

SILVANA NISGOSKI

**ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO NO ESTUDO
DE CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E PAPEL DE *Pinus taeda* L.**

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

Orientadora:
Prof.^a Dr.^a Graciela Inés Bolzon de Muñiz

CURITIBA
2005

A meus pais,
Paulo Renato e Relindis,
com todo amor

dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e oportunidades.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade e disponibilização dos laboratórios, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

À empresa Rigesa MeadWestvaco pelo fornecimento do material, sem o qual não seria possível o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores Dr.^a Graciela Inés Bolzon de Muñiz, Dr. Umberto Klock, Dr. Washington Luis Esteves Magalhães (EMBRAPA Florestas), Dr. Gregório Ceccantini (USP), Dr. Moacir Kaminski, pela orientação e apoio na execução do trabalho.

À Dionéia, Charles, Wagner, Mirele, Franciele, Wanessa, Mayara pela ajuda no preparo do material e medições.

À todos os colegas e amigos do Curso de Pós-Graduação que, direta ou indiretamente, auxiliaram neste trabalho.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Silvana Nisgoski, filha de Relindis Kugler Nisgoski e Paulo Renato Nisgoski, nasceu em 15 de outubro de 1974, em Curitiba, estado do Paraná.

Concluiu o curso primário e ginásial no Colégio Estadual Manoel Ribas, em Harmonia, Telêmaco Borba, Paraná, em 1988. Concluiu o curso de segundo grau, Educação Geral, na mesma Instituição, em 1991. Trabalhou como professora de inglês nas Escolas Fisk, em Telêmaco Borba, Paraná, no período de 1989 a 1991.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná em 1992. Participou do PET (Programa Especial de Treinamento) da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), de Engenharia Florestal - UFPR, de março de 1994 a março de 1997. Graduou-se como Engenheiro Florestal em março de 1997.

Ingressou no Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, nível Mestrado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais em março de 1997, concluindo em 5 de novembro de 1999, tendo o trabalho o título de “Identificação e Caracterização Anatômica Macroscópica das Principais Espécies Utilizadas para Laminação em Curitiba – PR.”

Foi professora da Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC) nos anos de 2000 e 2001. Desde 2001 é professora do Curso de Engenharia Florestal da Universidade do Contestado, Campus Canoinhas, e do Curso de Tecnologia da Madeira, no Núcleo de Porto União.

Em 2001 ingressou no Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Paraná, nível Doutorado, área de concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais, concluindo em 24 de junho de 2005, tendo o trabalho o título de “Espectroscopia no Infravermelho Próximo no Estudo de Características da Madeira e Papel de *Pinus taeda*.”

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	01
2 OBJETIVOS	03
3 REVISÃO DE LITERATURA	04
3.1 Considerações gerais sobre o <i>Pinus taeda</i> L.	04
3.2 Aspectos anatômicos da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	05
3.3 Efeitos genéticos e ambientais	10
3.4 Relação entre morfologia da fibra e propriedades do papel	17
<i>3.4.1 Resistência à tração, comprimento de auto-ruptura e arrebentamento</i>	18
<i>3.4.2 Resistência ao rasgo</i>	29
<i>3.4.3 Freeness (Drenabilidade)</i>	35
3.5 Refinação	35
3.6 Densidade básica, madeira juvenil, lenho inicial e tardio	40
3.7 Índices indicativos da qualidade das polpas	44
3.8 Espectroscopia no infravermelho próximo	49
4 MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1 Material	55
4.2 Métodos	58
<i>4.2.1 Determinação da densidade básica da madeira</i>	58

4.2.2 <i>Análise anatômica</i>	59
4.2.3 <i>Obtenção de celulose Kraft e produção de papel</i>	60
4.2.4 <i>Ensaio físicos e mecânicos do papel</i>	62
4.2.5 <i>Espectroscopia no infravermelho próximo</i>	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1 Características dendrométricas das árvores	68
5.2 Densidade básica	68
5.3 Análise anatômica	71
5.3.1 <i>Comprimento</i>	72
5.3.2 <i>Largura e diâmetro do lume</i>	73
5.3.3 <i>Espessura da parede</i>	75
5.3.4 <i>Índices indicativos da qualidade da polpa celulósica</i>	76
5.3.4.1 <i>Coefficiente de Flexibilidade</i>	78
5.3.4.2 <i>Fração Parede</i>	79
5.3.4.3 <i>Índice de Enfeltramento</i>	81
5.3.4.4 <i>Índice de Runkel</i>	82
5.3.4.5 <i>Índice de Boiler e Índice de Mülsteph</i>	84
5.4 Produção de Celulose	85
5.4.1 <i>Rendimento em celulose</i>	85
5.4.2 <i>Tempo de refinação</i>	86
5.5 Propriedades físicas e mecânicas do papel	89
5.5.1 <i>Espessura média das folhas</i>	89
5.5.2 <i>Densidade aparente e volume específico aparente</i>	89
5.5.3 <i>Resistência à tração</i>	94
5.5.4 <i>Resistência ao arrebentamento</i>	96

5.5.5 Resistência ao rasgo	98
5.6 Espectroscopia no infravermelho próximo	100
5.6.1 Densidade básica da madeira	101
5.6.2 Comprimento dos traqueóides axiais	104
5.6.3 Largura e diâmetro do lume dos traqueóides axiais	107
5.6.4 Espessura da parede dos traqueóides axiais	108
5.6.5 Coeficiente de Flexibilidade	111
5.6.6 Fração Parede	113
5.6.7 Índice de Enfeltramento	115
5.6.8 Índice de Runkel	117
5.6.9 Índice de Tração	120
5.6.10 Índice de Arrebentamento	122
5.6.11 Índice de Rasgo	124
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXOS	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Herdabilidade da estrutura da madeira	12
Tabela 2 – Características das fibras segundo o Coeficiente de Flexibilidade	46
Tabela 3 – Características das fibras segundo o Índice de Runkel	48
Tabela 4 – Parâmetros de cozimento utilizados	61
Tabela 5 – Características dendrométricas médias das árvores em relação às idades	68
Tabela 6 – Densidade básica média ponderada em diferentes idades	69
Tabela 7 – Características morfológicas médias dos traqueóides em relação à idade	71
Tabela 8 – Índices indicativos da qualidade da polpa em relação à idade	77
Tabela 9 – Rendimento em celulose e número <i>kappa</i> de acordo com a idade	85
Tabela 10 – Tempo de refinação e <i>freeness</i> de acordo com a idade	88
Tabela 11 – Propriedades físicas do papel em diferentes idades	90
Tabela 12 – CAR e índice de tração em diferentes idades	91
Tabela 13 – Índice de arrebatamento e rasgo em diferentes idades	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro eletromagnético	49
Figura 2 – Diagrama esquemático de um espectrofotômetro	50
Figura 3 – Local de coleta do material	55
Figura 4 – Esquema da retirada dos corpos-de-prova da árvore	56
Figura 5 – Divisão dos corpos-de-prova para ensaios	57
Figura 6 – Esquema de retirada dos corpos-de-prova para ensaios do papel	62
Figura 7 – Densidade básica média em diferente idades	69
Figura 8 – Comprimento médio dos traqueóides em relação à idade	72
Figura 9 – Largura média dos traqueóides em relação à idade	74
Figura 10 – Diâmetro médio do lume dos traqueóides em relação à idade	75
Figura 11 – Espessura da parede dos traqueóides em relação à idade	76
Figura 12 – Coeficiente de Flexibilidade médio em relação à idade	78
Figura 13 – Fração Parede média em relação à idade	80
Figura 14 – Índice de Enfeltramento médio em relação à idade	81
Figura 15 – Índice de Runkel médio em relação à idade	83
Figura 16 – Índice de Boiler médio em relação à idade	84
Figura 17 – Índice de Mülsteph médio em relação à idade	85
Figura 18 – <i>Freeness</i> em relação à idade e tempo de refino	87
Figura 19 – Densidade aparente do papel em relação à idade e tempo de refin.....	93
Figura 20 – Volume específico do papel em relação à idade e tempo de refino	93
Figura 21 – Índice de Tração em função da idade e tempo de refino	95
Figura 22 – Índice de Arrebentamento em função da idade e tempo de refino	97

Figura 23 – Índice de Rasgo em função da idade e tempo de refino	99
Figura 24 – Aspecto geral dos espectros de infravermelho obtidos da madeira	100
Figura 25 – Calibração para a densidade básica	102
Figura 26 – Validação para a densidade básica	102
Figura 27 – Validação externa para a densidade básica da madeira	103
Figura 28 – Densidade básica da madeira	103
Figura 29 – Calibração para o comprimento dos traqueóides	104
Figura 30 – Validação para o comprimento dos traqueóides	105
Figura 31 – Validação externa para o comprimento dos traqueóides	105
Figura 32 – Comprimento dos traqueóides.....	106
Figura 33 – Calibração para a largura dos traqueóides	107
Figura 34 – Calibração para o diâmetro do lume dos traqueóides	108
Figura 35 – Calibração para a espessura da parede	109
Figura 36 – Validação para a espessura da parede	109
Figura 37 – Validação externa para a espessura da parede dos traqueóides	110
Figura 38 – Espessura da parede	110
Figura 39 – Calibração para o Coeficiente de Flexibilidade	111
Figura 40 – Validação para o Coeficiente de Flexibilidade	112
Figura 41 – Validação externa para o Coeficiente de Flexibilidade	112
Figura 42 – Coeficiente de Flexibilidade	113
Figura 43 – Calibração para a Fração Parede	114
Figura 44 – Validação para a Fração Parede	114
Figura 45 – Validação externa para Fração Parede	114
Figura 46 – Fração Parede	115
Figura 47 – Calibração para o Índice de Enfeltramento	116

Figura 48 – Validação para o Índice de Enfeltramento	116
Figura 49 – Validação externa para o Índice de Enfeltramento	116
Figura 50 – Índice de Enfeltramento	117
Figura 51 – Calibração para o Índice de Runkel	118
Figura 52 – Validação para o Índice de Runkel	118
Figura 53 – Validação externa para o Índice de Runkel	119
Figura 54 – Índice de Runkel	119
Figura 55 – Calibração para o Índice de Tração	120
Figura 56 – Validação para o Índice de Tração	120
Figura 57 – Validação externa para o Índice de Tração	121
Figura 58 – Índice de Tração	122
Figura 59 – Calibração para o Índice de Arrebetamento	123
Figura 60 – Validação para o Índice de Arrebetamento	123
Figura 61 – Validação externa para o Índice de Arrebetamento	123
Figura 62 – Índice de Arrebetamento	124
Figura 63 – Calibração para o índice de Rasgo	125
Figura 64 – Validação para o Índice de Rasgo	125
Figura 65 – Validação externa para o Índice de Rasgo	126
Figura 66 – Índice de Rasgo	126

RESUMO

As muitas aplicações práticas da madeira e seu significado para as ciências levaram a um grande interesse na sua estrutura. Avanços tecnológicos conduziram à aplicação de vários métodos não destrutivos e rápidos nas pesquisas com madeira, entre os quais a espectroscopia no infravermelho próximo, que é a medição do comprimento de onda e intensidade de absorção de luz infravermelha próxima realizada por uma amostra, sendo útil para processar grande número de amostras em pouco tempo, com resultados bem próximos aos obtidos em técnicas convencionais de laboratório que, na maioria das vezes, são demorados. O presente trabalho objetivou avaliar o uso da espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e do papel a partir de clones de *Pinus taeda* L. em sete idades entre 10 anos e 7 meses e 17 anos e 9 meses, provenientes de plantios comerciais da região de Três Barras, SC. A densidade básica da madeira, as características morfológicas das fibras, propriedades físicas e mecânicas do papel foram determinadas pelos métodos convencionais de laboratório e correlacionadas com os espectros obtidos diretamente da face radial de cubos de madeira, com dimensões de 2x2x2cm, em equipamento de infravermelho próximo de marca FemWim900, de fabricação nacional. As melhores correlações na calibração e predição dos dados foram obtidas para a densidade básica da madeira e comprimento dos traqueóides axiais. A calibração para a densidade da madeira forneceu uma correlação de 0,87 com um erro de 0,012g/cm³, sendo que na validação a correlação foi de 0,78 com um erro de 0,016g/cm³ e na predição da propriedade com amostras externas obteve-se um erro de 0,018g/cm³. Para o comprimento dos traqueóides a correlação na calibração foi de 0,73 com um erro de 0,4mm e na validação externa apresentou uma correlação de 0,65 e um erro de 0,5mm. Em virtude da variação existente entre as características analisadas nas diferentes idades ser próxima do erro cometido na medida experimental, conseguiu-se relativamente baixos valores na predição das outras características. Os índices indicativos da qualidade da polpa (coeficiente de flexibilidade, fração parede, índices de Runkel, Boiler e Mülsteph) apresentaram melhores correlações com os dados fornecidos pelos espectros de infravermelho do que as características individuais de largura, espessura da parede e diâmetro do lume dos traqueóides. Os índices de tração, rasgo e arrebentamento, indicadores da resistência do papel a determinados esforços, também apresentaram alta correlação entre os dados medidos em laboratório e os fornecidos pelo infravermelho através dos espectros coletados em madeira maciça, obtendo-se valores de correlação para a calibração de 0,79 para a tração, 0,77 para o rasgo e 0,70 para o arrebentamento. Concluiu-se que a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo pode ser utilizada para a predição de características anatômicas da madeira e do papel, através da análise de amostras de madeira maciça.

Palavras-chave: infravermelho, propriedades da madeira e papel, *Pinus taeda*.

ABSTRACT

There are several practical uses for wood, and their scientific significance led to great interest in their structure. Technological advances led to application of several non-destructive and quick methods when conducting wood research, among them near infrared spectroscopy, which is the measurement of the wavelength and intensity of near infrared light absorption in a sample. This is useful to process a large number of samples in a short amount of time, and its results are very similar to those obtained by the traditional laboratory techniques that usually take a long time. The research conducted aimed to assess the use of near infrared spectroscopy in the study of the characteristics of wood and paper from clones of *Pinus taeda* L. with ages that range from 10 years 7 months to 17 years 9 months, from commercial planting in the region around Três Barras, Santa Catarina, Brazil. Basic wood density, morphological characteristics of fibers, physical and mechanical properties of paper were established by conventional laboratory methods and related to spectroscopy measurements established directly from the radial face of wood cubes, with dimensions 2x2x2cm, with domestic FemWim900 near infrared equipment. The best correlations in calibration and data prediction were achieved for the basic wood density and tracheid length. The calibration for wood density provided a correlation of 0.87 with error of 0.012g/cm³, and in validation the correlation was of 0.78 with error of 0.016g/cm³, and when predicting property with external samples the error was 0.018g/cm³. For the tracheid length the correlation in the calibration was of 0.73 with an error of 0.4mm and in external validation there was a correlation of 0.65 and an error of 0.5mm. Due to the variation among the characteristics analyzed in different ages being close to the error achieved in the experimental measuring, relatively low values were achieved in the prediction of the other characteristics. The indexes indicating pulp quality (flexibility coefficient, cell wall fraction, Runkel, Boiler, and Mülsteph indexes) presented better correlations with the data provided by near infrared spectroscopy results than the individual data for width, wall thickness and lumen diameter of tracheids. Tension, tear, and burst indexes, which indicated paper resistance to certain strains, also showed high correlation between the data measured in the laboratory and those provided by near infrared through spectroscopy results for solid wood, with correlation values for the calibration of 0.79 for tension, 0.77 for tear, and 0.70 for burst. The conclusion is that near infrared spectroscopy technique can be used for the prediction of anatomical characteristics of wood and paper, through analysis of solid wood samples.

Key-words: near infrared, wood and paper properties, *Pinus taeda*.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da madeira pode ser definida com base nos atributos que a fazem valiosa para um determinado uso final. Para as serrarias, é refletida no valor da produção de serrados, dependendo do grau de transformação e da influência de cada etapa; para o engenheiro estrutural, significa um alto nível de resistência; para um tecnologista, a densidade do material é importante, pois um aumento no seu valor pode resultar em maior resistência da peça e maior rendimento em polpa celulósica. Já as características necessárias na qualidade da madeira para papel são comprimento de fibra longo e baixo conteúdo de lignina.

Existem muitas maneiras de definir a qualidade do papel, por exemplo, quando produzindo embalagens, a resistência aos esforços aplicados é importante; quando papel para livros é produzido, a resistência é importante, mas outros fatores como o aceitação da tinta, com absorção em velocidade adequada e alta opacidade também tem grande influência; para papéis absorventes, a resistência à úmido é importante, etc.

A qualidade da madeira depende de suas características intrínsecas que são afetadas por diversos fatores (genéticos, ambientais) durante a formação de células e tecidos, em muitos casos não sendo utilizada nos programas de melhoramento genético de *Pinus* spp., devido à dificuldade de se avaliar determinadas propriedades e alto custo. Quando a qualidade da madeira está incluída em um programa de melhoramento florestal, a variável tradicionalmente avaliada é a densidade da madeira, pela facilidade de determinação, forte ligação com a produtividade e qualidade dos produtos oriundos da madeira e por representar uma resposta das características anatômicas e químicas das espécies.

As muitas aplicações práticas da madeira e seu significado para as ciências levaram a um grande interesse na sua estrutura, que foi uma das primeiras a ser estudada a nível anatômico e contribuiu para o desenvolvimento da teoria celular na biologia. Avanços

tecnológicos levaram à aplicação de vários métodos nas pesquisas estruturais, incluindo microscopia óptica e eletrônica, métodos analíticos físicos e químicos, cristalografia de raios-X, espectroscopia de impedância elétrica, tomografia computadorizada, auto-radiografia e espectroscopia no infravermelho.

A espectrometria no infravermelho próximo (NIR) é a medição do comprimento de onda e intensidade da absorção de luz infravermelha próxima realizada por uma amostra, em uma faixa de 800-2500nm. Esta técnica é tipicamente usada na medição quantitativa de grupos funcionais orgânicos, especialmente O-H, N-H, e C=O, e se apresenta como uma técnica rápida e eficiente em diversos campos de aplicação. As informações apresentadas nos espectros do infravermelho próximo podem ser empregadas para estimar a concentração de uma dada substância ou uma propriedade física quando esta for, de qualquer maneira, reflexo de mudanças significativas na intensidade e/ou comprimento de onda dos espectros produzidos pela amostra.

Os resultados obtidos pela técnica do infravermelho próximo vão sempre depender da existência de métodos de referência adequados e aceitáveis, uma vez que na fase de construção do modelo, o método direto baseado no NIR precisa ser capaz de identificar as características do espectro ou qual combinação daquelas características deve ser correlacionada para determinar a variável analisada. A diferença entre o sucesso e a “falha” é diretamente dependente da qualidade dos valores de referência associados com as amostras na fase inicial de informação.

No Brasil, a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo, nos últimos cinco anos, tem sido enfocada na análise de solos, medicamentos falsificados, controle de qualidade de lubrificantes, entre outros. Na área florestal os estudos ainda estão em fase inicial, sendo este um trabalho pioneiro relacionando as informações obtidas pela espectroscopia no infravermelho próximo com características anatômicas da madeira e propriedades do papel.

2 OBJETIVOS

Para este estudo estabeleceu-se como objetivo geral:

- Avaliar as características da madeira e papel de clones de *Pinus taeda* L., em diferentes idades, através de métodos convencionais e espectroscopia no infravermelho próximo.

Para cumprir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a densidade básica da madeira em diferentes idades;
- Determinar as características anatômicas do material;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas do papel produzido em laboratório pelo processo *Kraft*;
- Avaliar o uso do infravermelho próximo para prever características da madeira e papel a partir de espectros coletados em madeira maciça.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Considerações gerais sobre o *Pinus taeda* L.

O gênero *Pinus* é o mais antigo da família Pinaceae, tendo surgido há aproximadamente 180 milhões de anos. Seu centro de origem é o Hemisfério Norte, ocorrendo entre latitudes de 0 a 70° e altitudes de 0 a 3.500m. Existem mais de cem espécies pertencentes a esse gênero, nativas de regiões temperadas e tropicais. A madeira pode ser separada em três grupos: o dos pinus brancos, vermelhos e amarelos, entre os quais está o *Pinus taeda*. A palavra *pinus* é o nome latim clássico e *taeda* é o nome antigo para pinus resinosos (FPL 1988, p.1).

O *Pinus taeda* é conhecido popularmente por pinheiro-amarelo, pinheiro-rabo-de-raposa, pinheiro-do-banhado, pinus, pinho-americano (Lorenzi *et al.* 2003, p. 65). Internacionalmente pode ser chamado de *bastard pine*, *black pine*, *black slash pine*, *bog pine*, *buckskin pine*, *Bull pine*, *Carolina pine*, *cornstalk pine*, *foxtail pine*, *frankincense pine*, *heart pine*, *Indian pine*, *kienbaum*, *lobby pine*, *loblolly pine*, *longleaf pine*, *longschap pine*, *longschat pine*, *longshucks*, *longshucks pine*, *longstraw pine*, *maiden pine*, *meadow pine*, *North Carolina pine*, *old pine*, *oldfield pine*, *pin a l'encens*, *pin taeda*, *pinho-teda*, *pino de incienso*, *pino dell'incenso*, *prop pine*, *Rosemary pine*, *sap pine*, *shortleaf pine*, *shortstraw pine*, *slash black pine*, *slash pine*, *soderns gull-tall*, *southern pine*, *southern yellow pine*, *spruce pine*, *swamp pine*, *sydstaternas gull-tall*, *taeda pine*, *taeda-pijn*, *torch pine*, *Virginia sap-pine*, *yellow pine* (FPL 1988, p.1). Como sinonímia botânica encontram-se *Pinus lutea* Walter e *Pinus heterophylla* Small (Lorenzi *et al.* 2003, p. 65).

As árvores podem atingir de 25 a 30 metros de altura, sendo nativas dos Estados Unidos (Costa Atlântica do Sudeste e Golfo do México), de tronco com casca marrom-avermelhado, fendida com cristas escamosas. Ramos novos azulados, depois marrom-

amarelados com muitas cristas. Acículas em número de três por fascículo, rijas, finas, agudas, com margens finamente denteadas, torcidas, persistentes por vários anos. Frutos (cones) laterais ou quase terminais, decíduos, quase sésseis, de escamas alongadas com uma saliência transversal e um espinho triangular, recurvado no ápice. Sementes aladas, de cor marrom-escura, manchadas de preto. É semelhante ao *Pinus elliottii* Engelm, diferindo principalmente pela seção transversal triangular das acículas, as quais são também mais curtas e mais escuras, e pelos cones que são quase sésseis e acinzentados (Lorenzi *et al.* 2003, p. 65).

A madeira apresenta alburno branco amarelado, enquanto o cerne é marrom avermelhado. O alburno é geralmente largo em faixas de crescimento secundário. O cerne começa a ser formado quando a árvore tem em média 20 anos de idade. Em árvores velhas, de crescimento lento, o alburno pode ter apenas dois a cinco centímetros de largura (FPL 1988, p.1). Segundo Schultz (1997, p. 2-6), o xilema do *Pinus taeda* não pode ser visualmente distinto de outros importantes pinus do sudeste dos Estados Unidos e a posição no tronco tem um efeito maior que a idade nas propriedades físicas do mesmo. De acordo com Marchiori (1996, p.42), a madeira é indicada para construções, móveis e caixotaria; os traqueóides são longos e adequados à fabricação de papel.

O conteúdo de cinzas base seca do alburno varia de 0,25 a 0,54%, sendo a variação associada com a localização geográfica. Alta concentração de resinas e outras substâncias impregnadas nas paredes celulares e preenchendo as cavidades variam com a idade da árvore. Estas substâncias fazem o cerne muito mais escuro que o alburno (Schultz 1997, p.2-9).

3.2 Aspectos anatômicos da madeira de *Pinus taeda* L.

Os traqueóides axiais compõem a estrutura básica da madeira de *Pinus taeda*, atuando nas atividades de condução e sustentação do vegetal, ocupando um volume de até 95%. Estas células formam os anéis de crescimento que são claramente delineados por faixas distintas de

lenho inicial claro (células de parede fina) e lenho tardio escuro (células de parede espessa), produzidos a cada ano. Estas faixas podem variar de menos de 0,25 a mais de 1,50cm em largura. Um crescimento rápido estimula a produção de células com diâmetro muito grande, paredes finas, que formam largos anéis de crescimento, com uma alta porcentagem de lenho inicial. Ao contrário, árvores com crescimento lento produzem células pequenas, de paredes espessas, anéis de crescimento estreitos, com uma grande porcentagem de lenho tardio (Beckwith e Shackelford, apud Schultz, 1997, p.2-8).

De acordo com Larson *et al.* (2001, p.8), ao contrário dos anéis de crescimento adultos, a transição entre lenho inicial e tardio em anéis de crescimento jovens é extremamente gradual e difusa. A dificuldade em se determinar o limite é devido à natureza dos traqueóides de transição, que possuem características de ambos os lenhos, e geralmente compõem a maior parte dos largos anéis de crescimento juvenis. Os traqueóides de transição são produzidos quando as condições de crescimento são favoráveis à prolongação do crescimento dos brotos terminais e desenvolvimento foliar e também para promoção dos altos níveis de atividade fotossintética. Nos traqueóides de transição, o diâmetro radial geralmente permanece constante, ou seja, com lume amplo, e a parede celular torna-se gradativamente mais espessa.

A zona dos traqueóides de transição, além de ser uma característica de distinção do lenho juvenil, é um importante fator indicativo da qualidade da madeira. Considerando-se que as células do lenho inicial possuem lumes largos, paredes finas e são estruturalmente fracas, uma redução na formação do lenho inicial contribuiria para um aumento na qualidade da madeira. A redução na largura dos anéis sempre afeta mais o lenho inicial do que o tardio. Entretanto, a quantidade de lenho tardio não necessariamente aumenta, apesar de aumentar a porcentagem deste (Larson *et al.* 2001, p.8).

Os mesmos autores comentam que a redução no lenho inicial juvenil ocorre primeiramente com a redução da largura dos traqueóides de transição, os quais são geralmente classificados como lenho inicial. Quanto mais drástico for o decréscimo na taxa de crescimento e da largura dos anéis, mais estreita será a faixa dos traqueóides de transição nos anéis de crescimento. Em anéis relativamente estreitos, como os produzidos em árvores de plantios com espaçamento pequeno, o lenho de transição pode estar ausente nos anéis mais externos do lenho juvenil. Esses anéis possuem aparência e características visuais dos anéis adultos, sugerindo que o lenho juvenil consiste somente dos seis a oito primeiros anéis.

A resistência da madeira está diretamente relacionada ao comprimento dos traqueóides, que é significativamente menor para madeira juvenil do que para adulta. O comprimento dos traqueóides aumenta de menos de 2mm próximo à medula até 3-5 ou mais (média de 4,3mm) nos anéis mais externos em uma idade de 10 anos e então permanece mais ou menos constante pelo resto da vida da árvore (Jackson 1959 apud Schultz, 1997, p.2-7). Wheeler *et al* (apud Schultz, 1997, p.2-7) encontraram comprimento médio de 3,4mm para madeira juvenil e 4,4mm para madeira adulta, em povoamentos naturais na Carolina do Sul. A média para o quinto anel em plantações no Mississippi foi de 3,1mm, enquanto para o 15 anel foi de 4,1mm (Taylor e Moore apud Schultz, 1997, p.2-7).

Klock (2000, p.126) encontrou uma média de 2,934mm no lenho inicial e 2,979mm no lenho tardio para *Pinus taeda* de plantios com 11 anos de idade em Ventania, PR. Já Hasegawa (2003, p.47) observou média de 3,6mm no lenho inicial e tardio de plantios efetuados em Santa Catarina, de sementes provindas da África do Sul. Ballarin e Palma (2003, p.375), estudando *Pinus taeda* com 37 anos de idade, provindo de povoamentos de São Paulo, observaram um aumento acentuado e praticamente linear, da ordem de 66,5% no comprimento dos traqueóides até o 18º anel de crescimento; a partir deste anel, a taxa de aumento diminuiu, tendendo para um valor mais estável e quase constante. O valor médio

obtido para o comprimento foi de 4,2mm para o lenho juvenil e 5,3mm para o adulto. Concluíram que o comprimento dos traqueóides aumentou na direção radial da árvore, no sentido medula-casca; os traqueóides tiveram maior aumento no comprimento nos primeiros dezoito anéis e do vigésimo em diante apresentaram pouca variação (Ballarin e Palma, 2003, p.379).

O comprimento dos traqueóides também varia substancialmente dentro dos anéis de crescimento, tanto na madeira juvenil quanto adulta. Na madeira juvenil as primeiras células de lenho inicial formadas são menores do que as últimas ou os traqueóides axiais do lenho tardio. Na madeira adulta, os traqueóides aumentam até um comprimento máximo a uma distância de 50 a 65% da largura do anel e então diminuem até o final do lenho tardio (Schultz 1997, p.2-7). De acordo com Larson *et al.* (2001, p.10), os valores de comprimento de traqueóides dentro e entre árvores de *Pinus taeda* são extremamente variáveis, devido à divisão e formação das células do câmbio. Além do comprimento dos traqueóides variar de acordo com a idade e a posição no fuste, varia entre os indivíduos de acordo com a densidade da população, sítio, localização geográfica e práticas silviculturais. Também varia grandemente entre indivíduos, sendo considerado um fator genético.

O diâmetro radial dos traqueóides e a espessura da parede são controlados por processos fisiológicos completamente diferentes. Um fator ambiental ou prática silvicultural pode fazer com que a parede celular varie em espessura, sem que interfira no diâmetro radial do lume (Larson *et al.* 2001, p.8) O diâmetro dos traqueóides varia de acordo com a posição destes na árvore e com o tipo de lenho. A tendência de crescimento do diâmetro externo é semelhante àquela observada para o comprimento, ou seja, aumenta no sentido medula-casca e ao longo do fuste até aproximadamente 50% da altura da árvore (Muñiz 1993, p.110). Em geral, o diâmetro dos traqueóides varia de 20 a 60 μ m, sendo que para o *Pinus taeda* são

encontrados valores entre 35 e 45 μ m (Brown *et al.* 1949, p.132; Kollman e Côté 1968, p.10; Wheeler, 2005).

A espessura da parede é menor no topo da árvore do que na base e tende a aumentar à medida que se afasta da medula. Isto é esperado uma vez que a densidade e a porcentagem de lenho tardio diminuem da base para o topo da árvore e aumentam na direção medula-casca, sendo que estas variáveis estão diretamente relacionadas com a espessura da parede dos traqueóides (Muñiz, 1993 p.190).

Muñiz (1993, p.104) estudando *Pinus taeda* com 30 anos, obteve valores de diâmetro do traqueóide de 32,5 a 72,5 μ m, diâmetro do lume de 15 a 60 μ m e espessura da parede de 5 a 13,6 μ m. Klock (2000, p.126), em árvores com 11 anos de idade, encontrou diâmetros dos traqueóides de 17,5 a 75 μ m, média de 42,4 μ m para o lenho inicial e de 38,5 μ m no lenho tardio; diâmetro do lume de 5 a 70 μ m, média de 32,9 μ m no lenho inicial e de 22,3 μ m no lenho tardio; e paredes celulares de 1,25 a 18,75 μ m de espessura, média de 4,7 μ m no lenho inicial e 8,1 μ m no lenho tardio. Hasegawa (2003, p.47), avaliando árvores com 25 anos de idade, encontrou os seguintes valores para o lenho inicial e tardio: diâmetro externo de 25-50-82,5 μ m e 22,5-37,5-62,5 μ m; diâmetro do lume variando de 15-27,5-67,5 μ m e 2,5-12,5-42,5 μ m; espessura da parede celular entre 2,5-5-10 μ m e 3,8-12,5-20,6 μ m.

A madeira que forma a região central da árvore se desenvolve do câmbio imaturo e freqüentemente tem densidade menor e paredes celulares mais finas, traqueóides mais curtos, maior ângulo microfibrilar e propriedades mecânicas inferiores à madeira adulta (Bendtsen e Senft 1986, p. 24). Com o crescimento da árvore, a nova madeira aumenta em densidade e resistência. A demarcação entre lenho juvenil e adulto não é clara, devido às mudanças graduais nas células; de fato, o número real de anéis do lenho juvenil depende de como ele é definido anatomicamente, por exemplo, o comprimento dos traqueóides pode atingir a estabilidade antes da espessura da parede celular (Bendtsen e Senft 1986, p.23). A proporção

de madeira juvenil e adulta pode ser controlada por seleção genética, manipulação das faixas de densidade de árvores em pé e controle do tempo de rotação. A densidade do povoamento não afeta a idade de transição da madeira juvenil para adulta em uma árvore, mas afeta o diâmetro da porção juvenil. Plantando com espaçamento pequeno, e desbastando depois que as árvores começam a produzir madeira adulta, minimiza-se a porção juvenil. O tronco de *Pinus taeda* pode conter até 85% de madeira juvenil por volume aos 15 anos de idade. A proporção desta madeira diminui a 46% em idades de 30 anos, até menos de 19% a idades de 40 a 45 anos (Senft *et al.* 1985, Zobel e Blair 1976, Zobel *et al.* 1972, apud Schultz, 1997, p.2-8).

3.3 Efeitos genéticos e ambientais

Todos os estágios da vida de uma árvore são controlados por genes. Pode haver considerável variação genética entre árvores vizinhas de um povoamento. Por exemplo, árvores individuais têm níveis bem diferentes de monoterpenos, indicando que tanto a quantidade como qualidade dos mesmos estão sob um relativamente forte controle genético. Estudos de crescimento de povoamentos de *Pinus taeda* jovens e velhos, mostram que há muita variação não explicada entre árvores individuais em sítios uniformes. Estes estudos provam que há uma variação genética substancial em fecundidade, sobrevivência, crescimento, forma e resistência a insetos e pestes entre árvores individuais (Schultz 1997, p.7-9).

Zobel e Jett (1995, p.5) escreveram no prefácio de sua extensa revisão de trabalhos relativos à genética da produção da madeira: “*O controle genético é a maior causa da variação da maioria das propriedades da madeira. A madeira é controlada genética e diretamente pelo desenvolvimento de processos internos de formação, indiretamente pelo controle do formato da árvore e modelo de crescimento*”.

A herdabilidade é a fração da variação fenotípica em uma característica devida a diferenças genéticas como oposição a efeitos ambientais ou individuais. Pode ser biológica, onde erros de amostragem são efetivamente excluídos da variação fenotípica, ou de observação, a qual inclui esses erros e é então, baixa. A herdabilidade pode variar com o sítio devido às diferenças no tamanho dos fatores micro-ambientais e interação entre efeito genotípico e sítio. É, então, tão específica com o sítio como os parâmetros relativos a uma população. Apesar destas especificidades é útil, pois, quando combinada com a variabilidade, indica a resposta que pode ser esperada numa seleção artificial para determinada característica. Em plantios de árvores, se a herdabilidade é alta, um aumento na qualidade da madeira pode ser alcançado pela seleção das melhores; caso contrário, um tratamento silvicultural pode ser útil. Na prática, a combinação de seleção e tratamentos silviculturais deve alcançar o rendimento máximo (Donaldson e Burdon 1995, p.166).

Com o objetivo de investigar a extensão da variação genotípica dentro de florestas produtoras de madeira com tratamentos silviculturais, Wodzicki e Zajackowski (1983, p.19) estudaram uma população de 270 árvores de *Pinus sylvestris* dominantes, de 60 anos, com DAP de 36cm. Observaram que mudanças sazonais na espessura da parede de traqueóides sucessivos não estavam correlacionadas com o tempo das mudanças no diâmetro dos raios. Os resultados revelaram que a frequência de formação de traqueóides com vários diâmetros radiais e a quantidade de material na parede celular no anel de crescimento podem estar relacionados ao programa genético que controla o comprimento do período sazonal de atividade cambial. Também é aparente a dependência entre o genótipo e a estrutura da madeira, e que a seleção para propagação de genótipos de uma população florestal, de fenótipo aparentemente uniforme, com base na forma e tamanho da árvore, é inadequada para assegurar a uniformidade da madeira.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas características estruturais da madeira e seu potencial de herdabilidade.

TABELA 1 - HERDABILIDADE DA ESTRUTURA DA MADEIRA.

CARACTERÍSTICAS	FOLHOSAS	CONÍFERAS
METABÓLITOS		
Conteúdo de celulose	Moderada	Moderada
Conteúdo de lignina	Forte	Forte
Conteúdo de extrativos e gomas	Forte	Forte
CÉLULAS		
Comprimento fibra/traqueóide	Moderada-forte ²	Moderada-forte ²
Diâmetro fibra/ traqueóide	Forte ²	Moderada-forte ¹
Espessura da parede fibra/traqueóide	Forte ²	Forte ²
Ângulo microfibrilar	Moderada ²	Moderada ²
Largura dos elementos de vaso ou volume	Forte ²	
ARRANJO CELULAR		
Porcentagem de vasos	Moderada ²	
Porcentagem de fibras/traqueóides	Forte ²	
Volume dos raios	Forte ^{1,2}	Moderada-forte ²
Arranjo dos raios	Forte ^{1,2}	
Largura dos anéis de crescimento	Forte	Forte
Porcentagem de lenho inicial	Forte ²	Forte ²
Porcentagem de lenho tardio	Forte ²	Forte ²
Densidade da madeira	Moderada-forte ³	Moderada-forte ³
Grã espiral	Moderada-forte ²	Moderada-forte ³
Grã entrecruzada	Moderada ^{1,2}	
OUTRAS CARACTERÍSTICAS		
Madeira de reação	Controle genético é possível ¹	Controle genético é possível ¹
Predisposição para fendas e rachaduras	Controle genético é possível ¹	Controle genético é possível ¹
Formação de cerne	Forte ²	Forte ²
Cor da madeira	Controle genético é possível ²	Controle genético é possível ³
Conteúdo de umidade	Controle genético é possível ¹	Controle genético é possível ¹
Resistência às doenças	Forte	Forte

¹Informações esparsas; ²Fortemente relacionada ao ambiente; ³Dependente da idade.

Fonte: Zobel e Jett (1995).

A influência das condições externas na formação da madeira tem sido discutida por muitos autores. Uma vez que os fatores ambientais fornecem condições físicas para todos os processos biológicos, é provável que não exista nenhum alterando o crescimento da árvore que não afete a estrutura da madeira. Os fatores ambientais externos podem ser divididos naqueles que fornecem condições básicas para a biogênese, como temperatura, intensidade de luz, água, nutrientes (fertilidade do solo), gravidade, fotoperíodo e periodicidade do clima; e

aqueles com efeitos ocasionais, como vento, geadas, fogo, enchentes, queda das folhas, manejo silvicultural e poluição ambiental (Wodzicki 2001, p.8).

Os resultados obtidos nos testes de Pedini (1992, p.261) sugeriram que o rápido crescimento poderia diminuir a qualidade da madeira juvenil de *Picea sitchensis*. Herman *et al.* (1999, p.20) verificaram que na comparação entre *Picea abies* de rápido e lento crescimento, um significativo aumento no ângulo microfibrilar da camada S2 foi obtido nas árvores do primeiro caso. Isto poderia mudar a qualidade da madeira assim como as propriedades de resistência da polpa e papel produzido (Treacy *et al.* 2001, p.10).

As propriedades físicas da madeira deveriam ser consideradas em processos de seleção. Existem diferenças significativas entre famílias no ângulo microfibrilar, densidade, comprimento dos traqueóides, espessura da parede das células do lenho tardio, e conteúdo de umidade. O ângulo microfibrilar é correlacionado significativamente com a árvore progenitora e é sujeito à manipulação genética. O ângulo microfibrilar e o comprimento dos traqueóides são altamente correlacionados, mas um aumento na densidade não necessariamente resulta em um aumento proporcional no comprimento das células ou decréscimo no ângulo microfibrilar (Schultz 1997, p.7-15).

A herdabilidade estimada indica que a densidade da madeira e o conteúdo de umidade estão sob forte controle genético, enquanto o comprimento dos traqueóides está sob moderado a forte controle. Há forte correlação negativa entre densidade e conteúdo de umidade em plantações de 7-11 anos (Schultz 1997, p.7-15).

O melhoramento de árvores pode reduzir as diferenças entre as propriedades da madeira juvenil e adulta, e entre lenho inicial e tardio. Por exemplo, pode aumentar a densidade da madeira juvenil de 0,50 para 0,60 g/cm³ em *Pinus taeda*. Em adição, a densidade de árvores com 25 anos pode ser prevista razoavelmente com base na densidade de árvores com 2 anos. O resultado é um aumento substancial na densidade do xilema e assim aumento

no rendimento de polpa celulósica e propriedades de resistência do papel (Loo *et al.* 1985, p.18).

Existem informações conflitantes em relação às mudanças no comprimento dos traqueóides. Estudos iniciais indicavam que, embora houvesse variação geográfica, a hereditariedade provavelmente exercia a influência dominante nesta característica em *Pinus taeda*. Famílias com alta densidade deveriam ter traqueóides longos ou curtos, tornando possível trabalhar com a densidade, mantendo o comprimento dos traqueóides desejado. Estudos posteriores indicaram que o comprimento não poderia ser alterado facilmente por seleção genética. Loo *et al.* (1984, p.824) concluíram que o comprimento dos traqueóides em madeira juvenil não é um fator genético de predição para a madeira adulta, ou no cilindro central da árvore e que as correlações fenotípicas refletem mais as relações ambientais. Choong *et al.* (apud Schultz 1997, p.7-15) não encontraram diferenças significativas no comprimento dos traqueóides entre cinco procedências de sementes da Louisiana e concluíram que esta característica é controlada mais fortemente por fatores ambientais do que genéticos. Sugeriram que a seleção individual de árvores, em vez de pomares de sementes, seria mais eficiente para obter ganhos genéticos no comprimento dos traqueóides.

O crescimento é influenciado pelas propriedades físicas e químicas do solo (textura, compactação, aeração, umidade, pH, nutrientes), luz, temperatura, fotoperíodo, alelopatia, precipitação e modelos sazonais; competição intra e interespecífica por espaço e elementos essenciais. Conseqüentemente, estes efeitos bióticos e ambientais são comumente expressos como um peso médio das árvores dominantes com idade de 50 anos, ou seja, o índice de sítio (Baker e Langdon 2004, p.1029). As características do sítio podem afetar a densidade e outras propriedades físicas da madeira, como observado em estudos de clones de *Pinus taeda* provenientes de dois pomares de semente na Geórgia, Estados Unidos, onde as diferenças de sítio foram associadas com pequenas, mas significativas, mudanças na densidade, diâmetro do

lume e espessura da parede dos traqueóides desta espécie. Árvores de sítios mais produtivos produziram madeira com densidade mais baixa, diâmetro médio do lume maior e paredes mais grossas. A densidade da madeira desenvolvida logo após um desbaste pode aumentar, diminuir ou flutuar com fatores interagindo (como umidade do solo e desenvolvimento de galhos) promovendo o desenvolvimento de mais lenho inicial ou lenho tardio. Normalmente, a densidade da madeira de plantações jovens é menor do que as árvores de idade similar em povoamentos naturais, nas mesmas condições ambientais (Schultz 1997, p.2-7).

As características da madeira de *Pinus taeda* L. foram extensamente investigadas. Em sua região de origem, a densidade básica normalmente decresce do sudeste para o nordeste e das áreas costeiras para Piedmont. Também foi encontrada grande variação de árvore para árvore em relação à densidade, comprimento dos traqueóides e ângulo microfibrilar. O mais importante resultado das pesquisas, para geneticistas, foi que as características de qualidade da madeira e taxas de crescimento em idades maiores não são altamente correlacionadas e, mais importante, nem negativamente correlacionadas, o que permite a modificação para diversas características (Baker e Langdon 2004, p.1040). A densidade média da espécie varia de 0,47 a 0,51 g/cm³ (Schultz 1997, p.2-6).

Moura e Vale (2002, p.109), estudando a variabilidade genética na densidade básica da madeira de *Pinus tecunumanii*, encontraram herdabilidade de 0,13, 0,32 e 0,09 para indivíduos, progênies e indivíduos dentro de progênies para as procedências centro americanas. Também encontraram correlações significativas e positivas em nível de plantas e de média de progênies entre densidade e as características dendrométricas (exceto DAP), entretanto, as médias de densidade e as características dendrométricas não apresentaram correlação significativa em nível de médias de procedência. Já para as procedências mexicanas, a herdabilidade de indivíduos, progênies e dentro das progênies para densidade básica média da madeira foram de 0,30; 0,58 e 0,22. Correlação positiva e significativa foi

encontrada entre os valores médios da densidade básica da madeira e dos valores de altura e volume das progênies, procedências e indivíduos. Porém, essas correlações não foram observadas entre os valores individuais ou médias de progênies e procedência para DAP. Concluíram que a densidade básica média das procedências e progênies diferiu significativamente tanto para procedências centro americanas como mexicanas e que as seleções para esta característica devem ser feitas preferencialmente em idades quando a competição entre indivíduos ainda não atingiu níveis elevados.

Dentre as características silviculturais, a altura e o diâmetro da árvore são as mais importantes, pois estão relacionadas com a produtividade das florestas, orientando a elaboração e a condução de planos de corte (Rosado e Brune 1983, p.11).

A densidade básica está estreitamente ligada à qualidade da madeira, e é uma característica bastante utilizada por pesquisadores e melhoristas na determinação do uso final da madeira. Em espécies, procedências e progênies de *Pinus*, a densidade básica se tem mostrado bastante variável. Essa característica tem alta herdabilidade, superior às das características de crescimento. Nos estudos genéticos e de melhoramento florestal, as seleções normalmente são dirigidas para os aspectos de crescimento, relacionados a ganhos em volume e forma. Pouca atenção tem sido dada aos aspectos tecnológicos e de qualidade da madeira. Estes são considerados apenas nos processos de seleção secundária (Brasil *et al.* 1980, p.39).

Brolin *et al.* (1995, p.209), estudaram as características da madeira juvenil e polpa de *Picea abies* (L.) Karst. Observaram que, em relação à morfologia dos traqueóides, a média aritmética do comprimento das fibras variou de 2,5 a 2,7 mm, a largura média variou de 36 a 46 μm . Estas dimensões se referem apenas a fibras de lenho inicial. Houve uma significativa diferença entre as duas regiões, sendo que os traqueóides das árvores plantadas na região de agricultura eram mais curtos e largos, com paredes mais finas. A única diferença significativa

dentro das regiões foi a largura do lume na região de floresta. O estudo indicou que o sítio e o manejo afetam mais as propriedades dos traqueóides do que a taxa de crescimento.

3.4 Relação entre morfologia da fibra e propriedades do papel

A madeira é formada por vários tipos de células, entre os quais, os traqueóides axiais, nas coníferas, e fibras, nas folhosas, que desempenham a função de sustentação. A indústria de celulose e papel aplica a estas estruturas os termos comuns de fibra longa e fibra curta, respectivamente. Por essa razão, quando se tratando da análise das características anatômicas em relação à celulose e papel, utilizar-se-á o termo genérico fibra.

Estudos sobre a relação entre as características morfológicas das fibras e as propriedades do papel começaram por volta de 1900 (Cross e Bevan, apud Horn 1974, p.1), entretanto os resultados eram bem contraditórios. Uma das primeiras propriedades da fibra relacionada com as propriedades de resistência do papel foi o comprimento. Muitos estudos mostraram que esta característica afetava diretamente a resistência à tração do papel, o que levou à conclusão que as polpas produzidas de folhosas apresentavam resistência mais baixa, pois as fibras eram menores do que as de coníferas (Arlov, Barefoot *et al*, Dadswell e Wardrop, apud Horn 1974, p.1). Outros estudos mostraram contradição evidenciando que o comprimento da fibra não tinha grande influência nas propriedades do papel, principalmente resistência à tração (Horn 1974, p.1).

Até meados do século vinte, diversas relações foram estabelecidas entre cada uma das propriedades do papel e comprimento de fibra (Arlov 1959, p.342; Hentschel 1959, p.979), porcentagem de lenho outonal (Bray e Curran 1937, p.39; Pillow *et al*. 1941, p.6), densidade da madeira (Nylinder e Hägglund 1954b, p.184; Schwartz e Bray 1941a, p.1; Stockman 1962, p.978; Watson e Hodder 1954, p.290), espessura da parede da célula (Dadswell e Watson 1962, p.537), razão entre espessura da parede e diâmetro do lume (Runkel 1952, p.77) ou

diâmetro do lume e diâmetro da fibra (Peteri 1952, p.157; Petroff e Normand 1961, p.353), área de ligação (Parsons 1942, p.360), conteúdo de hemicelulose (Watson 1961, p.144), e a resistência de fibras individuais (Dinwoodie 1965a, p.763; Kellog e Wangaard 1964, p.361; Van Den Akker *et al.* 1958, p.412).

3.4.1 Resistência à tração, comprimento de auto-ruptura e fator de arrebentamento

Em comum com a maioria das outras propriedades de resistência do papel, foi assumido, de um modo geral, no início do século vinte, que a resistência à tração (comprimento de auto-ruptura) e resistência ao arrebentamento eram determinadas primeiramente pelo comprimento da fibra (relação direta) (Dinwoodie 1965b, p.440).

Cross e Bevan (apud Dinwoodie 1965b, p.440), estiveram entre os primeiros estudiosos a verificar que outros fatores estavam envolvidos. Assim, recomendaram que fatores relacionados ao número e natureza dos contatos entre fibras também deveriam ser considerados.

A suposição de que o comprimento da fibra era o fator determinante da resistência do papel persistiu, embora alguns poucos trabalhos posteriores sugeriram que a razão entre comprimento e diâmetro da fibra (relação direta) deveria ser considerada mais do que o comprimento individualmente (Klemm 1928, p.88). Esta suposição teve respaldo em estudos posteriores de Peteri (1952, p.157), Von Koeppen e Cohen (1955, p.105) e Von Koeppen (1958, p.460).

As publicações dos anos vinte de Benjamin (1923), o qual demonstrou que fibras curtas de eucaliptos australianos fornecem propriedades de resistência da polpa satisfatórias, e Nilssen (1926), que trabalhando com pinus, foi um dos primeiros a comparar polpas de lenho primaveril e outonal, encontrando maiores comprimentos de auto-ruptura no lenho primaveril, começaram a colocar em dúvida a importância do comprimento da fibra para a resistência à

tração. Estes trabalhos foram confirmados por numerosas investigações, nos anos trinta, em coníferas mostrando diferentes taxas de crescimento, as quais levaram a postulações que o comprimento de auto-ruptura e arrebentamento eram inversamente relacionados com a porcentagem de lenho outonal (Bray e Curran 1937, p.39; Pillow *et al.* 1941, p.6).

Em trabalhos posteriores, a densidade da madeira (relação inversa), mais do que a porcentagem de lenho outonal, foi considerada como sendo o principal fator envolvido (Holzer e Lewis 1950, p.110; Klem 1949, p.371; Nylinder e Hägglund 1954a, Schwartz e Bray 1941b, p.33; Stockman 1962, p.978; Trendelenburg 1936, p.389, Watson e Hodder 1954, p.290). Isto pareceria ser um desenvolvimento lógico, como Hildebrandt (1962, p.1348) e outros indicaram, para a porcentagem de lenho outonal, que não é sempre uma indicação segura da densidade, uma vez que o lenho outonal poderia ser constituído de células com diferentes espessuras da parede, ambas dentro de uma árvore e entre diferentes árvores.

Era aparente que estas propriedades do papel eram dependentes da flexibilidade das fibras, se isto era registrado como um efeito da densidade como acima, ou como um efeito da espessura da parede das células (Dadswell e Watson, 1962, p.540; Haywood 1950, p.77), da área da parede da célula relativamente à área total (Índice de Mülsteph) (Mülsteph 1940a, p.132; 1940b, p.45; 1941, p.201) ou como a relação do diâmetro do lume com o diâmetro da fibra (coeficiente de flexibilidade) (Petroff e Normand 1961, p.353; Petroff *et al.* 1963; Tamolang e Wangaard 1961, p.216). Petroff e Normand (1961, p.353), encontraram um coeficiente de correlação de 0,83 entre esta última relação e o comprimento de auto-ruptura. Esta relação foi usada para classificar árvores do Congo (Petroff *et al.* 1963) e para a seleção de amostras de árvores de 200 espécies no país para experimentos de polpação (Istas *et al.* 1951, p.10).

Entretanto, apesar da aparente significância da flexibilidade da fibra na resistência do papel, um número de trabalhos continuou a relacionar o comprimento de auto-ruptura com a

porcentagem de lenho outonal (Hammond e Billington 1949, p.563; Mottet e Quoilin 1957, p.116; Kress e Ratcliff 1943, p.31; Watson e Dadswell 1962, p.116).

Arlov (1959, p.342) examinou folhas formadas por polpa fracionada e encontrou significativa influência do comprimento da fibra na resistência à tração. Arlov relatou a influência em termos da distribuição de tensão, a fibra mais longa fazendo melhor uso de sua resistência intrínseca para distribuir a tensão externa sobre um número maior de ligações. Clark (1962, p.628), em um trabalho posterior, ilustra que o comprimento de auto-ruptura e o arrebatamento são também função do "*coarseness*" da fibra, uma expressão do peso por unidade de comprimento da fibra. Watson e Dadswell (1961, p.168), também mostraram o efeito do comprimento da fibra no comprimento de auto-ruptura em papéis feitos manualmente de cavacos deslignificados e folhas cortadas em faixas estreitas e então reconstituídas. Alguns pesquisadores encontraram, em uma investigação posterior (Watson e Dadswell 1964, p.146), que a razão entre o lume e o diâmetro não tinha efeito.

Relações com o comprimento da fibra são em parte explicadas em termos da grande variação desta característica no experimento. Isto foi certamente demonstrado por muitos investigadores que encontraram baixos valores de resistência em folhosas quando comparado a polpas de coníferas, devido ao menor comprimento das fibras (Annergren *et al.* 1963, p.196; Holzer 1950, p.163).

Expressando em equações o que observou empiricamente, Malmberg indicou que em coníferas (1964a, p.69) e folhosas (1964b, p.617) o comprimento de auto-ruptura é uma função do módulo de elasticidade e a espessura da folha, enquanto o arrebatamento nas polpas de coníferas é uma função curvilínea do módulo de elasticidade e espessura da folha. Kane (1959, p.359), também apresentou modelos matemáticos nos quais o comprimento de auto-ruptura é relacionado à distribuição do comprimento da fibra e refino. Ele é cuidadoso,

entretanto, dizendo que os dados estudados não lançam nenhuma luz na validade destas equações.

Determinados graus de interação ocorrem entre as características morfológicas das fibras e afetam de maneira diferenciada as propriedades do papel produzido, ou seja, variações na resistência não podem ser explicadas apenas por uma característica isolada. Os resultados do estudo de Horn (1974, p.3) mostraram que quantitativamente a espessura da parede exercia considerável influência, explicando em torno de 80% da variação na resistência à tração. Embora o comprimento de fibra sozinho não mostrasse uma significativa correlação com resistência ao arrebentamento e tração, a correlação entre comprimento de fibra e espessura de parede foi alta, sendo mostrado através de regressão múltipla uma pequena influência do comprimento na resistência à tração, resultando em um índice quantitativo, o índice de flexibilidade da fibra.

As relações apresentadas em muitas destas investigações devem ser aceitas com precaução na taxa de influência nas propriedades de auto-ruptura e arrebentamento. Em muitos experimentos somente um fator foi variável, e é fortemente surpreendente que relações aparentes entre resistência do papel e as propriedades das fibras foram encontradas (Dinwoodie 1965b, p.441). Entretanto, Buckland e Mathieson (1957, p.113) notaram que a relação entre o índice de comprimento de fibra e o comprimento de auto-ruptura variava com a refinação, mas a inclusão do "*freeness*" numa regressão múltipla não adicionou variação no comprimento de auto-ruptura, explicado pelo índice de comprimento de fibra. Marton e Alexander (1963, p.65), indicaram que, em polpas fracionadas, outras características morfológicas na polpa variavam entre frações, por exemplo, o diâmetro e freqüentemente a espessura da parede. Assim, a densidade do papel também deveria ser levada em conta. A significância da possibilidade de outros fatores variarem conjuntamente com o comprimento das fibras foi esquecida por muitos estudiosos.

Nas relativamente poucas investigações nas quais a densidade e o comprimento de fibra foram criticamente considerados, é geralmente indicado que embora o comprimento da fibra ou a razão comprimento/diâmetro da fibra (coeficiente de enfiletamento) (Peteri 1952, p.157; Wangaard 1962, p.548) sejam importantes, o principal fator envolvido é em termos de densidade, densidade por si (Clark 1958; Watson *et al.* 1952, p.243), espessura da parede da fibra (Barefoot *et al* 1964, p.343; Jayme 1958, p.178; 1961, p.372), razão entre o diâmetro do lume e diâmetro da fibra (Peteri 1952, p.157; Wangaard 1962, p.548), ou a relação de duas vezes a espessura da parede e o diâmetro do lume (índice de Runkel) (Runkel 1952, p.77).

Hiett *et al.* (1960, p.173) concluíram que tanto alta como baixa densidade da madeira poderia ser desejável dependendo se alta resistência ao rasgo e arrebentamento são necessárias. A grande variação nas resistências do papel com a densidade dentro de uma árvore sugere que outra característica varia com a densidade dentro da árvore (mas não entre árvores) e influencia as resistências do papel.

Foelkel *et al* (1992, p.40), concluíram que a densidade é um índice importante, mas o componente espécie também tem grande influência. Para muitas propriedades não basta apenas trabalhar com a densidade, independentemente da espécie, pois madeiras de espécies diferentes com a mesma densidade não são tecnologicamente ou anatomicamente semelhantes. Propriedades da celulose como volume específico, resistência ao ar e absorção de água, mostraram ser muito mais dependentes da densidade da madeira do que da espécie.

Em seus estudos de folhosas tropicais, Runkel (1952), indicou que, desde que o comprimento da fibra fosse médio, a adequação de espécies para polpação dependeria da relação entre duas vezes a espessura da parede e o diâmetro do lume ser menor que a unidade. Edge (1948, p.803), revendo os trabalhos feitos durante os anos de guerra, relatou que o comprimento tinha pequena significância na determinação do comprimento de auto-ruptura. Este ponto de vista foi confirmado por Annergren *et al.* (1963, p.196), os quais, revendo os

trabalhos de seus laboratórios durante alguns anos, acharam a mesma ausência de correlação em polpas *kraft* de coníferas. Em adição, declararam que não acharam melhorias usando a relação espessura da parede e diâmetro, ou espessura da parede e diâmetro do lume em vez da densidade da madeira.

Tamolang e Wangaard (1961, p.212), estavam entre os primeiros a empregar análises de regressões múltiplas para determinar quantitativamente a influência de vários fatores nas propriedades da polpa. Nos seus estudos de 15 folhosas tropicais e temperadas, foram capazes de explicar 87% da variação em comprimento de auto-ruptura e 85% da variação no arrebetamento de polpas sem refinação em termos de largura do lume (relação direta), diâmetro da fibra (relação inversa) e densidade básica da madeira (relação inversa), a última variável sendo significativa apenas a um nível de 10% de probabilidade. Em polpas com refinação a 450 ml CSf, 60% da variação em comprimento de auto-ruptura poderia ser explicada pela razão da largura do lume e diâmetro (relação direta), decréscimo da "*freeness*" (relação direta), comprimento de fibra (relação direta) e densidade básica (relação direta). Infelizmente, variáveis com nível de significância menores que 5% foram incluídas nestas regressões.

A extensão deste trabalho (Wangaard 1962 p.548), pela inclusão de três espécies adicionais e novos cálculos, produziu maiores mudanças nos resultados. O comprimento de auto-ruptura e índice de arrebetamento das polpas sem refinação foram significativamente relacionados com a razão do diâmetro do lume e diâmetro da fibra (relação direta) e a razão entre comprimento da fibra e diâmetro (relação direta), a primeira variável sendo mais importante que a última e ambas explicando 87% da variação no comprimento de auto-ruptura e 83% da variação no arrebetamento. Numa refinação a 450ml CSf, a resistência da fibra (relação direta) como medida pelo teste de zero span foi a mais importante variável. Comprimento de fibra (relação direta) e a razão diâmetro do lume/diâmetro da fibra (relação

direta) foram significantes a 10% de probabilidade, sendo que as três variáveis explicaram 73% da variação no comprimento de auto-ruptura e 63% da variação no arrebentamento.

Selecionando quatro árvores de *Pinus taeda* com combinações de fibras de alto e baixo comprimento e diferentes densidades, Barefoot *et al.* (1964, p.345) determinaram a relativa significância do comprimento da fibra (relação direta) e espessura da parede da fibra (relação inversa) das células do lenho outonal no comprimento de auto-ruptura. Como nos estudos de Tamolang e Wangaard (1961, p.44), as propriedades químicas das fibras não foram incluídas. Estes trabalhos explicam 92% da variação no comprimento de auto-ruptura de polpas sem refinação, em termos destas duas variáveis. Quando consideradas separadamente, a espessura da parede das células explica melhor a variação do que o comprimento das fibras. Entretanto, a regressão quadrática da relação da espessura da parede da célula com o diâmetro do lume (relação inversa) explicou 95%, sem a inclusão do comprimento de fibra, e isto parece indicar que o comprimento da fibra não é relativamente importante. Resultados similares foram obtidos para polpas com refinação a 500 e 300ml CSf em relação ao comprimento de auto-ruptura e resistência ao rasgo.

Dinwoodie (1966, p.61), na comparação de polpas de *Picea sitchensis* de anéis de crescimento separados e de 16 árvores cobrindo 14 diferentes coníferas, também utilizando análise de regressão múltipla, observou que a espessura da parede, ou a relação entre a espessura da parede e o diâmetro da fibra, eram as variáveis mais importantes influenciando o comprimento de auto-ruptura e arrebentamento (relação inversa). A variação explicada variou de 65 a 92% para ambas as propriedades. Em polpas com refinação a 400ml CSf, as mesmas variáveis foram novamente significantes, geralmente a 0,1% de probabilidade, mas a viscosidade da celulose foi também significativa (nível de 1.0%) (relação direta). As regressões explicaram 70-86% da variação de ambas as propriedades.

A resistência da fibra no desenvolvimento da resistência da folha (relação direta) foi demonstrada inicialmente por Van Den Akker *et al.*, em 1952. Com o uso de fibras coloridas incorporadas em uma folha, observaram que pelo menos 40% das fibras foram quebradas nas falhas de tensão de folhas de polpa sem refinação e esta porcentagem aumentou consideravelmente com a refinação (Van Den Akker *et al.* 1958, p.416). Este comportamento é contrário ao visto nos testes de auto-ruptura de fibras individuais, e também onde a resistência das folhas foi determinada apenas pela estrutura da folha. A influência da resistência da fibra foi confirmada por numerosos autores (Dinwoodie 1965a p.763; Van Buijtenen *et al.* 1958, p.170; Kellog e Wangaard 1964, p.361; Wangaard 1962, p.548), embora Wangaard, Kellog e Wangaard e também Dinwoodie tenham comparado a resistência da fibra e as propriedades do papel de madeira normal e de compressão, encontrando resistência das fibras significante somente em polpas com refinação.

Contrariando os autores citados anteriormente, Hiett *et al.* (1960, p.171), estudando as relações da densidade da madeira de *Pinus elliottii* e outras madeiras com as propriedades do papel, não encontraram nenhuma relação entre estas e o conteúdo de células de lenho tardio e comprimento de fibra. Observaram que a resistência ao arrebentamento parecia estar relacionada de uma maneira inversa com a densidade básica da madeira. Quando a densidade diminui, a resistência ao arrebentamento aumenta; inversamente, quando decresce, a resistência ao rasgo decresce, sendo que o decréscimo é mais acentuado com a variação dentro da árvore.

Embora as variações no comprimento de auto-ruptura e fator de arrebentamento sejam muito similares, as duas propriedades não são idênticas. Foi mostrado (Emerton 1957) que quando o papel é seco sob restrição há uma perda na resistência ao arrebentamento e ganho na resistência à tração. Isto foi explicado em termos de relação direta entre arrebentamento e esticamento do papel na direção da tensão aplicada (Sapp e Gillespie 1947, p.120).

É aparente pelas evidências acima que o comprimento de auto-ruptura e resistência ao arrebitamento são determinados pela estrutura da folha e resistência da fibra. O fator de formação, representando a influência combinada da forma e estrutura individual da parede das fibras, junto com a natureza e quantidade de ligações interfibras, poderia parecer mais importante que a resistência da fibra, especialmente em polpas sem refinação e levemente moídas (Dinwoodie 1965, p.442). Este ponto de vista foi expresso por Vilars (1950, p.455), e correlações entre resistência do papel e áreas coladas foram apresentadas (Parsons 1942, p.360). Van Den Akker *et al.* (1958, p.416) mostraram que uma porcentagem considerável de fibras quebradas encontradas na investigação rompeu depois do início do rompimento no papel, donde concluíram que é possível que a ligação fibra a fibra continue sendo o fator mais importante na resistência à tração de papéis comuns, e que a resistência à tração das fibras é de importância secundária. Giertz (1962, p.615), enfatizou o significado da refinação na determinação da significância da resistência da fibra afetando o comprimento de auto-ruptura e arrebitamento, confirmando, assim, o que foi primeiramente expressado por Graham (1956, p.147). Assim Giertz (1962, p.616) observou que o máximo comprimento de auto-ruptura e arrebitamento dependem da resistência média das fibras, embora Helle (1963, p.1015), concordando com isto para polpas sulfito, comenta que a máxima resistência em polpas *kraft* é determinada pelo grau de ligação.

A principal dimensão da fibra envolvida é a espessura da parede, ou a relação da espessura da parede com o diâmetro ou alguma razão similar. Esta propriedade determina a flexibilidade da fibra, e como a quantidade de colapso da fibra (Robertson e Mason 1962, p.640) e o grau de conformabilidade dentro da folha resultam em um grande número de áreas de ligação e um papel com maior comprimento de auto-ruptura e resistência ao arrebitamento (Dadswell e Watson 1962, p.570; Emerton *et al.* 1962, p.54). A área total ligada dentro de uma folha é também dependente da quantidade de finos (Jayme 1961, p.372).

Dinwoodie (1966, p.66), em seus estudos sobre a influência das características anatômicas e químicas das fibras nas propriedades de polpa *kraft*, verificou que o principal fator afetando o comprimento de auto-ruptura é a densidade da fibra (relação inversa), que determina a flexibilidade e o grau de colapso da fibra. O comprimento da fibra é de importância secundária na determinação do comprimento de auto-ruptura, tornando-se significativo a um nível crítico.

Dinwoodie (1966, p.66), encontrou também a influência da densidade da fibra na resistência ao arrebentamento, medida como espessura da parede ou duas vezes a espessura/diâmetro (relação inversa). A densidade da fibra determina a flexibilidade, a qual, em teoria, influencia a extensão das ligações dentro da folha. O comprimento da fibra afeta a resistência ao arrebentamento abaixo de um nível crítico, o qual foi encontrado próximo a 4mm.

Gonzaga *et al.* (1983, p.21), estudando a qualidade da madeira de eucalipto, verificou que fibras curtas que apresentam baixos Índices de Runkel e Frações Parede e altos Coeficientes de Flexibilidade mostram-se flexíveis na formação do papel, favorecendo as propriedades que dependem da interligação das fibras (resistência à tração e ao arrebentamento).

Barrichelo e Brito (1976, p.140), estudando quais as propriedades da madeira e fibras de *Eucalyptus grandis* que exercem a maior influência sobre as propriedades do papel chegaram à conclusão de que a resistência à tração era função direta da largura da fibra, do diâmetro do lume e do índice de enfieltramento; e que a resistência ao arrebentamento mostrou-se correlacionada com o comprimento, espessura da parede e largura da fibra.

Segundo Foelkel e Sani (1976, p.141), madeiras de alta densidade estão geralmente associadas com fibras de paredes espessas e isso traz valores para o índice de Runkel maiores que a unidade. Nestes casos, as fibras celulósicas se mostram rígidas e pouco flexíveis e as

celuloses possuem usualmente menor resistência à tração, ao arrebentamento e a outras propriedades que dependem da ligação entre as fibras.

D'Almeida (1986, p.41-42) comenta que a resistência de uma folha formada somente por pasta celulósica depende do tipo de refinador empregado e da resistência da fibra de celulose (diretamente relacionada com a viscosidade da pasta). Com relação à resistência da fibra, verificou que nas propriedades que dependem mais do entrelaçamento e ligações entre as fibras do que das suas características próprias, como é o caso do arrebentamento, esticamento e tração, a diminuição da viscosidade da pasta celulósica não é acompanhada de uma diminuição significativa dessas propriedades, a não ser para valores baixos de viscosidade (ao redor de 7,5 mPa.s).

Brolin *et al.* (1995, p.211), em um estudo comparativo entre árvores coletadas em povoamentos florestais e em regiões de agricultura, obtiveram um índice de tração, para polpa de *Picea abies* não refinada da região de agricultura de 10-15 Nm/g maior que o da polpa de povoamentos florestais. Comentam que isto se deve à alta flexibilidade das fibras e alto número de fibras por grama de polpa. Isto leva a uma alta densidade da folha e aumenta a oportunidade de ligações interfibras.

Mohlin *et al.* (1996, p.110) estudaram a deformação da fibra e resistência da folha *Kraft* de coníferas não branqueada, branqueada com oxigênio, e totalmente branqueada. Concluíram que as deformações que possuem efeito negativo em propriedades como índice de tração e resistência à tração, e provavelmente também na resistência ao arrebentamento e compressão, são aquelas que mudam a direção do eixo da fibra, ou seja, torcimento, curvatura e dobra angular. Não foi possível separar os efeitos nestes três tipos de deformações. As deformações que não mudam a direção do eixo axial da fibra não apresentaram influência significativa nas propriedades das folhas de papel.

El-Hosseiny e Anderson (1999, p.203), estudando o efeito do comprimento da fibra e “*coarseness*” na resistência ao arrebentamento do papel, utilizando 171 polpas *Kraft* diferentes, branqueadas, de coníferas, folhosas e misturas, concluíram que modelos teóricos para o arrebentamento, como o de Van den Akker, fornecem uma expressão invariante, na qual o arrebentamento é proporcional ao produto da resistência média pela raiz quadrada da direção da máquina em que é aplicado o esforço, ambos medidos em tensão uniaxial. Demonstraram a validade da expressão em folhas produzidas com orientação aleatória. Entretanto, observaram que um fator de correção é necessário para prevenir este modelo de erros não previstos. Uma explanação plausível é que o fator reflete a natureza biaxial do teste. As características das fibras que afetam este teste são o comprimento da fibra e o “*coarseness*”: o primeiro aumenta e o segundo o diminui.

3.4.2 Resistência ao rasgo

A resistência ao rasgo da folha de papel foi relacionada no passado à maioria das propriedades anatômicas e químicas das fibras, e embora esta relação tenha sido examinada por numerosos investigadores, existem dúvidas e incertezas quanto aos fatores críticos afetando esta propriedade (Dinwoodie 1965, p.443).

O comprimento dos traqueóides axiais é de grande importância para a indústria de celulose e papel, uma vez que papéis produzidos a partir de madeira com traqueóides longos possuem maior resistência ao rasgo (Brown *et al.* 1949, p.132; Kollman e Cote, 1968, p.10; Larson *et al.* 2001, p.10; Wheeler 2005).

Peteri (1952, p.158) e Petroff e Normand (1961, p.353), enquanto reportando a ausência de correlação entre resistência ao rasgo e comprimento de fibra, encontraram uma correlação significativa com a razão entre comprimento da fibra e diâmetro (relação direta).

Houve uma série de estudos onde a variação na resistência ao rasgo foi positivamente relacionada com a densidade ou espessura da parede da fibra (Foelkel e Barrichelo 1975, p.51; Haywood 1950, p.77; Schwartz e Bray 1941b, p.33; Stockman 1962, p.978; Watson e Hodder 1954, p.290) ou à porcentagem de lenho outonal (Hammond e Billington 1949, p.563; Nilssen 1926, p.6; Pillow *et al.* 1941, p.6; Watson e Dadswell 1962, p.116), sendo que apenas uma variável simples foi testada.

Gonzaga *et al.* (1983, p.25), encontraram relação da resistência ao rasgo com a razão entre comprimento e largura da fibra. A relação entre o diâmetro do lume e a largura da fibra (coeficiente de flexibilidade), expressa em percentagem, também foi analisada. Quanto maior esta relação, mais flexível se torna a fibra e ocorre assim maior possibilidade de ligações interfibras na fabricação da folha de papel. Com isso, diminui-se a resistência ao rasgo em certas condições. Foelkel e Barrichello (1975, p.51) encontraram proporcionalidade positiva da fração parede com a resistência ao rasgo.

Foelkel e Sani (1976, p.148), verificaram que madeiras de alta densidade estão geralmente associadas com fibras de paredes espessas e isso traz valores maiores que a unidade para o índice de Runkel. Nestes casos, as fibras celulósicas se mostram rígidas e pouco flexíveis e as celuloses possuem usualmente maior resistência ao rasgo. A qualidade da celulose obtida de madeira juvenil é bastante diferente daquela de madeira adulta, apresentando baixa resistência ao rasgo (Foelkel e Barrichelo 1975, p.52).

Barefoot *et al* (1964, p.343), estudando *Pinus taeda*, explicaram 89% da variação na resistência ao rasgo pela densidade da madeira, enquanto a inclusão do comprimento da fibra não foi responsável por nenhum aumento significativo na variação explicada pela regressão.

Alguns trabalhos comentavam que o comprimento da fibra e a densidade ou espessura da parede são aproximadamente de igual importância (Dinwoodie 1966, p.63; Petroff e Normand 1961, p.353; Tamolang e Wangaard 1961, p.216; Wangaard 1962, p.548). Assim,

Petroff e Normand (1961, p.353) registraram coeficientes de correlação de 0,90, em papéis de espécies tropicais de folhosas, entre resistência ao rasgo e a razão entre comprimento da fibra e diâmetro, e 0,89 entre resistência ao rasgo e a razão entre diâmetro do lume e diâmetro da fibra. Wangaard (1962, p.550) explicou 94% da variação, em polpas sem refinação, em termos do comprimento da fibra (relação direta), razão entre tamanho do lume e diâmetro da fibra (relação direta), e espessura da parede (relação direta).

Dinwoodie (1966, p.63), em seus estudos sobre polpas de madeira, encontrou que a principal variável era a razão entre a espessura da parede e o diâmetro da fibra (relação direta) seguida de perto em significância pelo comprimento da fibra (relação direta).

Outros estudos mostraram o comprimento da fibra como principal fator. Dadswell e Watson (1962, p.570), revendo seus estudos em coníferas e folhosas, concluíram que o comprimento da fibra é a mais importante variável simples. A espessura da parede é de importância secundária em polpas de fibras longas, onde seu aumento fornece maiores valores de rasgo.

Malmberg (1964a, p.69; 1964b, p.617) e Kane (1960, p.236), expressaram a resistência ao rasgo em termos de uma fórmula matemática. A forma mostrada é uma função da energia da tensão de ruptura, e a relação posterior com a distribuição no comprimento da fibra e refino, com a mesma reserva que para comprimento de auto-ruptura, com respeito à validade da relação.

Novamente, a possível significância da resistência de fibras individuais, na determinação da resistência ao rasgo do papel, foi observada (Marton e Alexander 1963, p.65) e alguns trabalhos apresentaram resultados indicando uma relação direta entre a resistência da fibra e a resistência ao rasgo, em polpas sem e com refinação (Dinwoodie 1965a, p.763; Giertz e Helle 1960, p.455; Helle 1963, p.1015). Van Den Akker (1958, p.416) mostrou que 76% das fibras rompem no teste de rasgo, sendo que a porcentagem aumentou levemente com

o refino. Este é um percentual consideravelmente maior do que o encontrado no teste de tração.

Três fatores parecem estar envolvidos na determinação da resistência ao rasgo do papel, nominalmente, o comprimento, a rigidez e provavelmente a resistência das fibras. Na tentativa de avaliar a relativa importância destas variáveis, e entender o mecanismo do rasgo, deve-se lembrar que este teste empírico mede o trabalho feito no cisalhamento do papel, assim como o fato de ser diferente dos testes de comprimento de auto-ruptura e arrebentamento, os quais refletem a força requerida para romper o papel (Dinwoodie 1965, p.444).

As primeiras tentativas de explicar a resistência ao rasgo foram feitas por Brecht e Imset (apud Dinwoodie 1965, p.444), os quais deram atenção à zona de rompimento como mais extensa que um ponto. Mostraram que as forças na região do rasgo resultam num momento de força relacionado a algum ponto de referência, e calcularam a força de cisalhamento dividindo este momento pela distância entre o ponto de referência e o ponto de incidência da força. Esta teoria enfatiza a influência da concentração de esforços na zona de rasgo e ilustra o quanto a extensão e comprimento da fibra influenciam o tamanho da região de rompimento. O ponto fraco desta teoria é que levou em conta as forças individuais agindo entre as fibras durante a ruptura no rasgo, mais do que a soma de todas as forças que são dependentes do tempo.

Em polpas de fibras longas, o trabalho feito na extração destas é alto e resulta em uma alta resistência ao rasgo. O grau de ligação antes de qualquer processo de refinação está geralmente acima do nível crítico, e qualquer aumento nas ligações irá resultar em uma redução da área de concentração de esforço, assim reduzindo a quantidade de energia requerida para romper o papel (Dinwoodie 1965, p.444).

O decréscimo na resistência ao rasgo com a refinação foi explicado em termos da concentração de esforços ou localização do ponto de aplicação da carga. Um aumento na área

de ligação dentro da folha de papel, pelo refino ou pela adição de adesivos, resulta em uma distribuição diferente da força de rasgo, concentrado em poucas fibras e ligações entre fibras, que podem depois ser rompidas com o uso de menos energia. Esta explicação do rasgo, mesmo assim, não incorpora considerações da resistência da fibra. Entretanto, as duas explicações são mais complementares do que contraditórias (Dinwoodie 1965, p.445).

Kärenlampi (1996, p.215) modelou o rasgo do papel como energia elástica dissipada com a quebra das fibras e ligações entre elas, resultados que diferiram de teorias anteriores onde foi calculado o trabalho de fricção quando as fibras eram arrancadas. O principal refinamento em relação ao trabalho de Page (apud Kärenlampi 1996, p.215) foi que a falha na fibra não tem que ser o mecanismo dominante da dissipação de energia, embora a resistência ao rasgo seja proporcional ao quadrado da resistência da fibra através de uma constante.

Kärenlampi *et al.* (1996, p.209) observa que o índice de rasgo “*in-plane*” é uma função linear do comprimento de fibra. O refino aumenta o índice de rasgo de papéis produzidos com fibras grossas, mas o mesmo não ocorre quando são utilizadas fibras mais finas, permanecendo constante ou diminuindo em alguns casos.

Giertz e Helle (1960, p.455) confirmaram que o mais importante fator simples determinando a resistência ao rasgo é a resistência da fibra, que é seguido de perto em significância pelo comprimento da fibra. Estes estudiosos concordam com o ponto de vista de Brecht e Imset (1934, p.14) respeitando a importância da extensibilidade da folha na determinação da resistência ao rasgo, enquanto uma conformação quantitativa desta relação foi apresentada por Wahlberg (1953, p.124).

Em adição ao comprimento e resistência da fibra, a resistência ao rasgo é freqüentemente relacionada diretamente à espessura da parede da célula. A relação deve ser dupla. Primeiro, um aumento na espessura da parede irá resultar em menos ligações, e, se estiver acima de um certo nível crítico, resultará em aumento na resistência ao rasgo devido a

um menor grau de concentração de esforços e provavelmente um maior grau de extensão da folha. Segundo, a espessura da parede da célula talvez seja outra expressão da resistência da fibra, desde que foi demonstrado que as fibras de lenho tardio de *Pinus taeda* são duas vezes mais resistentes por unidade de área do que fibras de lenho inicial (Dinwoodie 1965, p.445).

Estudos mais recentes também relatam influências da resistência da fibra nas propriedades do papel. D'Almeida (1986, p.41) observou que, no caso do rasgo, onde a resistência da fibra é importante, qualquer diminuição da viscosidade influi significativamente. Brolin *et al.* (1995, p.211) relata o baixo índice de rasgo da polpa de *Picea abies* devido ao pequeno comprimento das fibras observado.

Morris *et al.* (1997, p.137) observaram um aumento na resistência ao rasgo e diminuição na absorção da energia de tensão com o aumento da idade de corte em *Pinus elliottii* e *P. patula* além da influência da altitude do sítio.

Com respeito ao comprimento médio da fibra, Young (apud Campos *et al.* 2000, p.59) afirma que esse parâmetro afeta a formação ou uniformidade da distribuição das fibras. Quanto mais curtas forem as fibras, mais uniforme será a formação da folha e melhor sua estabilidade dimensional, por exemplo. O comprimento médio das fibras também afeta as propriedades mecânicas da folha de papel produzida. A resistência ao rasgo, por exemplo, diminui com o decréscimo no comprimento médio da fibra.

De acordo com Fardim e Duran (1999, p.203), a resistência ao rasgo é uma propriedade muito empregada para descrever o desempenho físico-mecânico de papéis, principalmente em situações de uso final, como capacidade de absorção de choques em papéis para embalagens e em controle de qualidade do papel imprensa. O desempenho em máquinas de impressão e conversão também é um importante fator afetado pela resistência ao rasgo. Entretanto, o papel é um material heterogêneo onde são empregadas fibras e aditivos, que afetam e contribuem para quase todas as propriedades de interesse nos papéis, no entanto,

para as propriedades físico-mecânicas é a característica da polpa celulósica o parâmetro mais importante (Scott *et al.* apud Fardim e Duran 1999, p.203).

Ainda segundo Fardim e Duran (1999, p.203 e 209), as propriedades da polpa, como comprimento médio dos traqueóides, têm correlação bem estabelecida com a resistência ao rasgo, mas relações envolvendo composição e componentes químicos ainda estão sob investigação. Comentam que o comprimento médio ponderado é a propriedade morfológica que está correlacionada linearmente com o índice de rasgo.

3.4.3 *Freeness* (Drenabilidade)

Dinwoodie (1965, p.445) comenta que o “*freeness*” parece estar relacionado com a flexibilidade da fibra se isto é mostrado como espessura da parede da célula (relação direta) ou como a razão entre diâmetro do lume e diâmetro da célula (relação inversa). Assim, Petroff e Normand (1961, p.353) encontraram uma correlação de -0,94 entre *freeness* e esta razão de flexibilidade. Wangaard (1962, p.548) em seus estudos de polpas de folhosas, explicou 84% da variação no *freeness* em termos da espessura da parede (relação inversa); enquanto Dinwoodie (1966, p.65), em coníferas, poderia explicar 78-86% da variação em termos de espessura da parede (relação direta) e comprimento de fibra (relação direta) ou a razão entre comprimento e diâmetro (relação direta). O fator comprimento é responsável por maiores variações do que a espessura da parede da célula. Tamolang e Wangaard (1961, p.216) concluíram que o *freeness* da polpa antes do refino está relacionado primariamente com a espessura da parede da célula, aumentando com o aumento da espessura da parede.

3.5 Refinação

Na refinação, as fibras são submetidas a uma ação mecânica para potencializar suas propriedades papeleiras em relação ao produto a ser fabricado, tendo como efeitos principais a

eliminação da parede primária, formação de finos, penetração da água na parede celular, ruptura de algumas ligações de hidrogênio entre fibras, aumento de flexibilidade das fibras, formação de fraturas na parede celular e alargamento e/ou compressão das fibras (Smook 1990, p.186). Tais modificações levam a uma melhora na distribuição e homogeneização, evitando a formação de aglomerados e aumentando a flexibilidade das fibras (IPT 1988, p.30; Caumo 2003, p.16).

De acordo com Smook (1990, p.196), Walker (1993, p.484) e Dueñas (1997, p.256), os efeitos na folha de papel, decorrentes da refinação são: decréscimo da resistência ao rasgo e aumento da resistência ao arrebentamento e à tração, devido ao aumento da área de contato entre as fibras; incremento inicial na resistência ao rasgo com uma leve refinação na polpa de coníferas, porém com uma maior refinação observa-se um declínio constante nesta propriedade, decorrente do aumento do número de cortes nas fibras.

Neves (1986, p.40) argumenta que o principal fator afetado pela refinação da pasta celulósica é a formação da folha na parte úmida da máquina de papel. Para uma boa formação de folha são desejáveis que as fibras tenham ganho em flexibilidade durante o refino; que tenha ocorrido colapso das fibras, o que contribui para aumentar a área de ligação entre elas, dando mais conformação e resistência à folha; que as fibras tenham sido fibriladas durante o refino, também para aumentar a resistência e que as fibras não se apresentem cortadas após a refinação, pois isto diminui a resistência mecânica do papel.

Silva Jr. (1983, p97), descreve o comportamento das polpas celulósicas durante a refinação através da facilidade com que as fibras sofrem modificações químicas e morfológicas, tendo como consequência a melhoria global das características do papel.

Silva Jr. (1983, p.106), estudando polpas *Kraft* branqueadas de pinus (mistura de *Pinus taeda*, *P. echinata* e *P. palustris* em proporções desconhecidas), bétula sueca (*Betula verrucosa*), *Eucalyptus grandis* e *E. rostrata*, verificou que as polpas apresentaram

comportamentos similares à medida que a energia de refinação foi aplicada. Também observou que a quantidade de finos produzidos durante o tratamento é diretamente proporcional às novas superfícies geradas externamente nas fibras. Uma análise microscópica revelou que, à medida que o tratamento prosseguia, não só as fibras eram desmembradas em pedaços menores, com maior superfície específica, como também os finos fibrilares de alta superfície específica eram formados, a partir do descascamento progressivo das camadas externas.

Com respeito à superfície específica, as folhosas parecem formar um grupo em separado, já que o pinho demonstrou sempre valores mais baixos, fato que se deve, provavelmente, ao baixo teor de finos primários e também número menor de fibras por grama. Uma comparação das três folhosas indicou que as polpas de eucalipto tiveram valores de superfície específica bastante altos no seu estado original, o que foi esperado pelo elevado número de pequenas e finas fibras por grama nestas polpas. O volume específico aumenta rapidamente nos estágios iniciais da refinação, mesmo quando a energia aplicada é muito baixa, mas tende a um valor máximo à medida que o tratamento prossegue. Tal fato foi observado em polpas integrais e nas fibras livres de finos, o que parece indicar que os efeitos principais ocorrem ao nível das fibras, sendo afetados pelos finos somente em quantidade, e não qualitativamente como observado para a superfície específica (Silva Jr., 1983, p.107).

Silva Jr. (1981) verificou em seus estudos que o aumento da resistência à tração com a energia aplicada tem as mesmas características para todas as polpas. Observou um rápido aumento na resistência logo no início do tratamento, seguido de uma tendência de nivelamento à medida que a refinação prossegue. O desenvolvimento das propriedades do papel, que dependem fundamentalmente do grau de consolidação da folha e de ligações entre fibras, é influenciado diretamente pela extensão do aumento de capacidade de retenção de água das polpas durante o processo de refinação. Com relação à resistência ao ar das folhas de

papel, observou uma relação estreita entre esta propriedade e a superfície específica das polpas no estado úmido. A maior densidade aparente é obtida pela maior flexibilidade das fibras, o que ocorre paralelamente ao aumento de sua capacidade de retenção de água. No entanto, este efeito parece ter importância secundária relativamente ao enchimento das cavidades na estrutura da folha com finos de alta superfície específica, promovendo o aumento da resistência ao ar com a refinação. Concluiu que as alterações na estrutura interna das fibras ocorrem em maior extensão nos estágios iniciais da absorção de energia, e tendem a diminuir à medida que o processo prossegue. Por outro lado, a separação de fibrilas das superfícies das fibras e a formação de finos parecem depender linearmente da energia aplicada às polpas. Também concluiu que as fibrilações interna e externa ocorrem ao mesmo tempo, mas não encontrou interdependência entre elas. A delaminação interna das paredes das fibras e seu conseqüente entumescimento não só constituem o principal efeito da refinação, como também controlam o comportamento dos flocos entre as superfícies de refinação. Por sua vez, as modificações que ocorrem nas propriedades dos flocos parecem influenciar a maneira como prossegue o processo como um todo. A análise da drenabilidade das polpas demonstrou ser esta dependente diretamente das superfícies formadas durante a refinação, tais como fibrilas na superfície das fibras e finos. Através da simulação de um tempo de drenagem dinâmica ficou evidenciado que o logaritmo deste correlaciona-se diretamente, e de uma maneira linear, com o quadrado da área específica das quatro polpas estudadas. Nenhuma correlação foi observada entre a drenabilidade das polpas e seus respectivos valores de "freeness". Para as folhas de papel, com exceção da porosidade, que parece ser altamente influenciada pela superfície específica das polpas, as propriedades de resistência mecânica e a opacidade demonstraram forte correlação com as modificações ocorridas internamente na estrutura das fibras durante a refinação. Concluiu, portanto, que a influência da fibrilação externa e da formação de finos na consolidação da folha úmida e na formação de ligações

entre as fibras deve ser considerada como secundária em relação à delaminação das paredes das fibras e ao conseqüente entumescimento através da absorção de água.

Demuner *et al.* (1993, p.34), estudando a influência das características dos flocos sobre o refino de polpas químicas, verificaram que o número de fibras por grama tem uma contribuição significativa sobre as propriedades do papel que dependem fundamentalmente do número de ligações entre fibras e também do número de interfaces fibra-ar. Também puderam observar que o comprimento e o número de fibras por grama isoladamente tiveram maior contribuição que a interação entre elas. O tamanho dos flocos tem relação direta com o comprimento, e, conseqüentemente com maior capacidade de entrelaçamento, formando flocos mais volumosos que as fibras de menor comprimento. Polpas com maior número de fibras por grama (menor comprimento de fibras x "*coarseness*") apresentam flocos menores que polpas com pequeno número de fibras por grama. O número de fibras por grama tem maior contribuição sobre o volume dos flocos que o comprimento das fibras.

Demuner *et al.* (1993, p.38), observaram que para as polpas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*, *E. globulus*) a variação do índice de tração aumentou com o volume dos flocos, enquanto que para as coníferas estudadas (*tropical pine*, *southern pine*, *scandinavian pine*), a variação do índice de tração diminuiu com o aumento do volume de flocos. Concluíram que o volume dos flocos é fortemente correlacionado com o comprimento das fibras e principalmente com o número de fibras por grama. As polpas com flocos de tamanho similar à largura das lâminas e dos canais dos discos (3mm) apresentaram maiores evoluções das propriedades com a energia específica aplicada, o que confirma a importância das características da entidade básica que recebe impactos durante o refino, na busca de uma maior otimização do processo.

Dasgupta (1994, p.165) relatou que o aumento no número e frequência de ligações fibra-fibra tem o maior papel realçando as resistências às tensões do papel refinado. O efeito

adverso de altos níveis de refinação possivelmente reflete os danos às fibras, e subsequente degradação da resistência da fibra.

Para Kerekes e Schell (1995, p.133), o “*coarseness*” exerce também sua influência na uniformidade da folha por meio do número de contatos entre fibras, tamanho dos flocos e mobilidade das fibras durante a formação. Uma alteração no valor de “*coarseness*” influencia significativamente propriedades da pasta celulósica tais como drenagem, resistência a úmido, propriedades estruturais, mecânicas e de aparência da folha seca.

3.6 Densidade básica, madeira juvenil, lenho inicial e tardio

De acordo com Foelkel *et al.* (1992, p.35), a densidade básica da madeira é um parâmetro importante para o processo de produção da polpa celulósica tendo em vista a influência que a mesma exerce sobre a quantidade de polpa produzida por unidade de volume de madeira consumido e também sobre o processo de deslignificação. Madeiras de maior densidade podem produzir cavacos com dimensões não uniformes e também dificultar a impregnação dos mesmos pelo licor de cozimento, levando ao incremento do consumo dos reagentes químicos durante a polpação, aumentando o teor de rejeitos e reduzindo o rendimento do processo (Wehr apud Almeida 2003, p.40).

Santos (apud Almeida 2003, p.4) descreve que a densidade básica influencia diretamente o processo de polpação e os parâmetros de qualidade da polpa, observados através das propriedades de resistência mecânicas, superficiais e ópticas. A densidade básica da madeira se correlaciona com o coeficiente de flexibilidade das fibras, e por essas razões, é considerado um parâmetro importante no processo de produção de polpa celulósica e, por apresentar um elevado índice de herdabilidade, essa propriedade é tida como referência nos programas de melhoramento genético.

Segundo Namkoong *et al.* (apud Barrichelo 1980, p.2) os *Pinus* do sul dos Estados Unidos possui elevada densidade, produzindo papel com excelente resistência ao rasgo, adequadas resistências à tração e ao arrebitamento e superfícies levemente ásperas. Por outro lado, papéis produzidos a partir de madeiras de *Picea* sp. e *Pseudotsuga* sp., que apresentam baixa densidade, mostram elevadas resistências à tração e ao arrebitamento, resistências ao rasgo intermediárias e excelentes superfícies para impressão. Watson *et al.* (apud Barrichelo 1980, p.2), trabalhando com coníferas de Queensland, observaram que, em geral, as propriedades do papel poderiam ser previstas a partir do conhecimento da densidade da madeira, aliada à determinação do comprimento dos traqueóides.

Byrd (apud Barrichelo, 1980, p.2), estudando madeira de *Pinus taeda* de diferentes densidades, encontrou correlações negativas com as resistências à tração e ao arrebitamento, e positivas com a resistência ao rasgo e peso específico aparente da celulose. Resultados semelhantes foram encontrados por Van Buijtenen (apud Barrichelo 1980, p.2) que observou que a diminuição da densidade da madeira foi traduzida por um aumento nas resistências à tração e ao arrebitamento e redução na resistência ao rasgo. Uprichard (apud Barrichelo, 1980, p.3) trabalhando com madeira de *Pinus patula* e *P. taeda* concluiu que, em geral, a resistência ao rasgo e volume específico aparente aumentam com a densidade, enquanto que as resistências à tração e ao arrebitamento diminuem com o aumento da densidade. Já Cole *et al.* (1966, p.165) observaram que a resistência ao rasgo parecia ser independente da densidade, quando produziram celulose de *Pinus elliottii*, *P. taeda* e *P. palustris*.

Segundo Einspahr *et al.* (1964, p.170), para a produção de papel, o aumento no comprimento dos traqueóides geralmente implica num grande aumento na resistência ao rasgo, e num pequeno aumento na resistência ao arrebitamento e à tração. Além disso, traqueóides de paredes grossas produzem papéis mais ásperos e espessos. Analogamente,

traqueóides de lenho inicial produzem papéis com boas propriedades de resistência à tração e ao arrebentamento (Einspahr *et al.* 1964, p.172).

De acordo com Wright e Sluis-Crémer (1992, p.183), para *Pinus taeda* a densidade é o fator mais importante para produção de pasta celulósica devido à sua boa correlação com as propriedades da polpa e à sua facilidade de obtenção. Porém, a densidade básica como fator isolado não é suficientemente confiável para predizer as propriedades do papel. Segundo Einspahr *et al.* (1964, p.169), as variações na densidade influenciam tanto no rendimento quanto na qualidade da celulose, por isso seu estudo é de fundamental importância.

Segundo Watson e Dadswell (1962, p.116), a porcentagem de lenho tardio exerce grande influência nas propriedades do papel. A polpa obtida de lenho inicial produz folhas de papel com mais ligações entre traqueóides e requer um pequeno grau de refino para produzir papéis com maiores resistências ao arrebentamento e à tração, porém baixa resistência ao rasgo. Papéis produzidos com lenho tardio são volumosos e ásperos, apresentando maior rendimento de celulose, alta resistência ao rasgo e resistências relativamente baixas ao arrebentamento e à tração. A qualidade do papel produzido somente com lenho tardio pode ser melhorada através do grau de refino, porém esse papel ainda apresentará propriedades inferiores às do papel feito com lenho inicial. Os traqueóides do lenho tardio, devido à rigidez da sua natureza, sofrem mais danos durante o refino do que as de lenho inicial.

A proporção ótima entre lenho inicial e tardio depende de vários fatores, mas principalmente do uso final do papel, que determinará quais devem ser as propriedades requeridas. Papéis com uma quantidade de lenho tardio de 20 a 50% apresentam aumento na resistência ao rasgo sem que haja prejuízo em propriedades como o arrebentamento (Watson e Dadswell 1962, p.121).

A influência do lenho inicial e tardio sobre as propriedades do papel foi estudada em *Pinus taeda* e *P. radiata* por Watson e Dadswell (apud Barrichelo, 1980, p.4). Observaram

que as resistências físico-mecânicas, que dependem das ligações entre as fibras (resistência à tração, arrebatamento e dobras duplas) foram melhores quando as folhas eram feitas com celulose de 100% lenho inicial. As fibras do lenho tardio forneceram importante contribuição quando a celulose era produzida a partir de madeira de *Pinus taeda*, todavia, os efeitos foram bem menores no caso do *Pinus radiata*. Análise semelhante foi efetuada por Barrichelo e Brito (apud Barrichelo 1980, p.4) que encontraram folhas densas, com alta resistência ao arrebatamento e baixa resistência ao rasgo em celulose produzida de lenho inicial de *Pinus taeda*.

Palmer e Tabb (apud Barrichelo, 1980, p.4), produzindo celulose e papel a partir de madeiras de coníferas desenvolvidas nos trópicos, observaram que a resistência à tração da celulose é mais dependente da habilidade das fibras se ligarem entre si, ao contrário da resistência ao rasgo que depende mais das resistências individuais das fibras. Confirmando estes dados, Smith e Byrd (apud Barrichelo, 1980, p.4), estudando *Pinus taeda*, concluíram que, embora as fibras do lenho tardio sejam cerca de três vezes mais resistentes que aquelas do lenho inicial, formam folhas volumosas e fracas, enquanto que fibras do lenho inicial produzem folhas de alta resistência. Esta diferença básica no comportamento das fibras dos diferentes lenhos responde pela maioria das diferenças nas propriedades da celulose. Comentam que devido ao colapso que sofrem e grande flexibilidade, as fibras do lenho inicial tendem a se compactar mais que as fibras do lenho tardio, resultando numa área maior de contato e cruzamento de fibras que aquelas menos flexíveis do lenho tardio.

Barefoot *et al.* (apud Barrichelo, 1980, p.4), estudando *Pinus taeda*, observaram que, com exceção do rendimento, pelo menos 93% da variação das propriedades do papel pode ser atribuída à morfologia das fibras. Sobre as dimensões das fibras, a espessura da parede dos traqueóides do lenho tardio foi o melhor parâmetro para se prever as propriedades do papel e responderam por pelo menos 74% da variação total. Concluíram que aquelas características

associadas com a densidade da madeira foram predominantes na determinação das propriedades do papel.

Barefoot *et al.* (apud Barrichelo, 1980, p.5) trabalhando com *Pinus taeda* concluíram que os resultados obtidos mostravam que as propriedades do papel estavam fortemente correlacionadas com as características morfológicas e físicas da madeira. De 60 a 95% da variação total no tempo de refinação, peso específico aparente, resistência à tração, ao arrebatamento e ao rasgo, estavam correlacionadas com as dimensões das fibras do lenho tardio. A espessura da parede das fibras do lenho tardio foi a mais importante delas, mas, algumas vezes, o comprimento das fibras foi um segundo fator de correlação.

3.7 Índices indicativos da qualidade das polpas

Além das propriedades intrínsecas das fibras, Seth (apud Campos *et al.* 2000, p.60) afirma que os parâmetros que descrevem o estado de ligação das fibras em uma rede têm sido incluídos em estudos, de forma a se tornarem aptos a predizer as propriedades do papel. Segundo Retulainen e Ebeling (1993, p.282), a propriedade de ligação entre fibras é a chave para a coesão interna do papel. Quase todas as interações mecânicas entre as fibras durante a fabricação do papel tomam lugar por meio das ligações das fibras.

Carpim *et al.* (1987, p.201) notaram que as propriedades que dependem do grau de ligação entre fibras, como densidade aparente e as resistências à tração e ao arrebatamento, mostraram maiores índices nas polpas com mais fibras por grama. Isso comprova que essa característica proporciona mais pontos de contato aumentando o número de ligações. Ao mesmo tempo, observa-se nessas polpas maior resistência ao ar.

Calculando a relação entre as dimensões obtidas em análise microscópica (comprimento, diâmetro externo, do lume e espessura da parede), pode-se estabelecer o comportamento e a capacidade papeleira de uma determinada fibra (Baldi 2001, p.29).

Constituem uma magnífica ajuda para saber de antemão o que se pode esperar ao empregar uma determinada madeira. Estes índices proporcionam diferentes relações entre as dimensões das fibras, as quais influenciam de maneira direta, indireta ou bem complementar, as características gerais da polpa, tais como: densidade, volume, resistência à passagem de ar e água, resistência à tração, arrebentamento, rasgo e as propriedades que determinam a qualidade de impressão (Urias, 1996, p.30).

As principais relações entre as dimensões das fibras, consideradas importantes para a produção de celulose e papel e que estão relacionadas às propriedades físico-mecânicas do papel produzido, são mostradas a seguir (Foelkel e Barrichelo, 1975, p. 50).

a) Coeficiente de Flexibilidade (CF), dado pela relação entre o diâmetro do lume (d) e o diâmetro da fibra (D), expressa em porcentagem:

$$CF = \left(\frac{d}{D} \right) \times 100$$

A razão de flexibilidade foi reportada como tendo uma relação parabólica com o comprimento de auto-ruptura (Peteri 1952, p.157). Quanto mais alto este coeficiente, melhor é a resistência à tensão.

Foelkel e Barrichelo (1975, p.50) comentaram que as fibras tubulares na estrutura do papel não se ajustam perfeitamente, dando origem a papéis pouco densos, de baixa resistência à tração e ao arrebentamento e com alta opacidade. As fibras de paredes delgadas formam folhas mais densas e devido à sua maior flexibilidade, ocorre maior ligação entre as fibras. Isso conduz a papéis com maior resistência à tração e ao arrebentamento.

Foelkel e Barrichelo (1975, p.51), observaram também que quanto maior o coeficiente de flexibilidade, mais flexível se torna a fibra e ocorre assim maior possibilidade de ligações interfibras na fabricação da folha de papel, o que aumenta as resistências à tração e ao arrebentamento.

Os critérios de classificação segundo este coeficiente são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS SEGUNDO O COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.

COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE	CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS		
	COLAPSO	SUPERFÍCIE DE CONTATO	UNIÃO FIBRA-FIBRA
75 <	Sim	Boa	Boa
75 – 50	Parcial	Boa	Boa
50 – 30	Pouco	Pouca	Pouca
30 >	Não	Muito pouca	Fraca

Fonte: Ista *et al.* apud Blanco Rojas, 1996.

Segundo Abitz e Luner (apud Almeida 2003, p.8), as propriedades de resistência da polpa são influenciadas pelo coeficiente de flexibilidade das fibras. Fibras com maior flexibilidade apresentam um maior poder de fazer ligações interfibras e com isso desenvolvem maior resistência à tração, embora reduzindo o volume específico do papel. Smook (1994, p. 20) menciona que, apesar do parâmetro coeficiente de flexibilidade das fibras ser usado pelos fabricantes de polpa na predição de propriedades de resistência da polpa, uma indicação mais específica no comportamento da fibra pode ser fornecido pelo parâmetro de *coarseness* da fibra.

b) Fração Parede (FP), dado pela relação entre o dobro da espessura da parede celular (e) e o raio da fibra ($D/2$), expressa em porcentagem:

$$FP = \left(\frac{2e}{D} \right) \times 100$$

Foelkel e Barrichelo (1975, p.51), admitem que quando a fração parede de um certo tipo de material fibroso é maior que 40 %, este não fornecerá celulose de qualidade satisfatória, pois as fibras serão extremamente rígidas, pouco flexíveis e haverá dificuldades na interligação das mesmas, encontrando proporcionalidade negativa com as resistências à tração e ao arrebentamento.

Silva Júnior *et al* (1996, p.38), comentam que fibras com fração parede elevada tendem a dar origem a papéis com volume específico alto, pois quando estas fibras são comprimidas durante a formação do papel, seu grau de colapso é menor do que o das fibras com fração parede baixa, que apresentam alto grau de colapso, tendendo a formarem fitas.

c) **Índice de Enfeltramento (IE)**, dado pela relação entre o comprimento (I) e o diâmetro da fibra (D):

$$IE = \frac{I}{D}$$

O índice de enfeltramento encontra algumas referências relacionando-o com resistência ao rasgo e ao arrebitamento (Gonzaga *et al.* 1983, p.26). A experiência tem mostrado que o valor mínimo da relação não pode ser menor que 50 para boas características do papel; quanto maior é tal valor, melhor a formação da folha, pois está relacionado com o rasgo e dobras duplas (Baldi 2001, p.29).

d) **Índice de Runkel (IR)**, dado pela relação entre duas vezes a espessura da parede celular (e) e o diâmetro do lume (d):

$$IR = \frac{2e}{d}$$

Indica o quanto a fibra é flexível e assim fornece uma idéia da capacidade de união das fibras, ou seja, em relação às características de resistência à tração e ao arrebitamento da folha de papel (Baldi 2001, p.29). Segundo Caumo (2003, p.14) assume os significados mostrados na Tabela 3.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS SEGUNDO O ÍNDICE DE RUNKEL.

ÍNDICE DE RUNKEL	GRUPO	CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS
≤ 0,25	I	A fibra é muito flexível, macia, apresentando a capacidade de acomodar-se facilmente. Tal fato representa a condição ótima para a fabricação de papel. O valor da relação indica que o lume é muito grande em relação à espessura da parede.
0,25 - 0,50	II	A fibra é menos flexível do que no caso anterior; também fornece bons resultados na fabricação de papel. O valor da relação indica que a igualdade entre o diâmetro da fibra e espessura da parede é aumentada, diminuindo em consequência o diâmetro do lume.
0,50 - 1,00	III	A fibra começa a ser menos flexível e macia do que anteriormente, apresentando características mecânicas modestas. O valor da relação indica que sendo aumentada a espessura da parede celular em relação ao caso anterior, diminui a seção do lume.
> 1	IV V	O valor da relação indica claramente que o diâmetro do lume diminui fortemente, enquanto as paredes se tornam espessas, portanto as fibras são rígidas e tem baixa capacidade para fabricação de papel.

Fonte: Caumo (2003, p. 14).

e) **Índice de Boiler (IB)**, dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre a soma dos quadrados destes diâmetros:

$$IB = \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right)$$

f) **Índice de Mülsteph (IM)**, dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre o diâmetro da fibra (D):

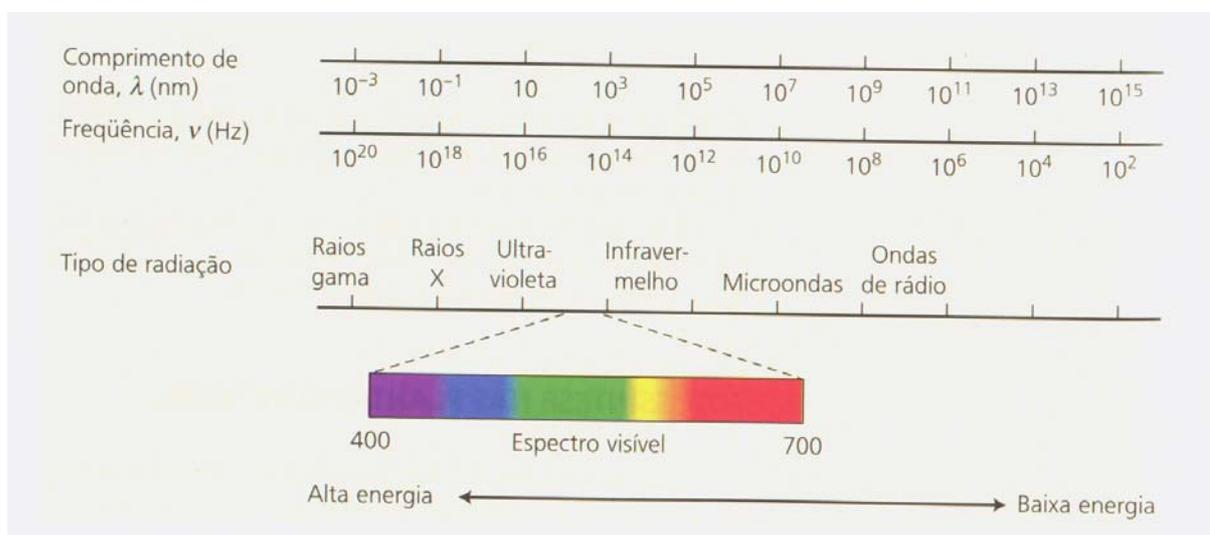
$$IM = \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2} \right)$$

A classificação de fibras de Mülsteph (1940a, p132; 1940b, p.45; 1941, p201) em relação à qualidade da folha de polpa é baseada na área relativa da parede da célula à fibra toda, como visto na seção transversal. Sob esta classificação, as fibras são agrupadas de acordo com a possibilidade de colapso e conseqüentemente pela tendência de formar folhas de baixa ou alta densidade.

3.8 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

A luz é uma onda eletromagnética transversal, que consiste em campos elétrico e magnético perpendiculares um ao outro e à direção de propagação, caracterizada por um comprimento de onda (distância entre dois picos sucessivos) e frequência, que é o número de picos que passam por um observador em um dado espaço de tempo. O olho humano é sensível a apenas uma pequena faixa de frequências, a região da luz visível do espectro eletromagnético. A luz com frequências levemente superiores (ou comprimentos de onda mais curtos) está na faixa do ultravioleta e a luz com frequências levemente inferiores (comprimentos de onda mais longos) está na faixa do infravermelho (Figura 1) (Taiz e Zeiger 2004, p.140).

FIGURA 1 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.

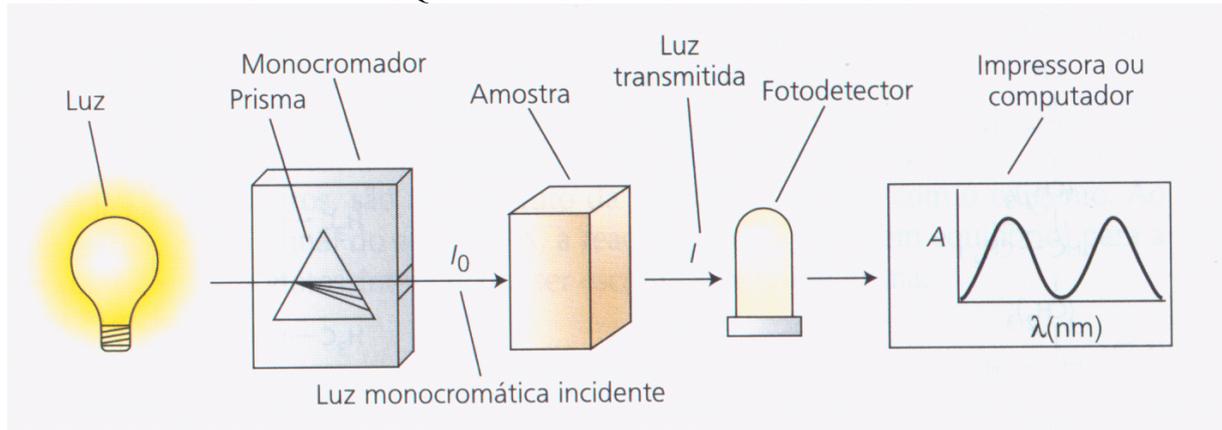


Fonte: Taiz e Zeiger (2004, p.140).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é a medição da intensidade da absorção/reflexão de luz infravermelha próxima (em uma faixa de 800 a 2500nm), em relação ao comprimento de onda, realizada pela amostra. É tipicamente usada na medição quantitativa de grupos funcionais orgânicos, especialmente O-H, N-H, e C=O. Um espectro de absorção/reflexão pode ser determinado com um espectrofotômetro, que consiste de uma fonte luminosa, um monocromador que contém o seletor de comprimentos de onda tipo

prisma, um receptáculo para amostras, um fotodetector e uma impressora ou computador (Figura 2). O comprimento de onda emitido pelo monocromador pode ser alterado por rotação do prisma; o gráfico de absorbância (A) versus comprimento de onda (λ) é denominado espectro (Taiz e Zeiger, 2004, p.141).

FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM ESPECTROFOTÔMETRO.



Fonte: Taiz e Zeiger (2004, p.141).

O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos iniciou o desenvolvimento de métodos instrumentais para a aplicação do infravermelho próximo na agricultura. Karl Norris iniciou seu trabalho com a tecnologia NIR procurando por novos métodos para a determinação da umidade nos produtos agrícolas, primeiro pela extração da água no metanol e depois pela suspensão de sementes moídas em CCl_4 (Hart *et al.*, citados por Pasquini 2003, p.199). Entre as primeiras aplicações também estão as medições do teor de proteína em trigo, e de gordura/óleo em soja, para permitir que as estações de manuseio de grãos pudessem pagar os fazendeiros de acordo com o teor de proteína/óleo e segregar o trigo em diferentes silos, uma vez que métodos clássicos de análise são muito lentos. Desta forma o NIR teve um grande sucesso no segmento agrícola, sendo que, tão logo as vantagens da técnica foram publicadas, a indústria procurou por outras aplicações, por exemplo, no controle de processo/qualidade (Silva 2002).

A espectroscopia no infravermelho próximo tem sido reconhecida como uma poderosa técnica analítica para a rápida determinação de vários constituintes em muitos materiais

agrícolas e outras matérias-primas. A técnica envolve a aquisição de um espectro de absorvância/reflectância depois que a radiação de infravermelho próximo penetra em uma amostra. O espectro de NIR resultante é então comparado com medidas obtidas usando técnicas analíticas convencionais, usando análise multivariada (Sefara *et al.* 2000, p.16).

A obtenção de informações rápidas referentes à composição específica de um produto é uma ferramenta de valor incalculável para a garantia da qualidade deste produto. Quanto mais rápido é determinada uma mudança na especificação deste produto, mais rápido uma correção pode ser feita, implicando em um melhor controle da qualidade e redução de custos, pois haverá menos desperdício (Silva 2002).

A técnica NIR apresenta como vantagens: análises não destrutivas, sem a utilização de produtos químicos, design robusto e compacto, análise múltipla de componentes, velocidade de resultados de análise (menos de um minuto), transferência de calibrações entre equipamentos. Como desvantagem, a calibração requer: tempo, cuidado e conhecimentos básicos de estatística e computação (Silva 2002).

Muitos estudos na área florestal vêm sendo desenvolvidos com a utilização do infravermelho próximo e técnicas de análise multivariada para a predição de propriedades da madeira como Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) (Hoffmeyer e Pedersen 1995, Schimleck *et al.* 2001a, 2002a,b, Kelley *et al.* 2004, Via 2004), densidade básica (Hoffmeyer e Pedersen 1995, Schimleck *et al.* 1999, 2001a, Hauksson *et al.* 2001, Via 2004), teor de lignina, celulose, polioses ou extrativos (Easty *et al.* 1990, Schultz e Burns 1990, Kelley *et al.* 2004, Yeh *et al.* 2004, Via 2004), conteúdo de umidade (Hoffmeyer e Pedersen 1995), ângulo de grã (Gindl e Teischinger 2002), ângulo microfibrilar (Schimleck *et al.* 2001, Schimleck e Evans 2002, Kelley *et al.* 2004, Via 2004), mudanças associadas à degradação química e biológica (Hoffmeyer e Pedersen 1995, Kelley *et al.* 2002, Via 2004), presença de preservantes inorgânicos (Feldhoff *et al.* 1998), características morfológicas das

fibras (Hauksson *et al.* 2001, Schimleck e Evans 2004, Via 2004), rendimento em celulose (Schimleck e Michell 1998, Raymond *et al.* 2001) e até mesmo características do MDF como MOE, MOR e colagem interna (Rials *et al.* 2002). So *et al.* (2004) apresentaram um histórico da utilização da técnica.

Nos últimos anos, tem havido grande interesse no desenvolvimento de aplicações do NIR na indústria de celulose e papel (Birkett e Gambino 1988b; Easty *et al.* 1990; Michel, 1995). Trabalhos com várias espécies de eucalipto têm focado o desenvolvimento de modelos de infravermelho próximo para quantificar e caracterizar os componentes químicos da madeira, como celulose e lignina (Garbutt *et al.* 1992) e também para propriedades da polpa (rendimento, número Kappa) (Easty *et al.* 1990; Birkett e Gambino 1988a).

Wright *et al.* (1990, p.165) utilizando amostras de 29 árvores de 14 espécies diferentes de *Pinus* estudaram a previsão do rendimento da polpa e celulose através do NIR, obtendo um coeficiente de correlação significativa para as duas variáveis, o que indica que esta técnica pode ser utilizada para prever estas propriedades em pequenas amostras de madeira.

O potencial de aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo para prever o rendimento em polpa de amostras de eucalipto foi reportado na literatura (Michell e Schimleck 1995). Birkett e Gambino (1988b, p.40) demonstraram que espectros de NIR podem ser usados para estimar o rendimento da polpa de *Eucalyptus grandis*. Usando uma série de filtros de diferentes comprimentos de onda, correlações de calibração até 0,91 foram obtidas. Wright *et al.* (1990, p.165) obtiveram coeficientes de correlação de 0,88 usando uma combinação de quatro comprimentos de onda, mas, o coeficiente de correlação para a predição foi baixo (0,49). Trabalhos com *Eucalyptus globulus* (Michell 1995) mostraram que coeficientes de correlação melhores ($r = 0,99$) poderiam ser obtidos quando o comprimento de onda total do espectrômetro é utilizado. Este trabalho foi expandido para outras espécies

como *E. nitens* e a qualidade dos modelos foi comparável com aquelas obtidas para *E. globulus* (Schimleck *et al.* 1996 e 1997).

Silva *et al.* (2000) utilizaram o infravermelho próximo para analisar polpas e polímeros gerados por carbamilação, em um estudo de caracterização do efeito cumulativo das etapas de branqueamento sobre a composição e estrutura de polpas Kraft de *Pinus* e *Eucalyptus*. Observaram que mudanças na intensidade dos picos são indicativo seguro da ocorrência de mudanças no estado de organização estrutural da celulose.

Sefara *et al.* (2000), estudaram o emprego do uso de espectroscopia de infravermelho próximo para uma rápida determinação do rendimento da polpa em plantações de eucalipto. Utilizaram um total de 100 árvores, pertencentes a quatro índices de sítio, 5 grupos de idades e 5 árvores por grupo de idade. Para relacionar o rendimento de cada polpa obtida nos digestores com o espectro NIR correspondente, aplicaram uma regressão linear pelo método PLS (Partial Least Squares). Concluíram que o rendimento da polpa pode ser previsto com precisão relativamente alta usando espectros de NIR de cunhas e cavacos e que a porcentagem média de erro desta técnica foi muito similar à convencional, que utiliza amostras de celulose coletadas nos digestores.

O conteúdo de celulose foi mostrado ser de grande correlação com o rendimento da polpa Kraft por Wallis (1966a, 1966b), Kube e Raymond (2002). DuPlooy (1980) observou que o conteúdo de celulose explicava 83% da variação observada na polpa de *E. grandis* na África do Sul, e Dillner *et al.* (1971) tinham reportado igual correlação em *E. globulus*.

A análise com a tecnologia NIR é útil para processar grande número de amostras e como a quantidade de madeira requerida é muito pequena (em torno de 3g seca ao ar), permite a predição do conteúdo de celulose a partir de pequenas amostras de madeira, como rolos de incremento. Clarke e Wessels (1995) usaram a análise do NIR para predizer o conteúdo de celulose em várias espécies de eucalipto. A calibração desenvolvida usando 47 amostras de

diferentes espécies apresentou uma correlação de 0,73 entre o conteúdo de celulose previsto e o encontrado em laboratório.

Raymond e Schimleck (2002, p.174) estudaram uma análise de reflectância para estimar os parâmetros genéticos relacionados ao conteúdo de celulose em *Eucalyptus globulus*. Verificaram que a análise de NIR fornece boas calibrações para prever o conteúdo de celulose em *E. globulus*. O erro ficou em torno de 1%, indicando que o conteúdo de celulose pode ser previsto de uma maneira segura pelo NIR. As correlações entre o conteúdo de celulose previsto e o rendimento da polpa previsto foram muito altos (acima de 0,8) e ambos mostraram herdabilidade similar e correlações com outras características.

Hauksson *et al.* (2001, p.484) analisaram o uso do infravermelho próximo utilizando uma regressão modelo PLS para prever a densidade, comprimento de fibra médio e distribuição do comprimento de fibra em *Picea abies*. Verificaram uma boa correlação entre os espectros obtidos e as propriedades analisadas e comentam que o uso da correção ortogonal do sinal (OSC) melhorou o modelo utilizado. Schimleck e Evans (2004, p.68), estudando *Pinus radiata*, obtiveram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,89 na calibração com a espessura da parede e de 0,65 a 0,69 para o diâmetro radial e tangencial, respectivamente. A predição foi satisfatória para a espessura da parede, obtendo-se um R^2 de 0,88 e 0,91, e para o diâmetro tangencial (R^2 de 0,69 e 0,79). No caso do diâmetro radial a predição não foi satisfatória, superestimando os valores. Via (2004, p.52) obteve na calibração um R^2 de 0,72 para o comprimento de fibra de *Pinus palustris*, caindo para 0,65 no momento da validação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Foram estudados clones de *Pinus taeda* L. com idades na época do corte de 10 anos e 7 meses, 11 anos e 7 meses, 12 anos e 8 meses, 14 anos e 8 meses, 15 anos e 9 meses, 16 anos e 9 meses, e 17 anos e 9 meses, pertencentes à mesma família, provenientes de fazendas da empresa Rigesa MeadWestwaco Corporation, localizadas no município de Três Barras, Santa Catarina (Figura 3). Para simplificar a escrita da idade das árvores, serão utilizados apenas os números referentes aos anos, ou seja, 10, 11, 12, 14, 15, 16 e 17 anos.

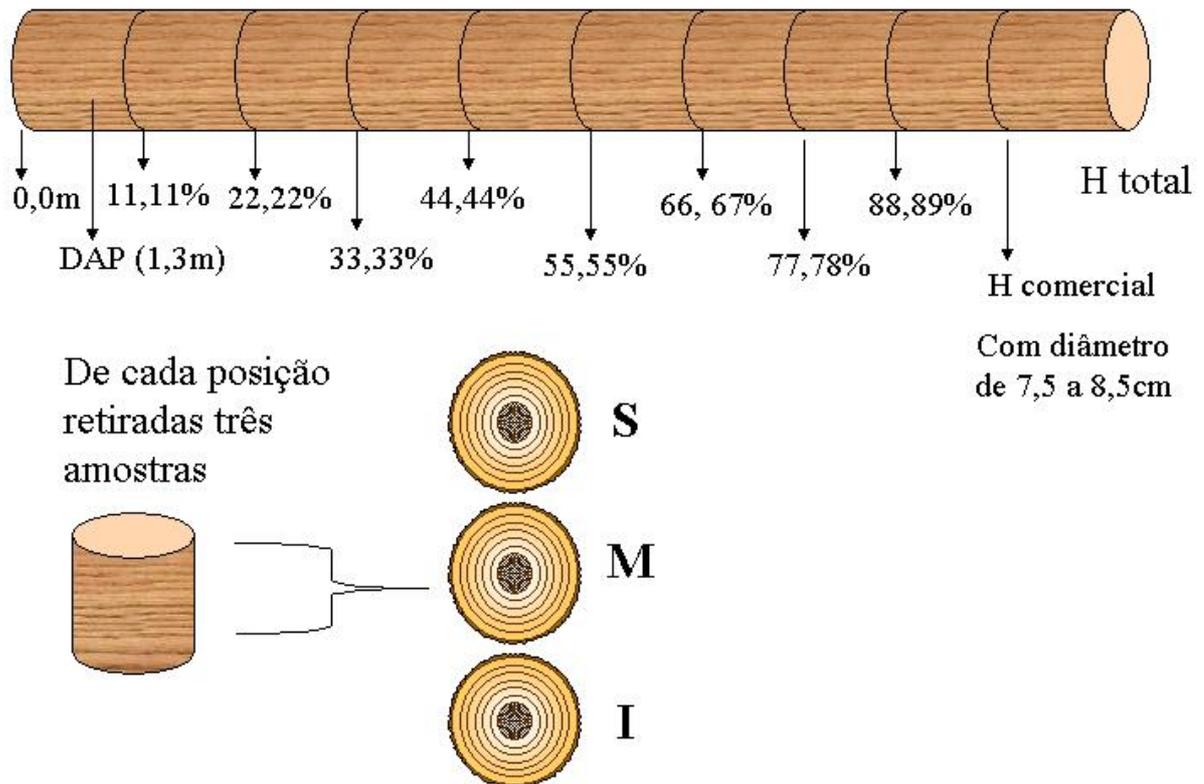
FIGURA 3 - LOCAL DE COLETA DE MATERIAL.



Foram instaladas unidades amostrais em áreas com índice de sítio entre 28 e 30, onde foram coletados os dados referentes ao DAP (diâmetro à altura do peito) de todas as árvores, sendo então selecionadas 16 árvores por unidade amostral, com base na variação do DAP. As árvores foram seccionadas em dez partes, partindo da base e a cada 11,11% da altura

comercial. De cada parte foram retirados três discos seqüenciais, com três a quatro centímetros de espessura cada, e anotados os códigos I para posição inferior, M para a média, e S para a superior (Figura 4).

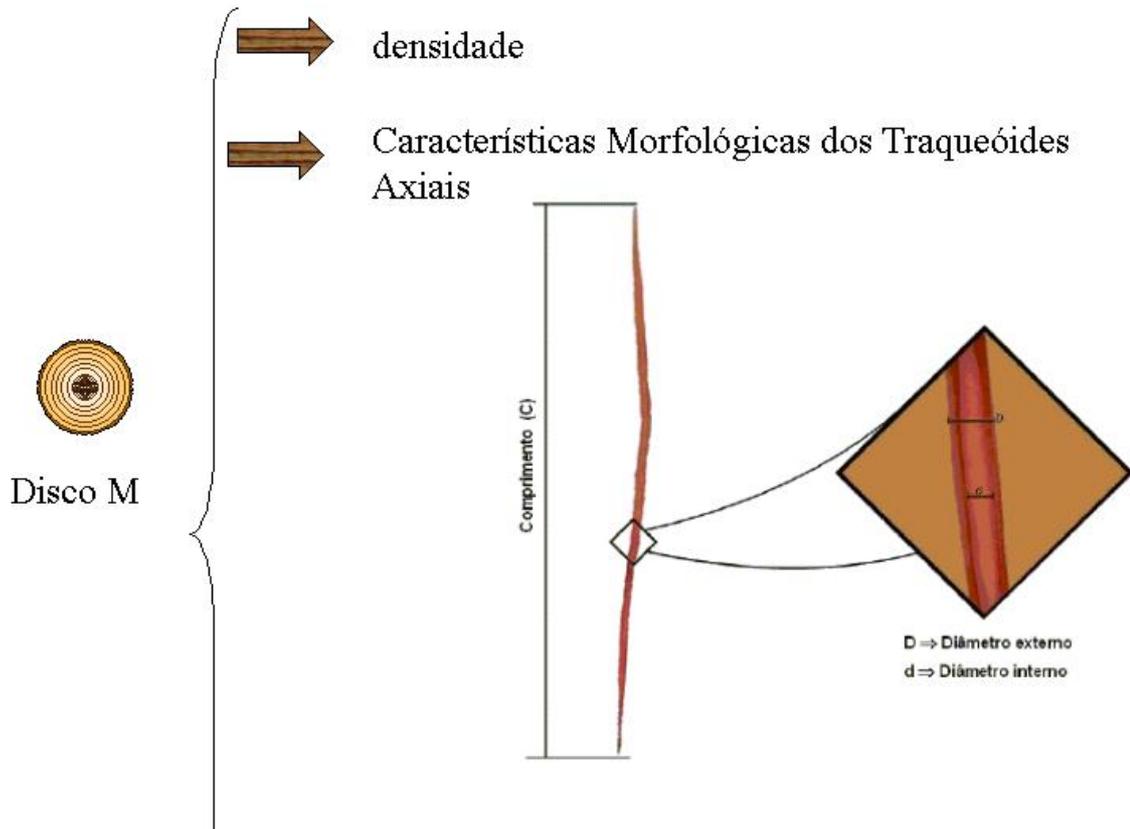
FIGURA 4 - ESQUEMA DE RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA DA ÁRVORE.



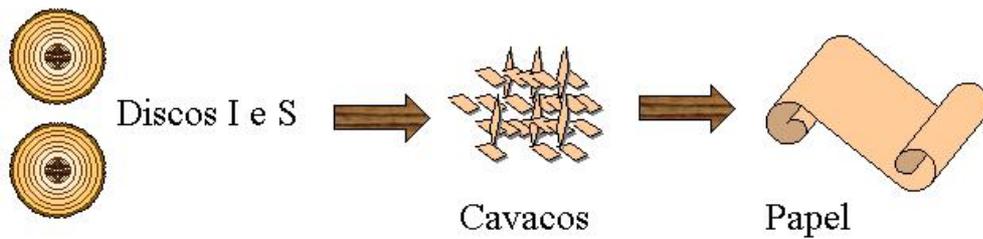
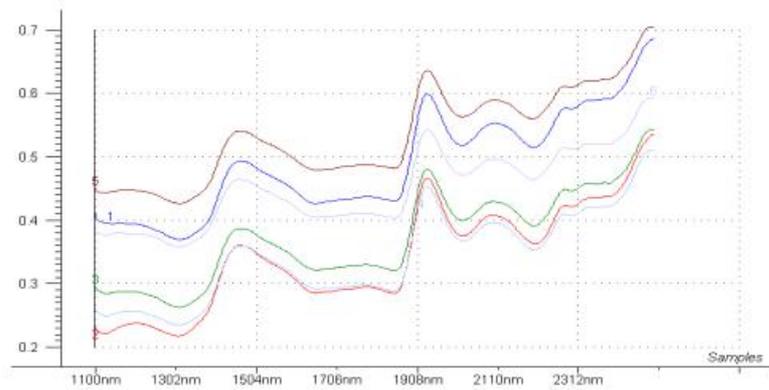
O material foi empacotado e devidamente codificado, sendo enviado ao Laboratório de Usinagem da Madeira, da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba.

Com os discos I e S foram produzidos os cavacos para a fabricação de papel. Do disco M determinou-se a densidade e as características anatômicas (Figura 5), além dos espectros de infravermelho, no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba.

FIGURA 5 – DIVISÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS.



Espectroscopia no Infravermelho Próximo



4.2 Métodos

4.2.1 Determinação da densidade básica da madeira

De cada disco M foram retiradas amostras na faixa central para a determinação da densidade básica média de cada árvore. A densidade básica de cada amostra foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho_b = \frac{Ms}{Vu}, \text{ onde:}$$

ρ_b = densidade básica (g/m^3); Ms = peso da amostra seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g); Vu = volume do disco em estado saturado (m^3).

O volume saturado foi obtido através do método de imersão, usando o Princípio de Arquimedes. Esse método consiste nos seguintes passos: imersão das peças em água por alguns dias até saturação completa; imersão das peças de madeira em um recipiente com água colocado sobre uma balança; leitura do valor obtido na balança através do empuxo da peça. Como a densidade da água é de 1kg/m^3 (a 4°C), a leitura de peso na balança pode ser considerada idêntica ao volume da peça medida. Após a determinação do volume, as peças foram colocadas em estufa a 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até peso constante.

Os valores de densidade foram obtidos nas diferentes alturas da árvore. Com esses valores foi feita a ponderação, em relação ao volume de cada seção, para uma maior representatividade, tendo-se a densidade básica média de cada árvore, utilizando-se a seguinte equação:

$$\rho_{ponderada} = \sum \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \times \frac{V_{seção}}{V_{total}} \right), \text{ onde:}$$

$\rho_{ponderada}$ = densidade básica ponderada; ρ_1 = densidade básica da extremidade de maior diâmetro; ρ_2 = densidade básica da extremidade de menor diâmetro; V seção = volume da seção analisada; V total = volume total do tronco.

Tendo-se os dados relativos a cada árvore foram obtidos os valores da densidade básica média ponderada para cada idade.

4.2.2 Análise anatômica

Para a análise anatômica as amostras retiradas no sentido radial da faixa central dos discos M de cada posição na árvore foram subdivididas de dois em dois centímetros, abrangendo toda variação medula-casca, para posterior comparação, posição por posição, com os dados obtidos através da calibração do infravermelho. Também foi analisada a variação entre a base e o topo. O material foi transformado em palitos e seguiu para o processo de maceração de acordo com a técnica de Franklin (1945) modificada, descrita por Kraus e Arduin (1997, p.110). Utilizou-se peróxido de hidrogênio e ácido acético na proporção 1:1. Depois do amolecimento e branqueamento, o material foi lavado diversas vezes em água destilada, colocado em safranina para tingimento e armazenado para medição.

Foram montadas lâminas temporárias onde se mediu o comprimento, diâmetro externo, do lume e espessura da parede dos traqueóides axiais através da observação em Microscópio Óptico Carl Zeiss. Para as mensurações dos elementos celulares individuais seguiu-se as recomendações feitas por Muñiz e Coradin (1991) e da Norma COPANT (C30:1-20/73).

A partir das características levantadas, foram calculadas as principais relações entre as dimensões dos elementos celulares, consideradas importantes para a produção de celulose e papel e que estão relacionadas às propriedades físico-mecânicas do papel produzido. Estas relações foram determinadas conforme preconizam Foelkel e Barrichelo (1975, p.51). Nestas relações utiliza-se o termo genérico fibra, aplicado na indústria de celulose e papel.

a) **Coefficiente de Flexibilidade (CF)**, dado pela relação entre o diâmetro do lume (d) e o diâmetro da fibra (D), expresso em porcentagem:

$$CF = \left(\frac{d}{D} \right) \times 100$$

b) Fração Parede (FP), dado pela relação entre o dobro da espessura da parede celular (e) e o raio da fibra (D/2), expressa em porcentagem:

$$FP = \left(\frac{2e}{D} \right) \times 100$$

c) Índice de Enfilramento (IE), dado pela relação entre o comprimento (I) e o diâmetro da fibra (D):

$$IE = \frac{I}{D}$$

d) Índice de Runkel (IR), dado pela relação entre duas vezes a espessura da parede celular (e) e o diâmetro do lume (d):

$$IR = \frac{2e}{d}$$

e) Índice de Boiler (IB), dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre a soma dos quadrados destes diâmetros:

$$IB = \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right)$$

f) Índice de Mülsteph (IM), dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre o diâmetro da fibras (D):

$$IM = \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2} \right)$$

4.2.3 Obtenção de celulose Kraft e produção de papel

Os cavacos foram obtidos dos discos I e S, no Laboratório de Usinagem da Madeira, do Centro de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Paraná. Depois de devidamente embalados e codificados, foram enviados ao Laboratório Experimental da

Rigesa, em Três Barras, Santa Catarina, onde foram acondicionados em câmara fria com o objetivo de evitar a infestação por fungos e perda de umidade.

O papel foi produzido pelo Processo Kraft, seguindo os mesmos parâmetros do processo industrial utilizado pela empresa (Tabela 4).

TABELA 4 - PARÂMETROS DE COZIMENTO UTILIZADOS.

PARÂMETROS	VALORES
Tempo até temperatura máxima	90 min
Tempo na temperatura máxima	30 min
Temperatura máxima	175°C
Pressão na temperatura máxima	81 Kgf/cm ²
Álcali ativo	14,5%
Fator H	1007,9

Os cozimentos foram realizados em um digestor rotativo de aço inoxidável, com 2,5 rpm, capacidade de 20 litros, aquecido eletricamente, dotado de termômetro e manômetro. Após cada cozimento, a pasta celulósica foi passada por um desfibrador, lavada e acondicionada em sacos plásticos.

Determinou-se o número Kappa através da oxidação da lignina residual com permanganato de potássio (KMnO₄) em solução acidificada (H₂SO₄), seguindo as normas TAPPI T 236 cm-85 – “Kappa Number of Pulp”, e ABNT NBR 7537:1997 – “Pastas celulósicas – Determinação do número Kappa”.

Foi realizada a refinação da massa em um refinador tipo Holandesa, onde foram utilizados 360g de celulose seca e 24 litros de água. Para acompanhar o grau de refino da massa, determinou-se a resistência à drenagem pelo aparelho *Canadian Freeness* (°CF). Foram utilizados nove tempos de refino por idade.

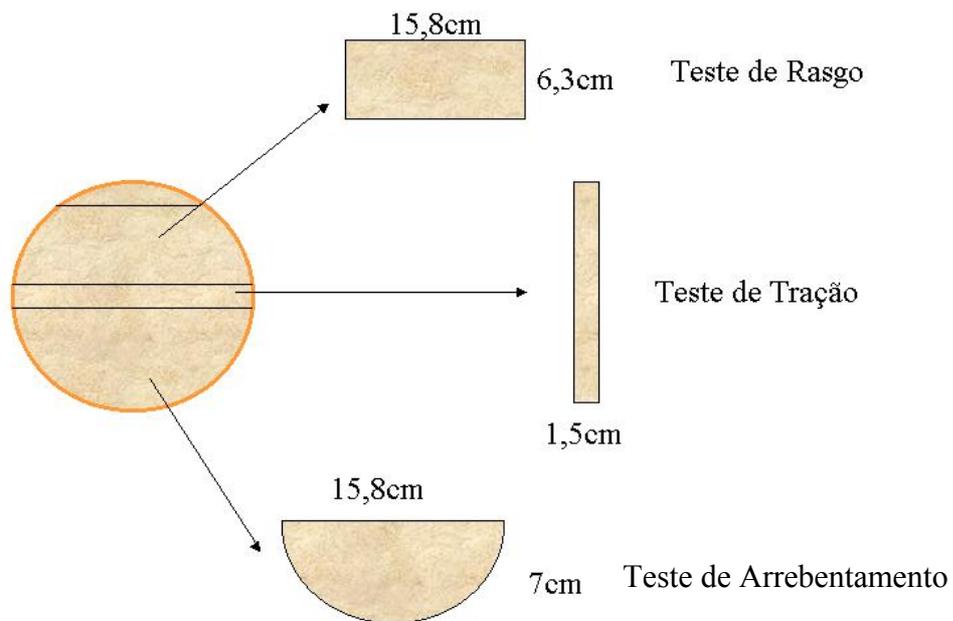
A cada um dos níveis de refino, foram formadas 5 folhas de papel na formadora *Rapid Koethen*, com área de 200cm², e uma gramatura final prevista de 80g/m² em cada folha. Depois as folhas foram secas e armazenadas em câmara climatizada à temperatura de 23±1°C e 50±2% de umidade relativa, segundo as normas das ABTCP P4:1994 – “Papel, cartão e pasta celulósica – Atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de

controle da atmosfera e condicionamento das amostras”, em conformidade com a Norma TAPPI T 402 om-93 – “*Standard conditioning and testing atmosphere for paper, board, pulp handsheets, and related products*”.

4.2.4 Ensaios físicos e mecânicos do papel

Os ensaios foram realizados em câmara climatizada no Laboratório Físico da Rigesa, seguindo as normas da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) e TAPPI. Todos os ensaios foram realizados separadamente por nível de refino. As propriedades analisadas foram: gramatura (g/m^2), espessura (mm), densidade aparente (g/cm^3), volume específico aparente (cm^3/g), resistência à tração (kN/m), comprimento de auto-ruptura (km), índice de tração (N.m/g), resistência ao rasgo (mN), índice de rasgo ($\text{mN.m}^2/\text{g}$), resistência ao arrebentamento (kPa) e índice de arrebentamento ($\text{kPa.m}^2/\text{g}$). Os corpos-de-prova foram confeccionados seguindo o esquema da Figura 6.

FIGURA 6 - ESQUEMA DA RETIRADA DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS DO PAPEL.



a) Gramatura

A gramatura (G), massa por unidade de área, foi determinada pesando-se as 5 folhas de papel de cada nível de refino, em uma balança digital com indicação de centésimo de grama. A gramatura foi calculada pela relação entre o peso absolutamente seco médio dos corpos-de-prova (m), em gramas e a área do corpo-de-prova (A), em centímetros quadrados. A gramatura é expressa em unidades de gramas por metro quadrado (g/m^2). A determinação da gramatura seguiu as recomendações da Norma TAPPI T220 om-88 – “*Physical testing of pulp handsheets*” e da ABTCP P6:1996 – “*Papel e cartão – Determinação da gramatura*”.

$$G = \left(\frac{m}{A} \right) \times 10.000$$

b) Espessura

A espessura (e) foi determinada com Micrômetro Apalpador Digital, sendo medidas todas as folhas, separadas por nível de refinação e o resultado expresso em micrometro. Seguiu as recomendações das Normas TAPPI T220 om-88 e da ABTCP P5:1994 – “*Papel e cartão – Determinação da espessura e da densidade aparente ou volume específico aparente*”.

c) Densidade Aparente

A densidade aparente (DEA) foi calculada pela relação entre a gramatura (G), em gramas por metro quadrado (g/m^2), e a espessura média das folhas (e), em micrômetros (μm). A densidade aparente é expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma TAPPI 220 om-88 e da ABNT P5:1994.

$$DEA = \frac{G}{e}$$

d) Volume Específico Aparente

O volume específico aparente (VEA) foi calculado pela relação entre a espessura média das folhas (e), em micrômetros (μm) e a gramatura (G), em gramas por metro quadrado (g/m^2). O volume específico aparente é expresso em centímetros cúbicos por grama (cm^3/g). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma TAPPI 220 om-88 e da ABNT P5:1994.

$$VEA = \frac{e}{G}$$

e) Resistência ao Rasgo

A resistência ao rasgo (RR) foi determinada em aparelho tipo *Elmendorf*, com os corpos-de-prova medindo 15,8 x 6,3cm, e calculada pela relação entre a média aritmética das leituras, em *milinewtons* (mN), e o número de folhas rasgadas simultaneamente. Neste ensaio foram testadas 5 folhas. A resistência ao rasgo é expressa em *milinewtons* (mN). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P9:1994 – “*Papel – Determinação da resistência ao rasgo*”.

$$RR = \frac{L}{n}$$

f) Índice de Rasgo

O índice de rasgo (IR) foi calculado através da relação entre a resistência ao rasgo (RR), em *milinewtons* (mN), e a gramatura (G), em gramas por metro quadrado (g/m^2). O índice de rasgo é expresso em *milinewtons* metro quadrado por grama ($\text{mN}.\text{m}^2/\text{g}$). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P9:1994 – “*Papel – Determinação da resistência ao rasgo*”.

$$IR = \frac{RR}{G}$$

g) Resistência à Tração

A resistência à tração, força máxima de tração por unidade de largura que o papel suporta antes de se romper, sob condições definidas em norma, foi determinada através de ensaios em Dinamômetro Digital. A resistência à tração (RT) é calculada pela relação entre a força média de tração (F), em *newtons* (N), e a largura do corpo-de-prova (L), em milímetros (mm). A resistência à tração é expressa em *kilonewtons* por metro quadrado (kN/m²). Foram efetuados 5 testes por nível de refino e os corpos-de-prova apresentavam dimensões de 15,8 x 1,5cm. Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P7:1994 – “*Determinação das propriedades de tração*”

$$RT = \frac{F}{L}$$

h) Comprimento de Auto-Ruptura

O comprimento de auto-ruptura (CAR), que é o comprimento limite calculado para que uma tira de papel, de largura uniforme e suspensa por uma das extremidades, se rompa sob o efeito da própria massa, foi calculado através da relação entre a força média de tração (F), em *newtons* (N) e a gramatura (G), expressa em gramas por metro quadrado (g/m²), vezes a largura do corpo-de-prova (L) em milímetros (mm). O comprimento de auto-ruptura é expresso em quilômetros (km). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P7:1994 – “*Determinação das propriedades de tração*”.

$$CAR = \left(\frac{F}{9,81 \times L \times G} \right) \times 10^3$$

i) Índice de Tração

O índice de tração (IT) foi calculado pela relação entre a resistência à tração (RT), expressa em *kilonewtons* por metro e a gramatura do corpo-de-prova (G), em gramas por metro quadrado (g/m^2). O índice de tração é dado em *newtons* metro por grama (N.m/g). Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P7:1994 – “*Determinação das propriedades de tração – Método da velocidade constante de carga*”.

$$IT = \left(\frac{RT}{G} \right) \times 10^3$$

j) Resistência ao Arrebatamento

A resistência ao arrebatamento, pressão máxima que uma única folha de papel pode suportar sob as condições de ensaio foi determinada através de equipamento do tipo Mullen Digital. A resistência ao arrebatamento (RA), expressa em quilopascal (kPa), é dada pela relação entre a média das leituras (A), em kPa, e o número de folhas ensaiadas (n). Foram efetuados 10 testes em cada nível de refino, sendo 2 por folha, um em cada lado do corpo-de-prova que possuía dimensões de 15,8 x 7cm. Este procedimento seguiu as recomendações da Norma ABTCP P8:1994 – “*Papel – Determinação da resistência ao arrebatamento*”.

$$RA = \frac{A}{n}$$

k) Índice de Arrebatamento (estouro)

O índice de arrebatamento (IA) foi calculado pela relação entre a resistência média ao arrebatamento (RA), em quilopascal (kPa), de 10 corpos-de-prova e a gramatura (G), em gramas por metro quadrado (g/m^2), do papel. O índice de arrebatamento é expresso em quilopascal vezes metro quadrado por grama ($\text{kPa.m}^2/\text{g}$). Este procedimento seguiu as

recomendações da Norma ABTCP P8:1994 – “*Papel – Determinação da resistência ao arrebentamento*”.

$$IA = \frac{RA}{G}$$

4.2.5 *Espectroscopia no infravermelho próximo*

Os corpos de prova para análise de infravermelho próximo foram retirados na mesma região dos utilizados para maceração dos elementos constituintes do lenho. Os espectros de reflectância foram obtidos da face longitudinal radial de cubos de madeira, com dimensões de 2x2x2cm, utilizando um espectrofotômetro FemWin900, de fabricação nacional. Os espectros foram coletados a cada 2nm, em um intervalo variando de 1100 a 2500nm. O equipamento utiliza um corpo de teflon como referência e opera em modo de reflectância difusa (log 1/R).

A calibração foi desenvolvida usando uma regressão pela técnica dos quadrados mínimos parciais (PLS) utilizando o software Unscrambler® versão 9.1, com a validação cruzada completa e o máximo de vinte fatores. O software recomenda o número final de fatores a ser usado. A medição do quanto a calibração representa os dados é o erro padrão da calibração (SEC - Standard Error of Calibration) e o erro padrão da predição (SEP - Standard Error of Prediction) fornece uma medida de quanto a calibração prediz os parâmetros de interesse para um grupo de amostras diferentes das utilizadas para a calibração.

Foram coletados 759 espectros abrangendo a variação medula-casca e base-altura de 23 árvores, nas idades de 10 anos e 7 meses, e 17 anos e 9 meses. Foi feita a média dos espectros por posição estudada pela técnica convencional de laboratório para posterior comparação com os dados medidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características dendrométricas das árvores

Os valores médios, por idade, do diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e altura comercial das árvores estudadas são apresentados na Tabela 5. Os resultados por árvore encontram-se no anexo 1.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS MÉDIAS DAS ÁRVORES EM RELAÇÃO ÀS IDADES.

IDADE (anos)	DAP (cm)				ALTURA TOTAL (m)				ALTURA COMERCIAL (m)			
	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.
10	16,5	23,18	31,1	3,88	17,57	19,29	22,2	1,16	10,06	14,37	17,38	1,62
11	15,6	21,78	25,9	3,02	17,48	19,06	20,23	0,82	11,68	14,51	16,19	1,28
12	15,6	23,17	32,4	4,06	17,29	20,19	21,97	1,35	7,79	14,96	17,75	2,70
14	16,5	22,56	30,9	3,96	19,65	22,40	23,91	1,08	13,24	17,40	19,97	1,81
15	18,7	25,36	35,2	4,20	23,63	26,56	28,57	1,66	15,34	21,07	23,92	2,62
16	17,9	24,38	33,3	3,86	23,11	25,05	26,41	0,94	22,17	20,42	22,17	1,92
17	20,1	26,28	31,8	3,54	22,55	28,46	30,26	2,15	25,94	23,11	25,94	3,50

Os valores médios do DAP observados, englobando várias classes diamétricas, não possuem um aumento contínuo em relação à idade, o que indica a influência das condições ambientais no desenvolvimento das árvores. A variação no diâmetro representa o incremento e a taxa de crescimento do povoamento. Os valores médios de altura total e altura comercial apresentam-se crescentes em relação à idade, exceto aos 16 anos, onde se observa uma diminuição nesta característica.

Os dados coletados são semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores em estudo de clones de *Pinus taeda*, em idades semelhantes, crescendo no sul do Brasil (Klock 2000, p.154; Bittencourt 2004, p.35)

5.2 Densidade básica

A densidade básica média da madeira do *Pinus taeda* apresentou-se bastante uniforme no momento de sua determinação, mostrando uma pequena variação entre as idades, sendo o menor valor médio ponderado evidenciado para a idade de 10 anos ($0,332\text{g/cm}^3$) e o maior

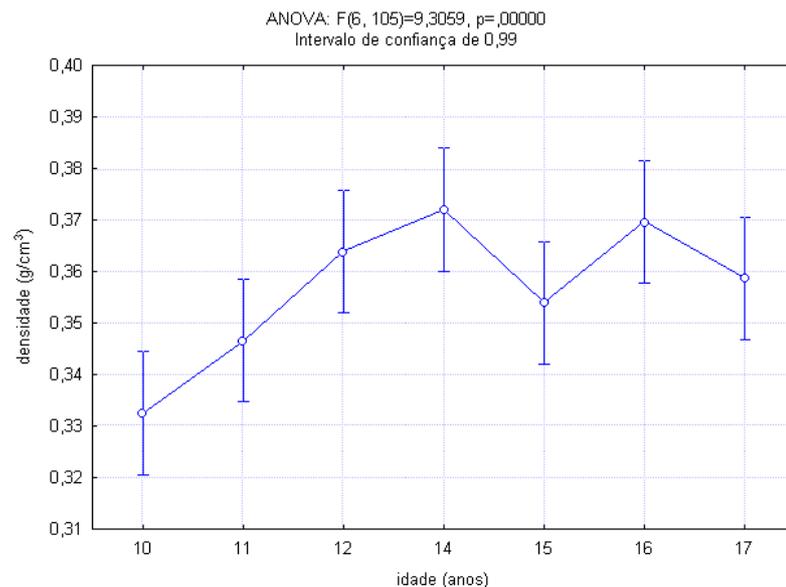
para a idade de 14 anos ($0,372\text{g/cm}^3$). Nos resultados obtidos neste estudo, observa-se a tendência de crescimento com o aumento da idade e também uma queda na densidade aos 15 anos, saindo do padrão de crescimento que vinha apresentando, o que mostra a influência de fatores externos, como clima, resultando em um crescimento mais acelerado, formando mais lenho inicial e diminuindo a densidade da madeira, o que pode ser comprovado observando-se as características anatômicas do material. A diferença da densidade média ponderada entre as idades foi estatisticamente significativa e encontra-se no anexo 4.1.

Os valores médios para todas as idades analisadas são apresentados na Tabela 6 e Figura 7 e os valores por árvore encontram-se no anexo 2.

TABELA 6 – DENSIDADE BÁSICA MÉDIA PONDERADA EM DIFERENTES IDADES.

IDADE	DENSIDADE BÁSICA (g/cm^3)			
	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	DESVIO PADRÃO
10	0,230	0,332	0,351	0,0143
11	0,312	0,347	0,382	0,0176
12	0,326	0,364	0,395	0,0228
14	0,342	0,372	0,400	0,0159
15	0,324	0,354	0,390	0,0180
16	0,347	0,370	0,399	0,0158
17	0,310	0,359	0,388	0,0214

FIGURA 7 - DENSIDADE BÁSICA MÉDIA DE *Pinus taeda* EM DIFERENTES IDADES.



Os valores médios determinados para *Pinus taeda* nesse estudo situam-se na faixa de variação dos resultados encontrados por pesquisadores que trabalharam com a mesma espécie

plantada no sul do Brasil, em idades próximas. Klock (2000, p.154 e 156) encontrou valores entre 0,369 e 0,440g/cm³, sendo a média de 0,420g/cm³ para *Pinus taeda* de 11 anos de idade. Resultados médios próximos foram observados por Rigatto *et al.* (2004, p.270) para árvores com 12 anos, variando de 0,373 a 0,394 nos oito sítios avaliados em Telêmaco Borba, PR. Bittencourt (2004, p.38) obteve média de 0,345g/cm³ para árvores de 10 anos, 0,366 para 14 anos, 0,382 para 16 anos e 0,383 para 20 anos em clones de *Pinus taeda* provenientes da região de Lages, SC. Foelkel (1976, p.57) já havia reportado uma densidade média de 0,347g/cm³ para *Pinus taeda* com 11 anos, e Brito e Barrichelo (1977, p.2) verificaram uma variação de 0,295 a 0,482g/cm³ aos 9 anos, ambos na região de São Paulo. Pereyra e Gelid (2002, p.9) também observaram a variação da densidade básica entre idades e procedências em *Pinus taeda* obtendo valores entre 0,346 e 0,391g/cm³ para classes de idade entre 6 e 10 anos e 0,394 a 0,441g/cm³ para classes de idade entre 11 e 15 anos. Em árvores com 25 anos, Hasegawa (2003, p.67) observou uma variação entre 0,393 – 0,389 – 0,395g/cm³ para três classes diamétricas de *Pinus taeda*, com material genético procedente de África do Sul.

A alta variabilidade da densidade básica na árvore e entre árvores é característica reconhecida nas espécies do gênero *Pinus*, e é devida principalmente a fatores genéticos, ambientais, silviculturais entre outros, podendo chegar a 30% em relação à média da espécie, segundo Tredelenburg e Mayer-Wegelin (1956).

Comparando com *Pinus taeda* crescendo no sul dos Estados Unidos comprova-se que as árvores plantadas no Brasil têm um crescimento mais rápido, produzindo material de menor densidade. Árvores com 12 anos estudadas em função do impacto do controle da vegetação e fertilização anual apresentaram densidade básica média variando de 0,420 a 0,480g/cm³ (Clark III *et al.* 2004, p.95).

5.3 Análise anatômica

As características morfológicas médias dos traqueóides em cada idade são apresentadas na Tabela 7. Os valores por árvore encontram-se no anexo 2.

TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS MÉDIAS DOS TRAQUEÓIDES EM RELAÇÃO À IDADE.

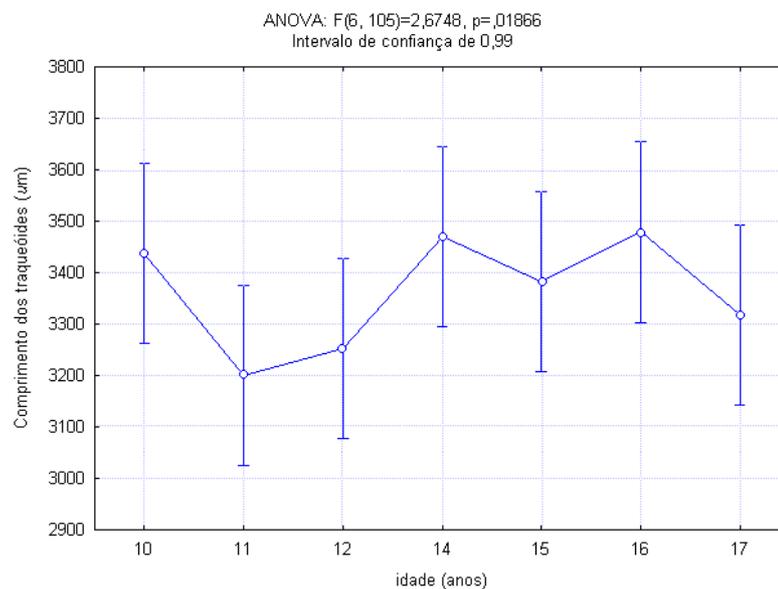
IDADE (anos)	VALORES	COMPRIMENTO (mm)	LARGURA (μm)	DIÂMETRO DO LUME (μm)	ESPESSURA DA PAREDE (μm)
10	Mínimo	2,99	33,90	21,60	4,54
	Média	3,44	39,27	26,38	6,45
	Máximo	3,94	47,03	30,62	9,12
	Desvio padrão	0,23	3,16	2,42	1,56
11	Mínimo	2,58	35,35	22,40	4,97
	Média	3,20	38,22	26,03	6,09
	Máximo	3,60	42,98	29,00	7,45
	Desvio padrão	0,28	2,28	1,99	0,85
12	Mínimo	2,98	34,97	21,13	4,58
	Média	3,25	39,31	26,69	6,31
	Máximo	3,66	45,53	32,53	7,05
	Desvio padrão	0,22	2,29	2,75	0,68
14	Mínimo	3,08	35,20	23,15	4,93
	Média	3,47	38,94	26,80	6,07
	Máximo	3,92	44,24	31,18	7,38
	Desvio padrão	0,29	2,21	1,86	0,57
15	Mínimo	2,84	35,58	23,15	4,75
	Média	3,38	38,15	23,36	5,90
	Máximo	3,88	42,57	30,48	7,33
	Desvio padrão	0,27	2,49	2,25	0,75
16	Mínimo	3,07	34,22	20,02	4,87
	Média	3,48	37,22	24,93	6,15
	Máximo	4,09	42,53	28,7	7,54
	Desvio padrão	0,31	2,23	2,30	0,71
17	Mínimo	2,91	37,33	24,65	5,01
	Média	3,32	40,42	27,09	6,67
	Máximo	3,68	43,05	30,05	7,71
	Desvio padrão	0,26	1,62	1,68	0,64

Os valores médios obtidos nesse estudo para as características morfológicas assemelham-se aos apresentados por Moreschi (1975), Foelkel (1976), Tomaselli (1979), Mendonça (1982), Klock (2000), Hasegawa (2003) e Rigatto (2004), para árvores de idade semelhante. As características serão discutidas separadamente a seguir.

5.3.1 Comprimento

Em relação ao comprimento médio dos traqueóides pode-se observar valores entre 3,20 e 3,48mm, sendo o menor encontrado para a idade de 11 anos e o maior representado por 16 anos. A Figura 8 ilustra a variação no comprimento médio em relação à idade e junto com a análise de variância (anexo 4.2) leva à conclusão que não existe diferença nesta característica entre as idades.

FIGURA 8 – COMPRIMENTO MÉDIO DOS TRAQUEÓIDES EM RELAÇÃO À IDADE.



Estes valores estão próximos aos observados em outros estudos com a mesma espécie plantada no sul do Brasil, em idades semelhantes. Klock (2000, p.126) verificou uma média de 2,93mm no lenho inicial e 2,98mm no lenho tardio em árvores com 11 anos na região de Ventania, PR. Já Rigatto *et al.* (2004, p.271) obtiveram média entre 3,38 e 3,47mm para *Pinus taeda* com 12 anos de idade, plantados em diferentes sítios em Telêmaco Borba, PR. Foelkel (1976, p.57) havia observado média de 2,78mm para árvores com 11 anos de idade da região de São Paulo. Em árvores mais velhas, Hasegawa (2003, p.47) relatou um comprimento médio de 3,6mm para árvores com 25 anos de idade procedentes da África do Sul e plantadas na região de Lages, SC. Muñiz (1993) verificou valores em torno de 3,42mm para *Pinus taeda* com 30 anos de idade da região de Irati, PR.

A grande variação do comprimento dos traqueóides axiais de *Pinus taeda* dentro e entre árvores é relatada por Larson *et al.* (2001, p.10) como sendo influenciada pela idade e posição no fuste, densidade da população, sítio, localização geográfica e práticas silviculturais, além de ser considerado um fator genético. Schultz (1997, p.2-7) também comenta que o comprimento aumenta com a idade (até 10 anos) permanecendo constante após este período.

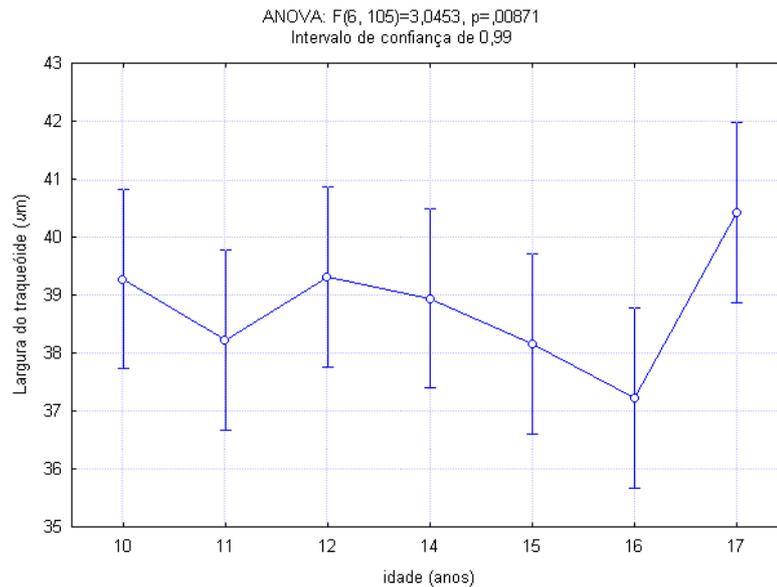
5.3.2 Largura e diâmetro do lume

Os valores encontrados neste estudo mostram uma variação da largura média dos traqueóides de 37,22 μ m aos 16 anos a 40,42 μ m aos 17 anos, sendo numericamente muito semelhantes entre as idades de 10 e 15 (Figura 9). Estatisticamente podem ser visualizados dois grupos (anexo 4.3).

Estes resultados estão próximos aos verificados por outros autores trabalhando com a mesma espécie e também plantadas no sul do Brasil. Klock (2000, p.126) relata uma média de 42,4 μ m no lenho inicial e 38,5 μ m no lenho tardio em *Pinus taeda* de 11 anos plantados na região de Ventania. Rigatto *et al.* (2004, p.271) obtiveram valores médios de 41,94 a 43,08 μ m para o diâmetro externo ou largura dos traqueóides de árvores com 12 anos de idade em diferentes sítios de crescimento da região de Telêmaco Borba, PR. Foelkel (1976, p.57) observou valores de 43,81 μ m para *Pinus taeda* de 11 anos. Em idades superiores, Hasegawa (2003, p.47) encontrou 50 μ m para o lenho inicial e 37,5 μ m para o lenho tardio de *Pinus taeda* com 25 anos de idade, plantado na região de Lages, SC; Muñiz (1993, p.104) obteve largura entre 32,5 e 72,5 μ m, em árvores com 30 anos.

De acordo com a literatura, o diâmetro dos traqueóides axiais para o *Pinus taeda* varia entre 35 e 45 μ m (Brown *et al.* 1949, p.132; Kollman e Côté 1968, p.10; Wheeler 2002).

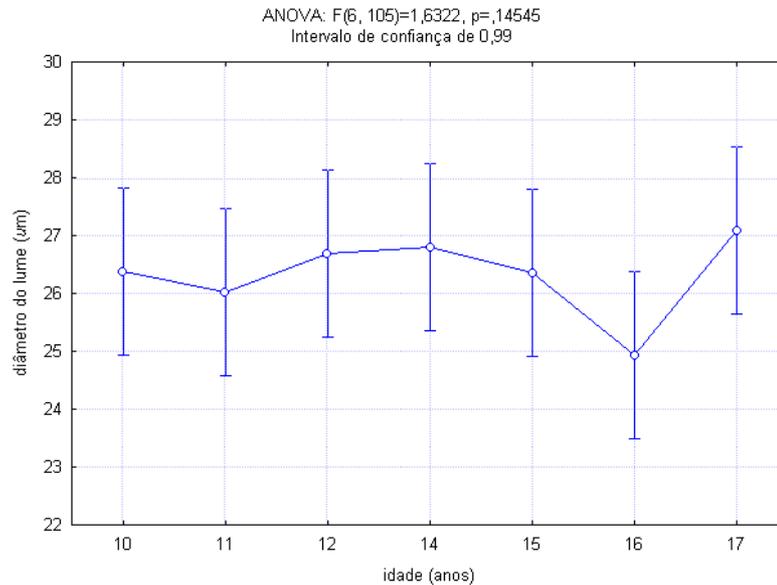
FIGURA 9 – LARGURA MÉDIA DOS TRAQUEÓIDES EM RELAÇÃO À IDADE.



Em relação ao diâmetro médio do lume observou-se uma variação de 24,93 μm aos 16 anos até 27,09 μm aos 17 anos, estando os valores das outras idades numericamente muito próximos entre si (Figura 10), não sendo diferentes estatisticamente (anexo 4.4).

Os dados referentes ao diâmetro do lume também são compatíveis com o observado por outros autores. Klock (2000, p.126) verificou uma média de 32,9 μm no lenho inicial e 22,3 μm no lenho tardio em *Pinus taeda* de 11 anos plantados na região de Ventania. Rigatto *et al.* (2004, p.271) obtiveram valores médios de 31,00 a 34,16 μm para o diâmetro do lume dos traqueóides de árvores com 12 anos de idade em diferentes sítios de crescimento da região de Telêmaco Borba, PR. Foelkel (1976, p.57) observou valores de 34,28 μm para *Pinus taeda* de 11 anos. Hasegawa (2003, p.47) encontrou 27,5 μm para o lenho inicial e 12,5 μm para o lenho tardio de *Pinus taeda* com 25 anos de idade, plantado na região de Lages, SC. Muñiz (1993, p.104) estudando *Pinus taeda* com 30 anos obteve valores e diâmetro do lume de 15 a 60 μm .

FIGURA 10 – DIÂMETRO MÉDIO DO LUME DOS TRAQEÓIDES EM RELAÇÃO À IDADE.

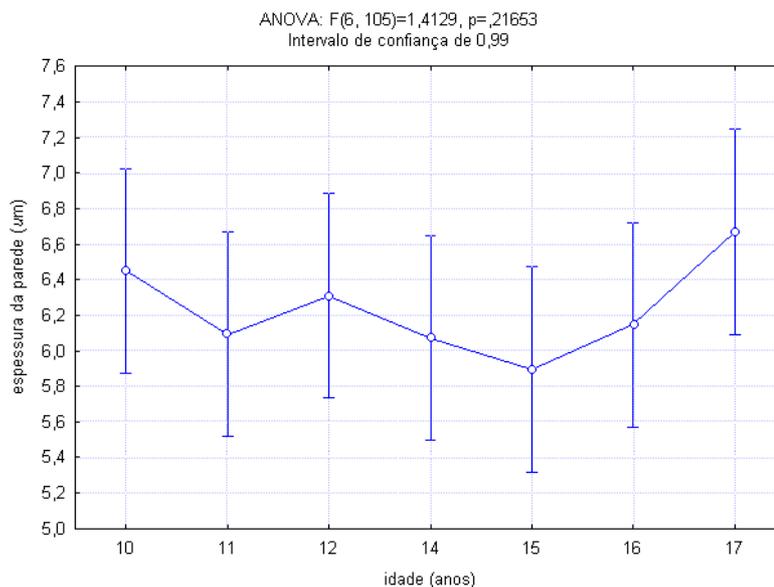


A literatura reporta que o diâmetro externo e do lume tendem a permanecer mais ou menos constantes, ou com um pequeno decréscimo em relação à idade, o que foi observado nos resultados obtidos neste estudo. A interferência das condições climáticas, solo e manejo silvicultural também são reportados como de grande influência nestas características, uma vez que interferem na condução de nutrientes e conseqüentemente desenvolvimento da árvore.

5.3.3 Espessura da parede

Os dados referentes à espessura média da parede dos traqueóides axiais mostram o menor valor na idade de 15 anos ($5,90\mu\text{m}$) e o maior aos 17 anos ($6,67\mu\text{m}$). As outras idades estudadas mostram valores numéricos muito semelhantes entre si (Figura 11). Não houve diferença estatística entre as idades analisadas (anexo 4.5). O valor médio da espessura da parede aos 10 anos ($6,45\mu\text{m}$) é maior que para as idades seguintes, estando abaixo apenas dos 17 anos ($6,67\mu\text{m}$), comprovando a influência externa no desenvolvimento desta característica na árvore.

FIGURA 11 – ESPESSURA MÉDIA DA PAREDE DOS TRAQUEÓIDES EM RELAÇÃO À IDADE.



Os resultados são compatíveis e um pouco superiores quando comparados com os encontrados para a mesma espécie em estudos de povoamentos do sul do Brasil. Klock (2000, p.126) verificou uma média de 4,7μm no lenho inicial e 8,1μm no lenho tardio em *Pinus taeda* de 11 anos plantados na região de Ventania. Rigatto *et al.* (2004, p.271) obtiveram valores médios de 4,2 a 4,8μm para a espessura da parede dos traqueóides de *Pinus taeda* com 12 anos de idade em diferentes sítios de crescimento da região de Telêmaco Borba, PR. Foelkel (1976, p.57) observou valores de 4,96μm para *Pinus taeda* de 11 anos. Hassegawa (2003, p.47) encontrou 5μm para o lenho inicial e 12,5μm para o lenho tardio de *Pinus taeda* com 25 anos de idade, plantado na região de Lages, SC. Muñiz (1993, p.104) observou valores de 5 a 13,6μm para *Pinus taeda* com 30 anos.

5.3.4 Índices indicativos da qualidade da polpa celulósica

O pinus tem como principal estrutura anatômica constituinte os traqueóides axiais (termo técnico). Em virtude do uso da terminologia fibra longa e curta pela Indústria de

Celulose e Papel, quando se trata da análise de características anatômicas em relação à celulose e papel utilizou-se neste estudo o termo genérico fibra.

As relações entre as dimensões das fibras fornecem os índices indicativos da qualidade da polpa celulósica a ser produzida com o material estudado. A Tabela 8 mostra a média por idade desses índices para *Pinus taeda*. Os valores por árvore encontram-se no anexo 2.

TABELA 8 – ÍNDICES INDICATIVOS DA QUALIDADE DA POLPA CELULÓSICA EM RELAÇÃO À IDADE.

IDADE (anos)	VALORES	CF (%)	FP (%)	IE	IR	IB	IM
10	Mínimo	55,61	23,97	76,90	0,31	0,27	0,42
	Média	67,37	32,63	87,92	0,50	0,38	0,54
	Máximo	76,02	44,39	107,07	0,80	0,53	0,69
	Desvio padrão	6,27	6,27	8,08	0,15	0,08	0,08
11	Mínimo	60,05	27,16	71,77	0,38	0,31	0,47
	Média	68,14	31,86	84,02	0,47	0,37	0,53
	Máximo	72,84	39,95	97,57	0,67	0,47	0,64
	Desvio padrão	3,87	3,87	9,04	0,08	0,05	0,05
12	Mínimo	60,44	23,00	71,07	0,30	0,26	0,40
	Média	67,78	32,22	82,98	0,48	0,37	0,54
	Máximo	77,00	39,56	96,48	0,65	0,46	0,63
	Desvio padrão	4,11	4,11	7,48	0,09	0,05	0,06
14	Mínimo	65,21	25,64	72,54	0,34	0,29	0,45
	Média	68,80	31,20	89,32	0,45	0,36	0,53
	Máximo	74,36	37,79	103,30	0,53	0,40	0,57
	Desvio padrão	2,47	2,47	8,31	0,05	0,03	0,03
15	Mínimo	61,90	24,82	74,08	0,33	0,28	0,43
	Média	69,08	30,92	89,21	0,45	0,35	0,52
	Máximo	75,17	38,10	107,15	0,62	0,44	0,62
	Desvio padrão	3,48	3,48	10,86	0,07	0,04	0,05
16	Mínimo	58,50	26,18	76,63	0,35	0,29	0,45
	Média	66,92	33,08	93,84	0,49	0,38	0,55
	Máximo	73,82	41,49	109,29	0,71	0,49	0,66
	Desvio padrão	3,86	3,86	10,40	0,08	0,05	0,05
17	Mínimo	62,48	26,09	68,47	0,35	0,29	0,45
	Média	67,00	33,00	82,23	0,49	0,38	0,55
	Máximo	73,91	37,52	95,19	0,60	0,44	0,61
	Desvio padrão	3,01	3,01	7,85	0,07	0,04	0,04

CF = Coeficiente de Flexibilidade; FP = Fração Parede; IE = Índice de Enfeltramento; IR = Índice de Runkel; IB = Índice de Boiler; IM = Índice de Mülsteph.

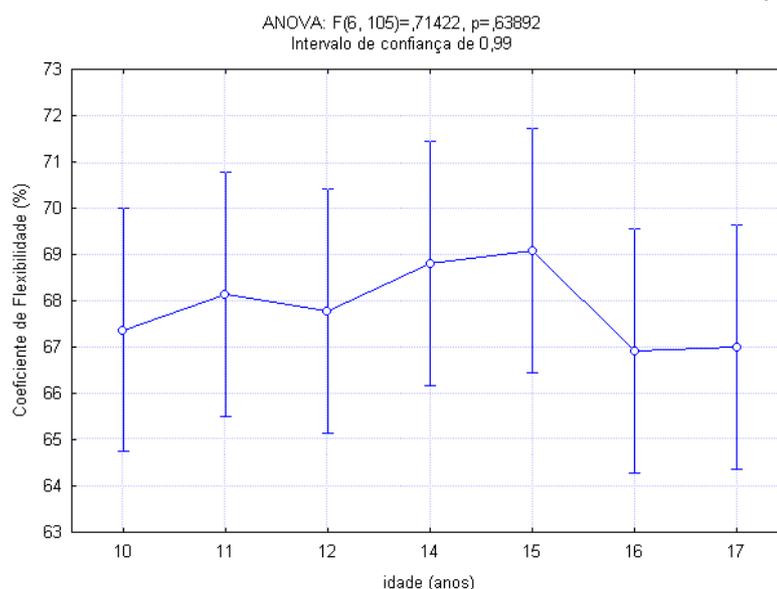
Algumas tendências reportadas na literatura comparando os índices indicativos da qualidade da polpa com as características do papel produzido foram encontradas neste estudo: fibras com menores Índices de Runkel e Fração Parede, e maiores Índice de Enfeltramento e Coeficiente de Flexibilidade forneceram um papel com alta resistência à tração. Pelas relações

aqui observadas o papel produzido é de boa qualidade para a utilização em embalagens, apresentando os valores de resistência ao rasgo, arrebentamento e tração adequados a este fim. As variações são justificadas pelas diferenças existentes no processo de produção de papel, entre as amostras, englobando diferentes tempos de refino, espessura dos cavacos e quantidade de NaOH utilizada no cozimento.

5.3.4.1 Coeficiente de Flexibilidade

É o resultado da relação entre o diâmetro do lume e a largura da fibra. Para que haja uma boa interligação entre as fibras no momento da fabricação de papel, este Coeficiente deve estar acima de 50%, e seu aumento melhora a resistência à tração e arrebentamento, resultado da união e disposição das fibras no momento da formação da folha. Neste estudo o Coeficiente de Flexibilidade médio para cada idade, medido percentualmente, variou de um mínimo de 66,92% na idade de 16 anos até o máximo de 69,08% na idade de 15 anos (Figura 12).

FIGURA 12 – COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE MÉDIO EM RELAÇÃO À IDADE.



Não houve diferença estatística neste índice (anexo 4.6), indicando que em qualquer idade que se corte a árvore, as fibras do *Pinus taeda* apresentam boa superfície de contato,

boa união fibra-fibra e bom grau de colapso no momento da fabricação de papel, estando dentro dos valores esperados para a produção de papel para embalagem.

Os valores deste estudo diferem dos encontrados por Klock (2000, p.147) que analisou separadamente o lenho inicial e tardio, obtendo valores médios para o lenho inicial de 76,9% e lenho tardio de 57,7% para *Pinus taeda* aos 11 anos de idade crescendo na região de Ventania, PR. Entretanto, quando se leva em conta a média dos lenhos, os valores são compatíveis. A mesma situação ocorre quando se comparam os dados deste estudo com os de Hasegawa (2003, p.58) em árvores mais velhas, que observou variação de 76,5 a 77,3 no lenho inicial e 41,2 a 45,4 no lenho tardio de *Pinus taeda* com 25 anos da região de Lages, SC.

De acordo com Peteri (1952, p.157) e Foelkel e Barrichelo (1975, p.50), quanto maior for o Coeficiente de Flexibilidade, mais flexíveis serão as fibras, o que contribui para o aumento na resistência ao arrebentamento e tração do papel, uma vez que aumenta o número de ligações entre as fibras, o que pôde ser comprovado observando-se as propriedades do papel produzido com o material deste estudo.

Foelkel (1976, p.58) obteve resultados maiores para o Coeficiente de Flexibilidade para reflorestamentos de *Pinus taeda* com 11 anos (78%).

Salienta-se que Dinwoodie (1965, p.440) cita vários pesquisadores que, em seus estudos, encontraram relação significativa entre o Coeficiente de Flexibilidade e a resistência à tração e ao estouro do papel.

5.3.4.2 Fração Parede

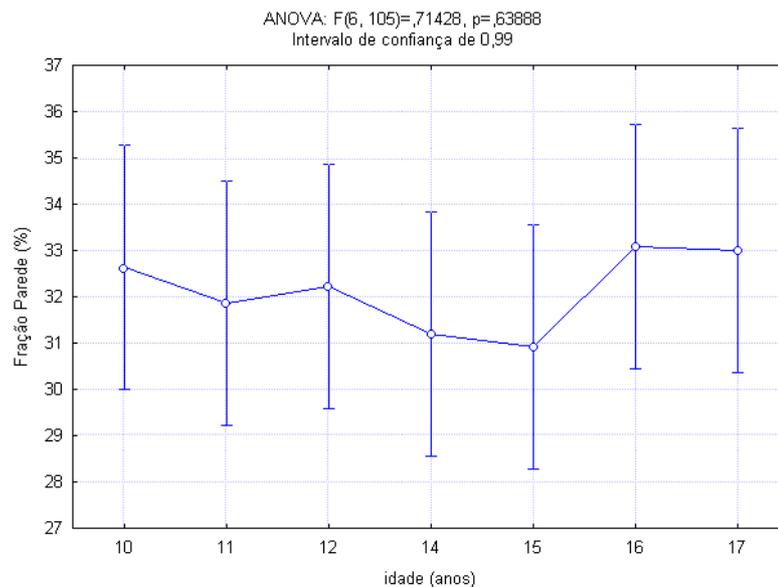
É o resultado da relação entre duas vezes a espessura da parede e a largura da fibra. No caso da Fração Parede, obtiveram-se neste estudo valores médios entre 30,92% (15 anos) e 33,08% (16 anos), abaixo, portanto, de 40%, o que coloca a fibra dentro do que seria o limite

indicado para uma celulose de qualidade satisfatória para a produção de papel de embalagem, uma vez que fibras com Fração Parede muito elevada são extremamente rígidas, com pouca flexibilidade, o que dificulta a interligação entre elas e diminui a resistência do papel (Foelkel e Barrichelo 1975, p.51).

De acordo com Watson e Dadswell (1961, p.175) quanto menor for a Fração Parede, maior será o esticamento, a resistência ao estouro e à tração do papel, uma vez que as fibras são mais flexíveis e se interligam com facilidade. Dinwoodie (1965, p.444) aponta como principal variável relacionada à resistência ao rasgo do papel, a Fração Parede (FP) uma vez que as mesmas formam fitas e apresentam um número maior de ligações. Com base na Fração Parede obtida nas várias idades deste estudo, resultados médios entre 30 e 33%, e sua influência na resistência do papel produzido, valores adequados são esperados nas propriedades de tração, arrebentamento e estouro, para o uso do papel em embalagens.

A Figura 13 mostra a variação entre as idades da Fração Parede média, e a análise de variância comprovando que não existe diferença significativa encontra-se no anexo 4.7.

FIGURA 13 – FRAÇÃO PAREDE MÉDIA EM RELAÇÃO À IDADE.



Os resultados médios desta pesquisa são menores do que os observados por Klock (2000, p.147) para *Pinus taeda* aos 11 anos de idade quando se avalia separadamente o lenho

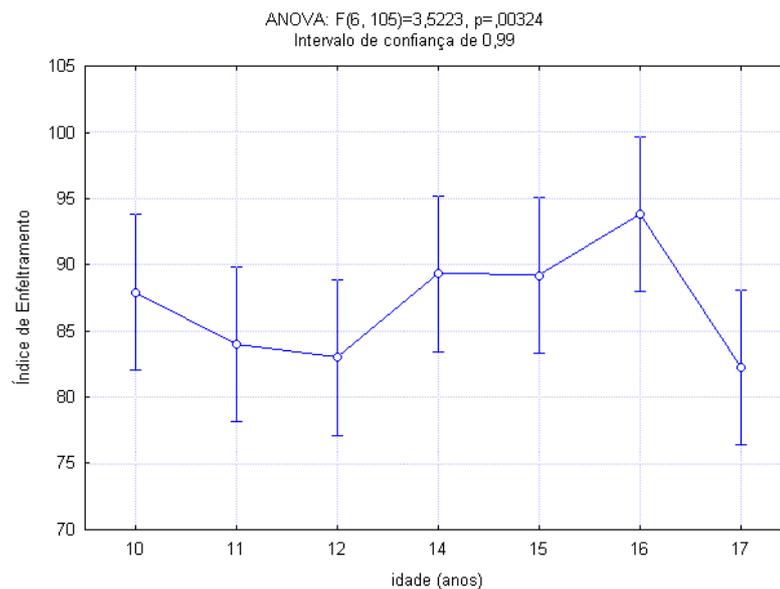
inicial (23,15) e tardio (42,3), entretanto, os valores médios dos lenhos são equivalentes aos encontrados neste estudo. O mesmo comportamento é verificado ao analisar os dados obtidos por Hasegawa (2003, p.58) que observou variação na Fração Parede de 20,1 a 23,5% no lenho inicial e 54,6 a 58,8% no lenho tardio de *Pinus taeda* com 25 anos.

Os resultados obtidos são maiores do que os encontrados por Foelkel (1976, p.58) para *Pinus taeda* com 11 anos (22%) com oito anos, mostrando a influência das características do local de crescimento do material.

5.3.4.3 Índice de Enfeltramento

É o resultado da relação entre o comprimento e a largura da fibra, sendo que quanto maior for o Índice de Enfeltramento, mais flexíveis são as fibras, uma vez que apresentam formato de tubos longos e estreitos. Os valores médios do Índice de Enfeltramento variaram de 82,23, aos 17 anos, até 93,84 aos 16 anos (Figura 14), acima do mínimo de 50 exigido, indicando que o papel produzido apresentará boas resistências ao rasgo e arrebentamento, resultado do número de ligações entre as fibras durante a formação da folha (Gonzaga *et al.* 1983, p.26, Watson e Dadswell 1961, p.171; Foelkel 1976, p.64).

FIGURA 14 – ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO MÉDIO EM RELAÇÃO À IDADE.



Geralmente as coníferas apresentam valores próximos ou superiores a 100 neste índice, resultado do maior comprimento das fibras, 2 a 5mm, o que denota sua qualidade para produção de papel (Dueñas 1997, p.227). A análise de variância e o teste de Tukey encontram-se no anexo 4.8 e mostram que as idades de 16 e 17 anos não apresentam o mesmo comportamento.

Os resultados deste estudo são maiores do que os encontrados por Klock (2000, p.147) que obteve valores médios para o Índice de Enfeltramento no lenho inicial de 69,5 e lenho tardio de 77,3 para *Pinus taeda* aos 11 anos de idade crescendo na região de Ventania, PR. Também são superiores aos relatados por Foelkel (1976, p.58) para *Pinus taeda* (63) com 11 anos. Os resultados deste estudo estão mais próximos dos obtidos por Hassegawa (2003, p.58) em árvores com 25 anos, da região de Lages – SC, que observou variação de 71,3 a 76,2 no lenho inicial e 91,4 a 92,9 no lenho tardio.

Dinwoodie (1965, p.443) cita vários pesquisadores que constataram a influência do Índice de Enfeltramento nas propriedades de resistência do papel, entre eles Peteri, Petroff e Normand, que encontraram em seus trabalhos importante correlação positiva com a resistência ao rasgo do papel, ou seja, quanto maior o Índice de Enfeltramento, originado do maior comprimento das fibras, maior a resistência ao rasgo, o que também foi observado neste estudo.

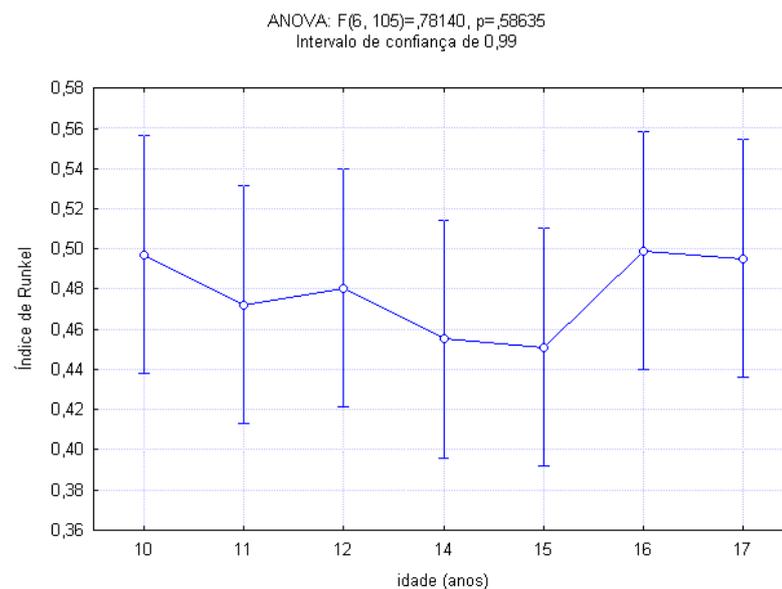
5.3.4.4 Índice de Runkel

O Índice de Runkel é classificado nas seguintes faixas: $\leq 0,25$, entre 0,25 e 0,50, entre 0,50 e 1,00, > 1 , sendo que os melhores resultados são obtidos nos dois primeiros grupos, uma vez que este índice é uma medida da capacidade de união fibra-fibra pela flexibilidade e possibilidade de acomodação na formação do papel.

Uma variação entre 0,4510 (aos 15 anos) e 0,4991 (aos 16 anos) foi encontrada para o Índice de Runkel em *Pinus taeda* na faixa de idade analisada. Estes valores indicam o quanto a fibra é flexível, fornecendo informações sobre a capacidade de união das fibras, ou seja, em relação às características de resistência à tração e estouro da folha produzida. Estes valores estão na faixa de classificação de uma fibra considerada muito boa para fabricação de papel, pertencendo ao grupo II da classificação de Runkel. Quanto maior for o Índice de Runkel, menor será a resistência ao arrebentamento e maior será a resistência ao rasgo (Watson e Dadswell 1961, p.169; Foelkel 1976, p.64). Valores altos, próximos ou acima de 1 não são desejados pois indicam que o diâmetro do lume diminui fortemente e as paredes se tornam espessas, tornando as fibras rígidas e com maior dificuldade de acomodação e união na folha de papel.

A Figura 15 mostra a variação do Índice de Runkel médio entre as idades analisadas e a análise de variância (anexo 4.9) comprova que não existe diferença significativa neste índice para a propriedade analisada.

FIGURA 15 – ÍNDICE DE RUNKEL MÉDIO EM RELAÇÃO À IDADE.



Os resultados deste estudo estão em desacordo com os valores médios encontrados por Klock (2000, p.147) para o lenho inicial de 0,329 e lenho tardio de 0,769 de *Pinus taeda* aos

11 anos de idade. Considerando-se a média dos lenhos, os valores de Klock são superiores aos desta pesquisa. Já Foelkel (1976, p.58) obteve valores menores para *Pinus taeda* (0,289) de 11 anos, indicando a influência da região de origem do material e também a variação entre espécies do gênero *Pinus*.

Mostrando a influência da idade, Hasegawa (2003, p.58) observou variação muito maior no Índice de Runkel, de 0,26 a 0,32 no lenho inicial e 1,37 a 1,64 no lenho tardio, de *Pinus taeda* com 25 anos da região de Lages, SC.

5.3.4.5 Índice de Boiler e Índice de Mülsteph

O Índice de Boiler variou de 0,3542 aos 15 anos a 0,3817 aos 16 anos (Figura 16), sendo maior que o obtido por Foelkel (1976, p.58) para *Pinus taeda* (0,240) de 11 anos.

No caso do Índice de Mülsteph (Figura 17) uma variação entre 0,5216 (15 anos) e 0,5508 (16 anos) foi observada. Estes valores são superiores aos verificados por Foelkel (1976, p.58) que obteve um índice de 0,397 para *Pinus taeda* (11 anos).

Não foi verificada diferença estatística nestes índices para as idades analisadas (anexo 4.10 e 4.11).

FIGURA 16 – ÍNDICE DE BOILER MÉDIO EM RELAÇÃO À IDADE.

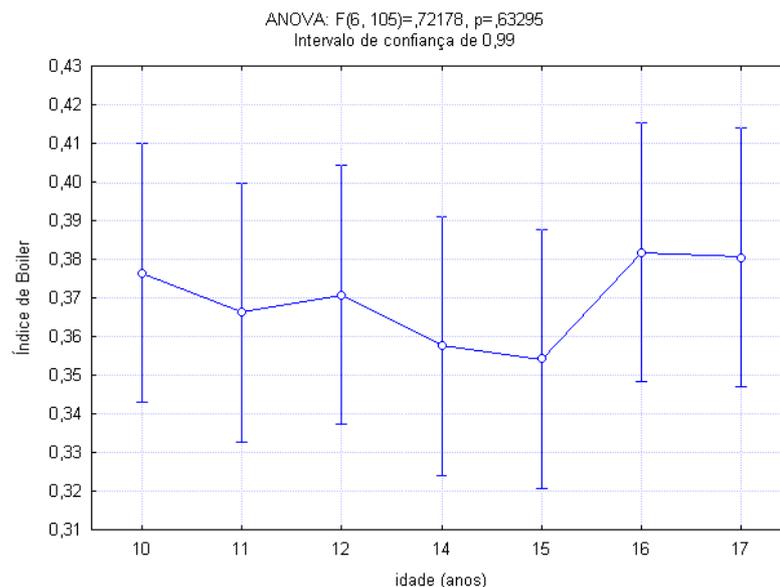
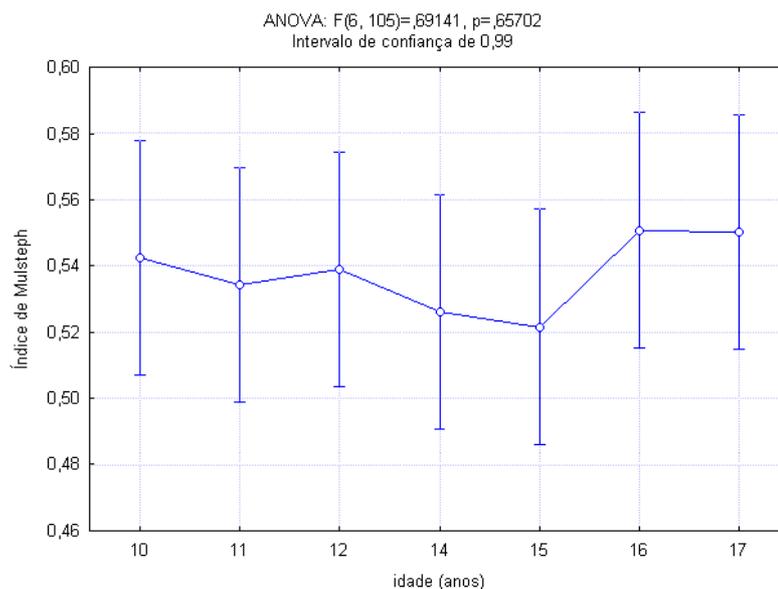


FIGURA 17 – ÍNDICE DE MÚLSTEPH MÉDIO EM RELAÇÃO À IDADE.



5.4 Produção de Celulose

5.4.1 Rendimento em celulose

As variáveis de rendimento e número *kappa*, que indica o grau de deslignificação, foram determinadas para as diferentes idades estudadas e os valores médios são apresentados na Tabela 9. Os valores para cada árvore são apresentados no anexo 3.

TABELA 9 – RENDIMENTO EM CELULOSE E NÚMERO *KAPPA* DE ACORDO COM A IDADE.

IDADE (anos)	NÚMERO <i>KAPPA</i>				RENDIMENTO BRUTO (%)			
	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	DESVIO PADRÃO	MÍN.	MÉDIA	MÁX.	DESVIO PADRÃO
10	91,50	101,80	111,40	6,03	52,60	55,41	57,10	1,48
11	86,10	98,51	107,50	5,63	53,00	54,60	56,50	0,90
12	87,00	104,56	112,80	7,71	52,00	57,26	59,60	2,16
14	88,50	97,81	111,70	7,43	52,30	55,07	58,10	1,79
15	96,00	104,51	113,00	5,15	55,20	57,16	59,20	1,15
16	96,00	104,37	114,50	5,25	53,20	55,99	58,50	1,47
17	91,50	104,50	113,10	7,58	52,40	56,46	59,10	2,29

O menor rendimento bruto médio foi obtido para a idade de 11 anos (54,6%) e o maior para 12 anos (57,26%), ocorrendo a mesma variação com o número *kappa*. Não foi observado um aumento contínuo do rendimento com a idade, esperado em função do aumento da

densidade do material, o que pode ser justificado pelas características morfológicas das fibras, principalmente a espessura da parede celular.

Os valores observados neste estudo estão muito acima de outros realizados com a mesma espécie, em idades semelhantes, plantada no sul do Brasil, porque seguiram o processo de produção de papel para embalagem, utilizado pela empresa que forneceu o material, que objetiva um *kappa* em torno de 100. Rigatto *et al.* (2004, p.271) obtiveram valores médios de 48,83 a 50,97% para o rendimento bruto e de 48,56 a 50,59% para o rendimento depurado na produção de celulose Kraft de *Pinus taeda* com 12 anos de idade em diferentes sítios de crescimento da região de Telêmaco Borba, PR, com um número *kappa* variando de 30,85 a 31,47. Klock (2000, p.248) obteve um rendimento bruto de 45,76% para *Pinus taeda* com 11 anos proveniente da região de Ventania, PR com um número *kappa* de 32,56. Hasegawa (2003, p.71) obteve rendimento médio variando de 47,12 a 53,36% para *Pinus taeda* com 25 anos da região de Lages, SC, com um número *kappa* entre 35,22 e 38,05. Bittencourt (2004, p.41) obteve rendimento de 47,1% (10 anos, *kappa* de 43,5), 49,8% (14 anos, *kappa* de 49,8), 51,4% (16 anos, 50,5) e 53,2% (20 anos, *kappa* de 52,9) verificando um rendimento crescente com a idade. Foelkel (1976, p.59) obteve um rendimento bruto médio de 49,4% para *Pinus taeda* com 11 anos de idade, crescendo na região de São Paulo, e 44,6% para *Pinus taeda* com 16 anos proveniente dos Estados Unidos para celulose do tipo não-branqueável e um *kappa* de 26,8 e 28,2, respectivamente.

Os valores nominais de rendimento na produção de celulose Kraft para coníferas variam, dependendo das condições, entre 40 e 50% de acordo com Smook (1994, p.44).

5.4.2 Tempo de refinação

O tempo de refinação variou de 35 a 100 minutos. O maior *freeness*, que indica a drenabilidade da polpa celulósica, foi observado aos 10 anos (757,5) com um tempo de

refinação de 35 minutos, e o menor (380) aos 12 anos e uma refinação de 100min (Tabela 10). Observou-se que o *freeness* diminuiu com o aumento do tempo de refinação conforme o esperado e que não existe uma relação linear entre o tempo de refinação e *freeness* e as idades estudadas (Figura 18). Os resultados deste estudo comprovam os efeitos da refinação na folha de papel, reportados na literatura, devido ao aumento da área de contato entre as fibras com o aumento no tempo de refino e também decorrentes do aumento do número de cortes nas fibras. A resistência ao rasgo e o volume específico das folhas de papel diminuíram com o aumento do tempo de refinação, ocorrendo o contrário com a resistência à tração, ao arrebatamento e a densidade específica aparente que aumentaram com um maior tempo de refinação. Em termos de valores médios, o tempo de refinação teve pouca influência na variação das propriedades físicas e mecânicas do papel em relação às idades avaliadas. Os valores para cada árvore são apresentados no anexo 3.

FIGURA 18 – *FREENESS* EM RELAÇÃO À IDADE E TEMPO DE REFINO.

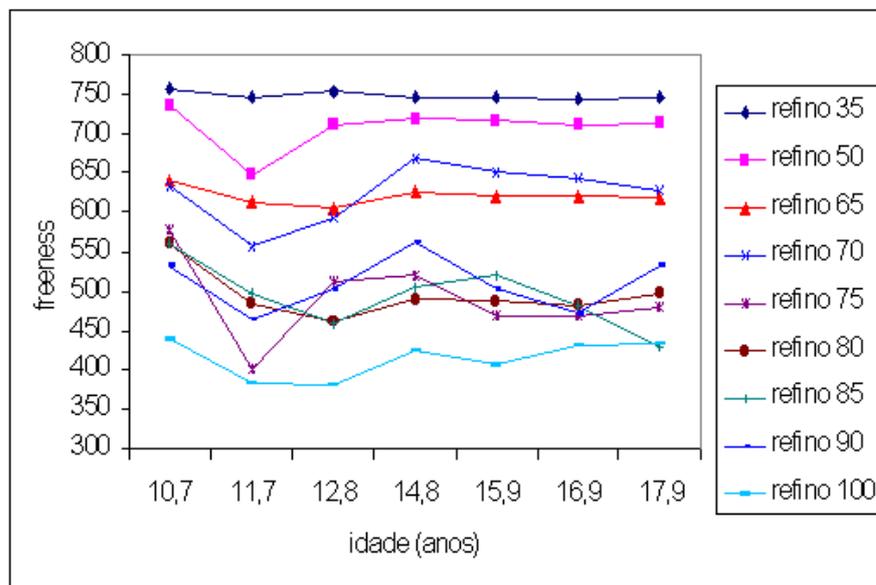


TABELA 10 – TEMPO DE REFINAÇÃO E *FREENESS* DE ACORDO COM A IDADE.

IDADE (anos)	REFINO (min)	<i>FREENESS</i>
10	35	757,50
	50	737,78
	65	641,88
	70	633,00
	75	576,75
	80	561,17
	85	559,75
	90	532,29
	100	439,67
11	35	748,13
	50	648,46
	65	613,45
	70	558,00
	75	399,75
	80	485,00
	85	498,00
	90	463,67
	100	384,33
12	35	755,00
	50	710,58
	65	606,67
	70	593,17
	75	512,43
	80	461,38
	85	458,67
	90	502,00
	100	380,00
14	35	748,13
	50	718,56
	65	626,57
	70	669,22
	75	519,25
	80	488,33
	85	504,90
	90	563,25
	100	423,67
15	35	747,50
	50	717,13
	65	621,43
	70	650,89
	75	468,00
	80	488,13
	85	519,00
	90	502,00
	100	406,50
16	35	743,75
	50	712,38
	65	620,90
	70	643,00
	75	470,00
	80	481,22
	85	482,17
	90	472,29
	100	431,00
17	35	746,25
	50	714,69
	65	618,30
	70	629,29
	75	478,83
	80	495,86
	85	427,80
	90	531,67
	100	434,00

5.5 Propriedades físicas e mecânicas do papel

Os valores médios das propriedades físicas do papel, analisadas neste estudo em 9 tempos de refino por idade, são apresentados na Tabela 11. Existem propriedades mecânicas do papel que podem ser comparadas com outros estudos, mesmo sob outras gramaturas na forma de índices, como é o caso do arrebentamento, tração e rasgo. Estas propriedades por idade e tempo de refino são apresentadas nas Tabelas 12 e 13. Os dados relativos a cada árvore encontram-se no anexo 3 e as análises de regressão no anexo 4.

5.5.1 Espessura média das folhas

A espessura depende da gramatura e é afetada pela refinação e formação da folha. Também sofre influência da composição fibrosa (quantidade e morfologia das fibras), afetando as propriedades mecânicas do papel. A menor espessura média da folha foi obtida na idade 11 com 100min de refino ($113,47\mu\text{m}$) e a maior aos 16 anos com 35min de refino ($180,77\mu\text{m}$), variando um pouco entre as amostras. Observou-se também uma tendência de diminuição na espessura com o aumento do tempo de refino, como esperado pelos efeitos do refino na fibra, como eliminação da parede primária, penetração de água na parede celular, ruptura de algumas pontes de hidrogênio, formação de fraturas na parede celular e alargamento e/ou compressão das fibras.

5.5.2 Densidade aparente e volume específico aparente

A maior densidade aparente média e o menor volume específico médio foram obtidos aos 11 anos com tempo de refino de 100min ($0,7133\text{g}/\text{cm}^3$ e $1,4050\text{cm}^3/\text{g}$) e a menor densidade e maior volume ocorreram aos 10 anos e 35min de refino ($0,4570\text{g}/\text{cm}^3$ e $2,1925\text{cm}^3/\text{g}$), ficando os outros valores médios próximos entre si. As Figuras 19 e 20 mostram a variação destas propriedades com a idade e tempo de refino.

TABELA 11– PROPRIEDADES FÍSICAS DO PAPEL EM DIFERENTES IDADES

IDADE (anos)	REFINO (min)	DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)				VOLUME ESPECÍFICO APARENTE (cm ³ /g)			
		MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.
10	35	0,4126	0,4570	0,5119	0,0263	1,9548	2,1925	2,4243	0,1245
	50	0,4575	0,5131	0,5671	0,0366	1,7637	1,9586	2,1860	0,1423
	65	0,5558	0,5838	0,6464	0,0293	1,5474	1,7170	1,7993	0,0818
	70	0,5406	0,5658	0,6404	0,0382	1,5617	1,7741	1,8501	0,1102
	75	0,5433	0,5924	0,6507	0,0444	1,5369	1,6952	1,8410	0,1249
	80	0,5920	0,6216	0,6610	0,0257	1,5135	1,6113	1,6892	0,0654
	85	0,5921	0,6109	0,6298	0,0208	1,5882	1,6386	1,6891	0,0556
	90	0,5949	0,6336	0,6801	0,0265	1,4704	1,5811	1,6810	0,0653
100	0,6395	0,6534	0,6626	0,0123	1,5093	1,5312	1,5640	0,0289	
11	35	0,4217	0,4885	0,5348	0,0349	1,8702	2,0579	2,3723	0,1512
	50	0,4579	0,5495	0,5920	0,0404	1,6897	1,8303	2,1842	0,1437
	65	0,5273	0,6021	0,6532	0,0334	1,5312	1,6661	1,8970	0,0966
	70	0,5704	0,6435	0,7537	0,0602	1,4327	1,5805	1,7532	0,1151
	75	0,6294	0,6597	0,6838	0,0269	1,4626	1,5182	1,5897	0,0624
	80	0,5483	0,6434	0,6862	0,0385	1,4575	1,5602	1,8242	0,1024
	85	0,6214	0,6614	0,7015	0,0566	1,4256	1,5178	1,6100	0,1304
	90	0,6194	0,6512	0,6676	0,0276	1,4990	1,5389	1,6155	0,0663
100	0,6888	0,7133	0,7419	0,0268	1,3481	1,4050	1,4521	0,0526	
12	35	0,3933	0,4722	0,5542	0,0498	1,8045	2,1408	2,5479	0,2259
	50	0,4593	0,5313	0,6082	0,0509	1,6446	1,8988	2,1774	0,1852
	65	0,5455	0,5984	0,6636	0,0374	1,5071	1,6771	1,8337	0,1040
	70	0,5185	0,5879	0,6658	0,0652	1,5022	1,7186	1,9291	0,1896
	75	0,5590	0,6229	0,6706	0,0421	1,4913	1,6125	1,7902	0,1113
	80	0,5744	0,6492	0,7257	0,0434	1,3805	1,5470	1,7411	0,1034
	85	0,5947	0,6111	0,6226	0,0146	1,6067	1,6374	1,6816	0,0392
	90	0,5612	0,6158	0,6802	0,0480	1,4704	1,6319	1,7819	0,1252
100	0,6135	0,6400	0,6665	0,0375	1,5009	1,5656	1,6303	0,0915	
14	35	0,4045	0,4657	0,5302	0,0403	1,8862	2,1633	2,4722	0,1866
	50	0,4678	0,5261	0,6015	0,0388	1,6629	1,9114	2,1377	0,1404
	65	0,5328	0,5884	0,6322	0,0358	1,5820	1,7054	1,8772	0,1071
	70	0,5063	0,5582	0,6047	0,0374	1,6539	1,7991	1,9755	0,1228
	75	0,6323	0,6356	0,6389	0,0035	1,5653	1,5736	1,5821	0,0087
	80	0,5637	0,6212	0,6638	0,0517	1,5066	1,6175	1,7742	0,1395
	85	0,5854	0,6306	0,6656	0,0247	1,5024	1,5883	1,7083	0,0630
	90	0,5743	0,5900	0,6028	0,0118	1,6595	1,6957	1,7413	0,0341
100	0,6020	0,6513	0,7054	0,0375	1,4234	1,5408	1,6618	0,0869	
15	35	0,4065	0,4708	0,5322	0,0409	1,8794	2,1417	2,4673	0,1898
	50	0,4517	0,5259	0,5826	0,0409	1,7166	1,9144	2,2180	0,1546
	65	0,5325	0,5909	0,6410	0,0412	1,5602	1,6999	1,8786	0,1200
	70	0,5296	0,5853	0,6362	0,0356	1,5720	1,7145	1,8897	0,1056
	75	0,6284	0,6445	0,6675	0,0205	1,4981	1,5532	1,5928	0,0492
	80	0,5641	0,6339	0,7056	0,0418	1,4173	1,5841	1,7729	0,1052
	85	0,6028	0,6364	0,6717	0,0233	1,4902	1,5741	1,6604	0,0578
	90	0,5919	0,6333	0,6801	0,0444	1,4713	1,5851	1,6902	0,1097
100	0,6615	0,6947	0,7208	0,0246	1,3930	1,4424	1,5119	0,0501	
16	35	0,3877	0,4607	0,5498	0,0526	1,8191	2,1977	2,5796	0,2443
	50	0,4410	0,5231	0,6132	0,0558	1,6328	1,9326	2,2678	0,2063
	65	0,4961	0,5950	0,6688	0,0567	1,4954	1,6955	2,0159	0,1677
	70	0,5069	0,5471	0,5910	0,0311	1,6927	1,8331	1,9731	0,1034
	75	0,6467	0,6579	0,6691	0,0159	1,4948	1,5207	1,5467	0,0367
	80	0,5857	0,6314	0,6977	0,0406	1,4336	1,5897	1,7074	0,1009
	85	0,5557	0,6075	0,6781	0,0509	1,4751	1,6558	1,7995	0,1351
	90	0,5727	0,6203	0,6726	0,0359	1,4900	1,6178	1,7485	0,0936
100	0,6136	0,6264	0,6508	0,0211	1,5367	1,5980	1,6306	0,0531	
17	35	0,3889	0,4588	0,5406	0,0447	1,8504	2,2001	2,5720	0,2169
	50	0,4390	0,5185	0,5866	0,0512	1,7056	1,9475	2,2820	0,1939
	65	0,5328	0,5849	0,6354	0,0379	1,5741	1,7168	1,9092	0,1133
	70	0,4987	0,5577	0,6260	0,0470	1,6020	1,8047	2,0059	0,1466
	75	0,5799	0,6240	0,6797	0,0366	1,4715	1,6075	1,7247	0,0923
	80	0,5952	0,6254	0,6641	0,0255	1,5059	1,6017	1,6802	0,0646
	85	0,5691	0,6453	0,6911	0,0454	1,4472	1,5567	1,7573	0,1174
	90	0,5713	0,6109	0,6666	0,0497	1,5004	1,6442	1,7507	0,1293
100	0,6091	0,6139	0,6139	0,0034	1,6194	1,6243	1,6293	0,0070	

TABELA 12 – AUTO-RUPTURA E ÍNDICE DE TRAÇÃO EM DIFERENTES IDADES.

IDADE (anos)	REFINO (min)	COMPR. AUTO-RUPTURA (km)				ÍNDICE DE TRAÇÃO (N.m/g)			
		MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.
10	35	4,8214	5,8624	6,6473	0,5012	47,2818	57,4904	65,1873	4,9154
	50	5,4959	6,5686	7,8346	0,7112	53,8964	64,4159	76,8312	6,9746
	65	6,7816	7,3388	7,8530	0,3593	66,5046	71,9693	77,0116	3,5235
	70	6,9342	7,0977	7,2264	0,0993	68,0016	69,6048	70,8672	0,9736
	75	6,9075	7,2852	7,5976	0,3550	67,7394	71,4436	74,5067	3,4817
	80	7,0925	7,8431	8,2689	0,4516	69,5539	76,9148	81,0906	4,4288
	85	7,0825	7,6838	7,9514	0,4052	69,4551	75,3525	77,9762	3,9732
	90	7,1807	7,7354	8,0751	0,3026	70,4186	75,8582	79,1897	2,9670
100	7,7409	8,0657	8,5576	0,4332	75,9121	79,0972	83,9213	4,2487	
11	35	4,9844	6,1982	7,9031	0,8155	48,8799	60,7833	77,5025	7,9974
	50	5,0948	6,9702	8,2016	0,9021	49,9634	68,3541	80,4499	8,8470
	65	5,8141	7,4455	8,3762	0,7100	57,0172	73,0156	82,1424	6,9623
	70	6,0454	7,4435	8,4528	0,7582	59,2849	72,9959	82,8937	7,4352
	75	5,7609	7,2975	8,4715	1,1758	56,4949	71,5639	83,0775	11,5308
	80	6,9847	7,6730	8,3143	0,4368	68,4967	75,2462	81,5355	4,2838
	85	7,0574	7,7643	8,4711	0,9996	69,2094	76,1413	83,0732	9,8031
	90	7,4783	7,8871	8,5617	0,5885	73,3371	77,3462	83,9613	5,7717
100	7,3604	7,7179	8,3922	0,5843	72,1812	75,6871	82,2993	5,7298	
12	35	3,9639	5,8704	7,9973	1,0442	38,8725	57,5686	78,4264	10,2405
	50	4,6822	6,5395	8,1949	1,0117	45,9163	64,1173	80,3640	9,9219
	65	6,1711	7,2862	8,2296	0,7709	60,5175	71,4532	80,7051	7,5602
	70	5,5643	6,7117	8,0132	0,9406	54,5670	65,8194	78,5829	9,2238
	75	6,5346	7,5294	8,3684	0,6812	64,0827	73,8383	82,0665	6,6803
	80	6,1200	7,5037	9,1351	0,9533	60,0169	73,5865	89,5846	9,3484
	85	6,2564	7,2235	8,1257	0,9364	61,3540	70,8383	79,6863	9,1827
	90	5,7833	7,0620	8,7496	1,2587	56,7146	69,2544	85,8032	12,3435
100	6,4879	7,0036	7,5192	0,7293	63,6246	68,6815	73,7384	7,1515	
14	35	5,1253	6,7962	8,6721	0,9436	50,2617	66,6476	85,0447	9,2535
	50	6,7393	7,7292	9,5230	0,7726	66,0897	75,7976	93,3885	7,5762
	65	7,2445	8,5281	9,4036	0,8067	71,0448	83,6325	92,2182	7,9113
	70	6,8526	8,1618	9,4203	0,8063	67,2007	80,0397	92,3820	7,9068
	75	9,3865	9,5794	9,8006	0,1750	92,0498	93,9419	96,1108	1,7166
	80	7,6440	8,9342	10,1829	1,2699	74,9621	87,6150	99,8597	12,4538
	85	8,4927	8,9688	9,7853	0,4082	83,2847	87,9540	95,9608	4,0033
	90	7,6746	8,3573	9,0629	0,5674	75,2625	81,9574	88,8768	5,5646
100	8,0141	8,9750	9,7329	0,5709	78,5919	88,0143	95,4470	5,5986	
15	35	5,8208	7,0263	9,2589	0,8185	57,0825	68,9042	90,7990	8,0270
	50	6,1385	7,5893	8,8167	0,8351	60,1979	74,4251	86,4623	8,1900
	65	7,9973	8,8772	9,9804	0,7180	78,4264	87,0557	97,8744	7,0412
	70	7,1558	8,5748	9,4104	0,6527	70,1746	84,0903	92,2849	6,4003
	75	8,1838	8,8730	9,3335	0,6081	80,2554	87,0148	91,5304	5,9630
	80	7,8901	8,9666	10,8671	0,9608	77,3756	87,9319	106,5697	9,4222
	85	7,2931	8,5488	9,3832	0,7365	71,5209	83,8351	92,0177	7,2225
	90	8,2059	8,5209	8,9410	0,3787	80,4726	83,5611	87,6817	3,7137
100	8,5922	9,2486	9,8171	0,5689	84,2611	90,6979	96,2729	5,5793	
16	35	4,9845	6,9114	8,9248	1,3486	48,8812	67,7778	87,5222	13,2251
	50	6,2791	7,8528	10,4049	1,1830	61,5771	77,0095	102,0376	11,6009
	65	7,2073	8,8878	10,5943	1,2263	70,6794	87,1597	103,8941	12,0254
	70	7,2776	7,9339	9,0179	0,6115	71,3687	77,8047	88,4356	5,9973
	75	8,9925	9,6914	10,3903	0,9884	88,1866	95,0402	101,8938	9,6925
	80	7,9257	9,0698	10,1070	0,7816	77,7244	88,9442	99,1156	7,6650
	85	7,7922	8,5262	9,6634	0,7439	76,4155	83,6137	94,7652	7,2949
	90	7,2702	8,5744	10,2357	0,9502	71,2967	84,0864	100,3783	9,3187
100	8,2330	8,3905	8,4850	0,1373	80,7379	82,2827	83,2093	1,3467	
17	35	4,7158	7,1878	8,6003	1,1915	46,2465	70,4879	84,3399	11,6843
	50	5,6532	7,8218	9,2693	1,0501	55,4388	76,7059	90,9011	10,2977
	65	6,8125	8,5707	9,6486	0,9169	66,8077	84,0495	94,6201	8,9917
	70	7,6078	8,2683	9,0848	0,5240	74,6066	81,0842	89,0914	5,1389
	75	8,0519	8,8887	9,2485	0,4506	78,9617	87,1679	90,6972	4,4185
	80	7,6426	8,8239	9,5668	0,6439	74,9488	86,5333	93,8179	6,3142
	85	8,5128	9,2438	9,8902	0,5173	83,4819	90,6508	96,9893	5,0732
	90	8,7454	9,0943	9,7094	0,5343	85,7634	89,1842	95,2166	5,2399
100	8,4325	8,4967	8,5609	0,0908	83,9038	83,9288	83,9538	0,0354	

TABELA 13 – ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO E RASGO EM DIFERENTES IDADES.

IDADE (anos)	REFINO (min)	ÍNDICE ARREBENTAMENTO (kPa.m ² /g)				ÍNDICE DE RASGO (mN.m ² /g)			
		MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.	MÍN	MÉDIA	MÁX	DESV. PAD.
10	35	4,2895	5,0832	6,2435	0,4988	13,5340	17,1834	20,5334	1,7730
	50	4,7941	5,7330	6,9844	0,8201	13,1104	15,4720	17,2022	1,6122
	65	5,4165	6,0480	6,9072	0,5742	9,8335	13,2856	15,9544	1,8217
	70	5,3483	5,8247	6,0689	0,2658	10,0140	13,4453	14,9435	1,8099
	75	5,1074	6,0510	6,7096	0,6752	8,6856	12,6496	15,2630	2,8722
	80	5,7960	6,5350	7,3052	0,6658	11,0110	12,1700	13,2831	0,8502
	85	6,3137	6,4555	6,6033	0,1205	11,8868	12,8061	14,6678	1,2645
	90	5,9797	6,4112	6,9487	0,3527	11,3426	12,7904	13,8617	1,0758
100	6,4397	6,6490	6,8637	0,2120	10,2868	11,3247	13,0272	1,4861	
11	35	3,9152	5,2211	6,3399	0,7259	13,9655	16,1163	18,7751	1,4169
	50	4,2818	5,8173	6,6384	0,6725	13,0426	14,5362	16,5100	1,1323
	65	4,4203	6,1740	6,8642	0,7243	11,4391	13,5594	15,9525	1,5655
	70	4,5462	5,9679	6,6631	0,7703	10,8516	12,3190	14,3038	1,1543
	75	4,3432	5,7037	6,6361	1,0851	9,7665	10,7271	12,4498	1,1823
	80	5,8003	6,4898	7,0643	0,4534	11,0180	12,4670	14,9788	1,5251
	85	5,7748	6,1606	6,5464	0,5456	11,2363	11,3274	11,4185	0,1289
	90	5,6653	6,3024	6,9312	0,6330	10,1492	11,8553	13,1546	1,5435
100	5,9057	6,3263	6,6760	0,3900	10,7995	11,1918	11,9548	0,6608	
12	35	2,8899	4,6336	5,7471	0,7722	13,9908	16,4436	17,9728	1,2962
	50	3,9043	5,0822	6,3410	0,8196	12,9643	15,0105	17,0449	1,4592
	65	4,3242	5,6269	6,8900	0,8679	11,7075	13,3899	14,8714	1,1034
	70	4,5906	5,3206	6,1675	0,6866	11,5803	13,5218	15,7657	1,5623
	75	4,5381	5,6686	6,3871	0,5973	11,3846	12,6881	14,8339	1,1372
	80	4,6329	5,8251	6,6758	0,7892	10,3396	11,8964	14,0911	1,2251
	85	5,1236	5,4263	5,9008	0,4161	11,4744	12,5996	13,9734	1,2679
	90	4,8316	5,5370	6,4882	0,6748	10,9096	13,0835	14,5842	1,3436
100	4,9872	5,3680	5,7488	0,5385	10,5528	10,6825	10,8121	0,1834	
14	35	3,5803	4,7742	5,9371	0,6678	14,8300	18,2510	20,7759	1,6371
	50	4,3951	5,4111	6,7501	0,6205	14,1598	16,5135	19,0664	1,5325
	65	4,7369	6,0535	6,9763	0,7369	12,7151	14,7727	17,0449	1,7450
	70	4,8747	5,7974	6,7087	0,6324	13,3705	15,3474	17,7361	1,1814
	75	6,2350	6,7078	7,3981	0,4920	12,5577	13,4217	13,9908	0,6112
	80	5,3248	6,2787	6,9499	0,8487	12,3446	14,6184	16,4245	2,0798
	85	5,6969	6,3915	6,8817	0,3589	11,6227	13,2878	14,5425	1,0902
	90	5,2138	5,7752	6,1413	0,4254	13,6830	14,4207	15,4544	0,7916
100	5,8260	6,1689	6,4187	0,2223	12,0389	12,7585	14,2984	0,8242	
15	35	4,1514	4,9373	6,2285	0,5921	14,1740	16,8033	20,1264	2,0991
	50	4,5798	5,4498	6,4488	0,6208	12,6247	14,8017	18,7912	1,8026
	65	5,1148	5,7730	6,3799	0,4988	11,8061	13,0773	15,9983	1,4605
	70	5,0449	6,0213	6,5829	0,5160	12,0899	13,6854	16,3052	1,2053
	75	5,2610	5,9871	6,3607	0,6289	11,4617	11,6064	11,7349	0,1373
	80	5,1276	6,0506	7,0301	0,6861	10,5494	11,6730	13,5177	1,0158
	85	5,2260	6,1093	6,8986	0,7003	11,7094	12,3210	12,9125	0,4697
	90	5,7551	6,0630	6,2395	0,2676	11,0452	11,9953	12,5983	0,8327
100	6,1397	6,4400	6,9155	0,3522	10,2889	11,0731	11,5807	0,5604	
16	35	3,5306	4,7203	6,4764	0,9890	12,6599	17,3072	21,2537	2,4033
	50	3,8815	5,4412	7,1305	0,9303	11,2809	15,5162	19,0424	2,3546
	65	4,6774	6,0951	7,4108	0,9107	10,2053	13,8489	16,9464	2,2242
	70	4,7713	5,3421	6,0789	0,4468	12,6868	14,7117	16,4341	1,7711
	75	6,1539	6,5345	6,9152	0,5383	10,0655	11,8138	13,5621	2,4725
	80	5,2305	6,2080	7,3151	0,8306	9,4978	12,7030	15,1826	1,8467
	85	5,3147	5,7894	6,2497	0,3747	10,8882	13,0448	14,7364	1,7965
	90	4,8543	6,0181	7,3103	0,8025	11,3863	13,3053	14,8100	1,4103
100	5,3713	5,6057	5,7676	0,2079	11,7240	13,3250	14,2252	1,3901	
17	35	3,2588	4,8070	6,2994	0,8486	13,7208	17,1534	22,7629	2,4604
	50	4,0336	5,3000	6,4480	0,7876	12,1051	15,1277	19,9960	2,1590
	65	4,4887	5,7549	6,5647	0,6863	11,5529	13,3135	16,0271	1,4272
	70	4,8057	5,5352	6,1873	0,5320	11,5934	14,6968	19,1058	2,4714
	75	4,6168	5,8192	6,6576	0,6779	10,4077	11,6776	13,4851	1,2584
	80	4,9305	5,8967	6,6955	0,5761	11,0757	12,3355	13,4812	0,9359
	85	5,2683	6,1535	6,5823	0,5240	9,8950	11,3573	13,0294	1,4639
	90	5,8696	6,2399	6,6134	0,6719	12,7205	14,0136	14,9435	1,1552
100	5,2334	5,2646	5,2958	0,0441	12,3800	12,4200	12,4600	0,0565	

FIGURA 19 – DENSIDADE APARENTE DO PAPEL EM RELAÇÃO À IDADE E TEMPO DE REFINO.

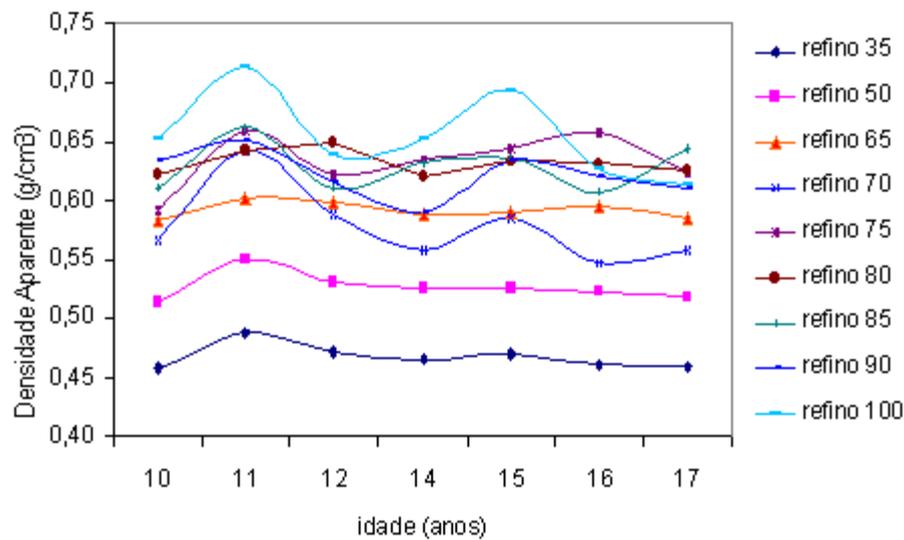
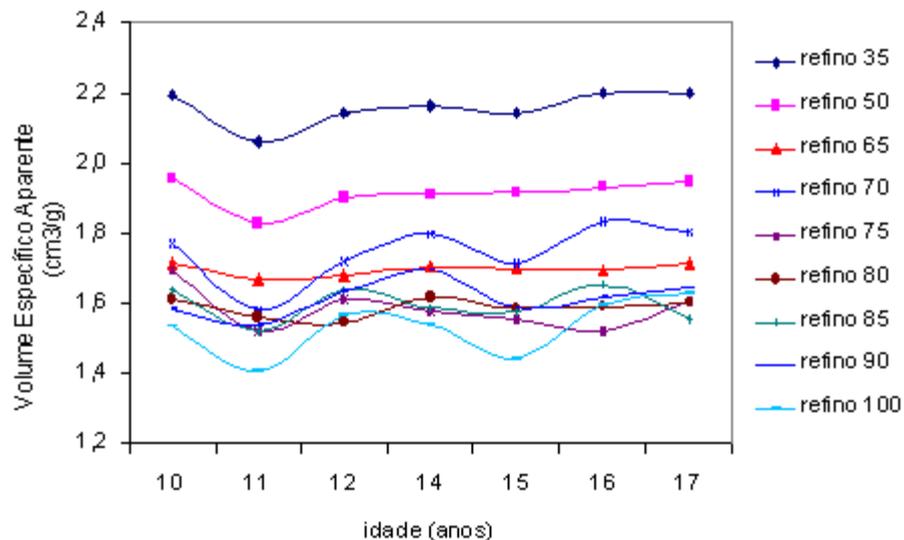


FIGURA 20 – VOLUME ESPECÍFICO DO PAPEL EM RELAÇÃO À IDADE E TEMPO DE REFINO.



Pelos dados obtidos neste estudo verificou-se um aumento na densidade aparente do papel com o aumento no tempo de refinação, ocorrendo o inverso com o volume específico aparente, que diminuiu com o aumento no refino, como esperado em virtude do aumento da capacidade de retenção de água. Em relação às idades analisadas, a diferença só foi significativa a 5% de probabilidade (anexo 4.12), ocorrendo uma pequena variação ($\cong 1\%$) entre a densidade aparente e volume específico aparente, mas não de maneira linear, o que

pode ser resultado da variação na gramatura e espessura das folhas, mas também da variação nas dimensões e índices indicativos da qualidade da polpa.

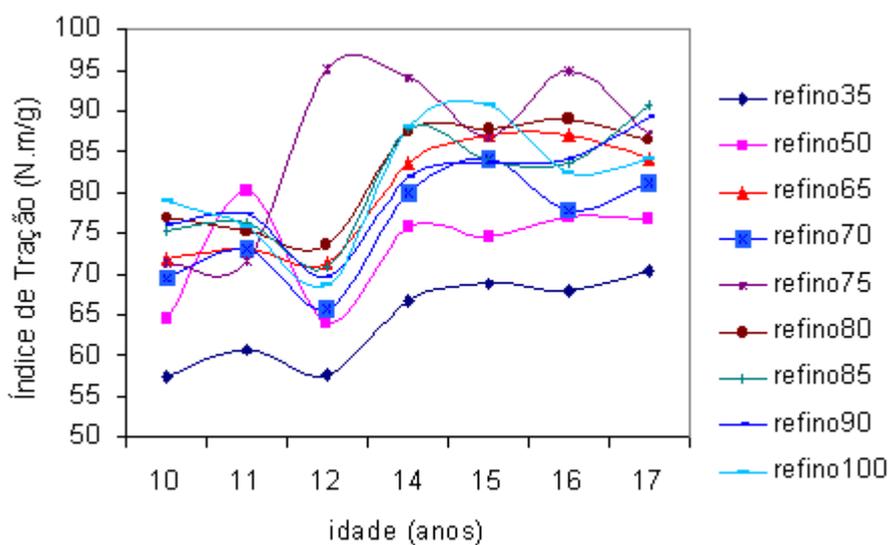
A maior densidade aparente é obtida pela maior flexibilidade das fibras, o que ocorre paralelamente ao aumento de sua capacidade de retenção de água. A densidade aparente do papel aumenta com o tempo de refinação, em função do desfibrilamento das paredes celulares, o que permite uma melhor acomodação das fibras no papel, permitindo uma melhor compactação destas nas folhas, proporcionando uma maior densidade aparente quando se utiliza um maior tempo de refino. O volume específico traduz o grau de ligação entre as fibras e também a presença de materiais não fibrosos, que preenchem os espaços vazios.

Outros estudos também demonstraram o aumento da densidade aparente com o tempo de refino. Klock (2000, p.249) obteve valores variando de 0,387 a 0,663g/cm³ para *Pinus taeda* com 11 anos e Hasegawa (2003, p. 73) estudando papel produzido a partir de *Pinus taeda* com 25 anos de idade, obteve uma densidade aparente entre 1,267 e 1,374g/cm³.

5.5.3 Resistência à tração

O maior comprimento médio de auto-ruptura (CAR) obtido neste estudo foi de 9,69km, para a idade de 16 anos e um tempo de refino de 75 minutos. O menor comprimento, 5,86km, foi verificado aos 10 anos com 35 minutos de refinação. O maior Índice de Tração médio obtido neste estudo foi de 95,04N.m/g aos 16 anos com um refino de 75min. O menor, 57,49N.m/g, foi verificado aos 10 anos com 35min de refino. De uma maneira geral o Índice de Tração aumenta com o aumento no tempo de refino e idade (anexo 4.14), variando de maneira um pouco irregular entre as idades (Figura 21). As irregularidades são explicadas pelas características morfológicas das fibras e variações no processo de produção.

FIGURA 21 – ÍNDICE DE TRAÇÃO EM FUNÇÃO DA IDADE E TEMPO DE REFINO.



Klock (2000, p.249) observou um Comprimento de Auto-Ruptura (CAR) variando de 3,63 a 6,47km com uma relação direta com o tempo de refino. Também verificou a tendência citada por outros autores de que esta propriedade tem relação negativa com a densidade da madeira, espessura média da parede celular e Índice de Runkel, e relação positiva com o Coeficiente de Flexibilidade, propriedades provenientes da flexibilidade da fibra e a interligação entre elas na folha de papel.

As relações entre o Índice de Tração e características morfológicas das fibras, densidade da madeira e os índices indicativos da qualidade da polpa (Coeficiente de Flexibilidade, Fração Parede, Índice de Enfeltramento, Índice de Runkel) não se apresentaram de forma uniforme, ou seja, foram parte positiva e parte negativamente relacionadas com estes fatores, o que pode ser justificado pelas proximidades nos valores de comparação e por estes valores não apresentarem tendência de crescimento ou decréscimo com a idade. Também fica claro que não podem ser avaliadas as dimensões da fibra ou outras características de maneira individual, uma vez que é o conjunto que atua nas propriedades do papel, também sendo influenciados por fatores externos (ambientais e de processo).

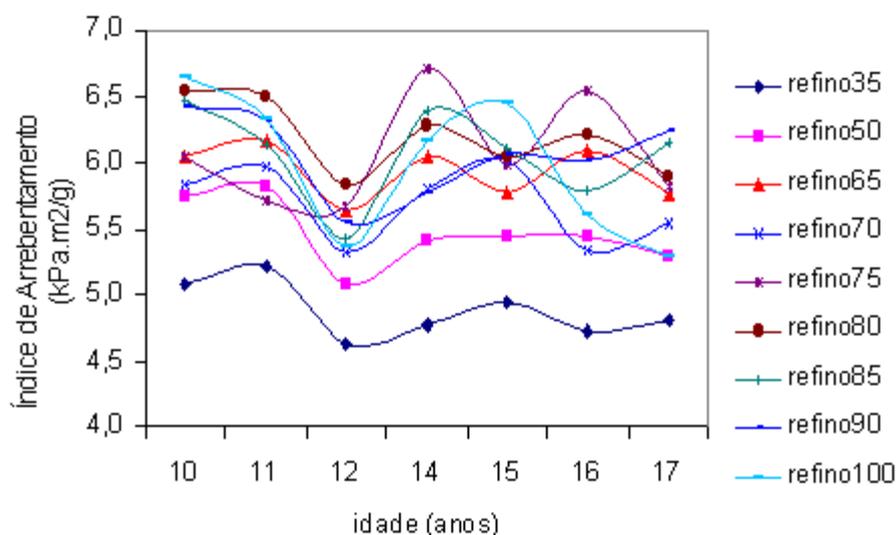
A resistência à tração é controlada por fatores como a resistência individual e comprimento médio das fibras, formação e estruturação da folha. Dependendo do processo de manufatura, as fibras podem sofrer degradação e enfraquecimento, dando origem a papéis fracos. O esticamento é influenciado de maneira positiva pelo comprimento dos traqueóides, pelo Coeficiente de Flexibilidade e pela densidade aparente do papel. Além disso, essa propriedade depende do procedimento utilizado para a formação do papel, pois no processo de secagem ocorre a contração das folhas (Foelkel, 1976, p.64). Os valores do Índice de Tração podem ser modificados com a refinação, onde o emprego de maiores energias de refinação leva a um aumento de resistência, pois aumenta o número de ligações entre as fibras. Bittencourt (2004, p.44) obteve uma relação negativa entre a resistência à tração e a idade.

Kumar *et al.* (2004, p.54) observaram um Índice de Tração variando de 48,7 a 90,6N.m/g, em uma relação direta com o tempo de refino, ou seja, o índice aumentou com o aumento no tempo de refino, em árvores de pequeno diâmetro e topo de *Pinus contorta*. Foelkel *et al.* (1975, p.85) trabalhando com *Pinus oocarpa* verificaram que a resistência à tração aumentou com a idade.

5.5.4 Resistência ao arrebentamento

O maior Índice de Arrebentamento médio observado neste estudo foi de 6,71kPa.m²/g, obtido aos 14 anos com um tempo de refino de 75min. O menor valor médio foi de 4,63kPa.m²/g, verificado aos 12 anos e um refino de 50min. De uma forma geral o Índice de Arrebentamento aumentou com o aumento no tempo de refino e teve a tendência de decréscimo com o aumento da idade (Figura 22). A regressão e análise de variância encontram-se no anexo 4.15.

FIGURA 22 – ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO EM FUNÇÃO DA IDADE E TEMPO DE REFINO.



Observou-se uma relação negativa do Índice de Arrebatamento com a densidade da madeira. As relações com as características morfológicas das fibras, Coeficiente de Flexibilidade, Fração Parede, Índice de Enfeltramento, Índice de Runkel se apresentaram bastante irregulares, o que pode ser justificado pelas proximidades nos valores de comparação e por estes valores não serem totalmente crescentes ou decrescentes com a idade. Também fica claro que não podem ser avaliadas as dimensões da fibra ou outras características de maneira individual, uma vez que é o conjunto que atua nas propriedades do papel, também sendo influenciados por fatores externos (ambientais e de processo).

Pelos dados obtidos neste trabalho, não ficam confirmadas as relações encontradas por outros autores, que também são controversas. Wright e Sluis-Crémer (1992, p.184) concluíram que os maiores valores de resistência ao estouro são obtidos com papéis produzidos com traqueóides de paredes delgadas. Os resultados de Hasegawa (2003, p.74) não mostraram essa tendência, indicando a influência de outros fatores nas propriedades do papel (a menor espessura resultou em menor resistência ao estouro). Segundo Watson e Dadswell (1961, p.171), Dinwoodie (1965, p.440), e Foelkel (1976, p.64) a resistência ao arrebatamento apresenta correlação negativa com a densidade básica, porcentagem de lenho

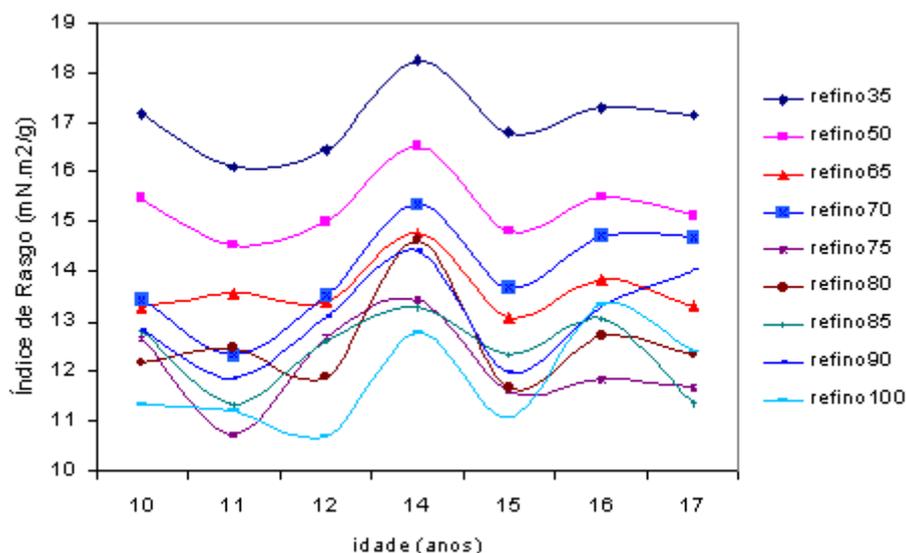
tardio e espessura da parede celular. Há correlação positiva entre a resistência ao arrebentamento e comprimento da fibra e coeficiente de flexibilidade. Klock (2000, p.249) também observou a relação inversa entre o Índice de Runkel e o Índice médio de Arrebentamento, e a relação positiva entre o Coeficiente de Flexibilidade e o Índice de Arrebentamento.

Bittencourt (2004, p.44) obteve um decréscimo no Índice de Arrebentamento com o aumento da idade, mostrando a influência positiva do aumento da quantidade de madeira juvenil, proporcionando um maior número de ligações interfibras. Klock (2000, p.249) obteve um Índice de Arrebentamento variando de 2,13 a 4,20kPa.m²/g, valores incrementados com os tratamentos de refino em função do desfibrilamento das paredes celulares que ocorrem no processo, provocando maior hidratação e melhor conformação das fibras nas folhas de papel formadas, o que ocorre até certo grau de refino.

5.5.5 Resistência ao rasgo

O maior valor médio para o Índice de Rasgo, 18,25mN.m²/g, foi observado aos 14 anos, com 50 min de refino e o menor, 10,68mN.m²/g ocorreu na mesma idade, mas com um tempo menor de refino, 35 minutos. O Índice de Rasgo diminuiu com o aumento no tempo de refino, e apresentou variação entre as idades (Figura 23). Apresentou relação direta com a densidade básica da madeira, comprimento de fibra, Fração Parede e Índice de Enfeltramento, sendo que as irregularidades são justificadas pelas alterações no processo produtivo, o que leva à conclusão que as variáveis do processo tem maior influência no produto final do que as características da madeira estudada. Verificou-se também uma relação inversa com o Coeficiente de Flexibilidade. Não ficou evidenciada uma relação com a espessura da parede, diâmetro do lume e da fibra e o Índice de Runkel, sendo contrário a alguns estudos.

FIGURA 23 – ÍNDICE DE RASGO EM FUNÇÃO DA IDADE E TEMPO DE REFINO.



A resistência ao rasgo é afetada pelo comprimento das fibras e ligação entre elas. Wright e Sluis-Crémer (1992, p.184) observaram que os valores maiores de resistência ao rasgo foram obtidos em papéis feitos com traqueóides de paredes espessas, o que se deve à resistência destes às operações de refino. O diâmetro do lume apresenta correlação negativa com a resistência ao rasgo (Foelkel 1976, p.64; Wright e Sluis-Crémer 1992, p.184). Bittencourt (2004, p.44) obteve resultados para o índice de rasgo crescentes com a idade, o que ocorreu pela influência da quantidade de fibras de paredes espessas na composição dos papéis. Klock (2000, p.249) obteve um Índice de Rasgo médio variando de 12,31 a 23,96mN.m²/g apresentando uma relação inversa com o tempo de refino, ou seja, o índice diminuiu com o aumento no tempo de refino. Observou correlação positiva do Índice de Runkel e Fração Parede com o Índice de Rasgo.

Kumar *et al.* (2004, p.54) observaram um Índice de Rasgo em uma relação inversa com o tempo de refino, ou seja, o índice diminuiu com o aumento no tempo de refino, em árvores de pequeno diâmetro e topo de *Pinus contorta*. Wright *et al.* (1996, p.79), estudando *Pinus patula*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi* e *P. chiapensis* com 8 anos de idade, plantadas na

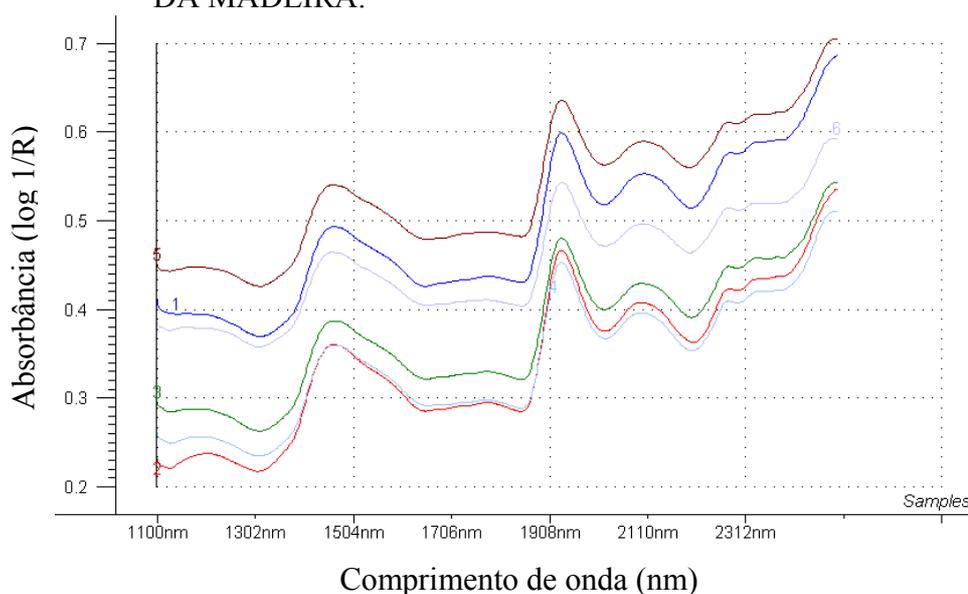
Colômbia, observaram que o aumento da idade deve incrementar também as propriedades de rasgo em razão da diferenciação dos traqueóides e do aumento da produção de madeira adulta.

5.6 Espectroscopia no infravermelho próximo

Os espectros de infravermelho próximo foram obtidos diretamente dos cubos de madeira com dimensões de 2x2x2cm, sendo então relacionados com a densidade da madeira, as características morfológicas dos traqueóides (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede), os índices indicativos da qualidade da polpa celulósica (Coeficiente de Flexibilidade, Fração Parede, Índice de Enfeltramento e Índice de Rünkel) e o índices de resistência do papel (Índice de Tração, Rasgo e Arrebetamento). Os histogramas de distribuição das variáveis analisadas encontram-se no anexo 5.

A Figura 24 é apenas ilustrativa e mostra as curvas obtidas a cada 2nm, entre os comprimentos de onda de 1100 e 2500nm, onde cada curva representa a resposta obtida para uma dada amostra. Na obtenção dos resultados, cada curva foi analisada em toda sua extensão, buscando correlação com as variáveis estudadas pelos métodos tradicionais.

FIGURA 24 – ASPECTO GERAL DOS ESPECTROS DE INFRAVERMELHO OBTIDOS DA MADEIRA.



Foram feitas análises multivariadas de regressão utilizando a técnica dos quadrados mínimos parciais (PLS) com todos os comprimentos de onda existentes, sendo utilizados os dados originais, a primeira e segunda derivada, e também a correção ortogonal do sinal. Os melhores resultados de calibração foram obtidos com os dados originais (sem transformação), os quais serão apresentados na seqüência.

Nas figuras apresentadas para cada variável são mostrados o número de amostras efetivamente utilizados, com a eliminação dos *outliers*, ou seja, aquelas amostras que apresentaram algum problema como irregularidade de superfície e/ou deslocamento; o coeficiente de correlação (que varia de -1 a 1) e o erro numérico em cada etapa, ou seja, na unidade medida ou calculada em laboratório.

5.6.1 Densidade básica da madeira

Foram utilizadas 100 amostras para a calibração e validação de um modelo para a densidade básica da madeira e outras 30 amostras para a validação externa, envolvendo a variação base-altura das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Os espectros, medidos a cada 2nm, foram agrupados de 10 em 10 pontos, compondo, portanto, um valor médio a cada 20nm.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com nove fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,87 na calibração (Figura 25) e 0,78 na validação (Figura 26). Aplicando o modelo para a validação em amostras externas a correlação foi baixa, 0,43 (Figura 27), o que pode ser justificado pela utilização de madeira juvenil, tanto na calibração quanto na validação, uma vez que a variação nos dados é pequena e irregular entre as árvores, não assumindo um padrão crescente proporcionalmente com a altura da árvore. A umidade do material também é outra característica que pode ter tido influência, uma vez que as amostras foram secas ao ar, mas sem controle final do teor de umidade. Além disso, em algumas

amostras ocorria a mancha azul (defeito causado por um fungo manchador), um tipo de erro que pode aumentar a variação na resposta dos espectros.

A precisão e exatidão da técnica do infravermelho próximo na medição de determinada característica são tão boas quanto a variação dos dados existentes nas amostras que representam o modelo. Uma distribuição de dados grande, ampla e uniforme é recomendada durante o estágio de calibração. Isso pôde ser comprovado quando foi analisada apenas a densidade média das árvores com a média dos espectros, num total de 23 amostras (20 + 3), onde a calibração forneceu um R de 0,92 e a validação de 0,81, e na predição alcançou-se uma correlação de 0,99.

FIGURA 25 – CALIBRAÇÃO PARA A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

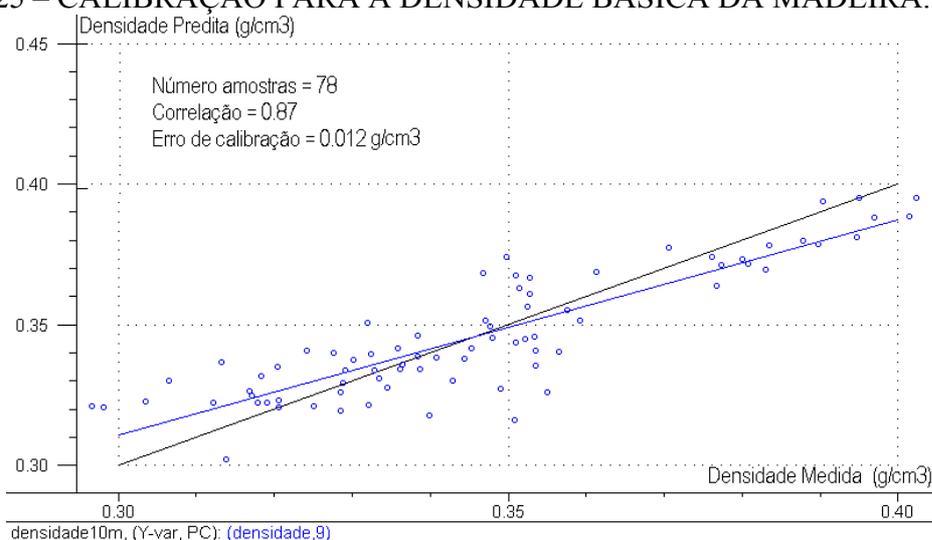


FIGURA 26 – VALIDAÇÃO PARA A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.

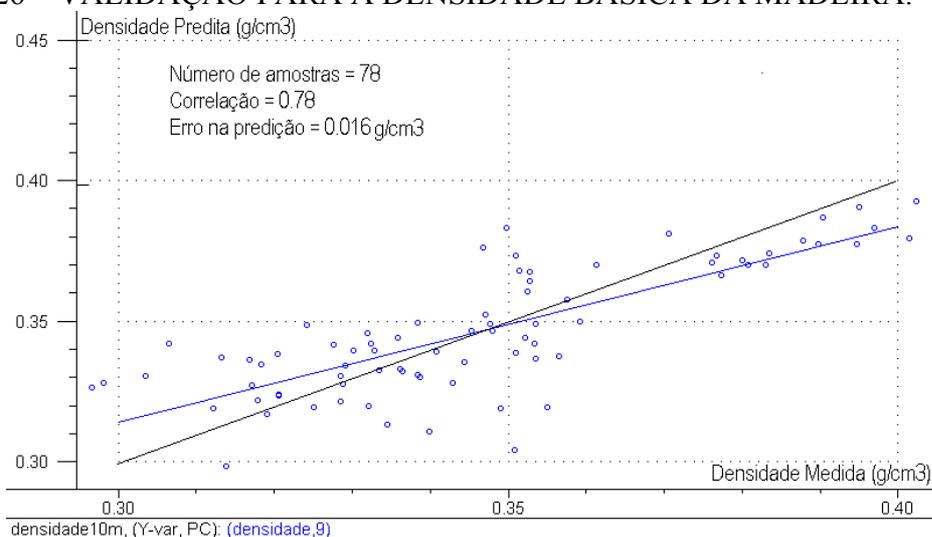
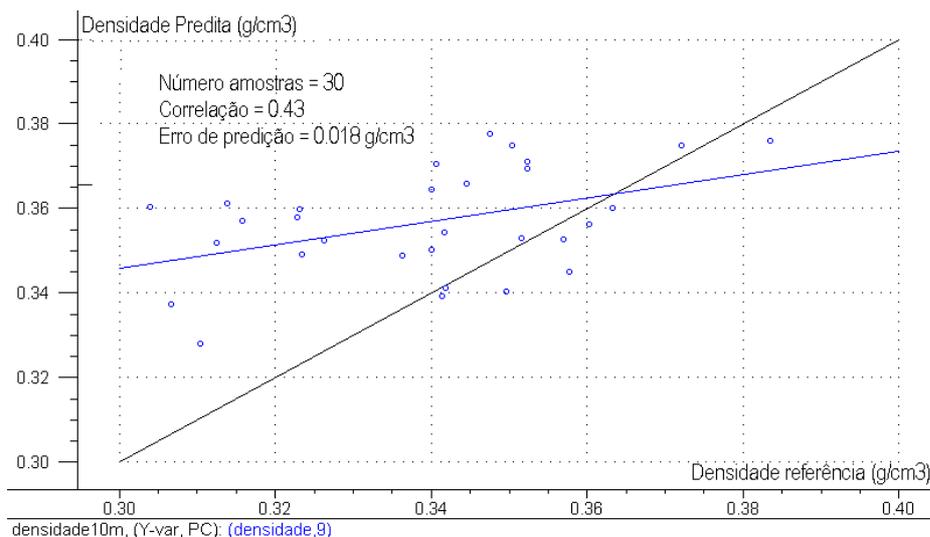
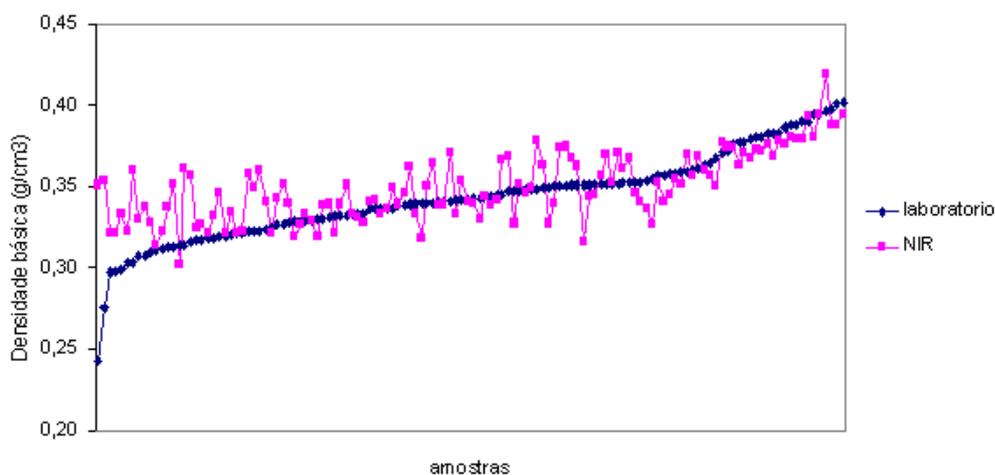


FIGURA 27 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.



Utilizando-se outra forma de representação dos dados calculados através de medidas efetuadas em laboratório e dos obtidos através dos espectros de infravermelho próximo observa-se que os dados fornecidos pelo NIR apresentam uma variação maior do que os do laboratório, mas seguem a mesma tendência (Figura 28), indicando que esta técnica pode ser utilizada para a predição da densidade da madeira, de forma rápida e eficiente.

FIGURA 28 – DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.



Schimleck *et al.* (2001, p.1671) em trabalho com *Eucalyptus delegatensis* obtiveram um coeficiente de determinação de 0,9 para a densidade, utilizando PLS da segunda derivada dos espectros. Já para *Eucalyptus globulus*, Schimleck *et al.* (1999, p.201) haviam concluído que a técnica não era adequada para uma estimativa precisa em rolos de incremento desta espécie, uma vez que o erro era muito grande. Hoffmeyer e Pedersen (1995, p.167)

encontraram uma correlação de 0,76 a 0,94 na calibração de modelos para a densidade de *Picea abies*.

5.6.2 Comprimento dos traqueóides axiais

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para o comprimento de fibra e outras 194 para a validação externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com nove fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,73 na calibração (Figura 29) e 0,63 na validação (Figura 30). Aplicando o modelo para a validação externa dos dados nas outras amostras a correlação foi boa, 0,65 (Figura 31).

FIGURA 29 – CALIBRAÇÃO PARA O COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES.

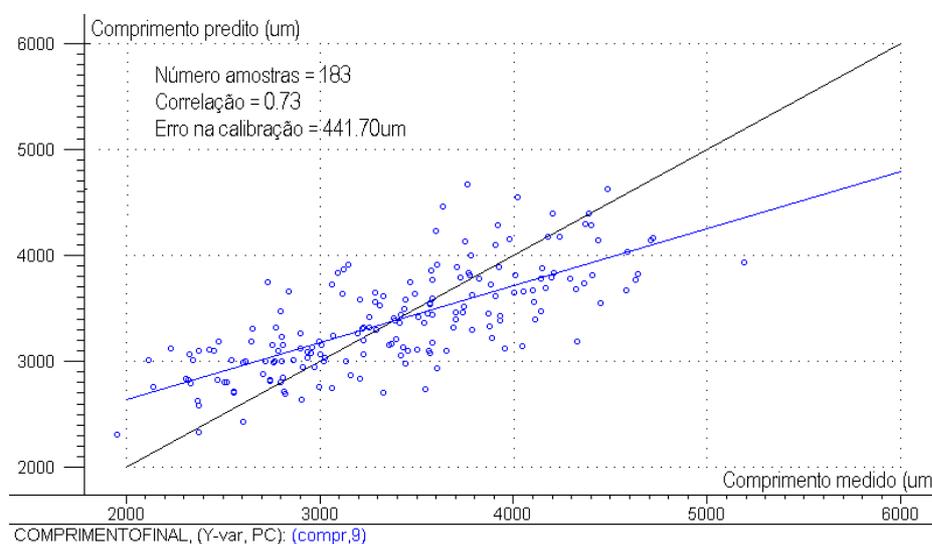


FIGURA 30 – VALIDAÇÃO PARA O COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES.

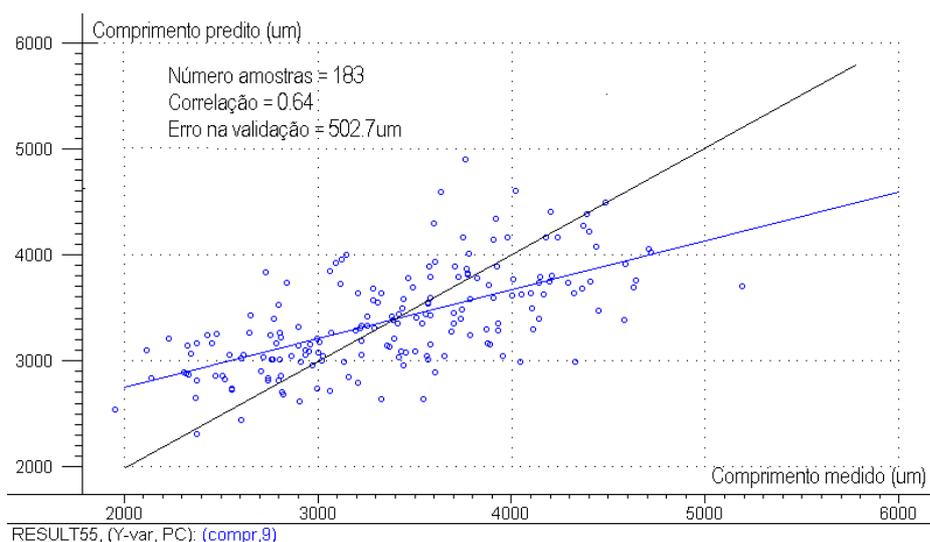
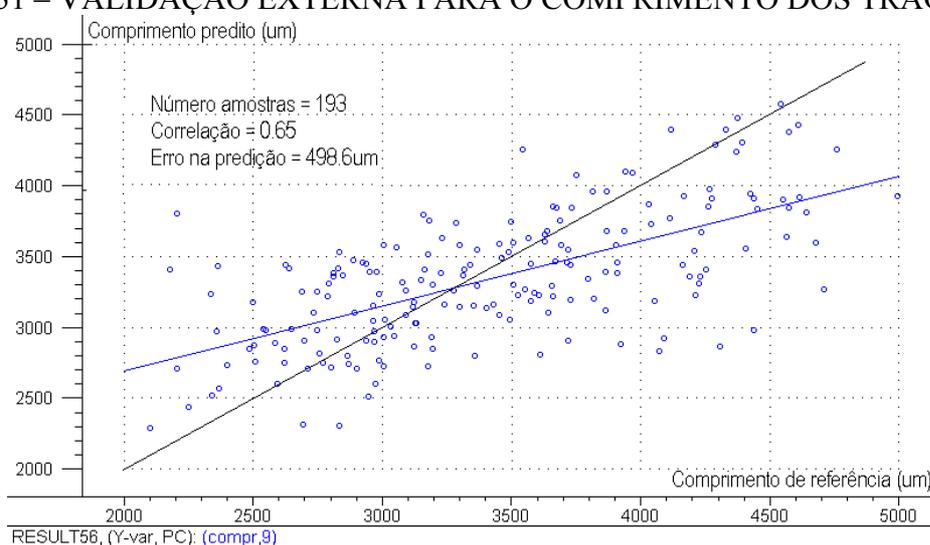
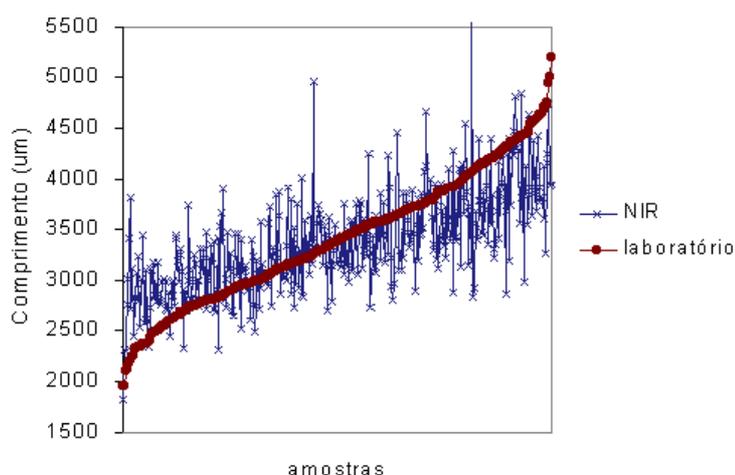


FIGURA 31 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES.



Observando-se de outra forma o comprimento dos traqueóides obtido através de medições pelas técnicas de laboratório e os provindos dos espectros de infravermelho próximo (Figura 32), nota-se que as curvas apresentam a mesma tendência, sendo que a irregularidade ou instabilidade na curva do NIR provém da alta sensibilidade do equipamento em relação à umidade do material e regularidade da superfície, indicando que esta propriedade pode ser prevista, de forma rápida, pela técnica de espectroscopia no infravermelho próximo utilizando madeira maciça.

FIGURA 32 – COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES AXIAIS.



Medidas de espectroscopia foram capazes de responder por 70 a 77% da variação no comprimento dos traqueóides em árvores de 48 anos de *Picea abies* (Hauksson *et al.* 2001, p.481). Via (2004, p.52) obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,72 para a calibração do modelo e 0,65 para a validação estudando *Pinus palustris* com 41 anos de idade.

A detecção do comprimento das fibras com o infravermelho próximo deve ter uma relação indireta com o sinal do NIR, principalmente porque a capacidade de absorção a um dado comprimento de onda depende das ligações entre as moléculas e elementos químicos, e não de uma característica macro como o comprimento da fibra. As mudanças que ocorrem no comprimento e composição química com a idade são uma possível conexão entre o comprimento dos traqueóides e os espectros de infravermelho. Normalmente, quando o câmbio amadurece, a concentração de celulose e o comprimento das fibras crescem, enquanto a quantidade de lignina decresce (Bendtsen e Senft 1986). Tal covariância entre características com a idade pode resultar em uma correlação secundária entre o sinal do NIR e o comprimento dos traqueóides.

De uma maneira geral, observando-se as curvas obtidas do infravermelho, verificou-se que as árvores mais velhas (17 anos) correspondiam às curvas mais baixas, ou seja, onde a absorvância do infravermelho era menor. Os dados medidos em laboratório, referentes ao comprimento dos traqueóides, mostraram claramente a variação medula-casca, sendo maiores

próximos à casca. Essa variação também foi evidenciada pela posição das curvas, sendo que as amostras próximas à casca correspondiam às curvas mais baixas, exceto quando a amostra apresentava algum defeito como lenho de reação ou havia se movimentado no momento da varredura.

5.6.3 Largura e diâmetro do lume dos traqueóides axiais

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para a largura e diâmetro do lume dos traqueóides e outras 194 para a validação externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com cinco e seis fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se, para a largura do traqueóide e diâmetro do lume, respectivamente, uma correlação de 0,13 e 0,21 na calibração (Figura 33 e 34), e 0,05 e 0,16 na validação. Aplicando o modelo para a validação externa, em outras amostras não houve uma boa correlação (R^2 de 0,08 e 0,10).

FIGURA 33 – CALIBRAÇÃO PARA A LARGURA DO TRAQUEÓIDE.

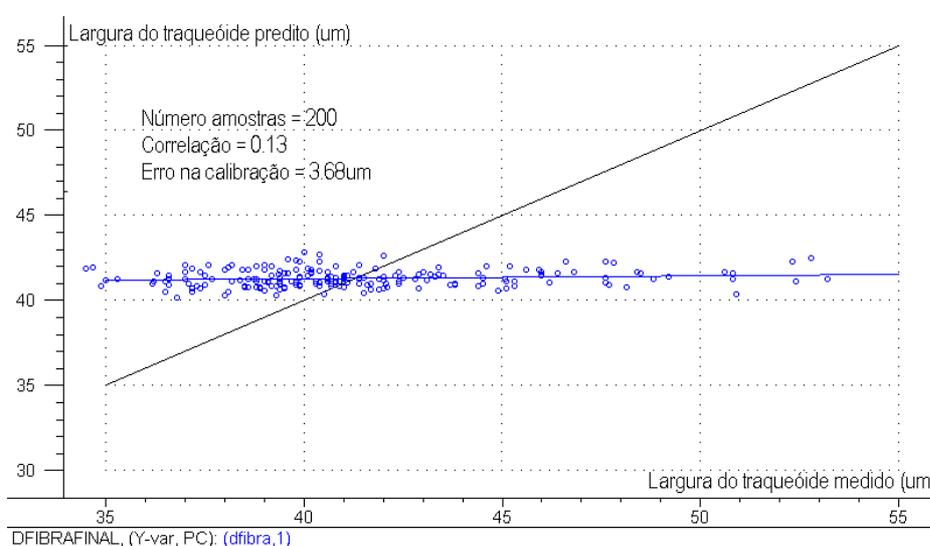
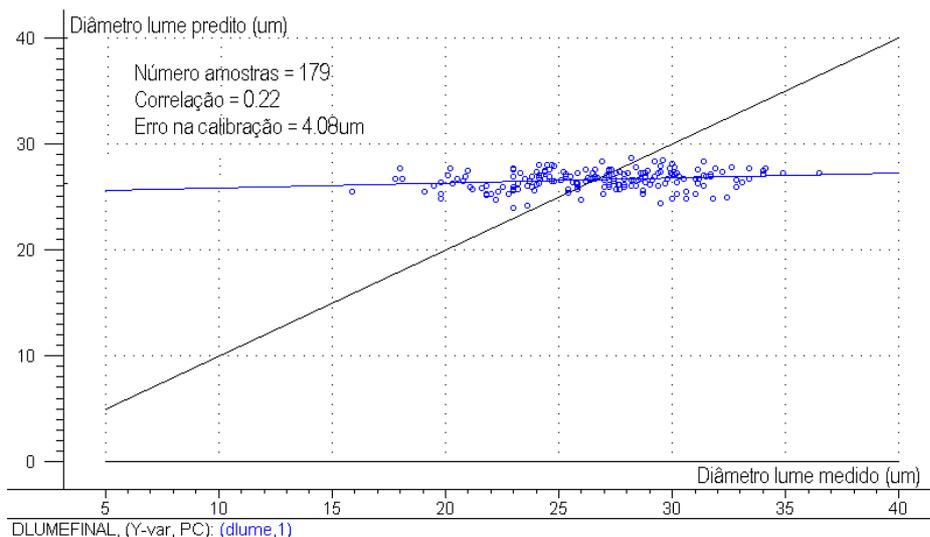


FIGURA 34 – CALIBRAÇÃO PARA O DIÂMETRO DO LUME DOS TRAQUEÓIDES.



A baixa correlação na calibração e predição dos dados deste trabalho é justificada uma vez que não existe uma tendência de aumento ou diminuição em relação à posição na árvore, seja a variação medula-casca ou base-altura. Também a variação entre as idades analisadas é numericamente muito pequena, não sendo adequada para a utilização do infravermelho. Outro importante fator de influência foi o sentido em que foram coletados os espectros, ou seja, a face longitudinal radial, se fosse utilizada a face transversal, essas características deveriam ser melhor representadas.

Outros autores também não obtiveram bons modelos para estas características. Schimleck e Evans (2004, p.68) observaram um R^2 entre 0,65 e 0,69 na calibração dos dados de *Pinus radiata*, mas na predição o modelo mostrou-se fraco.

5.6.4 Espessura da parede dos traqueóides

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para a espessura da parede dos traqueóides e outras 194 para a validação externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com cinco fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,58 na calibração (Figura 35) e 0,51 na validação (Figura 36). Aplicando o modelo para a predição dos dados em amostras externas a correlação foi baixa, 0,36 (Figura 37).

Os dados obtidos em laboratório indicaram uma mínima diferença existente entre as idades analisadas e a ausência de padrões em relação à posição na árvore (medula-casca e base-altura), ou seja, não apresentava tendência constante de acréscimo ou decréscimo em um sentido, antes de estabilizar. Isso justifica a baixa resposta dos espectros de infravermelho em relação à espessura da parede das amostras analisadas.

FIGURA 35 – CALIBRAÇÃO PARA A ESPESSURA DA PAREDE.

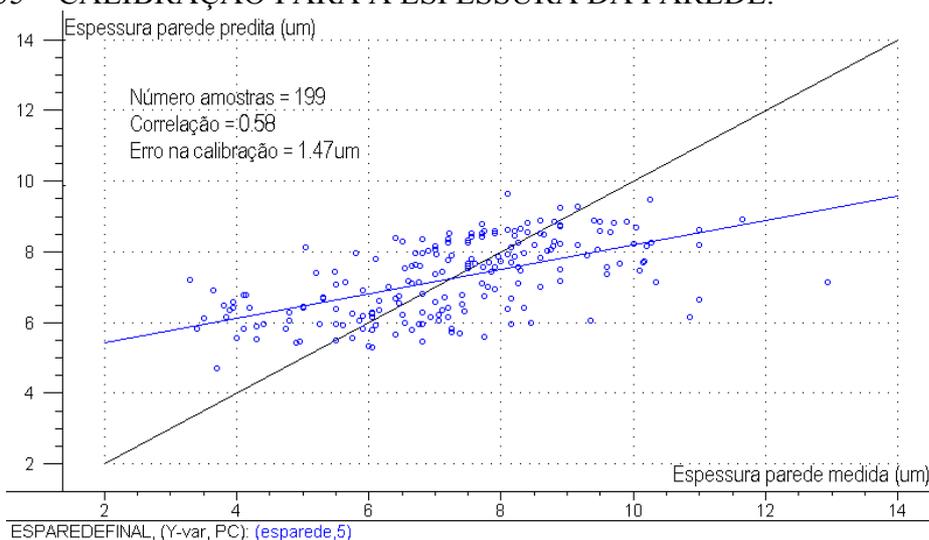


FIGURA 36 – VALIDAÇÃO PARA A ESPESSURA DA PAREDE.

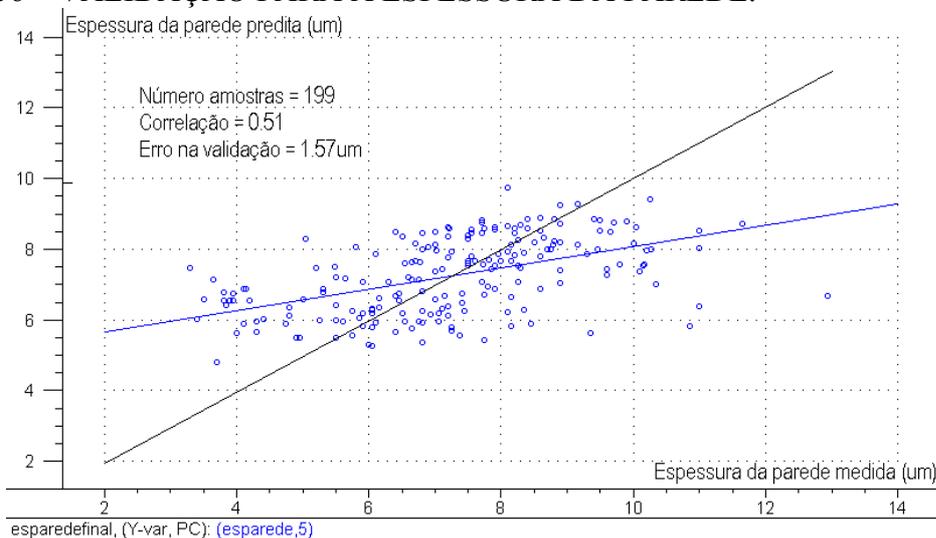
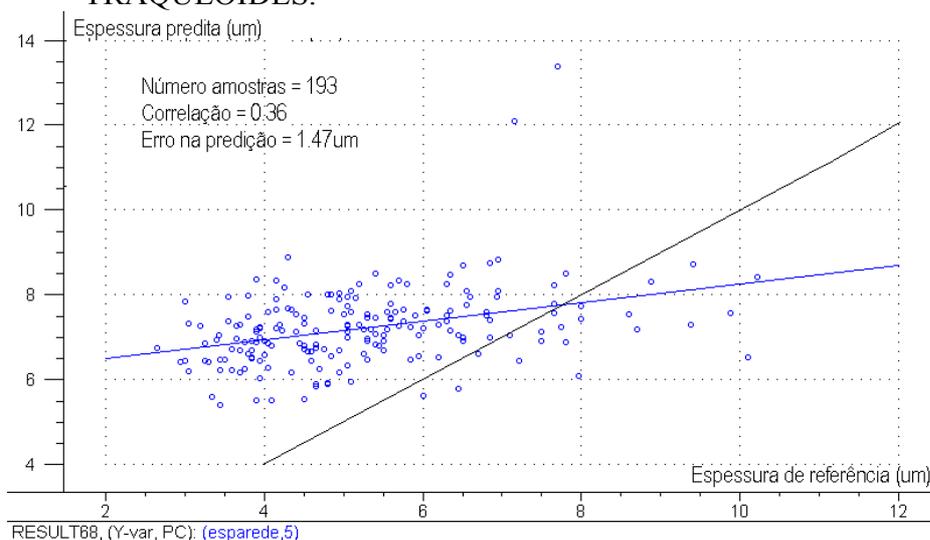
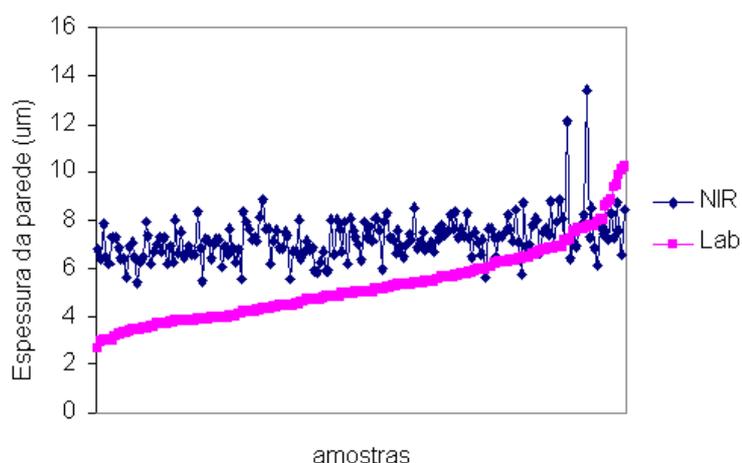


FIGURA 37 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA A ESPESSURA DA PAREDE DOS TRAQUEÓIDES.



Comparando-se os dados da espessura da parede obtidos em laboratório pelo método convencional e os dos espectros de infravermelho próximo (Figura 38), observa-se que numa parte das amostras o método NIR superestima os valores, o que pode ser causado pela influência da umidade e irregularidade da superfície que mascaram a pequena variação numérica existente entre as amostras além de afetar esta característica. Também a variação de condições ambientais e silviculturais que respondem pela proximidade dos valores da espessura da parede dos traqueóides axiais entre as duas idades analisadas (10 e 17 anos) pode ter tido influência.

FIGURA 38 – ESPESSURA DA PAREDE DOS TRAQUEÓIDES.



Schimleck e Evans (2004, p.68) estudando rolos de incremento de *Pinus radiata* obtiveram bons resultados para a calibração desta característica, com os dados em segunda derivada, encontrando um R^2 de 0,89 na calibração e uma boa predição dos dados com um R^2

variando de 0,88 a 0,91, e um erro entre 0,2 e 0,5 μ m, superestimando valores de posições afetadas por tratos silviculturais.

5.6.5 Coeficiente de Flexibilidade

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para o Coeficiente de Flexibilidade e outras 194 para a predição externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Os espectros, medidos a cada 2nm, foram agrupados de 10 em 10 pontos, compondo, portanto, um valor médio a cada 20nm.

Efetuando-se a calibração de um modelo, com nove fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,54 na calibração (Figura 39) e 0,48 na validação (Figura 40). Aplicando o modelo para a validação externa a correlação foi média, 0,51 (Figura 41).

O Coeficiente de Flexibilidade é calculado pela relação entre o diâmetro do lume e a largura dos traqueóides axiais. As características individualmente não foram adequadas à calibração de um modelo com os espectros de infravermelho, mas a relação entre elas forneceu resultados melhores, possibilitando o uso deste Coeficiente, que é um indicador da qualidade do papel a ser produzido com este material.

FIGURA 39 – CALIBRAÇÃO PARA O COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.

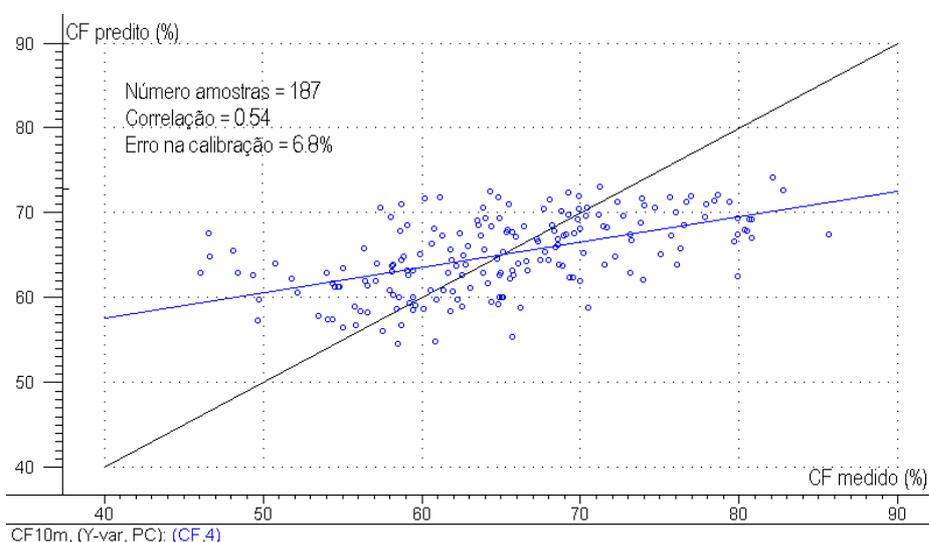


FIGURA 40 – VALIDAÇÃO PARA O COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.

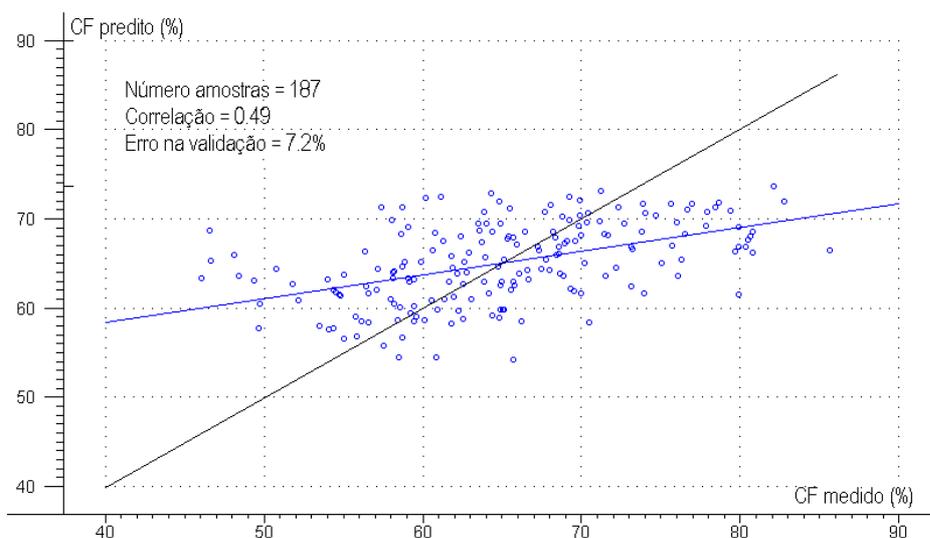
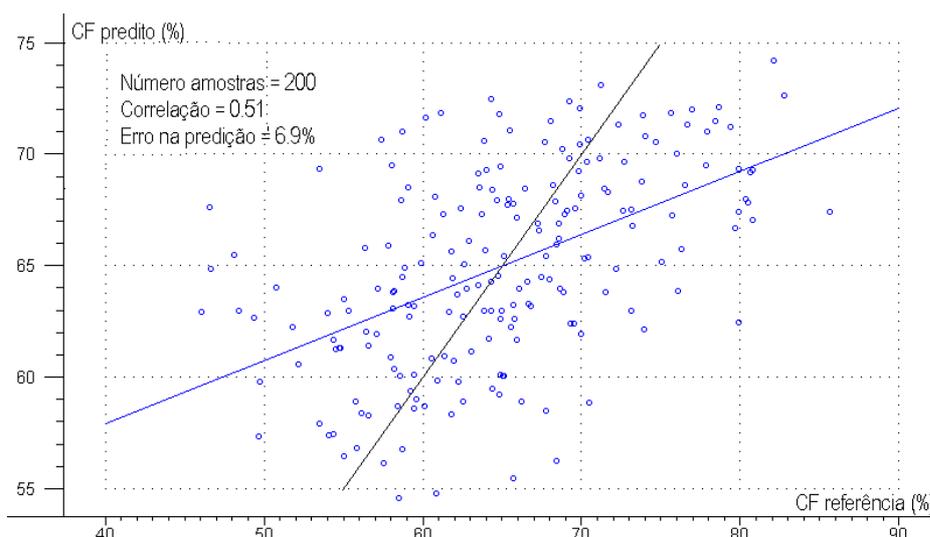
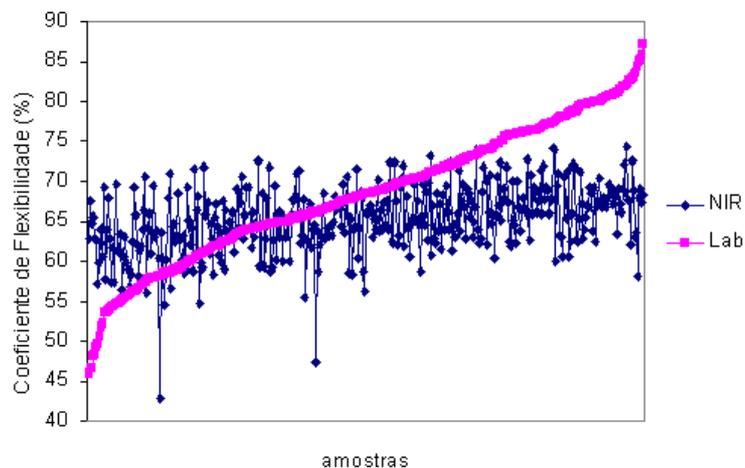


FIGURA 41 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.



A calibração e predição do Coeficiente de Flexibilidade apresentaram-se de média a baixa, o que é causado pela mínima diferença existente entre as amostras utilizadas no estudo, podendo ser melhorada com a escolha de um intervalo de dados maior, mais contrastante. Isso pode ser observado comparando-se os valores calculados através das dimensões dos traqueóides medidos em laboratório com os preditos através dos espectros de infravermelho próximo (Figura 42).

FIGURA 42 – COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.



5.6.6 Fração Parede

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para a Fração Parede e outras 194 para a validação externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com quatro fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,54 na calibração (Figura 43) e 0,48 na validação (Figura 44). Aplicando o modelo para a predição dos dados nas amostras externas a correlação foi baixa, 0,27 (Figura 45).

A Fração Parede é calculada através da relação entre duas vezes a espessura da parede e a largura do traqueóide, ou seja, é diretamente influenciada pela espessura da parede, que não apresentou tendência constante de aumento ou decréscimo em relação às idades e posição no tronco analisada, o que justifica a baixa correlação existente na calibração e predição deste índice indicativo da qualidade da polpa celulósica.

FIGURA 43 – CALIBRAÇÃO PARA A FRAÇÃO PAREDE.

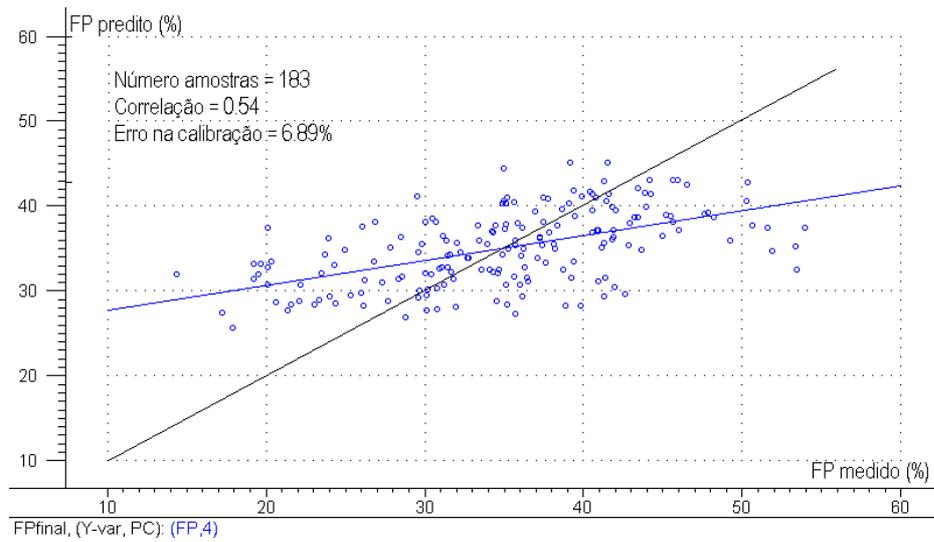


FIGURA 44 – VALIDAÇÃO PARA A FRAÇÃO PAREDE.

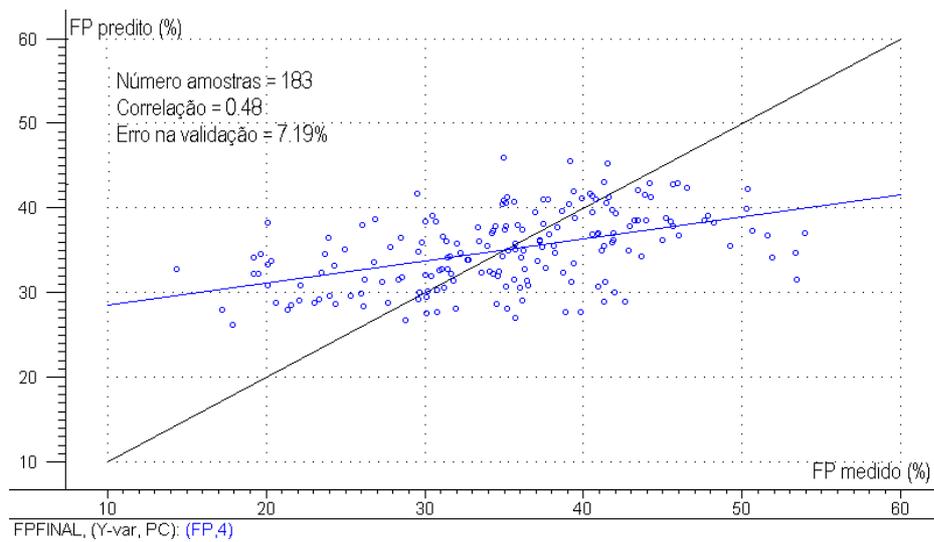
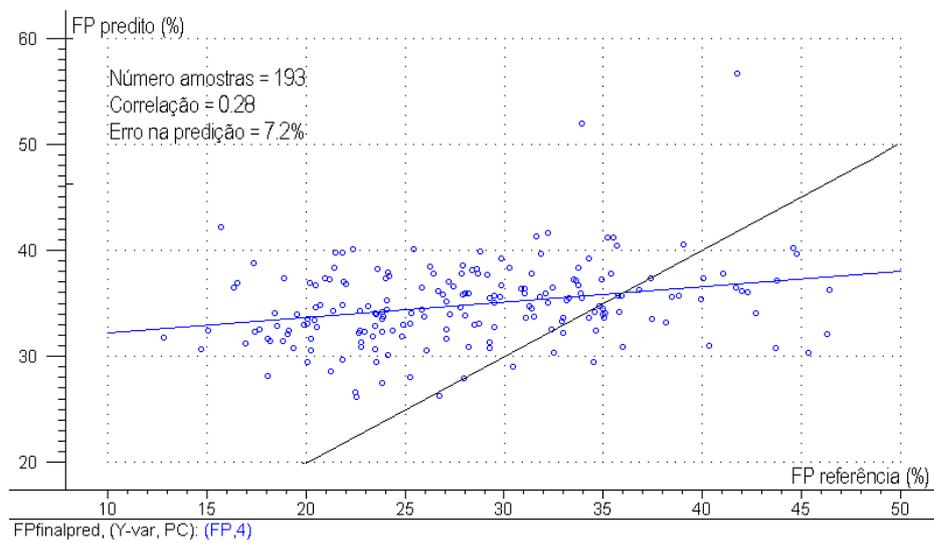
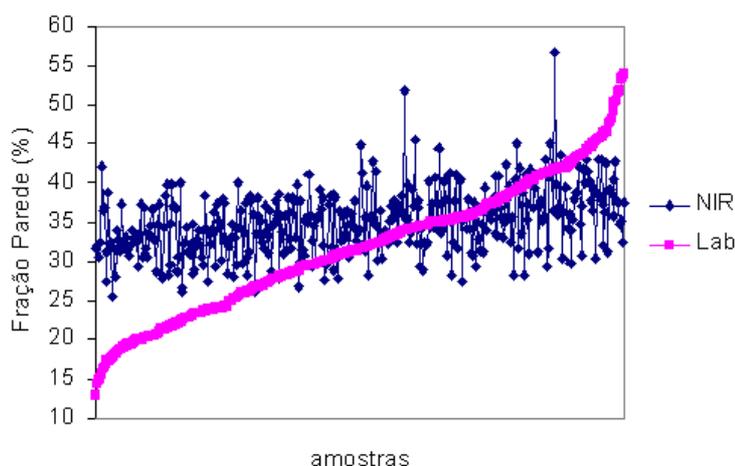


FIGURA 45 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA A FRAÇÃO PAREDE.



A relação entre a Fração Parede calculada através dos dados obtidos pelas técnicas convencionais de laboratório e os obtidos pela espectroscopia no infravermelho próximo é mostrada na Figura 46, indicando a possibilidade de uso desta técnica para análise da característica acima mencionada.

FIGURA 46 – FRAÇÃO PAREDE.



5.6.7 Índice de Enfeltramento

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para o Índice de Enfeltramento e outras 194 para a predição em amostras externas, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Os espectros, medidos a cada 2nm, foram agrupados de 10 em 10 pontos, compondo, portanto, um valor médio a cada 20nm.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com oito fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,67 na calibração (Figura 47) e 0,56 na validação (Figura 48). Aplicando o modelo para a predição dos dados em amostras externas, a correlação foi média, 0,54 (Figura 49).

FIGURA 47 – CALIBRAÇÃO PARA O ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO.

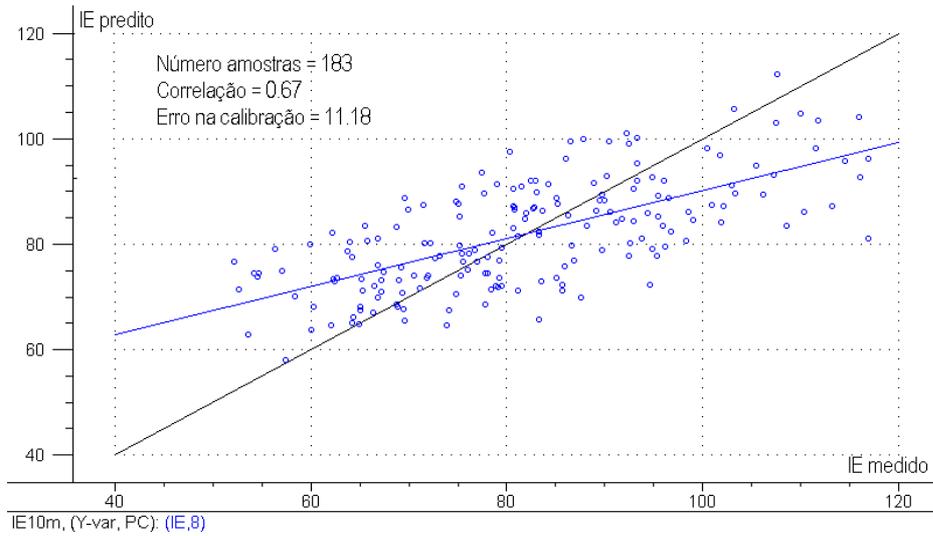


FIGURA 48 – VALIDAÇÃO PARA O ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO.

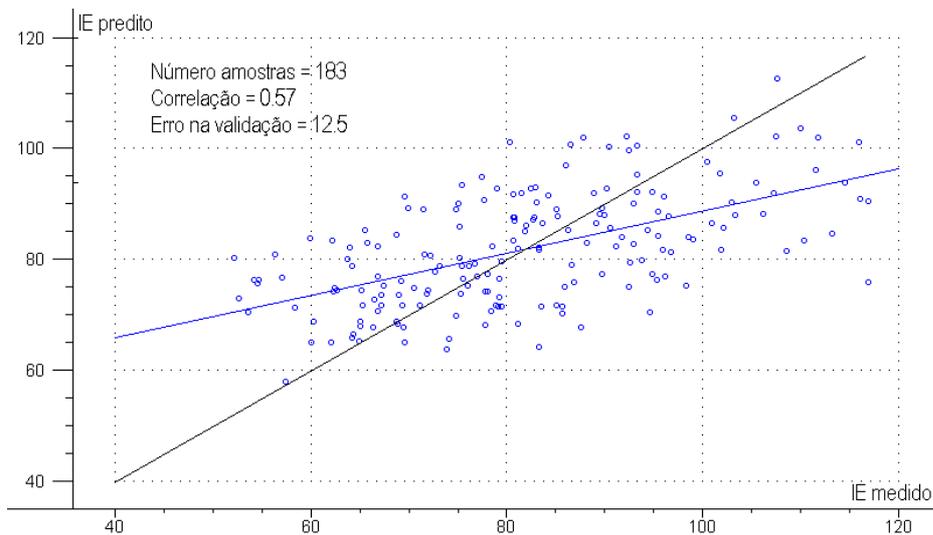
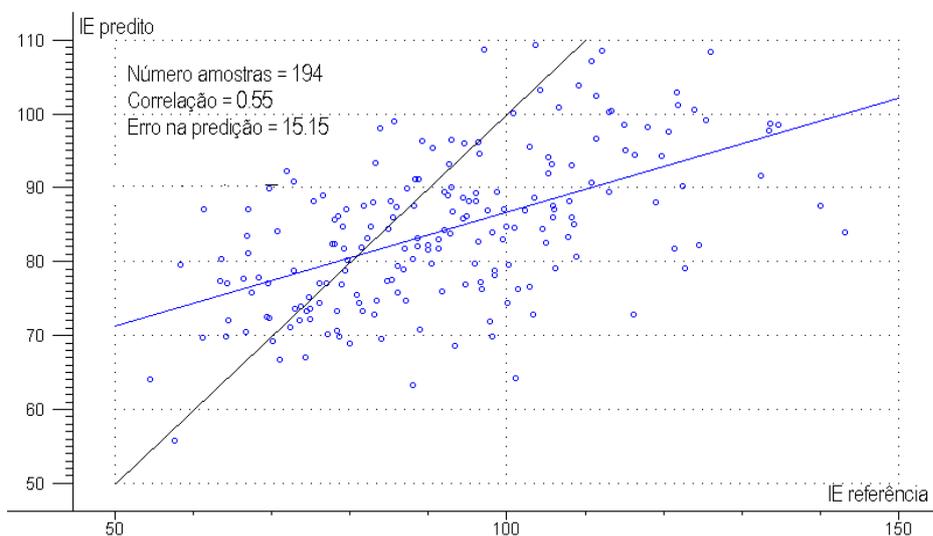


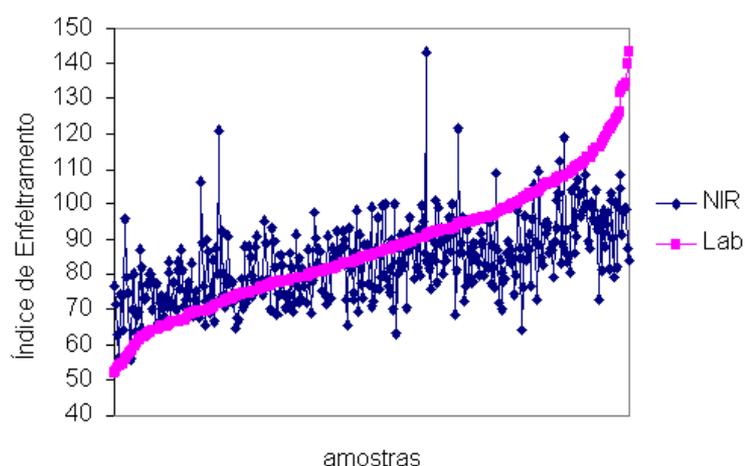
FIGURA 49 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO.



O Índice de Enfletramento é calculado pela relação entre o comprimento e a largura dos traqueóides, sendo influenciado diretamente pelo comprimento, o que explica a boa correlação encontrada para este índice.

Comparando os valores obtidos em laboratório com os do infravermelho (Figura 50) observa-se a mesma tendência, indicando que a técnica em estudo pode ser aplicada para a predição deste índice que é um dos indicativos da qualidade da polpa celulósica. Melhores resultados serão obtidos com um controle de umidade, homogeneidade de superfície da amostra e uma maior variação nas características das amostras a serem analisadas.

FIGURA 50 – ÍNDICE DE ENFLETRAMENTO.



5.6.8 Índice de Runkel

Foram utilizadas 200 amostras para a calibração e validação de um modelo para o Índice de Runkel e outras 194 para a validação externa, envolvendo a variação base-altura e medula-casca das árvores em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com cinco fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,53 na calibração (Figura 51) e 0,44 na validação (Figura

52). Aplicando o modelo para a validação externa dos dados nas outras amostras a correlação foi baixa, 0,36 (Figura 53).

O Índice de Runkel é calculado pela relação entre duas vezes a espessura da parede e o diâmetro do lume. A calibração para este índice ficou próxima da obtida para a espessura da parede, que está diretamente relacionada a este índice. Os valores de calibração mostraram-se médios, caindo na predição pela instabilidade dos valores da espessura parede celular que não apresentaram tendência e foram influenciados por condições ambientais e silviculturais.

FIGURA 51– CALIBRAÇÃO PARA O ÍNDICE DE RUNKEL.

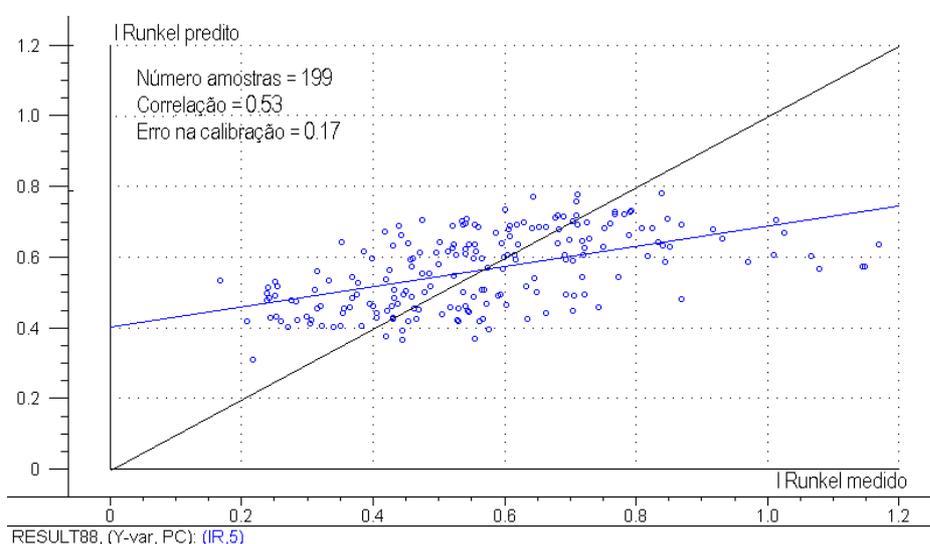


FIGURA 52 – VALIDAÇÃO PARA O ÍNDICE DE RUNKEL.

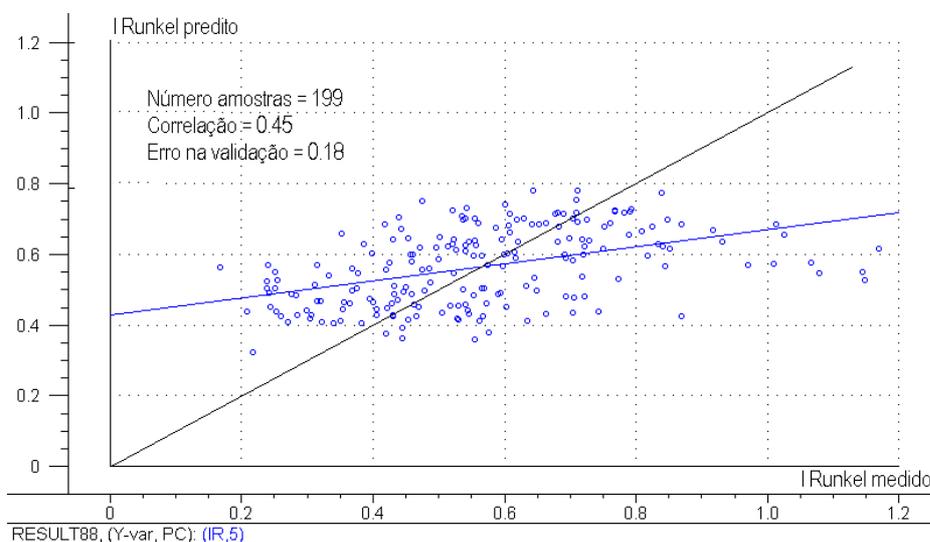
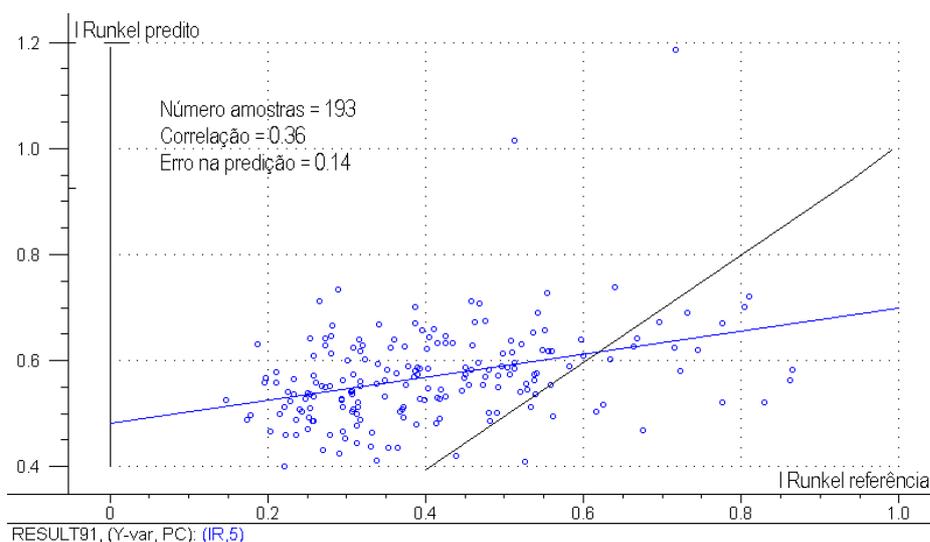
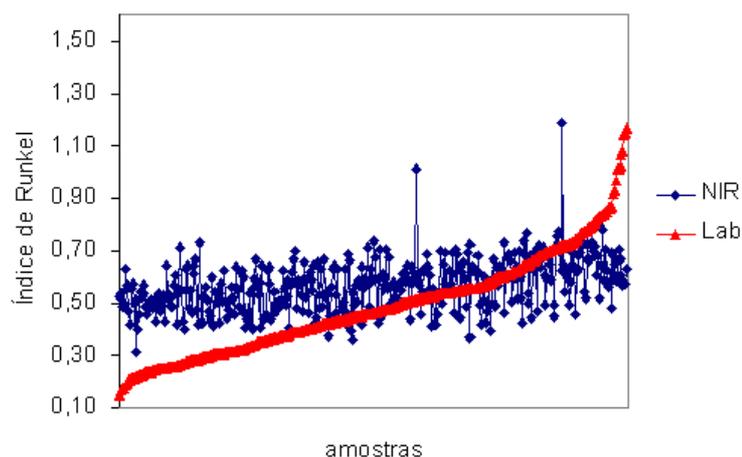


FIGURA 53 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O ÍNDICE DE RÜNKEL.



Quando comparando os dados medidos em laboratório com os fornecidos pela espectroscopia de infravermelho próximo observa-se que o último superestima uma parte das amostras, o que deve ser resultado da variação da umidade das amostras, uma vez que o equipamento é sensível a esta característica que não é tão facilmente visualizada em microscopia óptica (Figura 54).

FIGURA 54 – ÍNDICE DE RUNKEL.



5.6.9 Índice de Tração

Foram utilizados 500 espectros para a calibração e validação de um modelo para o Índice de Tração e outros 259 para a predição externa, sendo relacionados com o valor médio por árvore, em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701. Cada coluna de dados representa uma árvore.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com doze fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,79 na calibração (Figura 55) e 0,75 na validação (Figura 56). O modelo mostrou-se fraco para a validação externa dos dados nas outras amostras, com uma correlação muito baixa, 0,07 (Figura 57).

FIGURA 55 – CALIBRAÇÃO PARA O ÍNDICE DE TRAÇÃO.

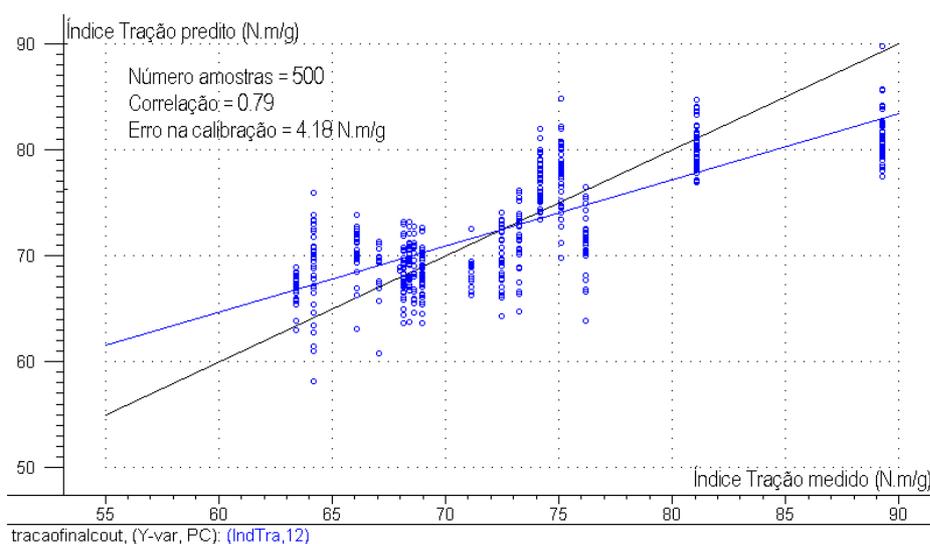


FIGURA 56 – VALIDAÇÃO PARA O ÍNDICE DE TRAÇÃO.

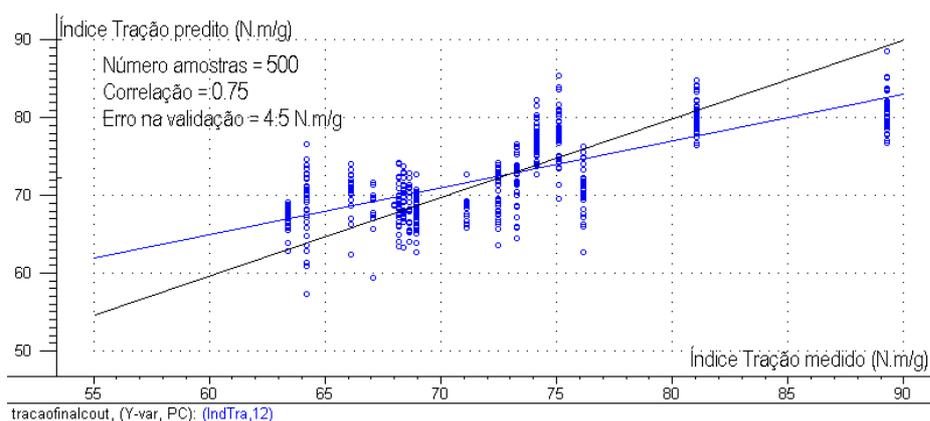
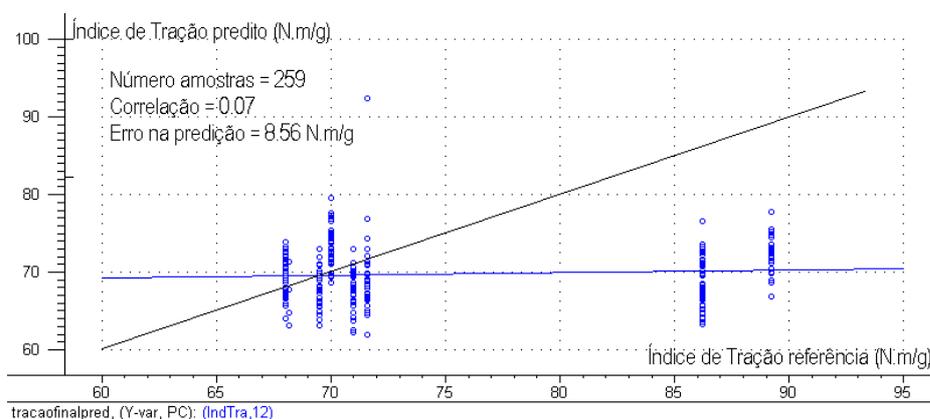


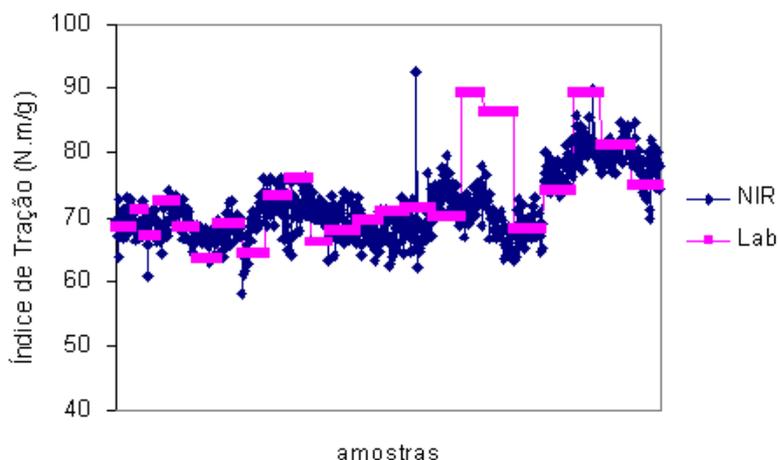
FIGURA 57 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O ÍNDICE DE TRAÇÃO.



Os valores do Índice de Tração são calculados com base nos testes de resistência efetuados no papel produzido com os cavacos misturados de uma árvore, e dependem de variáveis do processo produtivo, como tempo de refino, e características anatômicas e químicas da madeira. Os espectros foram coletados da madeira, por posição, abrangendo a variação medula-casca e base-altura, sendo relacionados um a um com o Índice de Tração da árvore para que se obtivesse uma média representativa de toda a variação, por isso as correlações na calibração e validação foram ótimas, o mesmo não ocorrendo na predição dos dados das outras amostras.

Quando comparando os dados medidos em laboratório com os preditos pela espectroscopia de infravermelho próximo de forma gráfica diferente (Figura 56) observa-se que ambos possuem a mesma tendência e as amostras que estão fora são as que apresentaram algum problema como deslocamento no momento da varredura, mancha azul ou irregularidade da superfície. Pelo gráfico a seguir pode-se dizer que a aquisição de espectros de infravermelho próximo da madeira para a predição do Índice de Tração do papel, é possível, de forma eficiente e precisa, desde que as condições de produção de papel sejam padronizadas e a amostragem tenha abrangência de toda a variação existente, além da alta variabilidade da característica ou propriedade a ser analisada. Lembra-se que existe toda a influência do processo de produção do papel atuando nesta relação.

FIGURA 56 – ÍNDICE DE TRAÇÃO.



5.6.10 Índice de Arrebetamento

Foram utilizados 500 espectros para a calibração e validação de um modelo para o Índice de Arrebetamento e outros 259 para a predição externa, sendo relacionados com o valor médio por árvore, em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701. Cada coluna de dados representa uma árvore.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com onze fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,70 na calibração (Figura 57) e 0,66 na validação (Figura 58). Aplicando o modelo para a validação externa nas outras amostras a correlação foi muito baixa, -0,02 (Figura 59).

Os valores do Índice de Arrebetamento são calculados com base nos testes de resistência efetuados no papel produzido com os cavacos misturados de uma árvore. Os espectros foram coletados da madeira, por posição, abrangendo a variação medula-casca e base-altura, sendo relacionados um a um com o Índice de Arrebetamento da árvore para que se obtivesse uma média representativa de toda a variação, por isso as correlações na calibração e validação foram boas, o mesmo não ocorrendo na predição dos dados das outras

amostras. Lembra-se que existe a influência do processo produtivo, além das características da madeira, nas propriedades de resistência do papel.

FIGURA 57 – CALIBRAÇÃO PARA O ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO.

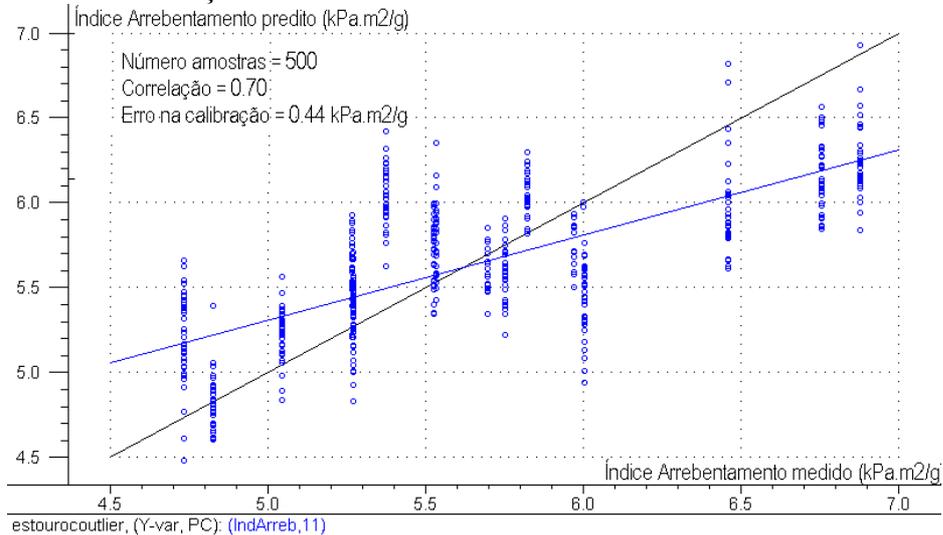


FIGURA 58 – VALIDAÇÃO PARA O ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO.

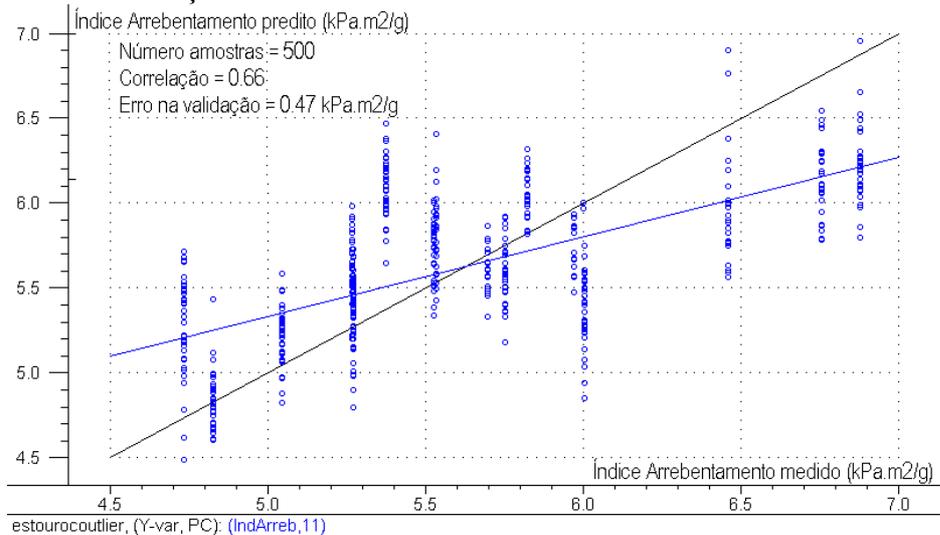
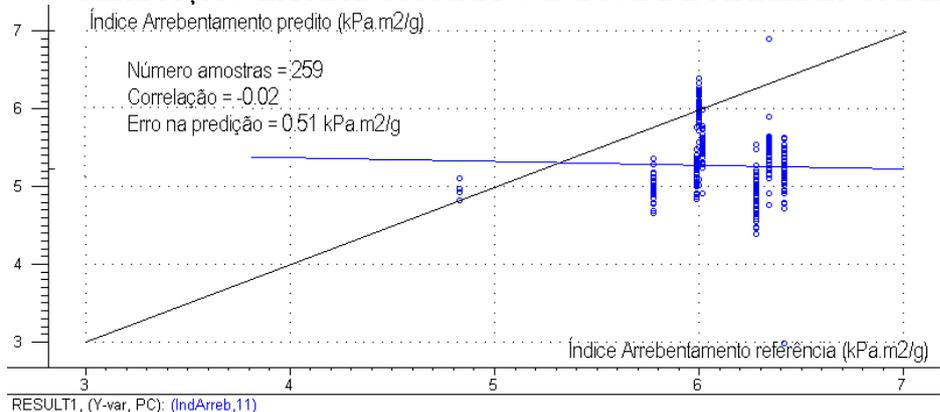
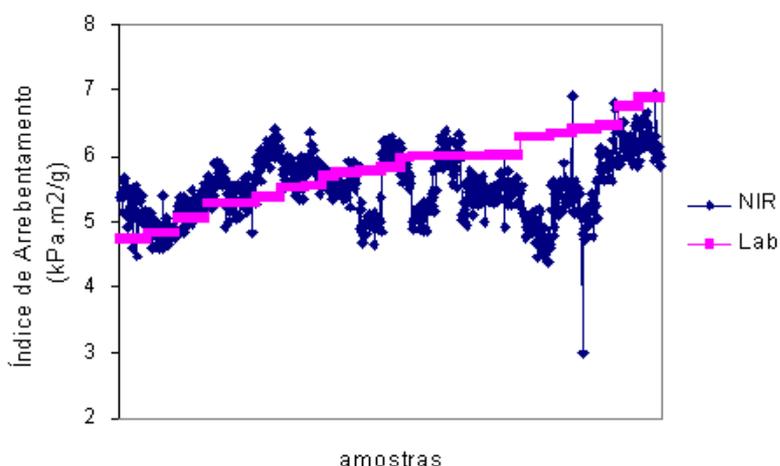


FIGURA 59 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO.



Quando comparando os dados medidos em laboratório com os preditos pela espectroscopia de infravermelho próximo, de forma gráfica diferente (Figura 60), observa-se que ambos apresentam a mesma tendência e as amostras que estão fora são as que apresentaram algum problema como deslocamento no momento da varredura, mancha azul ou irregularidade da superfície. Pelo gráfico a seguir pode-se dizer que a aquisição de espectros de infravermelho próximo diretamente da madeira, para a predição do Índice de Arrebentamento do papel, pode ser utilizada, devendo-se tomar cuidado no momento da calibração do equipamento, para se ter uma ampla variabilidade da característica ou propriedade a ser analisada e uma padronização total no processo produtivo.

FIGURA 60 – ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO.



5.6.11 Índice de Rasgo

Foram utilizados 500 espectros para a calibração e validação de um modelo para o Índice de Rasgo e outros 259 para a validação externa, sendo relacionados com o valor médio por árvore, em duas idades (10 e 17 anos). Foram utilizados todos os comprimentos de onda coletados, ou seja, a cada 2nm entre 1100 e 2500, num total de 701. Cada coluna de dados representa uma árvore.

Efetuada-se a calibração de um modelo, com quatorze fatores, utilizando a técnica do PLS obteve-se uma correlação de 0,76 na calibração (Figura 61) e 0,68 na validação (Figura 62). Aplicando o modelo para a predição externa dos dados nas outras amostras a correlação foi muito baixa, -0,05 (Figura 63).

Os valores do Índice de Rasgo são calculados com base nos testes de resistência efetuados no papel produzido com os cavacos misturados de uma árvore. Os espectros foram coletados da madeira, por posição, abrangendo a variação medula-casca e base-altura, sendo relacionados um a um com o Índice de Rasgo médio da árvore para que se obtivesse uma média representativa de toda a variação, por isso as correlações na calibração e validação foram boas, o mesmo não ocorrendo na predição dos dados das outras amostras.

FIGURA 61 – CALIBRAÇÃO PARA O ÍNDICE DE RASGO.

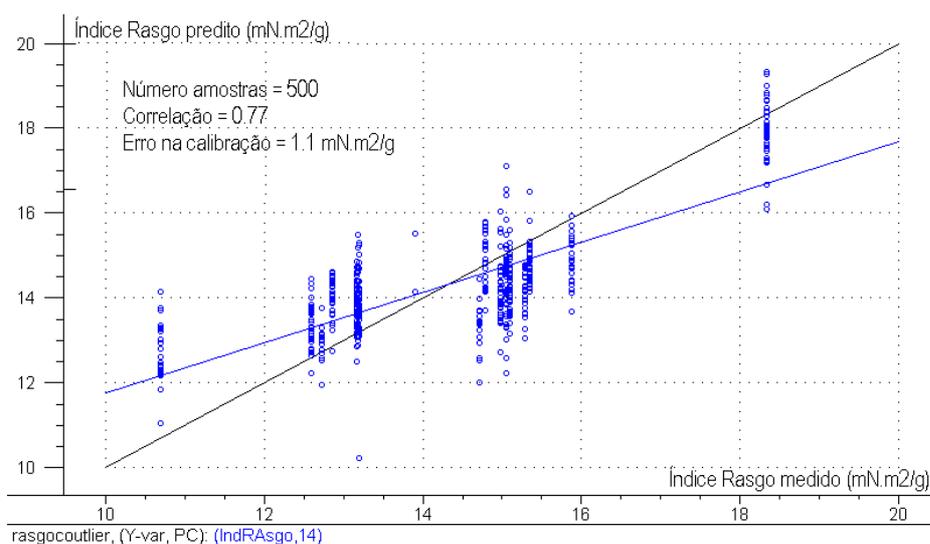


FIGURA 62 – VALIDAÇÃO PARA O ÍNDICE DE RASGO.

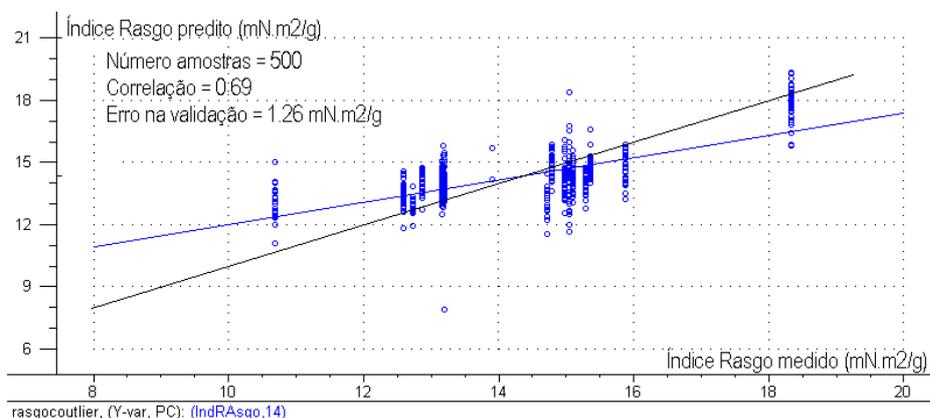
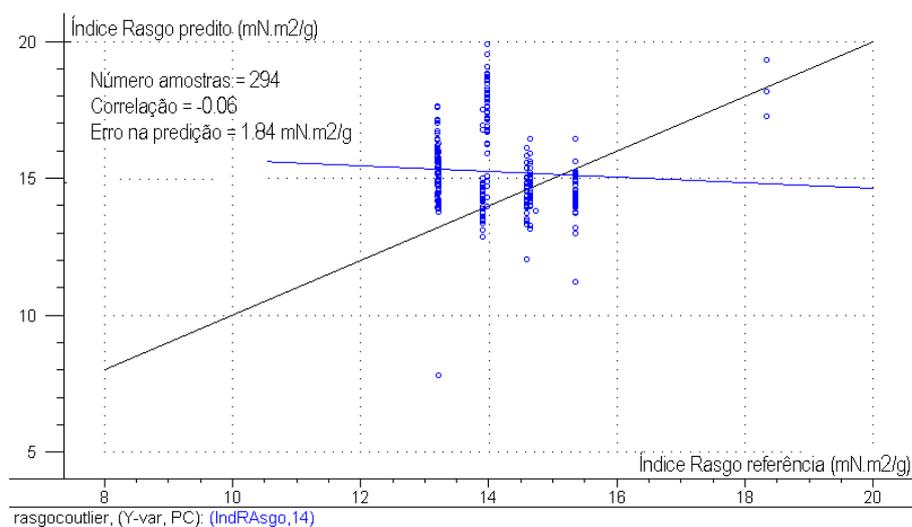
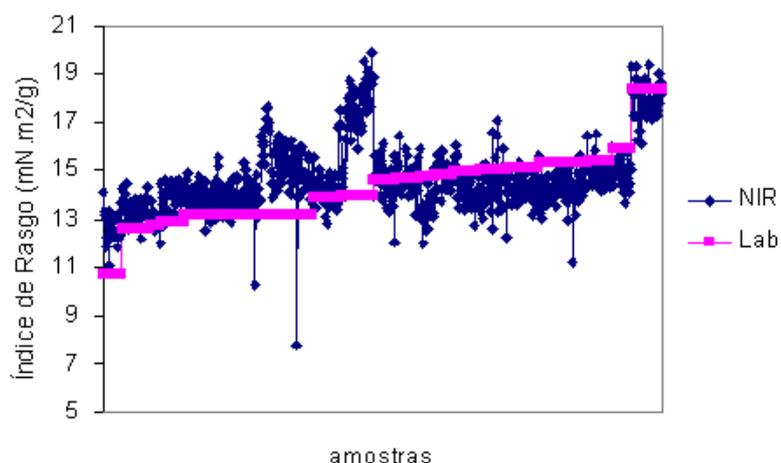


FIGURA 63 – VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O ÍNDICE DE RASGO.



Observando os dados medidos em laboratório e os fornecidos pela espectroscopia de infravermelho próximo (Figura 64) verifica-se que ambos apresentam a mesma tendência e as amostras que são extremos são as que apresentaram algum problema como deslocamento no momento da varredura, mancha azul ou irregularidade da superfície. Pelo gráfico a seguir pode-se dizer que a aquisição de espectros de infravermelho próximo da madeira, para a predição do Índice de Rasgo do papel, pode ser utilizada de forma rápida e eficiente, devendo-se tomar cuidado no momento da calibração do equipamento, para se ter uma ampla variabilidade da característica ou propriedade a ser analisada, além da necessidade de padronização total do processo de produção do papel.

FIGURA 64 – ÍNDICE DE RASGO.



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- A densidade básica média da madeira apresentou tendência de crescimento entre as idades analisadas;
- O comprimento, diâmetro do lume e espessura da parede dos traqueóides axiais, valores médios, permaneceram constantes entre as idades;
- A largura média dos traqueóides axiais apresentou-se de maneira irregular entre as idades analisadas;
- Os índices indicativos da qualidade da polpa celulósica, calculados com as características morfológicas dos traqueóides axiais, foram compatíveis com as propriedades de resistência do papel produzido com este material;
- O Índice de Tração apresentou tendência de crescimento e o Índice de Arrebentamento apresentou tendência de decréscimo com o aumento da idade. O Índice de Rasgo apresentou-se de maneira irregular entre as idades;
- Os espectros de infravermelho mostraram-se adequados para a predição da densidade básica da madeira e comprimento dos traqueóides.
- Os índices indicativos da qualidade da polpa celulósica (Coeficiente de Flexibilidade, Fração Parede, Índice de Enfeltramento e Índice de Runkel) apresentaram melhores correlações com os dados fornecidos pelo infravermelho do que as características individuais de largura e diâmetro do lume dos traqueóides axiais;
- Os índices de resistência do papel (Tração, Arrebentamento e Rasgo) apresentaram alta correlação com os espectros do infravermelho próximo, podendo ser preditos por esta técnica desde que haja uma calibração adequada com uma ampla variação de dados e as variáveis do processo de produção de papel sejam constantes;

A espectroscopia no infravermelho próximo mostrou-se eficiente para avaliar as características anatômicas e do papel de clones de *Pinus taeda* L. utilizando-se madeira maciça.

RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

- Os ensaios de espectroscopia no infravermelho próximo devem ser efetuados em atmosfera climatizada para excluir a influência da umidade no material;
- Os corpos-de-prova utilizados devem ter o mesmo teor de umidade e a superfície deve se apresentar com igual textura;
- Utilizar amostras com ampla variação nas características a serem medidas de modo que a calibração efetuada no equipamento seja aplicada de maneira eficiente na predição dos resultados em outras amostras;
- Testar árvores mais velhas ou com idades mais contrastantes;
- Adquirir os espectros diretamente do bloquinho de madeira e depois de transformá-lo em serragem fazer nova varredura para observar a influência do formato do corpo-de-prova na variação ou erro do processo.
- Desenvolver método para transferência de calibração entre equipamentos de infravermelho próximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITZ, P.; LUNER, P. **The relationship of wet fiber flexibility (WFF) to fiber and pulps properties.** New York: ESPR, 1991. 87p.

ALMEIDA, Fábio Sérgio de. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids® para madeiras de eucalipto.** Piracicaba, 2003. 115f. Dissertação. (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.

ANNERGREN, G.E.; RYDHOLM, S.; VARDHEIM, S.V. Influence of raw material and pulping process on the chemical composition and physical properties of paper pulps. **Svensk Papperstiding**, v.66, n.6, p.196-210, 1963.

ARLOV, AP. Load-elongation properties of paper sheets made from Bauer-McNett fractions fo beaten sulfite pulp. **Norsk skogindustri**, v.13, n10, p.342-351, 1959.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação: referências: elaboração.** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7537: Pasta celulósica: determinação número kappa.** 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Manual: Pasta celulósica e papel.** São Paulo: ABTCP, 1994.

BAKER, James B.; LANGDON, Gordon. Loblolly pine. In: **Silvics Manual.** Vol.1 Conifers. United States Department of Agricultural - Forest Service, 2004, p.1018-1040. Disponível em www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/volume1/pinus/taeda.htm. Acesso em 18 de março de 2005.

BALDI, Fabrizio. **Il processo di produzione dele paste chimiche e il loro trattamento.** Verona: 8° Corso di Tecnologia per Tecnici Cartari Edizione 2000/2001. 41p.

BALLARIN, Adriano Wagner; PALMA, Hernando Alfonso Lara. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore.** Viçosa, v.27, n.3, p.371-380, 2003.

BAREFOOT, AC.; HITCHINGS, RG.; ELLWOOD, EL. Wood characteristics and kraft paper properties of four selected loblolly pines: 1. Effect of fiber morphology under identical cooking conditions. **TAPPI**, Atlanta, v.47, n.6, p.343-355, 1964.

BAREFOOT, AC.; HITCHINGS, RG.; ELLWOOD, EL. Wood characteristics and kraft paper properties of four selected loblolly pines: 3. Effect of fiber morphology on pulps examined at a constant permanganate number. **TAPPI**, Atlanta, v.49, n.4, p.137-147, 1966.

BARRICHELO, Luis Ernesto George; BRITO, JO. A madeira de *Pinus taeda* como matéria-prima para celulose Kraft. 1. Influência dos teores de lenhos. In. 3° Congresso Florestal Brasileiro. **Anais.** Manaus, 1978. 18p.

BARRICHELO, Luis. Ernesto George; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. Brasília: IBDF, PNUD, FAO, BRA. **Série Divulgação**, n.13. 145p. 1976.

BARRICHELO, Luiz Ernesto George. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* – Principias interações entre as características da madeira e o rendimento e qualidade da celulose. **IPEF. Circular Técnica n°86**. São Paulo: IPEF, 1980. 8p.

BECKWITH, JR.; SHACKELFORD, LS. Relationship between crown growth and annual xylem sheath development in loblolly pine saplings. **Forest Science**, v.22, n.3, p.247-260, 1976.

BENDTSEN, BA; SENFT, John. Mechanical and anatomical properties of individual growth rings of plantation-grown eastern cotton-wood and loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, v.18, n.1, p.23-38, 1986.

BENJAMIN, L.R. Bulletin Inst. Science and Ind. n25, 1923.

BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Estimation of pulp kappa number with near-infrared spectroscopy. **Tappi Journal**, v.72, n.9, p.193-197, 1988a.

BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Potential for near infrared spectroscopy in the pulping industries. **Paper Southern Africa**, nov/dec, p.34-48, 1988b.

BITTENCOURT, Eduardo. **Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel**. 2004. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

BLAIR, BL.; ZOBEL, BJ.; BAKER, JA. Predictions of gain in pulp yield and tear strength in young loblolly pine through genetic increases in wood density. **TAPPI**, Atlanta, v.58, n.1, p.89-91, 1975.

BLANCO ROJAS, ML. **Beneficiamento e polpação da raquis da bananeira nanicaio**. Dissertação (Mestrado).150f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1996.

BOWYER, JL.; SHMULLSKY, R.; HAYGREEN, JG. **Forest products and wood science: an introduction**. 4 ed. Ames: Iowa State University Press, 2003. 554p.

BRASIL, Maria Aparecida Mourão; NICOLIELO, Norival; VEIGA, Ricardo Antonio de Arruda. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* em diversas idades na região de Agudos. **Revista Floresta**, Curitiba, v.11, n.1, p.33-40, jun 1980.

BRAY, M.W.; CURRAN, C.F. **Paper Trade Journal**, v.105, n.20, p.39, 1937.

BRECHT, W.; IMSET, O. **Zellstoff u. Papier** n.13, p.564, 1933; n.14, p.14, 1934.

BRITO, JO.; BARRICHELO, Luis Ernesto George. Correlação entre teor de lenho tardio e densidade básica para espécies do gênero *Pinus*. **IPEF. Circular Técnica n°30**. São Paulo: IPEF, 1977, 4p.

BROLIN, Anders; NORÉN, Anna; STAHL, Erik G. Wood and pulp characteristics of juvenile Norway spruce: a comparison between a forest and an agricultural stand. **Tappi Journal**, v.78, n.4, p.203-214, april 1995.

BROWN, HP.; PANSKIN, AJ.; FORSAITH, CC. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1949. v.1. 652p.

BUCKLAND, N.J.; MATHIESON, J. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.58, p.113, 1957.

BYRD, VL. Wood characteristics and kraft paper properties of four selected loblolly pines: part 2: wood chemical constituents and their relationship to fiber morphology. **Forest Products Journal**, Madison, v.15, n.8, p.313-320, 1965.

CAMPOS, Edison da Silva; MARTINS, Marco Aurélio Luiz; FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; FRIZZO, Sonia Maria Bitencourt. Seleção de critérios para a especificação de pastas celulósicas branqueadas de eucaliptos na fabricação de papéis para impressão "offset". **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p.57-75, jun 2000.

CARPIM, M.A.; BARRICHELLO, Luis Ernesto George.; SILVA JR., Ergílio Cláudio da; DE VASCONCELOS DIAS, R.L. A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel. In: Congresso Anual da Associação Técnica Brasileira de Celulose e Papel, 20, 1987, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: ABCTP, 1987. p. 183-205.

CAUMO, Mauro. **La raffinazione**. Verona: 10° Corso di Tecnologia per Tecnici Cartari Edizione 2002/2003. 47p.

CHOONG, ET.; ZABAL, NQ.; THIELGELS, BA.; FOGG, PJ. Variations in growth and certain wood properties of loblolly pine seed sources in Louisiana. **LSU Res. Rep. 9**. Baton Rouge, LA. Louisiana Agricultural Experiment Station, Louisiana State University, School of Forestry, Wildlife and Fisheries. 160p.

CLARK III, Alexander; BORDERS, Bruce E.; DANIELS, Richard F. Impact of vegetation control and annual fertilization on properties of loblolly pine wood at age 12. **Forest Products Journal**, v.54, n.12, p.90-96, dec. 2004.

CLARK, J. d'A. A search for new fiber crops: kenaf and wood pulp breeds. **TAPPI**, v.45, n.8, p.628. 1962.

CLARK, P.C. Unpublished master thesis, Syracuse University, 1958.

CLARKE, C.R.E; WESSELS, A.M. Variation and measurement of pulp properties in eucalyptus. In: Eucalypt plantations: improving fibre yield and quality. **Proceedings** of the CRCTHF-IUFRO Conference, fev. 1995, Hobart, Austrália, *edited by*. B.M. Potts, N.M.G. Borralho, J.B. Reid, R.N. Cromer, W.N. Tibbits, e C.A. Raymond. Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry, Hobart, Australia, 1995. pp.93-100.

COLE, DE.; ZOBEL, BJ.; ROBERTS, JH. Slash, loblolly and longleaf pine in a mined natural stand. A comparison of their wood properties, pulp yields and paper properties. **TAPPI**, Atlanta, v.49, n.4, p.161-166, 1966.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. Coníferas: madeira – descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira. COPANT 30-1:20, 1973.

CROSS, CF.; BEVAN, EJ. **A textbook of paper making**. London: Spon, 1916.

D'ALMEIDA, M.L.O. Viscosidade de uma pasta celulósica e a resistência do papel formado. **O Papel**, v.47, n.8, p.39-42, ago 1986.

DADSWEEL, HE.; WARDROP, AB. Growing trees with wood properties desirable for paper manufacture. **Appita**, v.12, n11, p.129-136, 1965.

DADSWELL, H.E.; WATSON, A.J. **The Formation and Structure of Paper**. (F. Bolam, ed.) London, Brit. Paper and Board Makers Tech. Assoc., 1962. p. 537-572.

DASGUPTA, Sunil. Mechanism of paper tensile-strength development due to pulp beating. **Tappi Journal**, v.77, n.6, p.158-166, jun 1994.

DEMUNER, Brás José; DÓRIA, Eduardo L.V.; SILVA Jr., Ergílio Cláudio da; MANFREDI, Vail. Influência das características dos flocos sobre o refino de polpas químicas. **O Papel**, v. 54, n.2, p.29-38, fev 1993.

DILLNER, B.; LJUNGER, A.; HERUD, O.A.; THUNE-LARSEN, E. The breeding of *Eucalyptus globules* on the basis of wood density, chemical composition and growth rate. **Timber Bulletin Europe** 23 (Suppl. 5), 1971. pp.120-151.

DINWOODIE, J.M. Tensile strength of individual compression wood fibre and its influence on properties of paper. **Nature**, London, v.205, n.4973, p.763, 1965a.

DINWOODIE, J.M. The relationship between fiber morphology and paper properties: a Review of Literature. **TAPPI**, Atlanta, v.48, n.8, p.440-447, aug 1965b.

DINWOODIE, J.M. The influence of anatomical and chemical characteristics of softwood fibers on the properties of sulfate pulp. **TAPPI**, Atlanta, v.49, n.2, p.57-67, feb 1966.

DONALDSON, LA.; BURDON, RD. Clonal variation and repeatability of microfibril angle in *Pinus radiata*. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.25, n.2, p.164-174, 1995.

DUEÑAS, Ruben SanJuan. **Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel**. Guadalajara: Universidade de Guadalajara, 1997. 293p.

DuPLOOY, A.B.J. The relationship between wood and pulp properties of *E. grandis* (Hill ex-Maiden) grown in South Africa. **Appita Journal** n.33, p.257-264, 1980.

EASTY, Dwight B.; BERBEN, Sally A.; DETHOMAS, Frank A.; BRIMMER, Paul J. Near-infrared spectroscopy for the analysis of wood pulp: quantifying hardwood-softwood mixtures and estimating lignin content. **Tappi Journal**, v.73, n.10, p.257-261, oct 1990.

EDGE, R.H. **Chem Ind.**, Dec. 18, 1948, p.803.

EINSPAHR, D. W.; PECKHAM, J. R.; MATHES, M. C. Base lines for judging wood quality of loblolly pine. **Forest Science**, Washington, v. 10, n. 2, p. 165-173, 1964.

EL-HOSSEINY, F.; ANDERSON, D. Effect of fiber length and coarseness on the burst strength of papel. **Tappi Journal**, v.82, n.1, p.201-203, jan 1999.

EMERTON, H.W. **Fundamentals of the beating process**. B.P.B.I.R.A. (British Paper and Board Industry Research Assoc.) Kenley, England, 1957, 198p.

EMERTON, H.W.; PAGE, D.H. & HALE, W. In: Formation and Structure of Paper (F. Bolam, ed.), London., Brit. Paper and Board Makers Tech. Assoc., 1962, p.53-59.

FARDIM, Pedro; DURAN, Nelson. Resistência ao rasgo e composição química da polpa Kraft: um estudo de análise de componentes principais. In: 32º Congresso Anual de Celulose e Papel. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 1999, p.203-210.

FELDHOFF, Roger; HUTH-FEHRE, Thomas; CAMMAN, Karl. Detection of inorganic wood preservatives on timber by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, n.6, A171-A173, 1998.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti *et al.* *Pinus elliottii*: fibra longa para produção de celulose. In 10 Congresso Anual de Celulose e Papel **Anais...** São Paulo, n.10, p.127-137, 1977.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. Celulose kraft de *Pinus spp.* **O Papel**, São Paulo, v.37, n.1, p.49-67, jan 1976.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; BARRICHELO, Luis Ernesto George. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. **O Papel**, São Paulo, v.36, n.9, p. 49-53, set 1975.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; BARRICHELO, Luis Ernesto George; AMARAL, Alina Célia Banzatto do; VALE, Celina Ferraz do. Variações das características da madeira e propriedades da celulose sulfato de *Pinus oocarpa* em função da idade do povoamento florestal. **IPEF**, Piracicaba, v.10, n.1, p.81-87, 1975a.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; FERREIRA, Mário; NEHRING, José Hélio; ROLIM, Mário Bogdol. Variabilidade no sentido radial de madeira de *Pinus elliottii*. **IPEF**, Piracicaba, v.10, n.1, p.1-11, 1975b.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; MORA, Ervin; MENOCELLI, Sérgio. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, v.53, n5, p.35-40, maio 1992.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; SANI, A. Presente, passado e perspectivas futuras na utilização do eucalipto pela indústria de celulose no Brasil. ABCP. Semana do Papel. São Paulo:ABCP. Cenibra. p.141-156. 1976.

FPL. Technology Transfer fact sheet. **Pinus taeda L.** USDA Forest Service – FPL–GTR-57, 1988. Disponível em www2.fpl.fs.fed.us/Techsheets/SoftwoodNA/htmlDocs/pinustaeda.html. Acesso em 18 de março de 2005.

GARBUTT, D.C.F.; DONKIN, M.J.; MEYER, J.H. Near-infrared reflectance analysis of cellulose and lignin in wood. **Paper Southern Africa**, april, p.45-48, 1992.

GIERTZ, H.W.; HELLE, T. **Norsk Skoging**, v.14, n.11, p.455, 1960.

GIERTZ, H.W. In: The Formation and Structure of Paper (F. Bolam, ed.), London., Brit. Paper and Board Makers Tech. Assoc., 1962, p.597-620.

GINDL, Wolfgang; TEISCHINGER, Alfred. The potential of vis- and nir-spectroscopy for the nondestructive evaluation of grain-angle in wood. **Wood and Fiber Science**, v.34, n.4, p.651-656, oct 2002.

GONZAGA, J. V.; FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti.; BUSNARDO, C. A.; GOMIDE, José Lívio; SCHMIDT, C. Qualidade da madeira e da celulose kraft branqueada de treze espécies de *Eucalyptus*. ABCP. III Congresso Latino-Americano de Celulose e Papel. São Paulo: ABCP. p.21-26. Nov. 1983.

GRAHAM, D. **TAPPI** n.39, p.147, 1956.

HAMMOND, R.N.; BILLINGTON, P.S. **TAPPI**, v.32, n.12, p.563, 1949.

HASSEGAWA, Mariana. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda L.* de procedência da África do Sul.** 2003. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HAUKSSON, J.B.; BERGQVIST, G.; BERGSTEN, U.; SJÖSTRÖM, M. EDLUND, U. Prediction of basic wood properties for Norway spruce - interpretation of near infrared spectroscopy data using partial least square regression. **Wood Science and Technology**, v.35, p.475-485, 2001.

HAYWOOD, G. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.51, n.9, p.77, 1950.

HELLE, T. **Svenks Papperstid**, v.66, n.24, p.1015, 1963.

HENTSCHEL, R.A.A. **TAPPI**, v.42, n.12, p.979, 1959.

HERMAN, M.; DUTILLEUL, P.; AVELLA-SHAW, T. Growth rate effects on intra-ring and inter-ring trajectories of microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*). **IAWA Journal**, v.20, n.1, p.3-21, 1999.

HIETT, Louis A.; BEERS JR., Walter L.; ZACHARIASEN, Karsten A. Relationship between wood density and other wood and pulp properties. **TAPPI**, v.43, n.2, p.169-173, feb 1960.

HILDEBRANDT, G. **Proceed.** 5th World Forest Congress, n.3, p.1348, 1962.

HOFFMEYER, P.; PEDERSEN, J.G. Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near infrared reflectance spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.53, n.3, p.165-170, 1995.

HOLZER, W.F. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.51, n.9, p.163, 1950.

HOLZER, W.F.; LEWIS, H.F. The characteristics of unbleached kraft pulps from western hemlock, douglas fir, western red cedar, loblolly pine, and black spruce. 3. The comparative pulping of the woods. **TAPPI**, v.33, n.2, p.110-112, 1950.

HORN, Richard A. Morphology of wood pulp fiber from softwoods and influence on paper strength. **USDA Forest Service**, Madison, FPL 242, 1974.

IPT. **Celulose e papel - tecnologia da fabricação da pasta celulósica**. Vol.1. 2. ed. São Paulo: IPT, 1998. 559p.

ISTAS, J.R.; HEREMANS, R.; RACKELBOOM, E.L. Publs. Etude agron. Congo belge Tech. 43, 1951.

JACKSON, LWR. Loblolly pine tracheid length in relation to position in tree. **Journal of Forestry**, v.57, n.5, 1959, p.366-367.

JAYME, G. **Papier** 15(8):372, 1961.

JAYME, G. **TAPPI**, v.41, n.11, p.178A-180A, 1958.

KANE, M.W. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.60, n.12, T359, 1959.

KANE, M.W. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.61, n.3, T236, 1960.

KÄRENLAMPI, Petri P. The effect of pulp fiber properties on the tearing work of paper. **Tappi Journal**, v.79, n.4, p.211-216, apr 1996.

KÄRENLAMPI, Petri P; SUUR-HAMARI, Harri T.; ALAVA, Mikko j.; Niskanen, Kaarlo J. The effect of pulp fiber properties on the in-plane tearing work of paper. **Tappi Journal**, v.79, n.5, p.203-209, may 1996.

KELLEY, Stephen S.; JELLISON, Jody; GOODELL, Barry. Use of NIR and pyrolysis-MBMS coupled with multivariate analysis for detecting the chemical changes associated with brown-rot biodegradation of spruce wood. **FEMS Microbiology Letters**, v.209, p.107-111, 2002.

KELLEY, Stephen S.; RIALS, Timothy G.; SNELL, Rebecca; GROOM, Leslie H.; SLUITER, Amie. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. **Wood Science and Technology**, v.38, n.4, p.257-276, 2004.

KELLOG, R.M.; WANGAARD, F.F. **TAPPI**, v.47, p.6, p.361, 1964.

KEREKES, Richard J.; SCHELL, Carolyn J. Effect of fiber length and coarseness on pulp flocculation. **Tappi Journal**, v.78, n.2, p.133-139, feb 1995.

KLEM, G.G. **Meddr norske Skogsfors Ves**, v.36, n.102, p.371, 1949.

KLEMM, P. **Wochenbl. Papierfabr.** 59, n 23A:88, 1928.

KLOCK, Umberto. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. Curitiba, 2000. 347f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

KOLLMANN, Franz FP.; CÔTÉ Jr, Wilfred A. **Principles of wood science and technology. Vol. 1. Solid wood**. Berlin: Springer Verlag, 1968. 592p.

KRAUS, Jane Elizabeth; ARDUIN, Marcos. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Seropédica, Rio de Janeiro: Editora Universidade Rural, 1997. 198p. il.

KRESS, D.; RATCLIFF, F.T. **Paper Trade Journal**, v.117, n.17, p.31, 1943.

KUBE, P.D.; RAYMOND, C.A. Prediction of whole tree basic density and pulp yield using wood core samples in *Eucalyptus nitens*. **Appita Journal**, v.55, n.1, p.43-48, 2002.

KUMAR, Saket; BARBOUR, R. James; GUSTAFON, Richard R. Kraft pulping response and paper properties of wood from densely stocked small-diameter stands. **Forest Products Journal**, Madison, v.54, n.5, p.50-56, may 2004.

LARSON, Philip *et al.* **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. Madison: USDA Forest Service, 2001. 42p.

LOO, JA; TAUER, CG; McNEW, RW. Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine. **Silvae Genetica**, v.34, n.1, p.14-19, 1985.

LOO, JA; TAUER, CG; van BUIJTENEN, JP. Juvenile-mature relationships and heritability estimates of several traits in loblolly pine (*Pinus taeda*). **Canadian Journal of Forest Research**, v.14, n.6, p.822-825, 1984.

LORENZI, Harri; SOUZA, Hermes Moreira de; TORRES, Mario Antonio Virmond; BACHER, Luis Benedito. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa, São Paulo: Instituto Plantarum, 2003. 384p. il.

MALMBERG, B. **Svensk Pappers**, v.67, n.3, p.69, 1964a.

MALMBERG, B. **Svensk Pappers.**, v.67, n.16, p.617, 1964b.

MARCHIORI, José Newton Cardoso. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: Ed. Da UFSM, 1996. 158p.

MARTON, R.; ALEXANDER, S.D. **TAPPI**, v.46, n.2, p.65, 1963.

MENDONÇA, Manoel Américo. **Características da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel**. Curitiba, 1982, 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MICHELL, A.J. Pulpwood quality estimation by near-infrared spectroscopic measurements on eucalypt woods. **Appita Journal**, v.48, n.6, p.425-428, 1995.

MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, L.R. Infrared spectroscopy – a rapid means of assessing pulping qualities of eucalypt wood? Proceedings CSCFHF-IUFRO Conference. **Eucalypt plantations: improving fibre yield and quality**, Hobart, 121-123, 1995.

MOHLIN, Ulla-Britt; DAHLBOM, Johan; HORNATOWSKA, Joanna. Fiber deformation and sheet strength. **Tappi Journal**, v.79, n.6, p.105-111, jun 1996.

MORESCHI, João Carlos. **Levantamento da qualidade da madeira em plantações artificiais de *Pinus elliottii* nos estados do sul do Brasil**. Curitiba: 1975. 162f. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná.

MORRIS, Andrew R.; PALMER, Edward R.; BARNES, Richard D.; BURLEY, Jeff; PLUMPTRE, Robert A.; QUILTER, Anthony. The influence of felling age and site altitude on pulping properties of *Pinus patula* and *Pinus elliottii*. **Tappi Journal**, v.80, n.6, p.133-138, jun 1997.

MOTTET, A.; QUOILIN, J. **Bull. Agron. Stns. Rechn. Gemblour** n.1&2, p.116, 1957.

MOURA, Vicente Pongitory Gifoni; VALE, Ailton Teixeira do; ISAIAS, Fabio Bakker. Comparação entre dois métodos de avaliação da variabilidade genética em volume, densidade básica da madeira e matéria seca de *Pinus tecunumanii* (Schwd) Eguluz e Perry. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.14, n.1, p.77-84, 2004.

MOURA, Vicente Pongitory Gifoni; VALE, Ailton Teixeira. Variabilidade genética na densidade básica da madeira de *Pinus tecunumanii* procedente do México e da América Central, no cerrado. **Scientia Forestalis**, São Paulo, n.62, v.2, p.104-113, dez. 2002.

MÜHLSTEPH, W. **Cellulosechemie**, v.18, n.6, p.132, 1940a.

MÜHLSTEPH, W. **Holz Roh-u Werkstoff**, v.3, n.2, p.45, 1940b

MÜHLSTEPH, W. **Wochenbl. Papierfabr.** 72(14):201, 1941.

MUÑIZ, Graciela Inés Bolzon; CORADIN, Vera R. **Normas de procedimentos em estudo de anatomia da madeira: I-Angiospermae, II-Gimnospermae**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, Série Técnica 15, 1991.

MUÑIZ, Graciela Inés Bolzon. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1993. 235 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

NAMKOONG, G.; BAREFOOT, AC.; HITCHINGS, RG. Evaluating control of wood quality through breeding. **TAPPI**, Atlanta, v.52, n.10, p.1935-1938, 1969.

NEVES, José Mangolini. Refinação de pasta celulósica - fatores que influem no processo e que são afetados por esta etapa da preparação de massa. **O Papel**, São Paulo, v.47, n5, p. 35-40, maio 1986.

NILSSEN, T.H. **Paper Mill News**, v.29, n.4, p.6, 1926.

NYLINDER, P.; HÄGGLUND, E. **Meddn. St. Skogforsk Inst.**, v33, n11, 1954a.

NYLINDER, P.; HÄGGLUND, E. **Meddn. St. Skogforsk Inst.**, v.44, n.11, p.184, 1954b.

PAAVILAINEN, L. **Influence of fiber morphology and processing on softwood sulphate pulp fiber and paper properties**". Tese, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 1993.

PAGE, DH. A note on the mechanism of tearing strength. **Tappi Journal**, v77, n.3, p.201-203, march 1994.

PALMER, ER.; GIBBS, JA. Pulping characteristics of the tree of *Pinus caribaea* with different densities grown in Jamaica. **Tropical Products Institute Report**, London, n30, p.1-23, 1973.

PALMER, ER.; TABB, CB. The production of pulp and paper from coniferous species grown in the tropics. **Tropical Science**, London, v.10, n.2, p.79-99, 1968.

PARSONS, S.R. **TAPPI** n.25, p.360, 1942.

PASQUINI, Celio. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of Brazilian Chemical Society**, v.14, n.2, p.198-219, 2003.

PEDINI, M. The variation in the microfibrillar angle within the juvenile wood of Sitka spruce. **IAWA Bulletin**, v.13, n.3, p.261, 1992.

PEREYRA, Obdulio; GELID, Mónica. Estudio de la variabilidad de la densidad basica de la madera de *Pinus taeda* para plantações de misiones y norte de corrientes. **Floresta**, Curitiba, v.33, n.1, jan-abr 2003.

PETERI, R. Pulping studies with African tropical woods. **TAPPI**, v.35, n.4, p.157-160, 1952.

PETROFF, G.; DOAT, J.; TISSOT, M. **Publ. Cent. Tech. for Tres.** 1963.

PETROFF, G; NORMAND, D. **Bull. Ass. Tech. Ind. Pap.** n.5, p.353, 1961.

PILLOW, M.Y.; CHIDESTER, G.H.; BRAY, M.W. **Southern Pulp and Paper Journal** v.4, n.7, p.6, 1941.

RAYMOND, C.A.; SCHIMLECK, L.R. Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**. Canada, v.32, p.170-176, 2002.

RAYMOND, C.A.; SCHIMLECK, L.R.; MUNERI, A.; MICHELL, A.J. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globules* and *E. nitens* for wood properties. III. Predicted pulp yield using near infrared reflectance analysis. **Wood Science and Technology**, v.35, n.3, p.203-215, 2001.

RETULAINEN, E.; EBELING, K. Fibre-fibre bonding and ways of characterizing bond strength. **Appita**, v.46, n.4, p.282-288, jul 1993.

RIALS, Timothy G.; KELLEY, Stephen S.; SO, Chi-Leung. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. **Wood and Fiber Science**, v.34, n.3, p.398-407, July 2002.

RIGATTO, Patrícia Aparecida; DEDECEK, Renato Antônio; MATOS, Joge Luis Monteiro de. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.267-273, 2004.

ROBERTSON, A.A.; MASON, S.G. Wet end factors affecting uniformity of paper. **In** The Formation and Structure of Paper (F. Bolam, ed.):791 B.P.B.M.A., London, 1962. p.639-647.

ROSADO, Sebastião C. da S.; BRUNE, Arno. Crescimento de árvores: estimativa de correlações entre idades diferentes e sua influência na densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.7, n.1, p.11-22, 1983.

RUNKEL, R. Pulp from tropical wood. **TAPPI**, Atlanta, v.35, n.4, p.174-178, 1952.

SANIO, K. Ueber die grösse der holzzellen bei der gemeinen kiefer (*Pinus sylvestris*). **Jahrbuch Wissenschaftlichen Bot.**, n.8, p.401-420, 1872.

SANTOS, CR. **Métodos não convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvore matrizes visando a produção de polpa Kraft – AQ**. Piracicaba, 2000. 117f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.

SAPP, J.E.; GILLESPIE, W.F. **Paper Trade Journal**, v.124, n.9, p.120, 1947.

SARÉN, MP.; SERIMAA, R.; ANDERSSON, S.; PAAKKARI, T.; SARANPÄÄ, P.; PESONEN, E.; Structural variation of tracheids in Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst. **Journal of Structural Biology**, v.136, n.2, p.101-109, 2001.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy. **IAWA Journal** v.23, n.3, p.217-226, 2002.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. **Holzforschung**, v.58, p.66-73, jan 2004.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert; ILLIC, J. Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. Canadá, v.31, n.10, p.1671-1675, 2001a.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert; ILLIC, J.; MATHESON, A.C. Estimation of wood stiffness of increment cores by near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. Canadá, v.32, n.1, p.129-135, 2002b.

SCHIMLECK, Laurence R.; MICHELL, Anthony J. Determination of within-tree variation of kraft pulp yield using near-infrared spectroscopy. **Tappi Journal**, v.81, n.5, p.229-236, 1998.

SCHIMLECK, Laurence R.; MICHELL, Anthony J.; RAYMOND, Carolyn A.; MUNERI, Allie. Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v.29, n.2, p.194-201, 1999.

SCHIMLECK, Laurence R.; MICHELL, Anthony J.; VINDEN, P. Eucalypt wood classification by NIR spectroscopy and principal component analysis. **Appita Journal**, v.49, n.5, p.319-324, 1996.

SCHIMLECK, Laurence R.; WRIGHT, P.J.; MICHELL, Anthony J.; WALLIS, A.F.A. Near-infrared spectra and chemical composition of *Eucalyptus globules* and *E. nitens* plantation woods. **Appita Journal**, v.50, n.1, p.40-45, 1997.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert; ILLIC, J. Application of near infrared spectroscopy to a diverse range of species demonstrating wide density and stiffness variation. **IWA Journal** v.22, n.4, p.415-429, 2001b.

SCHIMLECK, Laurence R.; EVANS, Robert; MATHESON, AC. Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near infrared spectroscopy. **Journal of Wood Science**, v.48, n.2, p.132-137, 2002a.

SCHULTZ, Robert P. **Loblolly pine – the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.)**. USDA Forest Service. Agricultural Handbook 713, 1997. 514p.

SCHULTZ, T.P.; BURNS, D.A. Rapid secondary analysis of lignocellulose: comparison of near infrared (NIR) and fourier transform infrared (FTIR). **Tappi Journal**, v.73, n.5, p.209-212, may 1990.

SCHWARTZ, S.L.; BRAY, M.W. **Paper Trade Journal** v.113, n1, 1941a

SCHWARTZ, S.L.; BRAY, M.W. **Paper Trade Journal**, v.113, n.8, p.33, 1941b.

SCOTT, WE.; ABBOTT, JC.; TROSSET, S. **Properties of paper: an introduction**. TAPPI Press, p.78-81, 1995.

SEFARA, Nelson L.; CONRADIE, Denise; TURNER, Philip. Progress in the use of near-infrared absorption spectroscopy as a tool for the rapid determination of pulp yield in plantation eucalypts. **Tappsa Journal**. Nov. 2000, p. 15-17.

SENFT, JF.; BENDTSEN, BA.; GALLIGAN, WL. Weak wood fast-grown trees make problem lumber. **Journal of Forestry**, v.83, n.8, p.477-484, 1985.

SETH, R.S. The importance of fibre coarseness for pulp properties. In: ANNUAL MEETING, 77, 1991, Montreal. **Proceedings ...** Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1991. p. 251-252.

SILVA Jr., Ergílio Cláudio da. **Chemical pulp beating related to fiber structure**. Ph.D.Tesis SUNY-College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, N.Y. EUA, 1981.

SILVA Jr., Ergílio Cláudio da. Efeitos da moagem nas propriedades das fibras. **O Papel**, v.44, n.11, p. 97-120, nov 1983.

SILVA JÚNIOR, Francides Gomes; McDONOUGH, T.J. Polpação Lo Solids de eucalipto: efeito do ritmo de produção. In 34º Congresso Anual de Celulose e Papel. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 2001, p.69-81.

SILVA JÚNIOR, Francides Gomes; VALLE, Celina Ferraz do; MUNER, João Carlos Gil Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel – VCP. **O Papel**, v.57, n.1, p.35-43, jan 1996.

SILVA, E.L.; WYPYCH, F.; RAMOS, L.P. Caracterização do efeito cumulativo das etapas de branqueamento (O-Q-OP-ZQ-PO) sobre a composição centesimal e estrutura fina de polpas kraft. **CIADICYP**. Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, 2000.

SILVA, PRV. 2002. Histórico da espectroscopia de infravermelho próximo. Disponível <http://www.consultornir.hpg.com.br>. Acesso em 19 de março de 2003.

SMITH, WE.; BYRD, VL. Fiber bonding and tensile stress-strain properties of earlywood and latewood hadsheets. USDA Forest Service. **Forest Products Laboratory Research Paper**, Madison, n.193, p.1-9, 1972.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp and paper technologists**. 2. ed. Vancouver: A. Wilde, 1994. 419p.

SO, Chi-Leung; VIA, Brian K.; GROOM, Leslie H.; SCHIMLECK, Laurence R. et al. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**. Madison, v.54, n.3, p.6-16, mar 2004.

STOCKMAN, L. **Svensk Paperstid**, v.65, n.23, p.978, 1962.

SVEDMAN, Michael; TIKKA, Panu; LUHTANEN, Matti. Effects of softwood morphology and chip thickness on pulping with a displacement kraft batch process. **Tappi Journal**, Atlanta, v.81, n7, p.157-168, jul 1998.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAMOLANG, F.N.; WANGAARD, F.F. Relationships between hardwood fiber characteristics and pulp-sheet properties. **Tappi**, Atlanta, v.44, n.3, p.201-216, mar 1961.

TAPPI Test Methods 1994-1995. Tappi Press, Atlanta, 1994.

TAYLOR, FW.; MOORE, JS. A comparison of earlywood and latewood tracheid lengths of loblolly pine. **Wood and Fiber**, v.13, n.3, p.159-165, 1981.

THOMSON, Sherry L.; GUSTAFSON, Richard R. Effect of kappa number variability on pulp properties. **Tappi Journal**, Atlanta, v.83, n.1, p.157-163, jan 2000.

TREACY, Mary; EVERTSEN, Jos; DHUBHÁIN, Áine Ní. **A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sitka spruce provenances**. Coford Connects 2001. 35p.

TRENDELENBURG, R. **Papierfabricant** 34:389; 44:401; 45:411; 46:421; 47:433, 1936.

UPRICHARD, JM. Pulps from New Zealand grown *Pinus patula* and *P. taeda*. **Appita**, Melbourne, v.24, n.1, p.52-59, 1970.

URIAS, Juan Carlos Tamarit. Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. **Madera y Bosques**, v.2, n.2, p.29-41, 1996.

VAN BUIJTENEN, J.P.; JORANSON, P.N.; EINSPAHR, D.W. **TAPPI**, v.41, n.4, p.170, 1958.

VAN BUIJTENEN, JP. Controlling wood properties by forest management. **TAPPI**, Atlanta, v.52, n.2, p.257-259, 1969.

VAN DEN AKKER, J.A.; LATHROP, A.L.; VOELKER, M.H.; DEARTH, L.R. **TAPPI** v.41, n.8, p.412,416, 1958.

VIA, Brian K. **Modeling longleaf pine (*Pinus palustris* Mill) wood properties using near infrared spectroscopy**. Tese. School of Renewable Natural Resources. Louisiana State University, 2004.

VILARS, J. **Papeterie** 72(9):455; 10(523), 1950.

VON KOEPPEN, A. **TAPPI**, v.41, n.8, p.460, 1958.

VON KOEPPEN, A.; COHEN, W.E. **Australian Journal of Applied Science**, v.6, n.1, p.105, 1955.

WAHLBERG, T.K. **Svenks Papperstid**, v.16, p.124, 173, 1953.

WALKER, JCF. **Primary wood processing: principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. 595p.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita Journal** n.49, p.427-432, 1966a.

WALLIS, A.F.A.; WEARNE, R.H.; WRIGHT, P.J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal** n.49, p.258-262, 1966b.

WANGAARD, F.F **TAPPI**, v.45, n.7, p.548, 1962.

WATSON A.J. **Appita**, v.14, n.4, p144, 1961.

WATSON, AJ.; DADSWELL, HE. Influence of fibre morphology on paper properties – Part 1. Fibre length. **APPITA**, Carlton, v.14, n.5, p. 168-178, mar. 1961.

WATSON, AJ.; DADSWELL, HE. Influence of fibre morphology on paper properties – Part II. Early wood and late wood. **APPITA**, Carlton, v.15, n.6, p. 116-128, may 1962.

WATSON, AJ.; DADSWELL, HE. Influence of fiber morphology on paper properties. 3. Length: diameter (L/D) ratio. 4. Micelar spiral angle. **Appita**, Melbourne, v.17, n.6, p.146-180, 1964.

WATSON, AJ.; HIGGINGS, HG.; SMITH, WJ. The pulping and papermaking properties of conifers from Queensland. CSIRO. **Division of Forest Products Technological Paper**, Melbourne, n.61, p.1-20, 1971.

WATSON, AJ.; HODDER, I.G. **Proc.** Aust. Pulp Pap. Ind. Tech. Ass. 6:290, 1954.

WATSON, AJ.; WARDROP, A.B.; DADSWELL, H.E.; COHEN, W.E **Proc.** Aust. Pulp Pap. Ind. Tech. Ass. 6:243, 1952.

WEHR, TFA. **Variações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimento Kraft**. Piracicaba, 1991. 84f. Dissertação. (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.

WHEELER, Elizabeth. **Wood anatomy and properties**. Disponível em <http://legacy.ncsu.edu/WPS202/syllabus.html>. Acesso em 02 de abril de 2005.

WHEELER, EY.; ZOBEL, BJ.; WEEKS, DL. Tracheid length and diameter variation in the bole of loblolly pine. **TAPPI Journal**, v.49, n.11, p.484-490, 1966.

WODZICKI, TJ. Natural factors affecting wood structure. **Wood Science and Technology**, v.35, n.1, p.5-26, 2001.

WODZICKI, TJ; ZAJACZKOWSKI, S. Variation of seasonal cambial activity and xylem differentiation in a selected population of *Pinus sylvestris* L. **Folia Forestalia Polonica**, Series A, v.25, p.5-23, 1983.

WRIGHT, Jeff A.; BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Prediction of pulp yield and cellulose content from wood samples using near infrared reflectance spectroscopy. **Tappi Journal**, v.73, n.8, p.164-166, 1990.

WRIGHT, Jeff A.; JAMEEL, Hasan; DVORAK, William. Laboratory kraft pulping of juvenile tropical pines: *Pinus patula*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi* and *P. chiapensis*. **Tappi Journal**, v.79, n.4, p.187-191, apr 1996.

WRIGHT, Jeff A.; SLUIS-CRÉMER, H. J. Tracheid morphology and pulp and paper strength traits of *Pinus taeda* and *P. patula* at age 17 years in South Africa. **Tappi Journal**, Midland, v.75, n.5, p.183 – 187, 1992.

YEH, Ting-Feng; CHANG, Hou-min; KADLA, John F. Rapid prediction of solid wood lignin content using transmittance near-infrared spectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.52, n.6, p.1435-1439, 2004.

YOUNG, J.H. **Pulp and paper: chemistry and chemical technology**. 3 ed., New York: John Wiley & sons, 1980. 1446p. Cap. 6: Fiber preparation and approach flow.

ZOBEL, B.; BLAIR, R. Wood and pulp properties o juvenile wood and topwood of the southern pines. **Applied Polymer Symposium** v.28, p.421-433, 1976.

ZOBEL, BJ.; JETT, JB. **Genetics of wood production**. Springer Series of Wood Science. New York: Springer-Verlag, 1995. 337p.

ZOBEL, BJ.; KELLISON, RC.; MATTHIAS, MF.; HATCHER, AV. Wood density of the southern pines. **Tech. Bull. 208**. St. Paul, MN:USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1972, 56p.

ANEXOS

Anexo 1 - DADOS DENDROMÉTRICOS

continua

Idade	Região	Talhão	DAP (cm)	Classes	Nº Árvore	N UFPR	Altura Total (m)	Alt Comercial (m)	D Comercial (cm)
10	22	54	18,4	1	1	17	17,91	12,71	7,8
10	22	54	16,5	1	2	18	17,57	10,06	8,0
10	22	54	19,3	2	3	19	19,34	14,54	8,0
10	22	54	20,9	2	4	20	19,40	14,69	8,0
10	22	54	19,2	1	5	21	18,84	12,86	8,2
10	22	54	23,2	3	6	22	19,00	14,36	7,8
10	22	54	23,1	3	7	23	19,63	15,11	8,2
10	22	54	24,6	3	8	24	22,20	15,00	8,0
10	22	54	23,6	3	9	25	18,7	14,18	8,10
10	22	54	22,6	3	10	26	18,0	13,59	8,00
10	22	54	21,6	3	11	27	18,6	14,14	8,10
10	22	54	26,1	4	12	28	19,60	15,65	8,0
10	22	54	26,2	4	13	29	19,0	14,54	7,60
10	22	54	25,9	4	14	30	19,8	15,21	7,80
10	22	54	28,6	5	15	31	20,44	15,94	8,1
10	22	54	31,1	5	16	32	20,76	17,38	8,4
11	17	30	18,4	1	1	33	18,7	14,36	8,00
11	17	30	15,6	1	2	34	18,3	11,68	8,00
11	17	30	18,7	2	3	35	17,5	12,65	8,00
11	17	30	19,4	2	4	36	18,8	13,96	8,00
11	17	30	18,7	2	5	37	17,9	13,09	8,50
11	17	30	23	3	6	38	18,9	14,10	8,00
11	17	30	23,5	3	7	39	20,1	15,61	8,00
11	17	30	21,3	3	8	40	19,9	15,20	8,00
11	17	30	23	3	9	41	19,8	15,78	8,00
11	17	30	20,5	3	10	42	18,9	14,30	7,80
11	17	30	21,4	3	11	43	18,5	13,89	7,70
11	17	30	24,7	4	12	44	20,2	16,09	8,00
11	17	30	24,1	4	13	45	18,9	14,46	8,00
11	17	30	24,3	4	14	46	19,1	15,29	8,20
11	17	30	25,9	5	15	47	20,2	16,19	8,00
11	17	30	25,9	5	16	48	19,4	15,43	8,00
12	16	109	15,6	1	1	49	17,3	9,34	8,00
12	16	109	16,8	1	2	50	17,5	7,79	8,00
12	16	109	21,4	2	3	51	19,0	14,70	7,90
12	16	109	20,8	2	4	52	19,9	15,20	8,00
12	16	109	20,9	2	5	53	19,2	13,73	8,00
12	16	109	22,1	3	6	54	21,2	16,09	8,00
12	16	109	22,4	3	7	55	21,1	15,59	8,00
12	16	109	23,8	3	8	56	20,5	16,16	8,30
12	16	109	22,2	3	9	57	20,2	15,17	7,80
12	16	109	22,4	3	10	58	21,2	16,48	7,60
12	16	109	24,3	3	11	59	20,5	15,16	8,50
12	16	109	26,4	4	12	60	21,5	17,04	8,00
12	16	109	25,1	4	13	61	21,1	17,14	7,70
12	16	109	26,2	4	14	62	20,8	15,86	7,90
12	16	109	32,4	5	15	63	22,0	17,75	8,60
12	16	109	27,9	5	16	64	20,2	16,18	8,10
14	16	80	16,5	1	1	65	21,7	15,61	8,00
14	16	80	16,8	1	2	66	19,7	13,24	8,00
14	16	80	19,4	2	3	67	22,2	16,28	8,00
14	16	80	19,8	2	4	68	22,0	16,09	8,00
14	16	80	18,8	2	5	69	21,1	14,88	8,00
14	16	80	24	3	6	70	23,0	17,89	7,90
14	16	80	21,2	3	7	71	22,8	17,05	8,00
14	16	80	21,1	3	8	72	22,3	17,66	8,00

Anexo 1 - DADOS DENDROMÉTRICOS

conclusão

Idade	Região	Talhão	DAP (cm)	Classes	Nº Árvore	N UFPR	Altura Total (m)	Alt Comercial (m)	D Comercial (cm)
14	16	80	22,3	3	9	73	22,8	18,17	8,00
14	16	80	24,1	3	10	74	22,7	18,10	7,90
14	16	80	22	3	11	75	21,7	17,31	8,00
14	16	80	24,8	4	12	76	23,5	19,16	7,50
14	16	80	26	4	13	77	23,1	19,17	8,00
14	16	80	25,1	4	14	78	22,2	18,35	7,90
14	16	80	28,2	5	15	79	23,9	19,97	8,00
14	16	80	30,9	5	16	80	23,9	19,40	8,00
15	2	174	18,7	1	1	81	23,6	15,34	8,00
15	2	174	20,6	1	2	82	24,7	18,29	7,90
15	2	174	21,8	2	3	83	26,7	20,55	8,00
15	2	174	22,6	2	4	84	24,6	18,47	7,80
15	2	174	21,1	2	5	85	24,0	17,76	8,00
15	2	174	25,3	3	6	86	26,6	21,07	8,20
15	2	174	25,6	3	7	87	27,9	22,70	7,80
15	2	174	26,4	3	8	88	28,4	23,81	7,60
15	2	174	23,4	3	9	89	26,2	20,60	7,90
15	2	174	24,1	3	10	90	27,3	22,20	8,00
15	2	174	25	3	11	91	25,07	19,08	8,00
15	2	174	27,6	4	12	92	28,3	23,92	8,00
15	2	174	29,3	4	13	93	27,0	22,81	7,70
15	2	174	29	4	14	94	28,1	23,81	8,00
15	2	174	35,2	5	15	95	28,6	23,45	7,80
15	2	174	30	5	16	96	27,9	23,27	8,10
16	7	30	17,9	1	1	97	23,46	16,46	8,40
16	7	30	18,3	1	2	98	23,11	16,07	8,00
16	7	30	21,3	2	3	99	24,34	19,16	8,00
16	7	30	21,3	2	4	100	23,89	18,59	8,00
16	7	30	21,7	2	5	101	25,00	19,70	8,00
16	7	30	24,6	3	6	102	25,39	21,21	7,70
16	7	30	25,1	3	7	103	25,48	21,64	8,00
16	7	30	25,3	3	8	104	24,91	21,18	7,40
16	7	30	24,7	3	9	105	25,40	21,10	8,50
16	7	30	23,2	3	10	106	25,07	21,14	8,00
16	7	30	24,3	3	11	107	26,26	22,17	7,40
16	7	30	27	4	12	108	25,19	21,34	7,60
16	7	30	26,6	4	13	109	25,96	21,70	8,00
16	7	30	26,6	4	14	110	25,26	20,99	8,00
16	7	30	33,3	5	15	111	26,41	22,12	8,00
16	7	30	28,8	5	16	112	25,62	22,14	8,50
17	5	116	20,1	1	1	113	22,55	14,16	8,00
17	5	116	20,2	1	2	114	24,70	15,48	8,00
17	5	116	23,7	2	3	115	29,29	24,04	8,00
17	5	116	23,9	2	4	116	28,63	23,65	8,30
17	5	116	22,9	2	5	117	27,07	21,32	8,00
17	5	116	27,8	3	6	118	29,55	23,77	8,00
17	5	116	26,7	3	7	119	29,03	24,14	8,30
17	5	116	28,3	3	8	120	28,99	24,69	7,80
17	5	116	25,2	3	9	121	27,34	22,47	8,20
17	5	116	26	3	10	122	29,51	24,94	7,70
17	5	116	25	3	11	123	28,21	22,80	7,80
17	5	116	28,9	4	12	124	29,91	25,84	7,60
17	5	116	29,4	4	13	125	30,26	25,00	8,30
17	5	116	29,7	4	14	126	29,95	25,94	8,00
17	5	116	30,9	5	15	127	30,26	25,92	8,00
17	5	116	31,8	5	16	128	30,07	25,65	8,00

Anexo 2 - DENSIDADE DA MADEIRA, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E ÍNDICES INDICATIVOS DA QUALIDADE DA POLPA CELULÓSICA continua

Idade	N UFPR	Densidade (g/cm3)	C (um)	D lume (um)	D traq (um)	Esp. par (um)	CF (%)	FP (%)	IE	IR	IB	IM
10	17	0,3324	3942,11	28,80	47,03	9,12	61,2433	38,7668	83,8153	0,6330	0,4545	0,6249
10	18	0,3197	2986,67	21,60	38,84	8,62	55,6128	44,3872	76,8967	0,7981	0,5276	0,6907
10	19	0,3452	3513,56	23,42	39,38	7,98	59,4718	40,5282	89,2218	0,6815	0,4774	0,6463
10	20	0,3423	3627,65	24,67	41,79	8,56	59,0242	40,9758	86,8004	0,6942	0,4833	0,6516
10	21	0,3247	3461,81	26,39	42,98	8,30	61,3921	38,6079	80,5447	0,6289	0,4525	0,6231
10	22	0,3362	3462,17	26,12	38,40	6,14	68,0113	31,9887	90,1508	0,4703	0,3675	0,5374
10	23	0,3428	3527,78	27,65	38,83	5,59	71,2152	28,7848	90,8546	0,4042	0,3270	0,4928
10	24	0,3506	3726,00	25,84	38,23	6,20	67,5827	32,4173	97,4510	0,4797	0,3729	0,5433
10	25	0,3292	3629,56	24,32	33,90	4,79	71,7485	28,2515	107,0668	0,3938	0,3203	0,4852
10	26	0,2966	3235,68	25,74	36,20	5,23	71,1172	28,8828	89,3884	0,4061	0,3282	0,4942
10	27	0,3362	3469,33	23,72	34,58	5,43	68,5899	31,4101	100,3250	0,4579	0,3601	0,5295
10	28	0,3205	3339,88	28,75	38,98	5,11	73,7695	26,2305	85,6886	0,3556	0,2952	0,4558
10	29	0,3430	3224,77	28,80	37,88	4,54	76,0283	23,9717	85,1425	0,3153	0,2674	0,4220
10	30	0,3315	3241,38	30,62	40,64	5,01	75,3454	24,6546	79,7615	0,3272	0,2758	0,4323
10	31	0,3511	3289,00	28,29	39,64	5,68	71,3495	28,6505	82,9658	0,4016	0,3253	0,4909
10	32	0,3175	3313,20	27,30	41,09	6,90	66,4376	33,5624	80,6304	0,5052	0,3875	0,5586
11	33	0,3595	3042,40	25,67	36,43	5,38	70,4483	29,5517	83,5059	0,4195	0,3366	0,5037
11	34	0,3451	2583,60	22,60	36,00	6,70	62,7778	37,2222	71,7667	0,5929	0,4346	0,6059
11	35	0,3226	2968,20	27,13	39,90	6,38	68,0033	31,9967	74,3910	0,4705	0,3676	0,5376
11	36	0,3334	3530,40	26,40	36,75	5,17	71,8433	28,1567	96,0740	0,3919	0,3191	0,4839
11	37	0,3409	3150,53	27,07	39,63	6,28	68,2927	31,7073	79,4920	0,4643	0,3639	0,5336
11	38	0,3553	3044,60	25,80	36,00	5,10	71,6667	28,3333	84,5722	0,3953	0,3213	0,4864
11	39	0,3529	3453,13	25,97	39,17	6,60	66,2979	33,7021	88,1651	0,5083	0,3893	0,5605
11	40	0,3123	3601,60	28,07	38,53	5,23	72,8374	27,1626	93,4671	0,3729	0,3067	0,4695
11	41	0,3508	3083,55	29,00	40,45	5,73	71,6934	28,3066	76,2311	0,3948	0,3210	0,4860
11	42	0,3490	3382,40	23,07	35,77	6,35	64,4921	35,5079	94,5685	0,5506	0,4125	0,5841
11	43	0,3529	3538,53	26,33	36,27	4,97	72,6103	27,3897	97,5699	0,3772	0,3096	0,4728
11	44	0,3238	3256,60	25,10	35,35	5,13	71,0042	28,9958	92,1245	0,4084	0,3296	0,4958
11	45	0,3823	2916,70	25,78	40,30	7,26	63,9578	36,0422	72,3747	0,5635	0,4194	0,5909
11	46	0,3502	3114,30	28,75	42,98	7,11	66,8994	33,1006	72,4677	0,4948	0,3816	0,5524
11	47	0,3697	3539,00	27,38	40,68	6,65	67,3018	32,6982	87,0068	0,4858	0,3765	0,5470
11	48	0,3445	3003,65	22,40	37,30	7,45	60,0536	39,9464	80,5268	0,6652	0,4699	0,6394
12	49	0,3436	3305,00	23,50	37,50	7,00	62,6667	37,3333	88,1333	0,5957	0,4360	0,6073
12	50	0,3353	3475,60	27,30	40,35	6,53	67,6580	32,3420	86,1363	0,4780	0,3720	0,5422
12	51	0,3495	3261,33	29,13	41,73	6,30	69,8083	30,1917	78,1470	0,4325	0,3447	0,5127
12	52	0,3293	3152,40	21,13	34,97	6,92	60,4385	39,5615	90,1544	0,6546	0,4649	0,6347
12	53	0,3748	3236,27	32,53	45,53	6,50	71,4495	28,5505	71,0747	0,3996	0,3241	0,4895
12	54	0,3854	3142,86	26,43	39,95	6,76	66,1452	33,8548	78,6698	0,5118	0,3913	0,5625

Anexo 2 - DENSIDADE DA MADEIRA, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E ÍNDICES INDICATIVOS DA QUALIDADE DA POLPA CELULÓSICAcontinuação

Idade	N UFPR	Densidade (g/cm3)	C (um)	D lume (um)	D traq (um)	Esp. par (um)	CF (%)	FP (%)	IE	IR	IB	IM
12	55	0,3876	2984,50	24,95	39,05	7,05	63,8924	36,1076	76,4277	0,5651	0,4202	0,5918
12	56	0,3707	3030,25	27,60	39,65	6,03	69,6091	30,3909	76,4250	0,4366	0,3472	0,5155
12	57	0,3886	3449,00	26,53	37,23	5,35	71,2559	28,7441	92,6528	0,4034	0,3265	0,4923
12	58	0,3948	3092,13	24,67	38,53	6,93	64,0138	35,9862	80,2457	0,5622	0,4187	0,5902
12	59	0,3901	3073,70	25,50	39,28	6,89	64,9268	35,0732	78,2610	0,5402	0,4069	0,5785
12	60	0,3741	3659,20	25,43	37,93	6,25	67,0402	32,9598	96,4852	0,4916	0,3798	0,5506
12	61	0,3643	3417,40	25,95	37,83	5,94	68,6054	31,3946	90,3477	0,4576	0,3599	0,5293
12	62	0,3533	3639,80	28,78	40,30	5,76	71,4020	28,5980	90,3176	0,4005	0,3247	0,4902
12	63	0,3558	3025,36	27,00	39,38	6,19	68,5627	31,4373	76,8248	0,4585	0,3605	0,5299
12	64	0,3257	3079,90	30,63	39,78	4,58	76,9956	23,0044	77,4331	0,2988	0,2556	0,4072
14	65	0,3845	3681,20	28,10	42,85	7,38	65,5776	34,4224	85,9090	0,5249	0,3986	0,5700
14	66	0,3478	3920,40	26,95	37,95	5,50	71,0145	28,9855	103,3043	0,4082	0,3295	0,4957
14	67	0,3877	3831,07	24,30	37,27	6,48	65,2057	34,7943	102,8014	0,5336	0,4033	0,5748
14	68	0,3728	3653,07	28,03	39,87	5,92	70,3177	29,6823	91,6321	0,4221	0,3383	0,5055
14	69	0,4002	3389,73	25,90	37,10	5,60	69,8113	30,1887	91,3675	0,4324	0,3447	0,5126
14	70	0,3705	3204,05	23,15	35,20	6,03	65,7670	34,2330	91,0241	0,5205	0,3961	0,5675
14	71	0,3722	3383,20	25,90	37,73	5,92	68,6396	31,3604	89,6608	0,4569	0,3595	0,5289
14	72	0,3655	3208,80	26,17	37,70	5,77	69,4076	30,5924	85,1141	0,4408	0,3498	0,5183
14	73	0,3624	3086,55	25,50	37,33	5,91	68,3188	31,6812	82,6939	0,4637	0,3636	0,5333
14	74	0,3837	3082,15	26,83	39,13	6,15	68,5623	31,4377	78,7770	0,4585	0,3605	0,5299
14	75	0,3945	3685,01	26,23	39,33	6,55	66,6949	33,3051	93,6868	0,4994	0,3843	0,5552
14	76	0,3739	3815,20	27,43	39,70	6,14	69,0806	30,9194	96,1008	0,4476	0,3539	0,5228
14	77	0,3601	3174,26	28,28	39,70	5,71	71,2217	28,7783	79,9562	0,4041	0,3269	0,4927
14	78	0,3765	3744,40	26,25	39,55	6,65	66,3717	33,6283	94,6751	0,5067	0,3884	0,5595
14	79	0,3418	3210,68	31,18	44,24	6,53	70,4792	29,5208	72,5741	0,4189	0,3362	0,5033
14	80	0,3591	3454,56	28,60	38,46	4,93	74,3630	25,6370	89,8222	0,3448	0,2878	0,4470
15	81	0,3421	3194,00	28,20	42,87	7,33	65,7854	34,2146	74,5101	0,5201	0,3959	0,5672
15	82	0,3594	3871,73	23,37	36,13	6,38	64,6679	35,3321	107,1513	0,5464	0,4102	0,5818
15	83	0,3618	3697,80	25,28	36,93	5,83	68,4496	31,5504	100,1435	0,4609	0,3619	0,5315
15	84	0,3236	2838,60	23,15	37,40	7,13	61,8984	38,1016	75,8984	0,6156	0,4460	0,6169
15	85	0,3392	3452,00	25,73	36,60	5,43	70,3097	29,6903	94,3169	0,4223	0,3384	0,5057
15	86	0,3339	3547,20	26,30	37,05	5,38	70,9852	29,0148	95,7409	0,4087	0,3299	0,4961
15	87	0,3744	3441,50	24,60	35,58	5,49	69,1497	30,8503	96,7393	0,4461	0,3530	0,5218
15	88	0,3352	3081,81	27,40	41,60	7,10	65,8654	34,1346	74,0819	0,5182	0,3949	0,5662
15	89	0,3592	3179,00	28,63	40,50	5,94	70,6790	29,3210	78,4938	0,4148	0,3337	0,5004
15	90	0,3897	3146,20	23,83	35,95	6,06	66,2726	33,7274	87,5160	0,5089	0,3897	0,5608
15	91	0,3482	3216,35	30,48	42,18	5,85	72,2584	27,7416	76,2620	0,3839	0,3139	0,4779
15	92	0,3451	3784,20	25,83	37,35	5,76	69,1432	30,8568	101,3173	0,4463	0,3531	0,5219

Anexo 2 - DENSIDADE DA MADEIRA, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E ÍNDICES INDICATIVOS DA QUALIDADE DA POLPA CELULÓSICA conclusão

Idade	N UFPR	Densidade (g/cm3)	C (um)	D lume (um)	D traq (um)	Esp. par (um)	CF (%)	FP (%)	IE	IR	IB	IM
15	93	0,3412	3390,87	30,38	40,42	5,02	75,1753	24,8247	83,8977	0,3302	0,2778	0,4349
15	94	0,3711	3353,13	27,40	38,20	5,40	71,7277	28,2723	87,7784	0,3942	0,3206	0,4855
15	95	0,3718	3523,43	25,01	35,97	5,48	69,5393	30,4607	97,9508	0,4380	0,3481	0,5164
15	96	0,3664	3418,93	26,27	35,77	4,75	73,4390	26,5610	95,5899	0,3617	0,2993	0,4607
16	97	0,3611	3203,20	28,20	39,28	5,54	71,7923	28,2077	81,5479	0,3929	0,3198	0,4846
16	98	0,3643	3160,53	26,30	39,83	6,77	66,0251	33,9749	79,3439	0,5146	0,3928	0,5641
16	99	0,3585	3491,73	25,33	38,10	6,38	66,4917	33,5083	91,6465	0,5039	0,3869	0,5579
16	100	0,3764	3065,40	24,33	36,58	6,13	66,5072	33,4928	83,8113	0,5036	0,3867	0,5577
16	101	0,3487	3529,00	24,90	36,78	5,94	67,7090	32,2910	95,9619	0,4769	0,3713	0,5415
16	102	0,3673	3631,68	26,02	35,76	4,87	72,7629	27,2371	101,5570	0,3743	0,3077	0,4706
16	103	0,3736	3980,90	23,80	36,43	6,31	65,3397	34,6603	109,2903	0,5305	0,4016	0,5731
16	104	0,3584	3785,40	23,08	36,30	6,61	63,5675	36,4325	104,2810	0,5731	0,4244	0,5959
16	105	0,3499	3759,20	22,15	35,10	6,48	63,1054	36,8946	107,0997	0,5847	0,4304	0,6018
16	106	0,3866	3258,80	27,45	42,53	7,54	64,5503	35,4497	76,6326	0,5492	0,4118	0,5833
16	107	0,3968	3181,92	20,02	34,22	7,10	58,5038	41,4962	92,9842	0,7093	0,4900	0,6577
16	108	0,3745	4094,32	26,80	39,38	6,29	68,0549	31,9451	103,9695	0,4694	0,3669	0,5369
16	109	0,3992	3418,24	24,56	35,86	5,65	68,4886	31,5114	95,3218	0,4601	0,3614	0,5309
16	110	0,3760	3570,24	23,02	35,42	6,20	64,9915	35,0085	100,7973	0,5387	0,4061	0,5776
16	111	0,3473	3309,00	24,22	35,12	5,45	68,9606	31,0394	94,2288	0,4501	0,3554	0,5244
16	112	0,3765	3225,60	28,70	38,88	5,09	73,8169	26,1831	82,9630	0,3547	0,2946	0,4551
17	113	0,3349	3285,57	25,81	41,23	7,71	62,6061	37,3939	79,6854	0,5973	0,4368	0,6080
17	114	0,3104	2907,60	28,40	42,47	7,03	66,8760	33,1240	68,4678	0,4953	0,3819	0,5528
17	115	0,3614	3300,60	24,88	39,55	7,34	62,8951	37,1049	83,4539	0,5899	0,4331	0,6044
17	116	0,3361	3653,60	30,05	43,05	6,50	69,8026	30,1974	84,8688	0,4326	0,3448	0,5128
17	117	0,3616	3121,80	28,13	41,95	6,91	67,0441	32,9559	74,4172	0,4916	0,3798	0,5505
17	118	0,3881	3076,86	24,65	39,45	7,40	62,4842	37,5158	77,9939	0,6004	0,4384	0,6096
17	119	0,3601	3129,60	27,28	40,22	6,47	67,8270	32,1730	77,8120	0,4743	0,3698	0,5400
17	120	0,3577	3264,00	29,50	42,22	6,36	69,8721	30,1279	77,3093	0,4312	0,3439	0,5118
17	121	0,3633	3583,60	28,40	38,43	5,01	73,9102	26,0898	93,2622	0,3530	0,2934	0,4537
17	122	0,3847	3067,20	27,30	39,96	6,33	68,3156	31,6844	76,7537	0,4638	0,3636	0,5333
17	123	0,3842	3513,90	26,73	41,38	7,33	64,5921	35,4079	84,9281	0,5482	0,4112	0,5828
17	124	0,3820	2946,24	26,76	39,28	6,26	68,1263	31,8737	75,0061	0,4679	0,3660	0,5359
17	125	0,3481	3401,12	28,66	41,74	6,54	68,6632	31,3368	81,4835	0,4564	0,3592	0,5285
17	126	0,3431	3579,28	26,5	39,44	6,47	67,1907	32,8093	90,7525	0,4883	0,3779	0,5485
17	127	0,3744	3683,68	25,58	39,08	6,75	65,4555	34,5445	94,2600	0,5278	0,4001	0,5716
17	128	0,3488	3553,87	24,77	37,33	6,28	66,3393	33,6607	95,1929	0,5074	0,3888	0,5599

Anexo 3 - RENDIMENTO, NÚMERO KAPPA, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PAPEL

continua

N UFPR	Idade	Nº Kappa	Rend. (%)	Álcali refino (min)	freeness	Gramatura (g/m2)	Espessura (um)	dea (g/cm3)	vea (cm3/g)	Índice de Rasgo (mN.m2/g)	Índice de Arreb (kPa.m2/g)	CAR (km) (km)	Índice de Tração (N.m/g)
17	10	111,40	56,70	14,50	60	499,60	84,76	127,720	0,651	1,537	10,6948	5,2671	68,4033
18	10	101,40	54,40	14,50	64	612,40	75,24	128,104	0,597	1,701	12,7274	5,9715	71,1378
19	10	96,70	56,80	14,50	66	611,00	83,68	154,008	0,553	1,842	14,7179	5,6951	67,0904
20	10	91,50	52,80	14,50	65	632,20	81,96	147,256	0,566	1,799	15,8730	6,4580	72,4671
21	10	92,20	52,60	14,50	71	640,60	81,90	153,224	0,546	1,874	14,7895	5,5341	68,6343
22	10	99,10	56,40	14,50	71	644,40	81,76	155,528	0,538	1,902	15,3517	5,7508	63,4006
23	10	104,90	56,10	14,50	65	613,80	79,52	141,424	0,572	1,775	12,8606	5,5264	68,9595
24	10	105,40	56,40	14,50	64	619,20	83,66	155,408	0,546	1,858	14,9801	5,3744	64,2045
25	10	107,20	55,10	14,50	65	639,20	78,92	134,624	0,593	1,707	13,1908	6,8756	73,2677
26	10	108,60	55,60	14,50	66	657,00	79,16	140,144	0,573	1,770	13,1854	6,7539	76,1803
27	10	103,90	57,10	14,50	69	642,20	80,86	152,872	0,540	1,893	15,2834	5,8230	66,1108
28	10	102,20	55,70	14,50	69	618,00	78,60	142,248	0,563	1,815	13,8968	6,0002	68,0057
29	10	106,00	56,50	14,50	70	643,80	80,74	148,240	0,555	1,835	13,2049	5,7764	69,4920
30	10	101,00	56,50	14,50	72	632,40	82,52	149,464	0,565	1,808	14,7369	5,9887	71,0031
31	10	105,00	53,10	14,50	72	636,60	80,30	140,312	0,581	1,751	13,2112	6,4147	71,5855
32	10	92,30	54,70	14,50	72	626,00	80,96	149,040	0,557	1,838	15,3443	6,0179	70,0059
33	11	91,90	53,70	14,50	58	571,20	79,60	130,824	0,614	1,645	12,1840	6,5755	75,5193
34	11	91,80	54,70	14,50	60	617,60	81,58	135,064	0,623	1,655	13,6093	6,4187	73,8356
35	11	101,30	54,80	14,50	64	595,80	77,60	133,568	0,589	1,722	12,3246	6,2381	71,8257
36	11	103,90	55,30	14,50	68	588,20	80,88	146,376	0,568	1,811	12,9418	5,2785	65,7869
37	11	86,10	54,70	14,50	61	544,60	80,20	128,864	0,628	1,608	12,3544	7,7319	78,4766
38	11	98,20	53,30	14,50	66	630,40	80,14	139,304	0,589	1,741	14,6095	6,3050	68,3793
39	11	92,00	55,10	14,50	59	537,20	82,64	144,736	0,580	1,756	12,3923	4,3013	54,5094
40	11	101,10	53,00	14,50	65	623,60	84,80	163,016	0,527	1,927	15,2263	5,5224	67,0656
41	11	100,30	56,50	14,50	90	750,00	82,30	137,584	0,603	1,673	16,2718	6,4038	76,4527
42	11	102,20	55,10	14,50	61	528,00	80,86	133,872	0,609	1,656	12,9358	5,4282	67,1851
43	11	107,50	55,00	14,50	70	630,40	83,48	151,240	0,566	1,811	14,5040	5,3738	66,1846
44	11	103,80	55,40	14,50	69	607,00	77,44	122,824	0,639	1,589	12,0633	6,4341	80,2558
45	11	96,00	53,70	14,50	59	563,20	82,04	134,584	0,614	1,641	14,1303	6,3510	74,3665
46	11	98,80	54,60	14,50	65	632,80	83,20	149,776	0,561	1,801	16,0949	5,9552	66,5851
47	11	99,00	54,90	14,50	65	618,00	81,36	142,504	0,579	1,750	14,4949	5,5375	65,6560
48	11	102,30	53,80	14,50	65	604,40	81,98	141,952	0,586	1,732	12,9469	6,2748	72,7040
49	12	106,00	56,20	14,50	65	619,80	81,94	138,248	0,601	1,685	13,7667	6,2994	72,4648
50	12	101,00	56,10	14,50	65	594,80	75,78	128,480	0,595	1,696	13,3665	5,8057	65,8100
51	12	109,90	59,50	14,50	71	653,60	83,36	162,040	0,526	1,937	14,9832	5,0737	59,0562
52	12	112,80	59,10	14,50	68	574,40	77,76	145,896	0,544	1,873	12,7125	4,8071	57,8614
53	12	87,70	52,00	14,50	61	551,60	78,46	124,760	0,633	1,591	12,1918	6,0908	71,9657

Anexo 3 - RENDIMENTO, NÚMERO KAPPA, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PAPEL

continuação

N UFPR	Idade	Nº Kappa	Rend. (%)	Álcali (min)	refino	freeness	Gramatura (g/m2)	Espessura (um)	dea (g/cm3)	vea (cm3/g)	Índice de Rasgo (mN.m2/g)	Índice de Arreb (kPa.m2/g)	CAR (km) (km)	Índice de Tração (N.m/g)
54	12	87,00	54,40	14,50	64	613,60	81,80	138,024	0,597	1,687	14,9852	6,1350	7,4209	72,7739
55	12	109,60	57,50	14,50	62	575,80	86,08	156,792	0,559	1,823	13,4536	4,3438	5,9970	58,8102
56	12	108,50	59,50	14,50	68	645,80	83,64	164,560	0,519	1,969	15,3915	4,4659	5,4582	53,5270
57	12	106,00	59,30	14,50	65	604,60	81,04	160,632	0,519	1,978	14,4093	4,2352	5,4714	53,6559
58	12	98,80	57,10	14,50	62	623,40	82,00	154,064	0,538	1,878	15,7094	5,0952	6,5625	64,3566
59	12	106,40	58,80	14,50	58	564,00	80,40	133,640	0,607	1,662	13,8718	5,6713	7,2313	70,9144
60	12	102,80	57,80	14,50	61	615,20	84,42	159,512	0,541	1,887	14,5045	4,7386	7,3789	72,3620
61	12	106,50	57,90	14,50	61	559,60	83,18	140,880	0,597	1,695	13,0133	5,1800	7,5811	74,3455
62	12	112,80	55,20	14,50	59	609,00	81,90	130,536	0,633	1,595	12,2696	6,0420	8,5310	83,6602
63	12	107,90	56,10	14,50	74	644,00	78,84	139,520	0,574	1,765	13,4432	5,5718	7,7868	76,3623
64	12	109,30	59,60	14,50	71	608,40	81,78	143,584	0,585	1,755	13,3913	5,4717	7,4435	72,9956
65	14	94,20	56,90	14,50	62	595,60	84,30	142,408	0,596	1,692	14,5544	5,8796	8,5534	83,8799
66	14	94,70	53,20	14,50	62	613,80	81,46	137,592	0,596	1,691	13,2397	6,3132	8,9690	87,9557
67	14	95,00	53,90	14,50	64	624,20	88,52	171,792	0,523	1,944	17,4399	4,7777	7,0593	69,2283
68	14	96,60	54,00	14,50	68	632,60	81,74	146,040	0,566	1,787	16,2555	5,8110	7,9637	78,0974
69	14	105,40	55,90	14,50	68	606,20	79,96	141,744	0,571	1,774	14,2978	6,1351	8,6635	84,9596
70	14	93,00	55,70	14,50	68	608,00	80,80	137,832	0,597	1,705	14,9817	5,8601	8,2916	81,3125
71	14	111,20	58,00	14,50	70	624,20	83,94	165,656	0,517	1,970	15,1720	4,7559	7,0134	68,7779
72	14	111,70	58,10	14,50	74	628,60	80,34	157,600	0,525	1,955	14,6436	4,9575	7,2251	70,8543
73	14	88,50	53,60	14,50	61	580,60	78,86	129,152	0,613	1,641	14,0171	6,8023	9,3233	91,4306
74	14	89,00	54,10	14,50	63	598,80	83,74	145,064	0,585	1,731	16,0725	5,9634	8,5374	83,7235
75	14	93,00	53,30	14,50	68	625,20	82,92	153,392	0,547	1,851	16,1225	5,5088	8,2274	80,6831
76	14	89,30	52,30	14,50	68	631,00	82,68	144,752	0,581	1,755	15,8160	5,7900	8,1892	80,3084
77	14	99,80	55,10	14,50	62	602,80	77,80	135,408	0,581	1,742	14,0545	5,9943	8,5954	84,2922
78	14	106,60	56,80	14,50	68	598,80	79,54	144,264	0,562	1,814	15,3623	5,4274	7,8548	77,0290
79	14	97,70	56,30	14,50	72	656,60	79,82	153,824	0,529	1,935	17,3728	5,5969	7,2867	71,4586
80	14	99,30	53,90	14,50	71	647,40	81,06	150,192	0,551	1,854	15,8268	6,0113	8,2222	80,6325
81	15	102,90	57,10	14,00	69	636,00	78,36	134,496	0,589	1,724	12,5595	6,2233	8,4915	83,2731
82	15	103,40	58,10	14,00	68	604,00	82,52	137,456	0,611	1,666	14,2472	6,4206	8,5212	83,5645
83	15	104,00	57,40	14,00	65	626,00	82,86	162,136	0,521	1,954	15,6996	4,9888	7,7633	76,1323
84	15	107,20	55,80	14,00	68	619,80	80,54	133,584	0,612	1,656	12,8430	6,2510	8,4343	82,7125
85	15	98,30	55,60	14,00	70	626,00	81,68	145,056	0,574	1,778	14,5061	5,8019	7,8352	76,8372
86	15	97,10	57,70	14,00	67	581,80	78,72	145,224	0,554	1,849	14,9700	5,4306	7,6560	75,0797
87	15	99,70	57,80	14,00	64	586,60	79,04	151,904	0,532	1,924	14,7905	4,8673	6,8597	67,2703
88	15	106,10	57,30	14,00	73	652,20	83,02	165,880	0,512	2,000	16,4625	5,6299	7,8270	76,7565
89	15	106,40	58,30	14,00	61	596,80	83,24	136,560	0,613	1,644	12,6162	5,9819	8,5677	84,0202
90	15	111,80	56,80	14,00	61	555,00	83,06	146,040	0,578	1,758	12,6643	5,0349	7,6887	75,4007

Anexo 3 - RENDIMENTO, NÚMERO KAPPA, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PAPEL

conclusão

N UFPR	Idade	N° Kappa	Rend. (%)	Álcali (min)	refino	freeness	Gramatura (g/m2)	Espessura (um)	dea (g/cm3)	vea (cm3/g)	Índice de Rasgo (mN.m2/g)	Índice de Arreb (kPa.m2/g)	CAR (km) (km)	Índice de Tração (N.m/g)
91	15	112,60	58,30	14,00	65	626,20	80,76	142,744	0,573	1,769	12,3678	6,4789	8,5961	84,2994
92	15	113,00	59,20	14,00	70	635,20	84,24	157,440	0,545	1,869	13,4101	5,4055	7,8621	77,1007
93	15	104,70	55,40	14,00	62	567,20	80,82	130,656	0,623	1,619	12,4175	6,3603	9,7055	95,1789
94	15	104,80	57,50	14,00	64	594,00	80,08	132,976	0,608	1,661	12,6508	5,6884	8,8031	86,3286
95	15	104,20	55,20	14,00	66	628,00	83,26	148,896	0,567	1,791	13,8908	5,5956	8,3631	82,0140
96	15	96,00	57,00	14,00	68	626,80	85,96	147,192	0,595	1,712	13,1882	5,5343	8,6032	84,3689
97	16	102,70	55,00	14,00	65	600,40	78,98	125,496	0,637	1,589	12,6105	7,1348	9,5315	93,4719
98	16	96,00	56,00	14,00	64	608,40	85,98	160,024	0,545	1,865	16,4256	5,4645	8,2249	80,6584
99	16	108,00	56,90	14,00	69	623,80	82,66	156,968	0,538	1,898	14,2691	4,7572	6,9990	68,6369
100	16	114,50	57,90	14,00	64	561,00	80,26	146,888	0,555	1,826	13,0796	5,1382	7,5957	74,4886
101	16	103,30	55,50	14,00	61	544,00	81,80	128,848	0,640	1,575	10,7419	6,7990	9,9915	97,9829
102	16	108,50	55,50	14,00	65	605,40	83,44	143,704	0,593	1,711	12,8756	6,1518	9,2706	90,9140
103	16	98,60	57,10	14,00	68	618,40	85,76	163,528	0,533	1,906	16,5104	5,1301	7,6187	74,7137
104	16	101,20	57,60	14,00	69	620,60	81,70	163,408	0,515	2,006	15,8030	5,2373	7,7269	75,7749
105	16	100,50	54,10	14,00	64	595,20	81,40	133,400	0,614	1,642	13,1371	6,7616	9,5523	93,6756
106	16	99,30	57,20	14,00	64	608,60	84,82	157,656	0,546	1,858	16,3478	5,1768	7,5525	74,0645
107	16	105,00	55,90	14,00	64	603,60	85,18	164,272	0,529	1,928	16,2736	4,6091	6,9437	68,0945
108	16	104,00	54,90	14,00	68	639,40	84,08	170,984	0,504	2,039	16,2003	5,0748	7,6279	74,8041
109	16	113,30	56,10	14,00	63	588,40	80,42	134,392	0,605	1,672	12,8293	5,9438	8,5695	84,0382
110	16	105,80	54,50	14,00	62	592,80	81,82	137,280	0,601	1,677	14,7655	5,6304	9,0363	88,6158
111	16	100,10	53,20	14,00	70	619,60	81,00	145,016	0,571	1,795	12,7311	6,2140	7,8556	77,0373
112	16	109,10	58,50	14,00	69	609,20	80,28	161,312	0,510	2,006	17,1132	4,8337	7,1798	70,4097
113	17	109,80	58,50	13,50	59	549,60	80,48	133,712	0,608	1,659	12,2274	5,8173	8,5935	84,2732
114	17	112,40	58,90	13,50	65	612,60	77,62	128,320	0,610	1,653	11,8599	6,3321	8,8939	87,2197
115	17	100,50	56,10	14,00	70	637,80	77,28	143,704	0,544	1,861	15,6884	5,7825	8,1773	80,1924
116	17	101,80	55,70	14,00	72	632,20	83,66	158,400	0,538	1,897	15,2530	5,5359	8,5451	83,7985
117	17	91,50	52,40	14,00	62	584,60	82,98	138,448	0,607	1,671	14,5930	6,3413	9,0972	89,2128
118	17	92,20	53,70	14,00	64	603,80	83,68	139,424	0,606	1,671	13,9795	6,2773	8,7894	86,1942
119	17	94,60	54,00	14,00	74	650,20	84,82	171,896	0,506	2,037	18,3372	4,8287	6,9513	68,1688
120	17	97,60	52,60	14,00	73	631,80	81,92	157,960	0,531	1,932	15,1022	5,0468	7,5613	74,1508
121	17	109,40	59,10	14,00	64	578,60	80,36	136,592	0,595	1,698	12,5910	6,0034	9,1037	89,2764
122	17	113,10	58,80	14,00	61	589,00	83,66	154,024	0,551	1,842	13,1623	5,2712	8,2663	81,0649
123	17	110,30	57,70	14,00	68	623,80	78,18	153,320	0,522	1,956	15,0512	4,7352	7,6591	75,1097
124	17	112,20	59,00	14,00	65	629,80	84,22	160,680	0,535	1,905	15,6855	5,1362	7,6629	75,1471
125	17	112,00	55,70	14,00	62	589,00	80,20	139,152	0,581	1,738	11,8322	5,8642	9,0447	88,6985
126	17	109,50	56,80	14,00	62	588,80	79,14	140,680	0,570	1,778	12,5883	5,6777	8,4675	83,0378
127	17	101,60	56,70	14,00	61	607,00	86,56	170,208	0,519	1,975	15,0624	4,2811	6,8650	67,3223
128	17	103,50	57,70	14,00	65	626,00	80,18	148,392	0,550	1,859	13,7215	5,5724	8,4279	82,6497

ANEXO 4 – ANÁLISES DE VARIÂNCIA E REGRESSÃO.

ANEXO 4.1 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A DENSIDADE.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	0,00309	9,31**	0,000000
Erro	105	0,00033		

** Significativo a 1% de probabilidade.

TESTE DE TUKEY - GRUPOS HOMOGÊNEOS, $\alpha = 0,01$

IDADE	DENSIDADE	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3
10	0,332474	****		
11	0,346577	****	****	
15	0,353882	****	****	****
17	0,358685		****	****
12	0,363931		****	****
16	0,369700			****
14	0,372068			****

ANEXO 4.2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	191478,1577	2,67 ^{ns}	0,018657
Erro	105	71585,8521		

^{ns} = não significativo.

ANEXO 4.3 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A LARGURA DO TRAQUEÓIDE.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	17,0	3,05**	0,008713
Erro	105	5,6		

** = Significativo a 1% de probabilidade

TESTE DE TUKEY – GRUPOS HOMOGÊNEOS, $\alpha = 0,01$

IDADE	LARGURA	GRUPO 1	GRUPO 2
16	37,22188	****	
15	38,15499	****	****
11	38,21854	****	****
14	38,94375	****	****
10	39,27483	****	****
12	39,31073	****	****
17	40,42334		****

ANEXO 4.4 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O DIÂMETRO DO LUME DOS TRAQUEÓIDES.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	7,94	1,63 ^{ns}	0,145453
Erro	105	4,86		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A ESPESSURA DA PAREDE DOS TRAQUEÓIDES.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	1,091	1,413 ^{ns}	0,216527
Erro	105	0,772		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	11,6	0,71 ^{ns}	0,638917
Erro	105	16,2		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA A FRAÇÃO PAREDE .

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	11,6	0,714 ^{ns}	0,638876
Erro	105	16,2		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	281,7	3,52**	0,003243
Erro	105	80,0		

** = Significativo a 1% de probabilidade.

TESTE DE TUKEY – GRUPOS HOMOGÊNEOS, $\alpha = 0,01$

IDADE	ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO	GRUPO 1	GRUPO 2
17	82,22795	****	
12	82,98349	****	****
11	84,01900	****	****
10	87,91901	****	****
15	89,21177	****	****
14	89,31871	****	****
16	93,83980		****

ANEXO 4.9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O ÍNDICE DE RUNKEL.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	0,00638	0,781 ^{ns}	0,586352
Erro	105	0,00817		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O ÍNDICE DE BOILER.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	0,00189	0,722 ^{ns}	0,632947
Erro	105	0,00262		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.11 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O ÍNDICE DE MÛLSTEPH.

EFEITO	GL	QM	F	p
Idade	6	0,00203	0,69 ^{ns}	0,657015
Erro	105	0,00293		

^{ns} = não significativo

ANEXO 4.12 - REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA A DENSIDADE APARENTE DO PAPEL (g/cm³)

R Múltiplo	0,8219
R ² Múltiplo	0,6755
R ² Ajustado	0,6742
Erro padrão de estimativa	0,0441

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO F
Regressão	1,983194	2	0,991597	510,0172
Resíduo	0,952679	490	0,001944	

VARIÁVEIS NA EQUAÇÃO

VARIÁVEIS	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE REGRESSÃO PADRONIZADO (BETA)	VALOR <i>t</i>	SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA
Intercepto			0,391615	29,89567*	0,000000
Idade	-0,057968	0,025737	-0,001855	-2,25229*	0,024746
Refino	0,818923	0,025737	0,003161	31,81866*	0,000000

* Significativo a 5% de probabilidade.

ANEXO 4.13 - REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O VOLUME APARENTE DO PAPEL (g/cm³)

R Múltiplo	0,8098
R ² Múltiplo	0,6558
R ² Ajustado	0,6544
Erro padrão de estimativa	0,1559

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO F
Regressão	22,70182	2	11,35091	466,7649
Resíduo	11,91595	490	0,02432	

VARIÁVEIS NA EQUAÇÃO

VARIÁVEIS	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE REGRESSÃO PADRONIZADO (BETA)	VALOR <i>t</i>	SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA
Intercepto			2,393621	51,6671**	0,000000
Idade	0,056758	0,026508	0,006238	2,1412	0,032753
Refino	-0,806913	0,026508	-0,010696	-30,4407**	0,000000

** Significativo a 1% de probabilidade.

ANEXO 4.14 - REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O ÍNDICE DE TRAÇÃO DO PAPEL (g/cm³)

R Múltiplo	0,6887
R ² Múltiplo	0,4743
R ² Ajustado	0,4722
Erro padrão de estimativa	8,7502

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO F
Regressão	33853,03	2	16926,51	221,0707
Resíduo	37517,37	490	76,57	

VARIÁVEIS NA EQUAÇÃO

VARIÁVEIS	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE REGRESSÃO PADRONIZADO (BETA)	VALOR <i>t</i>	SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA
Intercepto			25,24894	9,71291**	0,000000
Idade	0,432162	0,032758	2,15680	13,19267**	0,000000
Refino	0,543161	0,032758	0,32691	16,58115**	0,000000

** Significativo a 1% de probabilidade.

ANEXO 4.15 - REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO DO PAPEL (g/cm³)

R Múltiplo	0,5443
R ² Múltiplo	0,2962
R ² Ajustado	0,2933
Erro padrão de estimativa	0,7043

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO F
Regressão	102,2894	2	51,14472	103,1207
Resíduo	243,0250	490	0,49597	

VARIÁVEIS NA EQUAÇÃO

VARIÁVEIS	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE REGRESSÃO PADRONIZADO (BETA)	VALOR <i>t</i>	SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA
Intercepto			4,716003	22,54090**	0,000000
Idade	-0,100388	0,037903	-0,034849	-2,64853**	0,008345
Refino	0,533331	0,037903	0,022327	14,07091**	0,000000

** Significativo a 1% de probabilidade.

ANEXO 4.16 - REGRESSÃO MÚLTIPLA PARA O ÍNDICE DE RASGO DO PAPEL (g/cm³)

R Múltiplo	0,6965
R ² Múltiplo	0,4852
R ² Ajustado	0,4831
Erro padrão de estimativa	1,7739

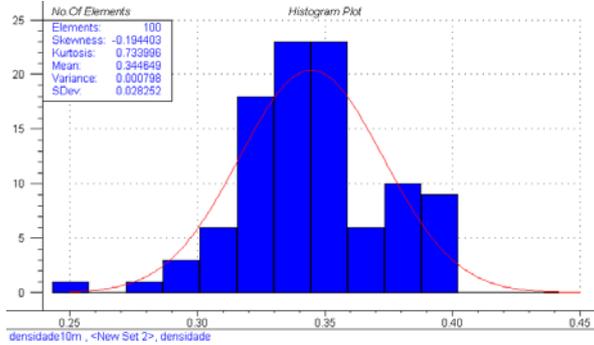
ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	RAZÃO F
Regressão	1453,130	2	726,5649	230,8842
Resíduo	1541,971	490	3,1469	

VARIÁVEIS NA EQUAÇÃO					
VARIÁVEIS	COEFICIENTE DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO DE COEFICIENTE	COEFICIENTE DE REGRESSÃO PADRONIZADO (BETA)	VALOR <i>t</i>	SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA
Intercepto			18,71127	35,5049*	0,000000
Idade	0,070499	0,032418	0,07208	2,1747*	0,030131
Refino	-0,691845	0,032418	-0,08530	-21,3412*	0,000000

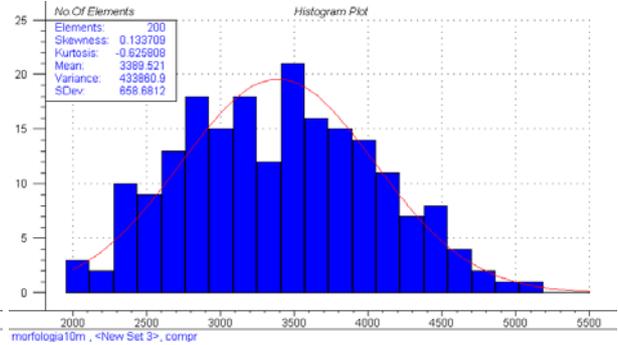
* Significativo a 5% de probabilidade.

ANEXO 5 – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS ANALISADAS PARA A CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE CALIBRAÇÃO COM O INFRAVERMELHO PRÓXIMO (continua).

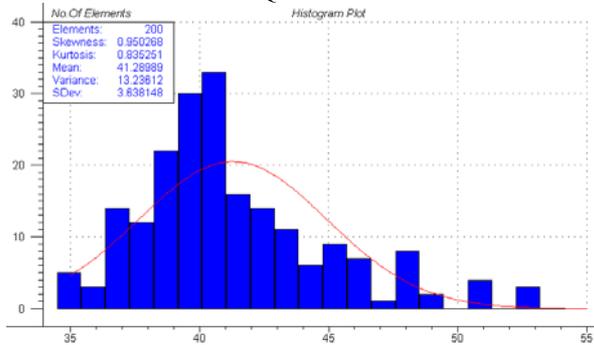
DENSIDADE BÁSICA.



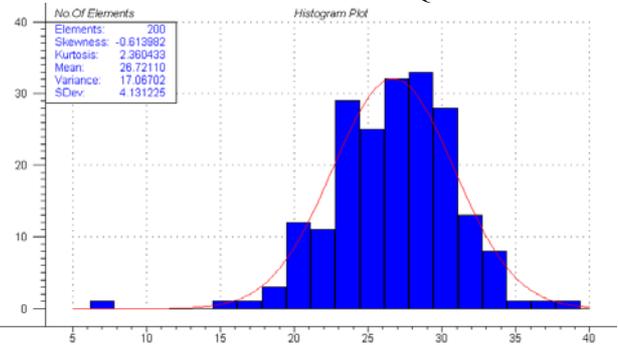
COMPRIMENTO DOS TRAQUEÓIDES.



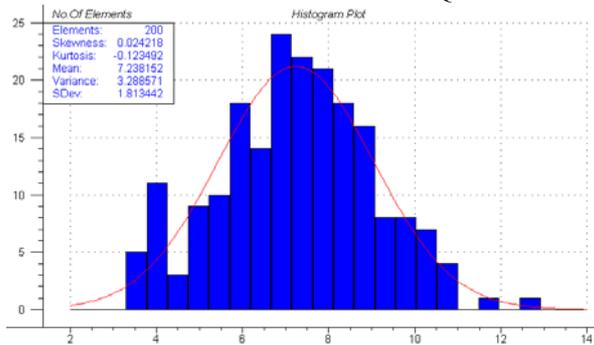
LARGURA DOS TRAQUEÓIDES.



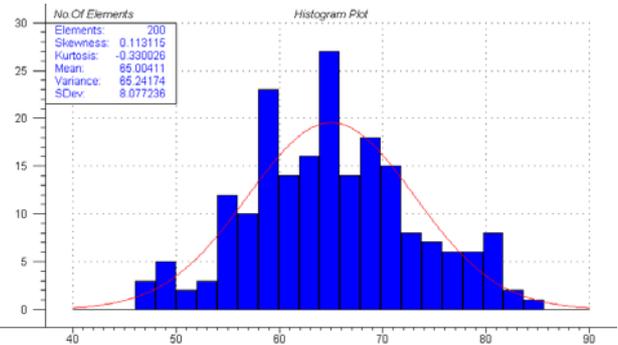
DIÂMETRO LUME DOS TRAQUEÓIDES



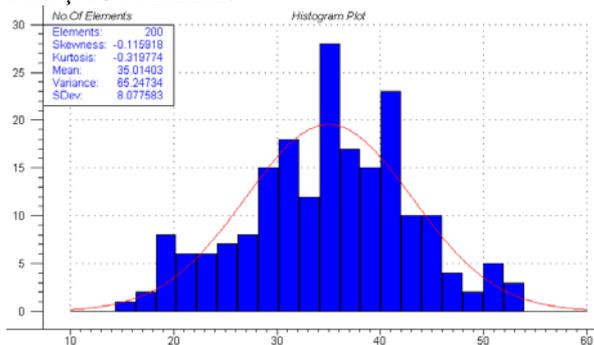
ESPESSURA DA PAREDE DOS TRAQUEÓIDES.



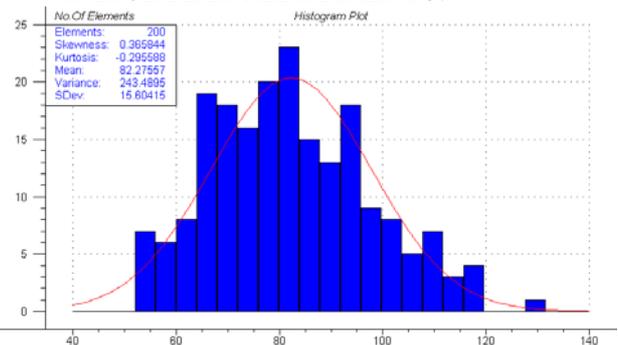
COEFICIENTE DE FLEXIBILIDADE.



FRAÇÃO PAREDE.

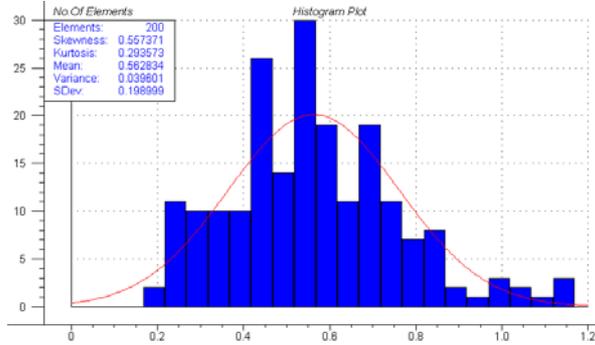


ÍNDICE DE ENFELTRAMENTO.

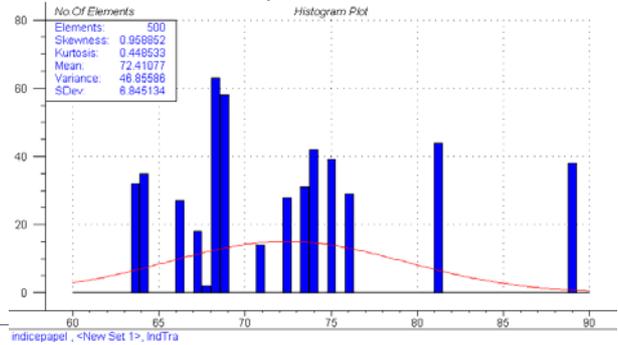


ANEXO 5 – HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS ANALISADAS PARA A CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE CALIBRAÇÃO COM O INFRAVERMELHO PRÓXIMO (conclusão)

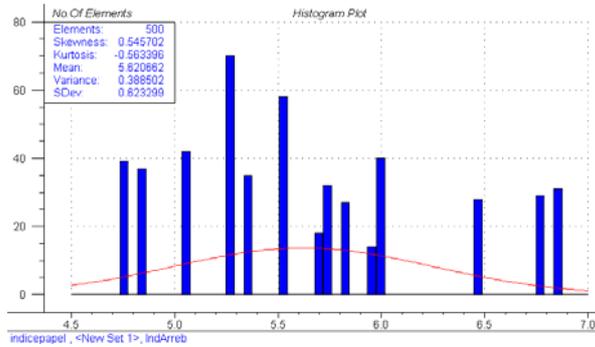
ÍNDICE DE RUNKEL.



ÍNDICE DE TRAÇÃO.



ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO.



ÍNDICE DE RASGO.

