-0,11355	0,03187	<b>0,81888</b>
Comprimento de fibras	0,99830	-0,22594	-0,03548	-0,19756	0,11037	-0,03312
Índice de Enfeltramento	0,99659	0,02365	0,14529	-0,02591	-0,63390	-0,08700
Diâmetro de Nós	0,98771	0,09180	-0,05684	-0,06268	-0,04852	-0,01231
Diâmetro das Toras	0,99686	0,09850	-0,01713	0,02898	0,09939	-0,01594

As variáveis estudadas apresentaram comunalidades superiores a 0,8, indicando que grande parte da variação de cada variável pode ser explicada por fatores comuns. Os fatores obtidos são semelhantes aos grupos obtidos para as toras 1, com apenas inversão na ordem dos mesmos e na porcentagem de participação sobre a variação total.

O fator 1, denominado de Rigidez das Fibras, explica 40,9 % da variação total. Já o fator 2, chamado de Percentual de Lenhos, é responsável por 15,8 % da variação total.

O terceiro fator, que explica 11,9 % da variação total, foi dominado pela velocidade e tempo de propagação de ondas de tensão, denominado de Propriedades Acústicas. Análise dos coeficientes de correlação das propriedades deste fator indicou que a densidade básica é a variável que exerce maior influência sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, apresentando coeficiente de correlação de 0,51, seguida do diâmetro dos nós e largura das fibras, com coeficientes de -0,22 e -0,21, respectivamente.

O quarto fator, responsável por 8,1 % da variação total, foi dominado exclusivamente pela largura das fibras e foi chamado de Largura das Fibras. Esta variável é importante na produção de celulose/pasta e papel, estando relacionada às propriedades físicas e mecânicas destes produtos.

O fator 5, denominado Nós, foi dominado pelas variáveis número e área de nós, e explica 7,4 % da variação total.

Para as toras 2, as características anatômicas dominam totalmente os fatores 01 e 04, explicando 49 % da variação total. O tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, juntamente com os nós (número e área total), explicaram 19,3 % da variação total, sendo este percentual bastante significativo. Se a variabilidade entre as árvores amostradas fosse maior, o percentual de participação das propriedades acústicas e nós da madeira poderia ser maior.

#### 4.8.4 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Tábuas

Na Tabela 31 são apresentadas as correlações entre as propriedades avaliadas para as tábuas.

As correlações observadas para as propriedades densidade básica, percentual de lenhos (inicial e tardio), dimensões de fibras e suas relações avaliadas nas tábuas são as mesmas verificadas para as toras 2, uma vez que as tábuas foram obtidas a partir destas toras, utilizando-se, portanto, os mesmos valores para essas propriedades.

Correlação significativa e positiva foi detectada entre a densidade básica e a densidade aparente das tábuas (Tabela 31). Cabe ressaltar que a densidade básica é a massa específica da madeira determinada a 0% de umidade e a densidade aparente é a massa específica obtida a certa umidade e, no caso das tábuas secas ao ar, a umidade era de aproximadamente 15%. Esta relação também foi detectada por KLOCK (2000). Em função desta alta relação com a densidade básica, a densidade aparente também apresentou correlação com a largura das fibras, diâmetro do lume, índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade. O módulo de elasticidade, determinado a partir da densidade aparente, mostrou-se correlacionado com as mesmas propriedades e também com a espessura da parede das fibras.

TABELA 31 – CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS TÁBUAS

	DB	LI	LT	LF	DL	C	EP	DN	NN	AN	TPU	VEL U	TPS	VEL S	AG1	AG2	AG3	AGM	AGT	IR	FP	CF	IE	DA	EL
DB	1,00																								
LI	<b>-0,69</b>	1,00																							
LT	<b>0,69</b>	-1,00	1,00																						
LF	<b>-0,64</b>	0,39	-0,39	1,00																					
DL	<b>-0,72</b>	<b>0,47</b>	<b>-0,47</b>	<b>0,90</b>	1,00																				
C	-0,19	0,10	-0,10	0,19	0,31	1,00																			
EP	0,39	-0,28	0,29	-0,07	<b>-0,49</b>	-0,32	1,00																		
DN	-0,09	0,07	-0,08	-0,09	-0,12	-0,03	0,10	1,00																	
NN	-0,06	0,17	-0,17	0,12	0,07	-0,01	0,09	-0,22	1,00																
AN	-0,13	0,30	-0,30	0,07	-0,03	-0,15	0,22	0,44	0,68	1,00															
TPU	-0,11	0,06	-0,06	-0,19	-0,07	0,20	-0,24	0,10	0,05	0,07	1,00														
VELU	0,11	-0,06	0,06	0,19	0,07	-0,20	0,23	-0,08	-0,05	-0,07	-1,00	1,00													
TPS	-0,14	0,18	-0,18	-0,01	0,07	0,08	-0,21	0,09	0,14	0,22	<b>0,57</b>	<b>-0,55</b>	1,00												
VELS	0,16	-0,16	0,16	-0,08	-0,17	-0,14	0,26	-0,06	-0,20	-0,22	<b>-0,45</b>	<b>0,43</b>	-0,97	1,00											
AG1	-0,04	0,31	-0,31	0,05	0,11	0,13	-0,15	0,10	0,16	0,23	0,28	-0,26	0,36	-0,39	1,00										
AG2	-0,29	<b>0,45</b>	<b>-0,45</b>	0,05	0,07	0,22	-0,06	0,24	0,11	0,35	0,32	-0,30	<b>0,50</b>	<b>-0,50</b>	<b>0,73</b>	1,00									
AG3	-0,02	0,32	-0,32	0,05	0,05	0,10	-0,03	0,17	0,03	0,29	-0,01	0,03	0,32	-0,35	<b>0,60</b>	<b>0,72</b>	1,00								
AGM	-0,14	<b>0,41</b>	<b>-0,41</b>	0,05	0,08	0,17	-0,09	0,20	0,12	0,33	0,24	-0,21	<b>0,45</b>	<b>-0,47</b>	<b>0,87</b>	<b>0,93</b>	<b>0,86</b>	1,00							
AGT	-0,13	0,34	-0,34	0,01	0,14	0,20	-0,29	0,15	0,00	0,15	0,27	-0,25	<b>0,41</b>	<b>-0,43</b>	<b>0,86</b>	<b>0,83</b>	<b>0,72</b>	<b>0,91</b>	1,00						
IR	<b>0,65</b>	<b>-0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>-0,56</b>	-0,87	-0,35	0,85	0,13	0,03	0,16	-0,09	0,09	-0,14	0,23	-0,14	-0,05	-0,01	-0,08	-0,23	1,00					
FP	<b>0,67</b>	<b>-0,44</b>	<b>0,44</b>	-0,56	<b>-0,86</b>	-0,35	0,85	0,12	0,01	0,15	-0,11	0,11	-0,15	0,22	-0,13	-0,06	-0,02	-0,08	-0,23	1,00	1,00				
CF	<b>-0,66</b>	<b>0,46</b>	<b>-0,46</b>	0,58	0,87	0,36	<b>-0,84</b>	-0,13	-0,04	-0,17	0,07	-0,07	0,11	-0,18	0,14	0,05	0,01	0,07	0,23	-0,99	-1,00	1,00			
IE	0,36	-0,25	0,25	-0,63	<b>-0,46</b>	0,63	-0,19	0,01	-0,11	-0,20	0,30	-0,30	0,08	-0,06	0,06	0,14	0,04	0,10	0,15	0,17	0,16	-0,17	1,00		
DA	<b>0,72</b>	<b>-0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,63</b>	-0,31	0,36	0,10	-0,24	-0,18	0,02	0,00	-0,10	0,16	0,15	-0,10	-0,08	-0,01	0,08	<b>0,57</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,56</b>	0,19	1,00	
EL	<b>0,60</b>	-0,39	0,39	<b>-0,41</b>	<b>-0,53</b>	-0,30	<b>0,43</b>	0,02	-0,27	-0,25	-0,25	0,25	-0,66	0,72	-0,11	-0,37	-0,27	-0,29	-0,20	<b>0,54</b>	<b>0,54</b>	<b>-0,51</b>	0,09	0,80	1,00

DB: densidade básica; LI: percentual de lenho inicial; LT: percentual de lenho tardio; LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento; EP: espessura da parede; DN: diâmetro de nó; NN: número de nós/área; NA: área de nós; TPU: tempo das ondas – tábua úmida; VELU: velocidade das ondas – tábua úmida; TPS: tempo das ondas – tábua seca; VELS: velocidade das ondas – tábua seca; AG1: ângulo de grã ponto 1; AG2: ângulo de grã ponto 2; AG3: ângulo de grã ponto 3; AGM: ângulo de grã – média 3 pontos; AGT: ângulo de grã tábua inteira; IR: Índice de Runkel; FP: fração parede; IE: índice de enfeltramento; DA: densidade aparente; EL: módulo de elasticidade dinâmico. Coeficientes de correlação destacados em negrito para p-valor ≤ 5 %

A densidade básica e a densidade aparente não apresentaram correlação com o tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão determinados nas tábuas.

Observou-se também correlação do tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, determinados nas tábuas úmidas, com aqueles obtidos nas tábuas secas ao ar. Estas relações foram discutidas no item 4.4.4.

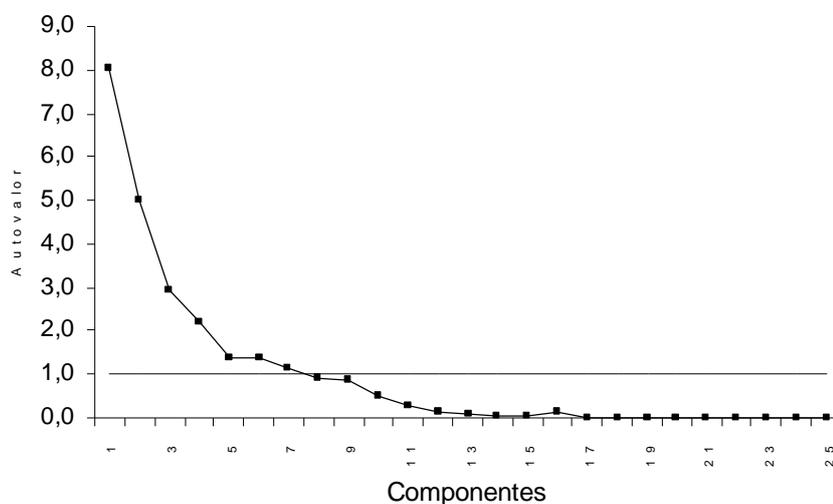
Quanto ao ângulo de grã, verificou-se correlação significativa entre todos os pontos estudados, porém, os maiores coeficientes foram observados entre a média do ângulo avaliado nos três pontos da tábua com o ponto 2 e entre este primeiro e o ângulo determinado para a tábua inteira. Isso indica que a determinação do ângulo de grã para a tábua inteira ou no ponto 02 representa bem a média dos 03 pontos avaliados.

O tempo e a velocidade de propagação de ondas de tensão determinados nas tábuas secas ao ar apresentaram correlações com o ângulo de grã do ponto 2, com a média dos três pontos avaliados e com o ângulo determinado na tábua inteira. Este resultado era esperado, pois quanto maior o ângulo de grã, maior é a inclinação das fibras em relação ao eixo principal da tábua ou do tronco, reduzindo a velocidade e aumentando o tempo de propagação das ondas, conforme visto na revisão de literatura.

Foram verificadas correlações significativas do percentual de lenho inicial e tardio com os ângulos de grã obtidos no ponto 2 e a média dos três pontos. Estas relações são devidas à variação dessas propriedades no sentido radial, discutidos no item 4.6, onde tanto o ângulo de grã (COWN, 1992; SILVA, 2002), quanto o percentual de lenho inicial, tendem a reduzir no sentido medula-casca, enquanto que o percentual de lenho tardio aumenta neste sentido. Os percentuais de lenho inicial e tardio também apresentaram correlação com a densidade aparente e o módulo de elasticidade dinâmico das tábuas.

No Gráfico 15 são apresentados os fatores obtidos na análise de componentes principais deste grupo estudado.

GRÁFICO 15 - COMPONENTES PRINCIPAIS, EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS TÁBUAS



As componentes obtidas apresentaram autovalores variando de 8,0 a zero. As sete primeiras componentes principais apresentaram autovalor superior a 1 e, ao mesmo tempo, acumulam 88,0 % da variação total (Tabela 32), sendo retidas na análise. Isso significa que as 25 variáveis ou propriedades da madeira consideradas para as tábuas podem ser substituídas por estas sete componentes, com perda de apenas 12,0 % de informação.

TABELA 32 - AUTOVALORES DAS SETE PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS, EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TÁBUAS

FATOR	AUTOVALOR	VARIAÇÃO TOTAL (%)	VARIAÇÃO ACUMULADA (%)
1	8,01704	32,07	32,07
2	5,02007	20,08	52,15
3	2,93229	11,70	63,85
4	2,19040	8,76	72,61
5	1,37382	5,50	78,11
6	1,36113	5,44	83,55
7	1,12560	4,50	88,05

Na Tabela 33 são apresentados os fatores rotacionados, obtidos pelo método Varimax e as variáveis que compõem cada fator, bem como seu grau de importância.

TABELA 33 - MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS, OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS TÁBUAS

PROPRIEDADES	COMUNALIDADES	FATOR						
		1	2	3	4	5	6	7
IR	0,99576	<b>0,95578</b>	-0,03976	0,23167	-0,01222	0,12597	-0,02509	0,04347
FP	0,99508	<b>0,95445</b>	-0,03524	0,25099	-0,03176	0,11869	-0,03525	0,03391
EP	0,89854	<b>0,88653</b>	-0,09216	-0,03819	-0,23880	-0,01310	-0,20967	0,03244
DL	0,91982	<b>-0,76253</b>	0,01746	-0,44284	-0,21715	-0,25137	-0,13480	-0,02410
CF	0,99632	<b>-0,95350</b>	0,04474	-0,26898	-0,00102	-0,07562	0,03630	-0,05394
AGM	0,98413	0,01574	<b>0,95907</b>	-0,15636	0,07148	-0,14689	0,06423	0,06771
AGT	0,93736	-0,19359	<b>0,93333</b>	-0,01934	0,15240	-0,01014	0,04901	-0,03579
AG1	0,86858	-0,12121	<b>0,89431</b>	0,00005	0,17512	0,05307	-0,06145	0,11539
AG2	0,90909	0,08085	<b>0,83756</b>	-0,29477	0,17438	-0,22290	0,13711	0,04642
AG3	0,81196	0,07002	<b>0,83436</b>	-0,09105	-0,19827	-0,21154	0,08250	0,02010
LT	0,88663	0,24312	-0,32387	<b>0,83035</b>	-0,07723	-0,06279	0,04889	-0,13804
DB	0,88316	0,47630	0,02074	<b>0,77107</b>	-0,04087	0,21740	0,04311	0,01184
DA	0,84550	0,41595	0,18660	0,54447	0,17272	0,46183	-0,23324	-0,20846
LF	0,77609	-0,43048	-0,02635	-0,52228	-0,36394	-0,31090	-0,26020	-0,01884
LI	0,88645	-0,24107	0,32515	<b>-0,83093</b>	0,07601	0,06336	-0,04925	0,13561
TPU	0,92625	-0,04482	0,11241	-0,02921	<b>0,93225</b>	-0,17136	0,10782	0,00884
VELU	0,91655	0,04227	-0,08891	0,04616	<b>-0,93066</b>	0,15905	-0,11392	-0,00884
EL	0,95078	0,38469	-0,09801	0,31878	-0,09262	<b>0,78984</b>	-0,14132	-0,19745
VELS	0,91866	0,14435	-0,39283	-0,09209	-0,36500	<b>0,76703</b>	0,04608	-0,10229
TPS	0,91790	-0,04889	0,35993	0,04131	0,50934	<b>-0,71880</b>	-0,06905	0,05284
IE	0,97830	0,11890	0,10548	0,32691	0,28725	0,11745	<b>0,86380</b>	-0,05719
C	0,84069	-0,28178	0,09980	-0,12767	0,00963	-0,14310	<b>0,84025</b>	-0,06465
NN	0,96816	0,03218	0,03640	-0,08313	0,02143	-0,11905	-0,02011	<b>0,94348</b>
AN	0,96248	0,18482	0,20647	-0,20782	0,00055	-0,14628	-0,14017	<b>0,78371</b>
DN	0,96107	0,09880	0,13018	-0,04952	0,04460	-0,00927	-0,02520	-0,04240

IR: Índice de Runkel; FP: fração parede; EP: espessura da parede; DL: diâmetro do lume; CF: coeficiente de flexibilidade; AGM: ângulo de grã médio da tábuas; AGT: ângulo de grã da tábuas inteira; AG1: ângulo de grã ponto 1; AG2: ângulo de grã ponto 2; AG3: ângulo de grã ponto 3; LT: percentual de lenho tardio; DB: densidade básica; DA: densidade aparente; LF: largura das fibras; LI: percentual de lenho inicial; TPU: tempo das ondas determinado nas tábuas úmidas; VELU: velocidade das ondas determinada nas tábuas úmidas; EL: módulo de elasticidade dinâmico; VELS: velocidade determinada nas tábuas secas ao ar; TPS: tempo das ondas determinado nas tábuas secas ao ar; IE: índice de enfretamento; C: comprimento das fibras; NN: número de nós; AN: Área de nós; DN: diâmetro dos nós.

Todas as variáveis estudadas apresentam alta comunalidade, sendo mantidas na análise. Como verificado para os grupos anteriores (árvore em pé, toras 1 e 2), o principal fator (fator 1), que explica 32,1 % da variação total das tábuas, está associado às características anatômicas espessura da parede das fibras, índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade, apresentando altos coeficientes de correlação. Além destas propriedades este fator está associado em menor grau com o diâmetro do lume. Como visto na análise de fatores rotacionados para as árvores, item 4.8.1, a espessura da parede, o índice de Runkel e a fração parede, apresentam relação direta com a rigidez da fibra e o coeficiente de flexibilidade é inversamente proporcional a estas variáveis, assim como o diâmetro

do lume das fibras. Como o inverso do coeficiente de flexibilidade pode ser traduzido como rigidez das fibras, este fator também foi denominado de Rigidez das Fibras.

O fator 2, responsável por 20,1 % da variação total, foi totalmente dominado pelos ângulos de grã, determinados nos diferentes pontos da tábua, com maior participação do ângulo avaliado na tábua inteira e ângulo médio entre os três pontos estudados, uma vez que apresentam os maiores coeficientes de correlação. Este fator foi denominado de Ângulo de Grã, estando associado à qualidade dos produtos laminados e serrados.

O terceiro fator, que compõe 11,7 % da variação total, foi dominado pelo lenho inicial e tardio, e pela densidade básica da madeira. Conforme revisão de literatura e correlações obtidas nos grupos anteriores, o percentual de lenho tardio apresenta relação direta com a densidade básica e é inversamente proporcional ao percentual de lenho inicial. Este fator foi chamado de Percentual de Lenhos e Densidade Básica. No setor de celulose/pasta e papel, estas variáveis estão associadas ao rendimento e qualidade dos produtos e, no setor de laminados e serrados estão associados à aparência e qualidade, podendo influenciar também na produção. Grandes variações no percentual de lenhos podem gerar problemas de ondulação das lâminas de madeira durante o processo de secagem.

No quarto fator, responsável por 8,7 % da variação total, verifica-se a dominância do tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, determinados nas tábuas úmidas. Este fator foi denominado de Propriedades Acústicas - condição úmida. Analisando os coeficientes de correlação deste grupo de variáveis, observou-se que a largura das fibras é a propriedade que exerceu maior influência sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, avaliados nas tábuas úmidas, apresentando coeficiente de correlação de -0,36, seguida do índice de enfiamento e espessura da parede das fibras, com coeficientes de correlação de -0,29 e -0,24, respectivamente.

O fator 5, responsável por 5,5 % da variação total, está associado às variáveis tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão, determinados nas tábuas secas ao ar e, ao módulo de elasticidade. Como o módulo de elasticidade foi obtido através da densidade aparente da madeira e da velocidade de propagação das ondas de tensão, conforme apresentado na metodologia, pode-se dizer que esta última variável tem maior peso sobre o fator 5. Portanto, as três variáveis possuem

relação direta entre si, sendo o tempo de propagação de ondas inversamente proporcional às outras duas propriedades. Este fator foi denominado de Propriedades acústicas - condição seca ao ar e Módulo de Elasticidade. Na condição seca ao ar, verificou-se que a densidade aparente das tábuas é a propriedade que exerce maior influência sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas, com coeficiente de correlação de 0,46, seguida do diâmetro do lume e ângulo de grã determinado no ponto 2, com coeficientes de correlação de  $-0,31$  e  $-0,25$ , respectivamente. A influência do módulo de elasticidade foi desconsiderada, uma vez que é resultante da fórmula de determinação do mesmo.

De acordo com os fatores rotacionados, as propriedades acústicas da madeira, determinadas nas tábuas úmidas, explicaram um percentual maior da variação total quando comparada com aquelas determinadas nas tábuas secas ao ar.

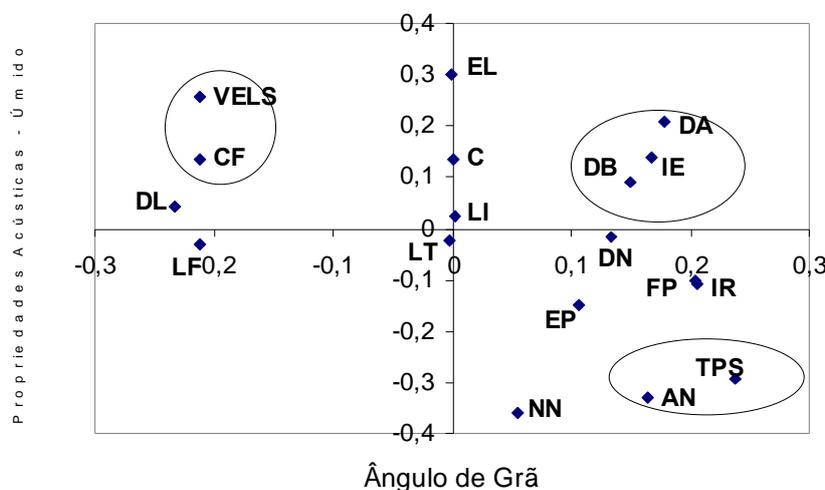
O fator 6 explica 5,4 % da variação total e está associado às variáveis anatômicas comprimento de fibras e índice de enfeltramento. O índice de enfeltramento é determinado pela divisão entre o comprimento e a largura das fibras. Sendo assim, há uma maior contribuição do comprimento de fibras neste fator, que apesar disso, foi denominado de Comprimento de Fibras e Índice de Enfeltramento.

Finalmente, o fator 7, que explica 4,5 % da variação total, foi composto pelas variáveis número e área total de nós e foi chamado de Nós.

De uma maneira geral, houve uma redução na participação das características anatômicas na variabilidade total devido ao processamento (traçamento e desdobro) da madeira, caindo de 65,1 % das árvores em pé (item 4.8.1) para 55,6 % e 49 % para as toras 1 e 2 (itens 4.8.2 e 4.8.3), respectivamente e para 37,5 % nas tábuas. Juntos, o ângulo de grã, as propriedades acústicas e os nós da madeira explicam 38,8 % da variabilidade total.

Com o objetivo de verificar outras relações entre as propriedades através de agrupamentos, especialmente entre propriedades acústicas, nós e ângulo de grã, foi elaborado o Gráfico 16, relacionando as propriedades acústicas da madeira, determinadas na condição úmida (Fator 4), e o ângulo de grã (fator 2).

GRÁFICO 16 – RELAÇÕES ENTRE OS FATORES PROPRIEDADES ACÚSTICAS DA MADEIRA- CONDIÇÃO ÚMIDA E ÂNGULO DE GRÃ



LI: percentual de lenho inicial; LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento das fibras; IE: índice de enfiamento; DN: diâmetro dos nós; DB: densidade básica; LT: percentual de lenho tardio; EP: espessura da parede das fibras; IR: índice de Runkel; CF: coeficiente de flexibilidade; VELS: velocidade de propagação das ondas na condição seca ao ar; TPS: tempo de propagação das ondas na condição seca ao ar; NN: número de nós; AN: área de nós; DA: densidade aparente; EL: módulo de elasticidade dinâmico.

No primeiro quadrante do gráfico (eixos positivo e negativo), verificou-se agrupamento da velocidade de propagação de ondas de tensão, determinada para as tábuas secas ao ar, com o coeficiente de flexibilidade. Apesar de não ter sido observada relação significativa entre ambos na tabela de correlação (Tabela 31), este agrupamento indica que as duas propriedades possuem relação entre si, confirmada, anteriormente, nas correlações entre as propriedades do grupo árvores em pé (Tabela 22). Estas propriedades também se relacionam às variáveis que compõem os eixos (tempo e velocidade das ondas – condição úmida e ângulos de grã), tendo sido observadas também na Tabela 31.

No segundo quadrante (eixos positivos), notou-se o agrupamento das variáveis densidade básica, densidade aparente e índice de enfiamento. A relação entre densidade básica e densidade aparente também foi detectada e discutida na tabela de correlação (Tabela 31). Já, a relação entre ambas as densidades (básica e aparente) e o índice de enfiamento, apesar de não ter sido observada nas tabela de correlação, diz respeito à variação radial destas propriedades, pois todas tendem a aumentar no sentido medula-casca. Além destas relações, as três variáveis estão relacionadas às propriedades que compõem os eixos do gráfico, o tempo e

velocidade de propagação das ondas, determinados nas tábuas úmidas, mencionadas no item 4.8.1, e os ângulos de grã. As relações da densidade básica, densidade aparente e índice de enfiletramento com o ângulo de grã são indiretas, sendo que as três primeiras propriedades aumentam e o ângulo de grã reduz no sentido medula-casca.

No terceiro quadrante (positivo e negativo), observou-se relação do tempo de propagação de ondas de tensão determinado nas tábuas secas ao ar com a área total de nós, já discutidas na Tabela 24, item 4.8.1. Quanto às relações destas variáveis com os eixos, apenas a relação área de nós e ângulo de grã não foi ainda mencionada, sendo uma relação indireta, já que ambos reduzem no sentido radial.

Além destes agrupamentos, observou-se que o número de nós encontra-se isolado e distante dos eixos. Isso significa que, além de estar relacionado às variáveis que compõem os eixos, esta propriedade contribui muito para a variação total, dentro do grupo de variáveis analisado para as tábuas.

#### 4.8.5 Inter-relações entre as Propriedades Avaliadas para as Lâminas

Na Tabela 34 são apresentadas as correlações entre as propriedades avaliadas para as lâminas. Para efeito de correlação, identificou-se a região do tronco as quais pertenciam as lâminas avaliadas (madeira juvenil, de transição ou adulta).

As correlações observadas para as propriedades densidade básica, percentual de lenho (inicial e tardio), dimensões de fibras e suas relações, também foram registradas para as árvores em pé e para as toras, discutidas no item 4.8.1 e na revisão de literatura.

Além das correlações mencionadas acima, também foram detectadas correlações significativas dos percentuais de lenhos inicial e tardio com o diâmetro e número de nós, sendo positivas para o lenho inicial e negativas para o lenho tardio. Como relatado no item 4.8.3, ambas as propriedades reduzem no sentido radial, enquanto que o percentual de lenho tardio aumenta.

TABELA 34 - CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS

PROPRIEDADES	DB	LI	LT	LF	DL	C	EP	DN	NN	AN	TPL	VELL	TPT	VELT	IR	FP	CF	IE
Densidade Básica (DB)	1,00																	
Percentual de lenho Inicial (LI)	<b>-0,46</b>	1,00																
Percentual de lenho Tardio (LT)	<b>0,46</b>	-1,00	1,00															
Largura da Fibra (LF)	<b>-0,49</b>	0,23	-0,23	1,00														
Diâmetro do Lume (DL)	<b>-0,73</b>	0,31	-0,31	<b>0,88</b>	1,00													
Comprimento de Fibras (C)	-0,12	-0,18	0,18	0,10	0,12	1,00												
Espessura da Parede das Fibras (EP)	<b>0,51</b>	-0,18	0,18	0,22	-0,26	-0,02	1,00											
Diâmetro de Nós (DN)	-0,02	0,10	-0,10	-0,09	0,07	0,13	-0,32	1,00										
Número de Nós (NN)	0,03	<b>0,73</b>	<b>-0,73</b>	-0,08	-0,13	-0,39	0,09	-0,09	1,00									
Área de Nós (AN)	0,04	<b>0,73</b>	<b>-0,73</b>	-0,19	-0,15	-0,24	-0,10	0,32	0,80	1,00								
Tempo Propagação Ondas – longitudinal (TPL)	0,03	0,02	-0,02	-0,22	-0,16	<b>0,43</b>	-0,12	0,17	0,02	0,10	1,00							
Velocidade de Propagação Ondas – longitudinal (VELL)	0,01	-0,01	0,01	0,09	0,04	<b>-0,45</b>	0,10	-0,02	0,06	-0,03	-0,74	1,00						
Tempo Propagação Ondas – transversal (TPT)	-0,29	0,19	-0,19	0,16	0,21	<b>0,46</b>	-0,10	0,23	-0,04	0,07	<b>0,42</b>	-0,02	1,00					
Velocidade de Propagação Ondas – transversal (VELT)	0,34	-0,17	0,17	-0,21	-0,31	<b>-0,63</b>	0,22	-0,10	0,07	-0,09	<b>-0,57</b>	<b>0,66</b>	-0,58	1,00				
Índice de Runkel (IR)	<b>0,78</b>	-0,32	0,32	<b>-0,45</b>	-0,81	-0,09	0,77	-0,26	0,12	0,01	0,01	0,03	-0,21	0,37	1,00			
Fração Parede (FP)	<b>0,78</b>	-0,30	0,30	-0,44	-0,80	-0,12	0,77	-0,29	0,16	0,02	0,03	0,05	-0,26	0,38	0,99	1,00		
Coefficiente de Flexibilidade (CF)	<b>-0,76</b>	0,30	-0,30	0,44	0,80	0,09	<b>-0,77</b>	0,30	-0,14	-0,00	-0,01	-0,02	0,23	-0,36	-0,99	-1,00	1,00	
Índice de Enfeltramento (IE)	0,39	-0,30	0,30	-0,80	<b>-0,69</b>	0,51	-0,19	0,16	-0,12	0,04	0,49	-0,38	0,13	-0,19	0,34	0,31	-0,32	1,00

Coefficientes de correlação destacados em negrito para p-valor  $\leq 5\%$

O tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão, determinados no sentido longitudinal e transversal, também apresentaram correlação, confirmando resultado apresentado no item 4.4.4.

Relação negativa significativa foi observada entre o comprimento de fibras e a velocidade de propagação das ondas de tensão, determinados no sentido transversal da lâmina. Teoricamente, a onda ao encontrar o espaço vazio do lume tende a percorrer longitudinalmente a parede da fibra para então se propagar para outras células/fibras. No sentido longitudinal, isto é, na direção da grã, esperava-se uma correlação positiva, pois a onda se propaga rapidamente ao longo da fibra, através da parede. Entretanto, o valor obtido mostrou-se negativo, podendo ter sido influenciado pelas interferências do ambiente nas medições e a alta variação.

O Gráfico 17 apresenta os fatores obtidos na análise de componentes principais para as propriedades avaliadas nas lâminas. As componentes obtidas apresentam autovalores variando de 6,0 a zero. As cinco primeiras componentes apresentaram autovalor superior a 1 e, ao mesmo tempo, explicam 88,0 % da variação total (Tabela 35). Isso significa que as 18 variáveis ou propriedades das lâminas podem ser substituídas por estas cinco componentes, com perda de apenas 12,0 % da variação total. Estas sete componentes foram retidas na análise para avaliação dos fatores.

GRÁFICO 17 - COMPONENTES PRINCIPAIS EXTRAÍDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA AVALIADAS PARA AS LÂMINAS

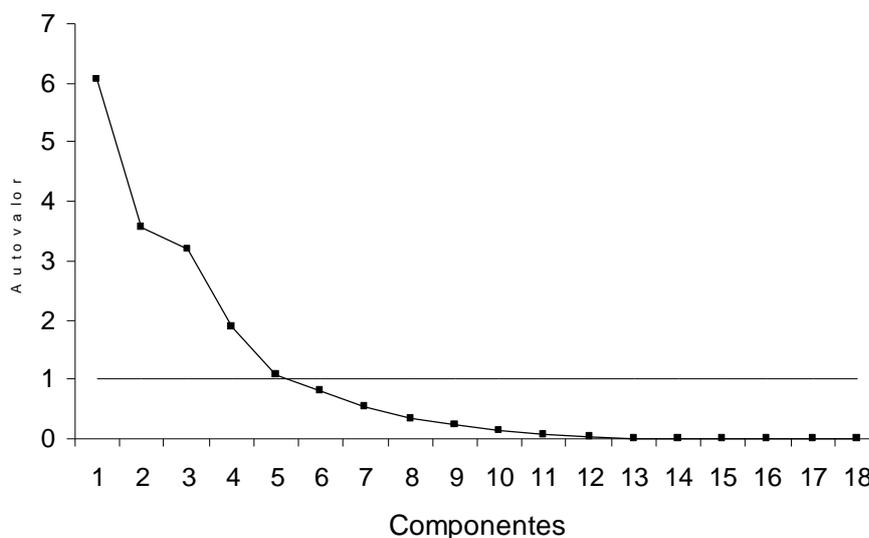


TABELA 35 - AUTOVALORES DAS CINCO PRIMEIRAS COMPONENTES PRINCIPAIS, OBTIDAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS

FATOR	AUTOVALOR	VARIAÇÃO TOTAL (%)	VARIAÇÃO ACUMULADA (%)
1	6,07377	33,74	33,74
2	3,58152	19,90	53,64
3	3,19558	17,75	71,39
4	1,89941	10,55	81,94
5	1,09259	6,07	88,01

Na Tabela 36 são apresentados os fatores rotacionados, obtidos através do método Varimax, e as variáveis que compõem estes fatores, com seus respectivos graus de importância.

TABELA 36 - MATRIZ DOS FATORES ROTACIONADOS, OBTIDOS ATRAVÉS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES AVALIADAS PARA AS LÂMINAS

PROPRIEDADES	COMUNALIDADES	FATOR				
		1	2	3	4	5
Índice de Runkel	0,99493	<b>0,95210</b>	-0,05584	-0,27043	0,03241	-0,05280
Fração parede	0,99275	<b>0,94918</b>	-0,02894	-0,25690	0,05722	-0,09156
Espessura da parede	0,99353	<b>0,90689</b>	-0,04477	0,38885	0,05355	0,02295
Densidade básica	0,92282	<b>0,74308</b>	-0,18203	-0,32802	0,00073	-0,15807
Coefficiente de flexibilidade	0,99161	<b>-0,94770</b>	0,04097	0,26197	-0,02367	0,06353
Percentual de lenho inicial	0,98166	-0,23043	<b>0,92354</b>	0,17994	-0,01301	0,06665
Número de nós	0,91332	0,16070	<b>0,89648</b>	-0,05105	0,01213	-0,01560
Área total de nós	0,95850	0,03730	<b>0,89367</b>	-0,16819	-0,03242	0,00288
Percentual de lenho tardio	0,98227	0,22945	<b>-0,92415</b>	-0,18007	0,01431	-0,06690
Largura das fibras	0,99092	-0,18862	0,00677	<b>0,96293</b>	0,03905	0,07457
Diâmetro do lume	0,98744	-0,62171	0,02287	<b>0,76408</b>	0,01313	0,06488
Índice de enfiamento	0,98826	0,14853	-0,13043	<b>-0,84631</b>	-0,28167	0,08013
Velocidade das ondas - L	0,97718	0,03142	-0,00433	0,06928	<b>0,94455</b>	0,16684
Velocidade das ondas - T	0,93646	0,29614	-0,09025	-0,12324	0,63319	-0,38501
Tempo prop. das ondas - L	0,95465	0,01487	0,01765	-0,23338	<b>-0,86858</b>	0,34949
Tempo prop. das ondas - T	0,98911	-0,13755	0,07877	0,04655	-0,12686	<b>0,94427</b>
Comprimento das fibras	0,97397	-0,04591	-0,24225	-0,03683	-0,34342	0,27239
Diâmetro de nós	0,98658	-0,20869	0,07017	-0,08792	-0,03303	0,09293

L: longitudinal; T: transversal.

Todas as variáveis estudadas para as lâminas apresentaram altas comunalidades, sendo mantidas na análise de fatores rotacionados. Observou-se que o fator 1, o qual explicou 33,7 % da variação total, foi associado com as variáveis espessura da parede das fibras, índice de Runkel, fração parede, coeficiente de flexibilidade e com a densidade básica, sendo que esta última

propriedade aparece pela primeira vez no fator 1. Este fator foi denominado de Rigidez das Fibras e Densidade Básica.

O fator 2, responsável por 19,9 % da variação total, foi dominado pelo percentual de lenho inicial e tardio e pelo número e área de nós. A associação verificada entre estas propriedades foi explicada na tabela de correlação (Tabela 34) e está relacionada ao comportamento destas variáveis na madeira juvenil e adulta. Este fator foi denominado de Percentual de lenhos e Nós. Estas propriedades são importantes na obtenção de produtos, tais como, laminados e serrados.

O terceiro fator, que compõe 17,7 % da variação total, é dominado pelo diâmetro do lume, largura da fibra e índice de enfiletramento. Como o índice de enfiletramento é determinado através da divisão entre o comprimento e a largura das fibras, concluiu-se que a largura da fibra é a principal propriedade deste fator. A largura das fibras apresenta relação positiva com o diâmetro do lume, conforme mencionado no item 4.8.1, e a relação dessas duas variáveis resulta no coeficiente de flexibilidade, denominando-se este fator de Flexibilidade das Fibras e Índice de enfiletramento.

No quarto fator, responsável por 10,5 % da variação total, verificou-se a dominância do tempo e velocidade e tempo de propagação das ondas de tensão, determinados no sentido longitudinal das lâminas, sendo chamado de Propriedades acústicas Longitudinais. Análise dos coeficientes de correlação das variáveis pertencentes a esse grupo, indicou que o comprimento de fibras é a variável que exerce maior influência sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão, apresentando coeficiente de correlação de - 0,34, seguida do índice de enfiletramento, com coeficiente de - 0,28.

Finalmente, o fator 5 foi dominado integralmente pela variável tempo de propagação das ondas de tensão, determinadas no sentido transversal das lâminas. Este fator, responsável por 6,1 % da variação total, foi chamado pela própria variável, Tempo de Propagação das Ondas de Tensão Transversais. Verificou-se, também neste caso, a maior influência do comprimento de fibras sobre o tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão.

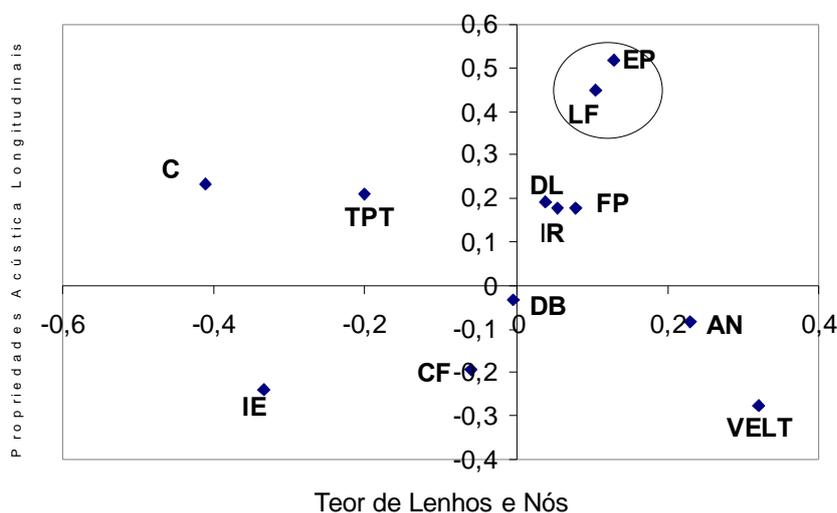
Conforme apresentado, as propriedades acústicas da madeira, determinadas no sentido longitudinal das lâminas, isto é, no sentido de disposição das fibras no tronco das árvores, explicaram um percentual maior da variação total,

quando comparadas às propriedades acústicas determinadas no sentido transversal às fibras.

De uma maneira geral, as características anatômicas explicaram 51,4 % da variação total do conjunto de propriedades avaliadas para as lâminas. O percentual de lenhos, as propriedades acústicas e os nós da madeira, juntos, explicaram o restante da variação total (48,6 %).

Relação gráfica foi realizada com os fatores Percentual de lenhos e Nós e Propriedades Acústicas Longitudinais. O resultado é apresentado no Gráfico 18.

GRÁFICO 18 - RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS DOS FATORES PERCENTUAIS DE LENHOS E NÓS COM AS PROPRIEDADES ACÚSTICAS LONGITUDINAIS DA MADEIRA - LÂMINAS



LF: largura das fibras; DL: diâmetro do lume; C: comprimento das fibras; IE: índice de enfileiramento; DB: densidade básica; EP: espessura da parede das fibras; IR: índice de Runkel; CF: coeficiente de flexibilidade; VELT: velocidade de propagação das ondas no sentido transversal; TPT: tempo de propagação das ondas no sentido transversal; AN: área de nós.

Observou-se um agrupamento entre a espessura da parede e a largura das fibras no quadrante positivo do gráfico. As duas propriedades apresentaram relação negativa, entretanto, ambas contribuem positivamente para a variação total do conjunto de propriedades. Estas variáveis estão relacionadas com as propriedades que compõem os eixos do Gráfico 17, o tempo e velocidade de propagação de ondas de tensão, neste caso determinado no sentido longitudinal das lâminas, e com

os percentuais de lenho inicial e tardio e a freqüência e área total de nós. Todas estas relações já foram discutidas anteriormente.

Isoladamente e distantes dos eixos, dispostos praticamente na diagonal dos quadrantes, encontram-se o comprimento de fibras e o índice de enfiamento e, em sentidos opostos, estão o tempo e a velocidade de propagação de ondas de tensão determinados no sentido transversal das lâminas, pois são inversamente proporcionais. Estas variáveis contribuem muito para a variação total e também estão relacionadas com as propriedades que compõem os eixos do gráfico.

#### 4.9 REGRESSÃO PARA AS VARIÁVEIS AVALIADAS

Selecionaram-se os melhores modelos, combinados ou não às variáveis independentes tempo e velocidades das ondas, desde que significativos, considerando-se a possibilidade de utilização de uma ou outra ou de ambas na estimativa das demais propriedades. No que diz respeito às dimensões de fibras e suas relações, foram testados modelos apenas para aquelas consideradas mais importantes para a produção de celulose/pasta. Com relação aos percentuais de lenhos, optou-se pela apresentação de modelo apenas para o lenho tardio, já que ambos somam 100 % na madeira, podendo-se obter o lenho inicial por diferença. Os resultados são apresentados em subitens, de acordo com o processo de avaliação do material.

##### 4.9.1 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Árvores

Na Tabela 37 são apresentados os modelos de regressão linear polinomiais para estimar as propriedades das árvores em pé, através das propriedades não destrutivas tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão e o DAP.

Todos os modelos apresentados foram significativos a 1 % de probabilidade. Observou-se que o DAP não está presente nos modelos mais importantes para estimar as propriedades da madeira de árvores em pé, através de variáveis não destrutivas.

TABELA 37 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NA ÁRVORE EM PÉ

PROPRIEDADE	MODELO	R <sup>2</sup>	F (1%)	CV (%)
Densidade básica	$Y = 7,046.10^{-4}.TP - 2,275.10^{-7}.TP^2$	0,9980	5748,85	4,7
	$Y = 9,906.10^{-4}.VEL - 3,860.10^{-7}.VEL^2$	0,9977	5022,72	5,0
Espessura da parede	$Y = 9,560.10^{-3}.TP - 2,930.10^{-6}.TP^2$	0,9945	2077,88	7,8
	$Y = 0,016.VEL - 7,870.10^{-6}.VEL^2$	0,9946	2120,50	7,7
Comprimento das fibras	$Y = 3,67.10^{-3}.TP - 8,920.10^{-7}.TP^2$	0,9987	8740,77	3,8
	$Y = 0,011.VEL - 7,770.10^{-6}.VEL^2$	0,9986	8382,83	3,9
Coeficiente de flexibilidade	$Y = 0,059.TP - 1,200.10^{-5}.TP^2$	0,9989	10038,10	3,5
	$Y = 0,220.VEL - 1,7.10^{-4}.VEL^2$	0,9989	10073,30	3,5
% Lenho tardio	$Y = 0,064.TP - 2,13.10^{-5}.TP^2$	0,9913	1305,50	9,8
	$Y = 0,062.VEL$	0,9914	2760,80	9,5
Diâmetro dos nós	$Y = 2,880.10^{-3}.TP - 1,09.10^{-6}.TP^2$	0,9060	110,83	33,9
	$Y = 2,120.10^{-3}.VEL$	0,8968	208,60	34,7
Número de nós	$Y = 0,0526.TP - 9,590.10^{-6}.TP^2$	0,9151	123,91	31,9
	$Y = 0,020.VEL$	0,9160	261,71	31,1
Área de nós	$Y = 0,101.TP - 4,010.10^{-5}.TP^2$	0,8638	72,93	42,01
	$Y = 8,800.10^{-5}.VEL^2$	0,8559	142,56	42,3

TP: tempo de propagação das ondas; VEL: velocidade das ondas; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) dos principais modelos apresentados são altos, com valores acima de 0,85. Os modelos apresentam-se bem ajustados, com alta precisão na estimativa das propriedades anatômicas, densidade básica e percentual de lenho tardio. Para as variáveis diâmetro, número e área de nós, apesar de bem ajustados, com altos valores de F, significativos a 1 % de probabilidade, os modelos apresentaram altos coeficientes de variação, o que sugere a necessidade de análise de um maior número de árvores para melhorar a confiabilidade na estimativa destas variáveis através dos modelos propostos.

Os modelos apresentados permitem a estimativa das propriedades avaliadas para as árvores em pé, a partir do tempo de propagação das ondas ou da velocidade, ou ainda de ambos juntos.

Os resultados obtidos são de suma importância tanto para o setor Florestal, quanto Industrial, indicando que é possível se fazer uma seleção prévia das características desejáveis das árvores, antes do abate, para diferentes produtos, prevendo-se, antecipadamente, a produção e as características do produto final,

reduzindo-se tempo e custo de análises e, ao mesmo tempo, escolhendo-se a melhor utilização dos povoamentos existentes.

#### 4.9.2 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Toras 1

Os modelos para estimar as propriedades físicas, anatômicas, morfológicas e os defeitos diâmetro, número e área de nós das toras 1, através das propriedades não destrutivas tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão e o diâmetro das toras são apresentados na Tabela 38.

TABELA 38 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 1

PROPRIIDADE	MODELO	R <sup>2</sup>	F (1%)	CV (%)
Densidade básica	$Y = 1,100.10^{-3}.TP - 5,355.10^{-8}.TP^2$	0,9974	4337,6	5,4
	$Y = 3,266.10^{-4}.VEL - 4,358.10^{-8}.VEL^2$	0,9971	3940,38	5,6
Espessura da parede	$Y = 0,016.TP - 7,810.10^{-6}.TP^2$	0,9946	2120,67	7,7
	$Y = 3,320.10^{-3}.VEL$	0,9939	3900,14	8,0
	$Y = 4,657.10^{-7}.VEL^2 + 0,229.D + 2,450.10^{-3}.D^2$	0,9953	1542,80	7,3
Comprimento das fibras	$Y = 6,010.10^{-3}.TP - 2,390.10^{-6}.TP^2$	0,9987	8683,58	3,8
	$Y = 3,490.10^{-3}.VEL - 8,086.10^{-7}.VEL^2$	0,9987	8675,43	3,8
Coeficiente flexibilidade	$Y = 0,096.TP - 3,272.10^{-5}.TP^2$	0,9985	7909,31	4,0
	$Y = 0,0704.VEL - 1,789.10^{-5}.VEL^2$	0,9985	7466,76	4,1
% Lenho tardio	$Y = 0,097.TP - 5,012.10^{-5}.TP^2$	0,9900	1139,60	10,5
	$Y = 0,020.VEL$	0,9895	2270,81	10,5
Diâmetro dos nós	$Y = 4,680.10^{-3}.TP - 2,870.10^{-6}.TP^2$	0,9045	108,92	34,1
	$Y = 6,818.10^{-4}.VEL$	0,8977	210,54	34,6
Número de nós	$Y = 0,012.TP$	0,8949	204,40	34,8
	$Y = 6,350.10^{-3}.VEL$	0,9042	226,42	33,2
Área de nós	$Y = 0,154.TP - 9,697.10^{-5}.TP^2$	0,8573	69,07	43,0
	$Y = 9,080.10^{-6}.VEL^2$	0,8491	135,03	43,3

TP: tempo de propagação das ondas; VEL: velocidade das ondas; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação da equação; D: diâmetro das toras.

Os modelos apresentados foram significativos a 1 % de probabilidade. Aqueles obtidos para as propriedades avaliadas nas toras 1 são os mesmos determinados nas árvores em pé (Tabela 37), com diferenças apenas nos coeficientes das variáveis independentes, apresentando altos coeficientes de

determinação ( $R^2$ ), com valores iguais ou acima de 0,85. Os modelos estão bem ajustados, com alta precisão na estimativa das propriedades anatômicas, densidade básica e percentual de lenho tardio. Quanto ao diâmetro, número e área de nós, os modelos, apesar de bem ajustados e significativos a 1 % de probabilidade, apresentaram altos coeficientes de variação, indicando a necessidade de avaliação de um número maior de toras para melhoria da confiabilidade na estimativa destas variáveis através dos modelos propostos.

Observou-se que entre os modelos mais importantes, o diâmetro das toras esteve presente em apenas um deles, estimando a espessura da parede das fibras, podendo, inclusive ser substituído pelos outros dois compostos pelo tempo e velocidade de propagação das ondas, com mesmo nível de importância.

Os modelos apresentados permitem a estimativa das propriedades avaliadas para as primeiras toras, próximas à base das árvores, a partir das propriedades não destrutivas tempo e velocidade de propagação das ondas, indicando a possibilidade de uma seleção de toras através da estimativa das características desejáveis, prevendo-se a produção e qualidade dos produtos a serem obtidos.

#### 4.9.3 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Toras 2

Comparando-se os modelos apresentados para as toras 2 (Tabela 39) com as toras 1 (Tabela 38), verificou-se que são os mesmos para as propriedades densidade básica, dimensões e coeficiente de flexibilidade das fibras, e percentual de lenhos. Entretanto, foram observadas algumas diferenças entre os modelos obtidos para o diâmetro, número e área de nós. Todos os modelos apresentados para as propriedades da madeira avaliadas para as toras 2 são significativos a 1 % de probabilidade, com valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,77. Os modelos estão bem ajustados, com alta precisão na estimativa das propriedades anatômicas, densidade básica e percentual de lenho tardio. Mantendo-se o resultado das árvores em pé e toras 1, os modelos obtidos para o diâmetro, número e área de nós das toras 2, apesar de bem ajustados e significativos a 1 % de probabilidade, apresentaram altos coeficientes de variação, indicando a necessidade de avaliação de um número maior de toras para melhoria da confiabilidade na estimativa destas variáveis através desses modelos propostos.

TABELA 39 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TORAS 2

PROPRIEDADE	MODELO	R <sup>2</sup>	F (1%)	CV (%)
Densidade básica	$Y = 1,220.10^{-3}.TP - 6,933.10^{-7}.TP^2$	0,9975	4503,34	5,3
	$Y = 2,094.10^{-4}.VEL$	0,9974	9376,43	5,6
Espessura parede	$Y = 0,016.TP - 8,460.10^{-6}.TP^2$	0,9951	2314,49	7,3
	$Y = 3,270.10^{-3}.VEL$	0,9944	4288,57	7,6
Comprimento das fibras	$Y = 5,590.10^{-3}.TP - 1,900.10^{-6}.TP^2$	0,9982	6382,09	4,4
	$Y = 4,020.10^{-3}.VEL - 1,010.10^{-6}.VEL^2$	0,9982	6354,81	4,4
Coeficiente flexibilidade	$Y = 0,098.TP - 3,317.10^{-5}.TP^2$	0,9985	7905,46	4,0
	$Y = 0,071.VEL - 1,789.10^{-5}.VEL^2$	0,9985	7790,62	4,0
% Lenho tardio	$Y = 0,092.TP - 5,099.10^{-5}.TP^2$	0,9889	1024,88	11,0
	$Y = 0,017.VEL$	0,9886	2086,47	10,9
Diâmetro dos nós	$Y = 3,290.10^{-3}.TP$	0,9408	381,63	25,6
	$Y = 1,620.10^{-3}.VEL$	0,9375	360,00	26,3
Número de nós	$Y = 8,060.10^{-6}.TP^2$	0,8362	122,55	45,5
	$Y = 4,500.10^{-3}.VEL$	0,8145	105,35	48,4
Área de nós	$Y = 1,035.10^{-4}.TP^2$	0,7947	92,93	52,2
	$Y = 5,789.10^{-2}.VEL$	0,7760	83,16	54,5

TP: tempo de propagação das ondas; VEL: velocidade das ondas; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação da equação.

Dentre os principais modelos para estimar as propriedades avaliadas das toras 2, não se verificou a presença do diâmetro da tora, considerado no grupo de variáveis independentes.

De uma maneira geral, os modelos apresentados permitem a estimativa das propriedades avaliadas também para as segundas toras das árvores amostradas, podendo manter este resultado para toras obtidas em outras alturas da árvore.

#### 4.9.4 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Tábuas

Na tabela 40 são apresentados os modelos para estimar as propriedades físicas, anatômicas, morfológicas e mecânicas, além do diâmetro, número e área dos nós das tábuas para tábuas úmidas e secas ao ar. Foram selecionados modelos apenas para as propriedades de interesse para madeira serrada.

TABELA 40 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TÁBUAS

PROPRIEDADE	CONDIÇÃO	MODELO	R <sup>2</sup>	F (1%)	Continua
					CV (%)
Densidade básica	Úmida	$Y = 1,720.10^{-3}.TPU - 1,510.10^{-6}.TPU^2$	0,9957	2656,29	6,9
		$Y = 2,341.10^{-4}.VELU - 2,806.10^{-8}.VELU^2$	0,9957	2669,23	6,8
		$Y = 6,416.10^{-7}.TPU^2 + 1,737.10^{-8}.VELU^2$	0,9958	2730,33	6,8
	Seca ao ar	$Y = 2,430.10^{-3}.TPS - 2,990.10^{-6}.TPS^2$	0,9958	2720,69	6,8
		$Y = 9,763.10^{-5}.VELS$	0,9956	5388,73	6,8
		$Y = 5,563.10^{-4}.TPS + 9,262.10^{-9}.VELS^2$	0,9958	2749,03	6,7
Densidade aparente	Úmida	$Y = 1,900.10^{-3}.TPU - 1,560.10^{-6}.TPU^2$	0,9967	3517,17	6,0
		$Y = 2,950.10^{-4}.VELU - 3,777.10^{-8}.VELU^2$	0,9967	3507,61	6,0
		$Y = 8,147.10^{-7}.TPU^2 + 1,934.10^{-8}.VELU^2$	0,9970	3884,44	5,7
	Seca ao ar	$Y = 2,720.10^{-3}.TPS - 3,190.10^{-6}.TPS^2$	0,9969	3686,43	5,8
		$Y = 1,159.10^{-4}.VELS$	0,9966	7138,69	5,9
		$Y = 6,941.10^{-4}.TPS + 1,037.10^{-8}.VELS^2$	0,9970	3870,58	5,7
Módulo elasticidade dinâmico	Úmida	$Y = 56,447.TPU - 0,545.TPU^2$	0,9934	1739,14	8,5
		$Y = 6,124.VELU - 6,271.10^{-4}.VELU^2$	0,9934	1735,39	8,5
		$Y = 1320508.TPU + 4,326.10^{-4}.VELU^2$	0,9933	1713,92	8,5
	Seca ao ar	$Y = 3075966.TPS$	0,9892	2188,10	10,7
$Y = 5,804.10^{-4}.VELS^2$		0,9965	6880,31	6,0	
% Lenho tardio	Úmida	$Y = 0,136.TPU - 1,200.10^{-4}.TPU^2$	0,9877	922,72	11,6
		$Y = 1,888.10^{-2}.VELU - 2,290.10^{-6}.VELU^2$	0,9877	920,95	11,6
		$Y = 4,101.10^{-2}.TPU + 9,657.10^{-7}.VELU^2$	0,9877	926,89	11,6
	Seca ao ar	$Y = 8,364.10^{-2}.TPS$	0,9858	1664,34	12,2
		$Y = 7,800.10^{-3}.VELS$	0,9879	1965,01	11,3
Diâmetro dos nós	Úmida	$Y = 6,280.10^{-3}.TPU$	0,9406	380,09	25,6
		$Y = 9,779.10^{-4}.VELU$	0,9355	348,45	26,7
	Seca ao ar	$Y = 8,140.10^{-3}.TPS$	0,9417	387,48	25,4
		$Y = 7576.10^{-4}.VELS$	0,9397	374,02	25,8
Número de nós	Úmida	$Y = 0,017.TPU$	0,8247	112,89	47,0
		$Y = 2,730.10^{-3}.VELU$	0,8199	109,29	47,7
	Seca ao ar	$Y = 4,927.10^{-5}.TPS$	0,8286	116,03	45,5
		$Y = 2,11.10^{-3}.VELS$	0,8206	109,82	45,8
Área de nós	Úmida	$Y = 0,225.TPU$	0,7863	88,28	53,2
		$Y = 0,035.VELU$	0,7797	84,96	54,0
	Seca ao ar	$Y = 6,350.10^{-4}.TPS$	0,7934	92,16	52,3
		$Y = 0,027.VELS$	0,7803	85,22	54,0

TABELA 40 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS TÁBUAS

PROPRIEDADE	CONDIÇÃO	MODELO	R <sup>2</sup>	Conclusão	
				F (1%)	CV (%)
Ângulo grã da tábu inteira	Úmida	$Y = 4,640.10^{-3}.TPU$	0,9294	315,86	28,2
		$Y = 2,250.10^{-3}.VELU - 3,968.10^{-7}.VELU^2$	0,9276	147,42	29,2
	Seca ao ar	$Y = 1,307.10^{-5}.TPS^2$	0,9334	336,3	27,4
		$Y = 3,73.10^{-3}.VELS - 6,408.10^{-7}.VELS^2$	0,9378	173,32	27,05
Ângulo grã médio 3 pontos	Úmida	$Y = 5,470.10^{-3}.TPU$	0,9256	298,4	29,0
		$Y = 8,484.10^{-4}.VELU$	0,9113	246,43	31,7
	Seca ao ar	$Y = 1,542.10^{-5}.TPS^2$	0,9322	329,74	27,7
		$Y = 4,77.10^{-8}.VELS - 8,305.10^{-7}.VELS^2$	0,9384	175,20	26,9

TPU: tempo de propagação das ondas determinados nas tábuas úmidas; VELU: velocidade das ondas determinada nas tábuas úmida; TPS: tempo de propagação das ondas determinados nas tábuas secas ao ar; VELs: velocidade das ondas determinadas nas tábuas secas ao ar; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação da equação.

Os modelos selecionados para estimar as propriedades das tábuas tanto úmidas, quanto secas ao ar, foram significativos a 1 % de probabilidade e apresentaram altos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), com valores superiores a 0,77. Os modelos estão bem ajustados, com alta precisão na estimativa das propriedades avaliadas. Porém, os modelos obtidos para as propriedades dos nós e de ângulo de grã, apesar dos altos coeficientes de determinação e significância de 1 % de probabilidade, apresentaram alto coeficiente de variação, o que reduz a precisão na determinação dessas variáveis. Este fato indica a necessidade de avaliação de um número maior de amostras para aumentar a confiabilidade do modelo.

Como pode se observar, apenas com a utilização de variáveis independentes não destrutivas e de fácil determinação é possível estimar propriedades de difícil determinação e que exigem um tempo considerável de análises laboratoriais. Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que é possível a seleção de tábuas com características desejáveis, podendo ser desenvolvida metodologia para implementação até mesmo em uma linha de produção.

#### 4.9.5 Modelos para Estimar as Propriedades Avaliadas nas Lâminas

Na Tabela 41 são apresentados os modelos para estimar as propriedades das lâminas. Foram selecionados modelos considerando as variáveis independentes determinadas no sentido longitudinal, na direção da grã.

TABELA 41 – MODELOS PARA ESTIMAR AS PROPRIEDADES AVALIADAS NAS LÂMINAS

PROPRIEDADE	MODELO	R <sup>2</sup>	F (1%)	CV (%)
Densidade básica	$Y = 9,279 \cdot 10^{-5} \cdot TP$	0,8317	118,61	42,0
	$Y = 8,614 \cdot 10^{-4} \cdot VEL - 2,648 \cdot 10^{-7} \cdot VEL^2$	0,8927	95,68	34,2
	$Y = 6,462 \cdot 10^{-5} \cdot TP + 2,346 \cdot 10^{-4} \cdot VEL$	0,9626	296,36	20,2
% Lenho tardio	$Y = 8,830 \cdot 10^{-3} \cdot TP$	0,7977	94,61	46,9
	$Y = 0,082 \cdot VEL - 2,502 \cdot 10^{-5} \cdot VEL^2$	0,8578	69,35	40,1
	$Y = 6,130 \cdot 10^{-3} \cdot TP + 0,022 \cdot VEL$	0,9255	142,90	29,0
Diâmetro dos nós	$Y = 3,651 \cdot 10^{-4} \cdot TP$	0,4027	16,18	124,2
	$Y = 3,620 \cdot 10^{-3} \cdot VEL - 1,290 \cdot 10^{-6} \cdot VEL^2$	0,4156	8,18	125,5
Número de nós	$Y = 3,200 \cdot 10^{-7} \cdot TP^2$	0,3618	13,61	111,4
	$Y = 0,012 \cdot VEL$	0,4535	19,91	103,1
	$Y = 2,147 \cdot 10^{-7} \cdot TP^2 + 8,420 \cdot 10^{-3} \cdot VEL$	0,5441	13,73	96,2
Área de nós	$Y = 8,610 \cdot 10^{-3} \cdot TP$	0,4333	18,35	111,5
	$Y = 0,083 \cdot VEL - 2,776 \cdot 10^{-5} \cdot VEL^2$	0,4488	9,37	112,3
	$Y = 8,208 \cdot 10^{-7} \cdot TP + 0,026 \cdot VEL$	0,4691	10,16	110,2

TP: tempo de propagação das ondas; VEL: velocidade das ondas; CV: coeficiente de variação; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação da equação.

Os modelos obtidos para estimar a densidade básica e o percentual de lenho tardio apresentaram valores de F significativos a 1 % de probabilidade, e altos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), indicando que os modelos estão bem ajustados. Entretanto, os coeficientes de variação são altos, indicando a necessidade de um número maior de amostras para melhorar a confiabilidade dos modelos. Com relação ao diâmetro, número e área de nós, apesar dos valores de F significativos a 1 % de probabilidade, os coeficientes de determinação dos modelos são baixos e os coeficientes de variação altos podendo limitar significativamente estas estimativas.

De uma maneira geral, as equações obtidas para a densidade básica, dimensões de fibras e suas relações e os percentuais de lenhos inicial e tardio dos grupos árvores em pé, toras 1 e 2 e tábuas apresentaram probabilidade de erro de

apenas 1,2 %, mostrando-se como importante forma de determinação destas variáveis. Para as variáveis diâmetro, número e área de nós a probabilidade de erro varia de 14,0 % nas árvores em pé a 22,0 % nas tábuas. Apesar da possibilidade de melhoria destas equações para os nós da madeira, a utilização do método, de uma maneira geral, dependerá da necessidade e da confiabilidade necessária na determinação destas propriedades. Indiscutivelmente, o método é indicado para caracterizações macro para seleção, classificação e adequação de uso nas indústrias, permitindo estimativa prévia de rendimentos e qualidade do produto final. A técnica de propagação de ondas de tensão pode ser utilizada como fator complementar para planejamentos de produção e qualidade e, de acordo com os resultados obtidos. Também pode ser empregada para acompanhar as mudanças das propriedades físicas, anatômicas, mecânicas e morfológicas da árvore durante seu crescimento e auxiliar na determinação do manejo adequado, visando características e produtos específicos ou multiusos das florestas, indicando para os povoamentos adultos, a sua melhor utilização. Pode ser utilizada também para fins de melhoramento florestal.

É importante salientar que as equações obtidas podem ser utilizadas para material com condições semelhantes (espécie, idade, diâmetro, etc), sendo necessária a determinação de novas equações para materiais diferentes.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitem as seguintes conclusões:

- A julgar pela teoria de propagação de ondas de tensão, que se dá em meio elástico, caracterizado na madeira pela espessura da parede das fibras e seus arranjos microfibrilares, as maiores espessuras proporcionaram maior velocidade das ondas. O diâmetro do lúmen, vazio considerado como área descontínua, reduziu a velocidade das ondas ao mudar seu curso;
- Os nós (frequência, diâmetro e área), também caracterizados por áreas descontínuas, e os maiores ângulos de grã aumentaram o tempo e reduziram a velocidade de propagação das ondas, podendo ser determinados pelo método, sem que a madeira seja destruída;
- Nas árvores em pé e nas toras, a área, diâmetro de nós e a densidade básica exerceram as maiores influências sobre as variáveis do método. Nas tábuas úmidas, a largura das fibras, índice de enfiletamento e espessura de parede foram mais importantes. Nas tábuas secas, a densidade básica, diâmetro do lúmen e ângulo de grã, determinado no ponto 2, se correlacionaram mais fortemente com o tempo e velocidade de propagação das ondas. Nas lâminas, o comprimento de fibras exerceu influência marcante sobre as variáveis do método;
- A aplicação da técnica para avaliação das propriedades da madeira pode ser realizada nos produtos úmidos, já que foi observada correlação significativa para as variáveis do método determinadas nas tábuas úmidas e secas ao ar, verificadas também na bibliografia, podendo-se eliminar a fase de secagem para obtenção dos resultados com maior rapidez e facilitando sua utilização no início das linhas de produção;

- A técnica de aplicação de ondas de tensão pode ser utilizada para determinação das propriedades da madeira, de maneira indireta (não destrutiva), com rapidez e eficiência, uma vez que apresentou fortes correlações entre suas variáveis tempo e velocidade de propagação das ondas e as propriedades avaliadas nos grupos árvores em pé, toras, tábuas e lâminas;
- As relações obtidas entre as variáveis avaliadas nos diferentes grupos estudados, indicaram que a técnica de propagação de ondas de tensão pode ser empregada tanto na árvore em pé, quanto nas toras. Isso possibilita a seleção do melhor material para diferentes finalidades (pasta, celulose, papel, laminados e serrados, dentre outros), de acordo com os requisitos exigidos. Também pode ser empregada em linhas de produção para classificação de produtos, já que as relações observadas entre as variáveis foram significativas nos produtos avaliados;
- É possível determinar a qualidade dos produtos com base no uso da técnica em árvores em pé e toras, considerando as significativas relações obtidas entre as variáveis do método e as propriedades da madeira determinadas nestes grupos e suas relações teóricas com a qualidade dos produtos finais;
- Equações baseadas no tempo e velocidade de propagação das ondas de tensão proporcionam estimativas das propriedades anatômicas (dimensões de fibras e suas relações), físicas (densidade básica e densidade aparente), morfológicas (percentuais de lenhos, ângulo de grã) e defeitos (diâmetro, frequência e área de nós) com precisão, rapidez e facilidade, permitindo tomadas de decisões rápidas quanto aos aspectos de produção e utilização.

Com base nos resultados, discussões e conclusões deste trabalho, recomenda-se:

- Desenvolver estudo para validação das equações determinadas neste trabalho e do método utilizado;
- Considerar a variação radial das propriedades da madeira para estimativa do número adequado de avaliações a serem realizadas nos produtos (tábuas e lâminas) e também para determinação dos nós nas árvores em pé e toras, indicados nos resultados deste trabalho.
- Estudar forma de determinação do tempo de propagação nas lâminas, de modo a evitar interferências do ambiente e padronizar as determinações;
- Estudar a viabilidade de aplicação da técnica em pilhas de toras, visando facilitar a seleção das mesmas dentro das indústrias;
- Estudar as relações entre as variáveis da técnica (tempo e velocidade de propagação das ondas) e outras variáveis não contempladas neste trabalho, como, por exemplo, o ângulo fibrilar e outras propriedades de resistência mecânica;
- Realizar estudo para estimar a densidade aparente através da emissão de ondas de tensão, uma vez que esta propriedade tem sido uma das variáveis que mais interfere na utilização de grande parte dos métodos não destrutivos;
- Realizar novos estudos para diferentes idades e condições de crescimento desta espécie e também estudos para outras espécies;

- Testar a possibilidade de se estimar a qualidade de celulose/pasta com base no uso da técnica em árvores em pé e toras;
- Por se tratar de uma técnica simples e barata, desenvolvida com equipamento de baixo custo (aproximadamente 7,5 mil dólares), torna-se acessível também à pequenas indústrias e empresas do ramo madeireiro, permitindo maior aproveitamento da madeira, melhoria de seus processos e produtos, reduzindo as perdas e resíduos e, conseqüentemente os impactos sobre o meio ambiente, podendo ser implementada nestas indústrias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABCP M14/70.** Densidade básica da madeira - Associação Brasileira de Celulose e Papel. 1970.

BAMBER, R. K.; BURLEY, J. **The wood properties of radiata pine.** Commonwealth Agricultural Bureaux, 1983. 84 p.

BARRICHELO, L. E. G. **Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Mor. Var *hondurensis* Barr. e Gof. para a produção de celulose kraft.** Piracicaba, 1979. 167 f. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) - Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. F. Processo nítrico-acético para maceração de madeira. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 732-733, jan./fev. 1983.

BARROSO, L. P.; ARTES, R. **Análise multivariada.** In: 10<sup>o</sup> SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO / 48<sup>o</sup> REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 2003, Lavras. **Anais...** Lavras: UFL. 151 p.

BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.

BETHGE, K.; MATTHECK, C. Visual tree assessment and related testing methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. 1994, Madison. **Proceedings**, 9. Madison: Forest Products Society, 1994. p. 176-182.

BOUTELJE, J. B. **The anatomical structure, moisture content, density, shrinkage and resin content of the wood in and around knots of Swedish Redwood (*Pinus silvestris* L.) and Swedish Whitewood (*Picea abies* Karst.).** MEETING OF WORKING GROUPS ON WOOD QUALITY OF IUFRO, 1965, Stockholm. **Proceedings**. Stockholm: FPRL, 1965, p. 161–178.

BRASHAW, B. K. Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 6, p. 85-89, 2004.

BROWN, W. H. **Timbers of the world**. 9 – Central America and the Caribean. Londres: Timber Research and Development Association, 86 p, 1979.

BUCUR, V. Wood structure anisotropy estimated by acoustic invariants. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 9, n. 1, p. 67-74, 1988.

BUCUR, V.; JANIN, G.; ORY, J. M. **Ultrasonic detection of reaction wood in European species**. Paper presented at Xème Congrès Forestier Mondial. Set, 17-26, Paris. 1991.

BUCUR, V. **Acoustic of wood**. Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Recherches Forestières, Nancy, 283 p, 1995.

BURMESTER, A. Relationship between sound velocity and the morphological, physical and mechanical properties of wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 23, n. 6, p. 227-236, 1965

CALORI, V. J.; DIAS, G. L. **Emprego do ultra-som na determinação expedita da densidade básica da madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. 2000, São Carlos. **Anais...**, São Carlos: UFSC, 2000. p. 149-155.

CARPIM, M. A. SOUZA, V. R.; BARRICHELO, L. E. G. **Comparação das características da madeira de *E. grandis* e *E. saligna* de diferentes procedências.** In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, São Paulo, v. 1, p. 57-68, 1985.

CHA, J. K; PEARSON, R. G. Stress analysis and prediction in 3-layer laminated veneer lumber: response to crack and grain angle. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 26, n. 1, p. 97-106, 1994.

CHOONG, E. T.; FOGG, P. J. Effect of cultural treatment and wood-type on some physical properties of longleaf and slash pine wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v.21, n.2, p.193-206, 1989.

CLEMENTE, A. **Pesquisa de variáveis múltiplas.** Curitiba: Scientia et labor, 1990.

CORSON, S. R. Influence of wood quality characteristics on TMP and RMP from New Zealand-grown radiata pine. **Appita**, Carlton, v. 37, n. 5, p. 400-408, 1984.

CORSON, S. R. Wood characteristics influence pine TMP quality. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 74, p. 135-140, nov. 1991.

COWN, D. J. Variation in tracheid dimensions in the stem of a 26-year-old radiata pine tree. **Appita**, Carlton, v. 28, n.4, p.237-245, 1975.

COWN, D. J. Radiata pine: Wood age and wood properties concepts. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 10, n. 3, p. 504-507, 1980.

COWN, D. J.; KIBBLEWHITE, R. P. Effects of wood quality variation in New Zealand radiata pine on kraft paper properties. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 10, n. 3, p. 521-532, nov. 1980.

COWN, D. J.; McCONCHIE, D. L. Wood properties variation in old-crop stand of radiata pine. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 10, n. 3, p. 508-520, out. 1980.

COWN, D. J.; McCONCHIE, D. L. Rotation age and silvicultural effects on wood properties of four stands of pinus radiata. **New Zealand journal of forestry Science**, Rotorua, v. 12, n. 1, p. 71-85, 1982.

COWN, D. J.; McCONCHIE, D. L. Radiata pine wood properties survey (1977-1982). **FRI Bulletin**, Rotorua, n. 50, 1983. 42 p.

COWN, D. J.; McCONCHIE, D. L.; YOUNG, G. D. Wood properties of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* grown in Fiji. **FRI Bulletin**, Rotorua, n. 17, 1983. 54 p.

COWN, D. J.; YOUNG, G. D.; KIMBERLEY, M.O. Spiral grain patterns in plantation-grown Pinus radiata. **New Zealand Journal of forestry Science**, Rotorua, v. 21, n. 2/3, p. 206-216, 1991.

COWN, D. J. Corewood (juvenile wood) in Pinus radiata should be concerned? **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 22, n. 1, p. 87-95, 1992.

CURRY, W. T.; COVINGTON, S. A. Grade stress for European redwood and whitewood. In: THE PRINCESS RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **The strength properties of timber**. Lancaster: MTP Construction. 1974.

DADSWELL, H. E. NICHOLS, J. W. Assessment of wood qualities for tree breeding. I. *Pinus elliottii* var. *elliottii* from Queensland. Div. For. Prod. Technol. Pap. For. Prod. Aust., v. 4, 16 p. Apud. **Forestry Abstracts**, v21, n. 2, 1960.

DINWOODIE, J. M. The relationship between fiber morphology and paper properties: A review of literature. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 48, n.8, p. 440-446, ago. 1965.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. Second edition (1981), 709p. Wiley series in probability and mathematical statistics. 1966.

ELVERY, R. H.; NWOKOYE, D. N. **Strenght assessment of timber for glued laminated beams**. PAPER II, SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE AND TIMBER.1970. London: Inst. Of Civil Engeneering., 1970, p. 105-110.

ERICKSON, H. D.; HARRISON, A. T. Douglas-fir wood quality studies. Part I – Effects of age and stimulate growth on wood density and anatomy. **Wood Science and Technology**, v. 8, p. 225-265, 1974.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICCHELO, L. E. G. **Tecnologia de Celulose e Papel**. Piracicaba, ESALQ – USP, 1975. 207 p.

FOELKEL, C. E. B. Celulose kraft de *Pinus* spp. **O Papel**. ABCP, São Paulo, p.49-67, jan. 1976.

FUJIWARA, S.; YANG, K. C. The relationship between cell length and ring width and circumferential growth rate in five Canadian species. **IAWA Journal**, Leiden, v. 21, n. 3, p. 335-345, 2000.

GALLIGAN, W. L.; PELLERIN, R. F.; LENTZ, M. T. **A feasibility study: Longitudinal vibration of logs for prediction of lumber quality**. Internal report No. 4. Wood Technology Section, Engineering Res. Div., Washington State University, Pullman, Wash. 1967.

GERHARDS, C. C. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. **Forest Products Journal**, Madison, v. 25, n. 4, p. 51-57, 1975.

GERHARDS, C. C. Effect of earlywood and latewood on stress wave measurements parallel to the grain. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 11, n. 2, p. 69-72, out. 1978.

GERHARDS, C. C. Effects of cross grain on stress waves in lumber. USDA, Forest Service, **Research Paper FPL** n. 368, 9 p. Madison, 1981.

GERHARDS, C. C. Effect of knots on stress waves in lumber. USDA Forest Service, **Research Paper FPL** n. 384, 29 p. Madison, set. 1982a.

GERHARDS, C. C. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: Factors affecting applications: state of the art. **Forest Products Journal**, Madison, v. 32, n. 2, p. 20-25, fev. 1982b.

GORNIAC, E.; MATOS, J. L. M. **Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. 2000, São Carlos. **Anais...**, São Carlos: UFSC, 2000. p. 121-131.

GÖRLACHER, R. Ein neues meßverfahren zur bestimmung des elastizitätsmodulus von Holzs. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 42, n. 6, p. 219-222, 1984.

HAIR, J. F. Jr.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W.C. **Multivariate data analysis**. 5<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice Hall. 1998.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul**. Curitiba, 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HALSLETT, A. N.; SIMPSON, I. G.; KIMBERLEY, M. O. Utilization of 25-year-old *Pinus radiata*. Part 2: Warp of structural timber in drying. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 21, n. 2/3, p. 228-234, 1991.

HIGGINS, H. G. et al. The density and structure of hardwoods in relation to paper surface characteristics and other properties. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 56, n. 8, p. 127-31, 1973.

IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. Curitiba, 1982. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

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

JANG, S. S. Evaluation of lumber properties by applying stress waves to larch logs grown in Korea. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 3, p. 44-48, mar. 2000.

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

JOHNSON, R. A.; WIECHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.

JUNG, J. Stress-wave grading techniques on veneer sheets. USDA Forest Service, **PFL GTR** n. 27, 10 p. Madison, 1979.

JUNG, J. Properties of parallel laminated veneer from stress-wave-tested veneers. **Forest products Journal**, Madison, v. 32, n. 7, p. 30-35, jul. 1982.

KARTH, S. W. Factors affecting wood quality and quantity and consequently pulp manufacture. **Southern Africa Forest Journal**, Pretoria, v. 63, p. 17-24, 1967.

KIBBLEWHITE, R. P. Effects of beaters and wood quality on the surface and internal structure of radiata pine kraft fibres. **Pap. Ja. Puu**, v. 54, n. 11, p. 709-714, 1972.

KIBBLEWHITE, R. P. Effects of beating on radiata pine kraft properties. Effects of beaters. **Appita**, Carlton, v. 27, n. 6, p. 418-23, 1974.

KIBBLEWHITE, R. P. Radiata pine corewood and slabwood, and their interrelations with pulp and handsheet properties. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 10, n. 3, p. 533-550, set. 1980.

KIBBLEWHITE, R. P. The qualities of radiata pine papermaking fibres. **Appita**, Carlton, v. 35, n. 4, p. 289-298, 1982.

KIBBLEWHITE, R. P.; LLOYD, J. A. Interrelations between the wood, fibre, and kraft pulp properties of new-crop radiata pine corewood and slabwood. **FRI Bulletin**, Rotorua, n. 45, 1983. 26 p.

KIBBLEWHITE, R. P. Pinus Radiata. Wood residue qualities and some utilization options. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 14, n. 3, p. 382-94, 1984.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus oocarpa* Shiede e *Pinus caribaea* Morelet var *hondurensis* Barr e Golf**. Curitiba, 1989. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. Curitiba, 2000. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

KOCH, P. Utilization of the southern pines. **USDA**. Forest Service. Washington, v. 2, 1972. 734 p.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer, v. 2, 1968. 674 p.

KONARSKI, B.; WASNY, J. Relationship between ultrasonic velocity and mechanical properties of wood attacked by fungi. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 35, n. 9, p. 341-345, 1977.

LARA PALMA, H. A. **Determinação dos parâmetros elásticos e de resistência e a influência da madeira nas propriedades de compensados de *P. elliotii* Engelm. E *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1994. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality**. Yale Univ. Sch. For. Bull n. 74, 1969. 45 p.

LARSON, P; NICHOLS, J. W. P; DADSWELL, H. E. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. Madison: USDA, 2001. 42 p.

LAVORANTI, O. J. **Estabilidade e adaptabilidade fenotípica através da reamostragem “Bootstrap” no modelo AMMI**. Piracicaba, 2003. 166 f. Tese (Doutorado em Estatística) – Departamento de Estatística, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

LEE, I. D. G. A nondestructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using ultrasonic pulse technique. **Journal Institute of Wood Science**, Madison, v. 1, p. 43-57, 1958.

LUCHESA, C. J. **Estudo da adequação dos índices da análise econômico-financeira às empresas florestais, utilizando métodos estatísticos multivariados**. Curitiba, 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MATOS, J. L. M.; KEINERT JR., S.; ROSA, G. M. **Uso de métodos de emissão acústica para determinação não destrutiva de propriedades de painéis compensados de madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7. 2000, São Carlos. **Anais...**, São Carlos: UFSC, 2000. p. 131-137.

McDONALD, K. A. Lumber defect detection by ultrasonics. USDA Forest Service **Research Paper, FPL** n. 311, Madison, 1978.

MEGRAW, R. A. Wood quality factors in loblolly pine. **Tappi Press Atlanta**, Georgia, 1985. 89 p.

MENDONÇA, M. A. **Características da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel**. Curitiba, 1982. 124 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade federal do Paraná.

METRIGUARD INC. Metriguard Model 239A Stress Wave Timer. **Manual care and instructions, theory and data reduction.** Pullman, 1997.

MOURA, M. C. **Variações em características de crescimento e da madeira em clones de *Eucalyptus*.** Lavras, 2000. 63 f. Dissertação (Mestrado em Produção Florestal) – Universidade Federal de Lavras.

MUNER, T. S. **Influência de diferentes intensidades de desbaste na qualidade da madeira de *P. taeda* L. para produção de celulose Kraft.** Piracicaba, 1983. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento em Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MUÑIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *P. elliottii* Engelm e *P. taeda* L.** Curitiba, 1993. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PELLERIN, R. F. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 15, n. 3, p. 93-101, 1965.

POLGE, H. Essais de caractérisation de la veine verte du merisier. **Annals Science Forestry**. Paris, v. 41, p. 45-58. 1984.

PUEHRINGER, C. A. **Uso de emissão de ondas de tensão para avaliação não destrutiva de árvores e da madeira de *P. taeda* L.** Curitiba, 2002. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

RASMUSSEN, D. L. **The strength of laminated veneer lumber (LVL) made from second growth Grand fir.** Idaho, Thesis. Master of Science. University of Idaho. 49 p. 1994.

RIPPY, R. C.; WAGNER, F. G.; GORMAN, T. M.; LAYTON, H. D.; BODENHEIMER, T. Stress-wave analysis of Douglas-fir logs for veneer properties. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 4, p. 49-52, abr. 2000.

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

ROSS, R. J.; McDONALD, K. A.; GREEN, D. W.; SCHAD, K. C. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. **Forest Products Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 89-92, 1997.

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

ROSS, R. J. Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools – A guide for use and interpretation. **Forest Products Laboratory**, Madison, General Technical report, n. 114, abr. 1999.

ROSS, R.J.; WILLIS, S. W.; SEGEN, W. V.; BLACK, T.; BRASHAM, 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**, Madison, v. 49, n. 11/12, p. 60-62, nov./dez. 1999.

ROSS, R. J.; YANG, V. W.; ILLMAN, B. L.; NELSON, W. J. Relationship between stress wave transmission time and bending strength of deteriorated oriented strandboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 53, n. 3, p. 33-35, mar. 2003.

ROYSTON, P. **Approximating the Shapiro-Wilk W-Test for non-normality**, **Statistics and Computing**, 2, pag. 117 -119. 1992.

SAHLBERG, U. Influence of knot fibers on TMP properties. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 78, n. 5, p. 162-168, mai. 1995.

SANDOZ, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 23, p. 95-108, 1989.

SANDOZ, J. L; LORIN, P. **Standing tree quality assessment using ultrasound**. In: FIRST EUROPEAN SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF WOOD. 1994, Sopron. **Proceedings**, 1. Sopron: University of Sopron, 1994, p. 493 – 502.

SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. Publicações, 1996.

SCHAD, K. C. Stress wave techniques for determining quality of dimensional lumber from switch ties. USDA Forest Service, **Research Paper FPL** n. 265, 11 p., Madison, 1995.

SCHAD, K.C.; SCHMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. US Forest Laboratory. **Research Paper FPL** n. 546, Madison, fev. 1996.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** Piracicaba, 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SHIMOYAMA, V. R. S.; WIECHETECK, M. S. S. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 63-80, ago. 1993.

SILVA, J. C. Perspectivas do setor florestal. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 9, n. 50, p. 8-12, 2000.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden**. Curitiba, 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

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

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

SMITH, W. J. **Tracheid length and micellar angle in hoop pine (*Araucaria cunninghamii* Art.), their variation, relationships and use as indicators in parents tree selection**. Report number 8, Queensland Forest Service, Brisbane, p. 1-61, 1959.

SO, C; LEBOW, S. T.; GROOM, L. H.; RIALS, T. G. The application of near infrared (NIR) spectroscopy to inorganic preservative-treated wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 36, n. 4, p. 329-336, 2004.

THUNELL, B. Sortierungs-und sicherheitsfragen bei der vervundung von holz fur tragewerke und geruste. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.16, p. 127-131, 1958.

TOMASELLI, I. **Qualidade da madeira de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Araucária angustifolia* e sua correlação com as propriedades do papel**. Relatório Final. Convênio FINEP, UFPR, n 18/79, Curitiba, 1979. p. 157-161.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e estrutura anatômica da madeira de *E. saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 37-45, 1985.

VALOR FLORESTAL. **Mercado de Toras**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO PINUS. Joiniville, 24 a 26 de agosto, 2004.

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

WATSON, A. J.; DADSWELL, H. E. Influence of fibre morphology on paper properties – Part I. Fibre length. **Appita**, Carlton, v. 4, n. 5, p. 168-178, mar. 1961.

WILLIAMS, R. F.; HAMILTON, J. R. The effect of fertilization on four wood properties of slash pine. **Forestry Journal**, Madison, v. 59, p. 662-665, 1961.

YIANNOS, P. N.; TAYLOR, D. L. Dynamic modulus of thin wood sections. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 50, n. 1, p. 40-47, 1967.

ZOBEL, B. J. Inheritance of wood properties in conifers. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 10, p. 65-70, 1961.

ZOBEL, B. Wood quality from fast-grown plantations. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 64, n. 1, p. 71-74, 1981.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. Wood variation. Its causes and control. **Springer Series in Wood Science**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989. 363 p.