UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CELULOSES BRANQUEADAS DE *PINUS* E *EUCALYPTUS* EM ANALISADOR ÓPTICO AUTOMÁTICO DE FIBRAS

MIGUEL LARA MENEGAZZO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do titulo de mestre em Ciências Florestais.

BOTUCATU – SP
Agosto – 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CELULOSES BRANQUEADAS DE *PINUS* E *EUCALYPTUS* EM ANALISADOR ÓPTICO AUTOMÁTICO DE FIBRAS

MIGUEL LARA MENEGAZZO

Orientador: Prof. Dr. Cláudio A. Sansígolo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do titulo de mestre em Ciências Florestais.

BOTUCATU – SP
Agosto – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO – SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Menegazzo, Miguel Lara, 1985-
L732c Características morfológicas de celuloses branqueadas de pinus e eucalyptus em analisador óptico automático de fibras / Miguel Lara Menegazzo.– Botucatu :[s.n.], 2012
x, 65 f. : il., color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2012
Orientador: Cláudio Angeli Sansígolo
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Pinus. 3. Celulose. 4. Branqueamento. 5. Fibras. I. Sansígolo, Cláudio Angeli. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE CELULOSES BRANQUEADAS DE *PINUS* E *EUCALYPTUS* EM ANALISADOR ÓPTICO AUTOMÁTICO DE FIBRAS"

ALUNO: MIGUEL LARA MENEGAZZO

ORIENTADOR: PROF. DR. CLÁUDIO ANGELI SANSIGOLO

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. CLÁUDIO ANGELI SANSIGOLO

PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

PROF. DR. GUSTAVO VENTORIM

Data da Realização: 29 de agosto de 2012.

DADOS CURRICULARES

MIGUEL LARA MENEGAZZO

NASCIMENTO	07/01/1985 – CAMPO GRANDE-MS
FILIAÇÃO	Marcio V. Menegazzo (in memoriam) Eudinéia Lara Menegazzo
2003-2008	Graduação em Agronomia Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS Campus Cassilândia-MS
2009 – 2010	Agrônomo na empresa AFW- Assessoria Agrária e Ambiental. Campo Grande – MS
2010-2012	Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, nível de Mestrado na Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP.

Dedico

A Deus, meus pais, amigos e aos professores pelo apoio, força, incentivo, companheirismo e amizade.

AGRADECIMENTOS

- A Deus por estar sempre comigo nos momentos difíceis, me dar força para superar todas as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas.

- Aos meus pais, Marcio Valdecir Menegazzo (in memoriam) e Eudineia Lara Menegazzo aos quais sou profundamente grato pelo amor, pelo apoio em minha vida acadêmica, por sempre estarem ao meu lado.

- A minha irmã Mariana (Mainaina), pelo incentivo ao estudo, pelo carinho, pela paciência nas madrugadas me ajudando com as tabelas e gráficos, e pela dedicação.

- Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio A. Sansígolo, pela dedicação e paciência, por acreditar em mim, mostrar o caminho da ciência e por ser exemplo de profissional.

- Aos professores Elias e Valdemir pelas sugestões para melhoria do trabalho.

- Aos funcionários do Departamento de Ciências florestais (DCF), e aos técnicos de laboratório, Liliane e Lira, pela ajuda na realização do trabalho.

- Aos amigos de mestrado, Luciane, João Paulo, Carlos, Fabio, Felipe Camargo, Felipe Garcia, Maria Rita, Daniela, Patrício, Aline, Paula, Melany, Guilherme, Rita, Cinthia e Jose Carlos, pela amizade, e contribuições nos afazeres acadêmicos.

- Aos meus amigos sul-mato-grossenses, Emerson, Renata e Alessandra pelo incentivo, dedicação e auxilio.

- Aos amigos da FCA e de Botucatu, Natália, Camila, Rubia, Talita, Bruno, Alessandra, Armando, Heloisa, Isabela, Bruna, Fernando entre outros, pelos grandes momentos em Botucatu e pelas festas.

- À Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista – UNESP, juntamente com a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de realização do curso.

- A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Os meus sinceros agradecimentos, a todos aqueles que contribuíram diretamente e indiretamente para a realização deste trabalho.

Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS IX
LISTA DE FIGURAS X
RESUMO 1
SUMMARY 3
1. INTRODUÇÃO 5
2. OBJETIVOS 7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
3.1 Celulose de Eucalipto 8
3.2 Celulose de *Pinus* 10
3.3 A morfologia da fibra como fator chave da qualidade da celulose 11
3.4 Refino 17
3.5 Finos 19
3.6 Propriedades físico e mecânicas da polpa celulósica 20
3.7 Equipamentos para avaliação da morfologia de fibras em celulose 21
3.8. Morfologia de fibras da celulose em analisador óptico automático 23
3.8.1 Comprimento da fibra 24
3.8.2 Largura e Espessura da parede da fibra 25
3.8.3 “Coarseness” 25
3.8.4 Curvatura das fibras 26
4. MATERIAL E MÉTODOS 28
4.1 Material 28
4.1.1 *Pinus* 28
4.1.2 *Eucalyptus* 29
4.2. Métodos 29
4.2.1 Caracterizações da morfologia de fibras 29

4.2.2 Classificação de fibras da amostra de celulose de *E. globulus*..... 30
4.2.3 Refino e propriedades físico-mecânicas da polpa integral e das frações obtidas no Bauer McNett de *E. globulus* 31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 35
5.1 Morfologia de fibras em três amostras de celulose branqueadas de *Pinus* 35
5.2 Morfologia de fibra de celulose branqueada dos híbridos de *E. urophylla x E. grandis.* 39
5.3 Análise comparativa da morfologia das fibras de celulose de Pinus e da celulose do híbrido de *E. grandis x E. urophylla* 40
5.4 Morfologia da fibra da celulose branqueada de *E. globulus* 42
5.5 Propriedades físico-mecânicas da polpa de *E. globulus*..... 46
6. CONCLUSÃO..... 51
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... 53
APÊNDICE 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Correlações qualitativas entre propriedades da fibra e propriedade do papel (BARRICHELO e BRITO, 1976) 16

Tabela 2- Características das três amostras de celulose fofa (“fluff pulp”) Kraft branqueada de fibra longa de mercado procedente dos Estados Unidos. 29

Tabela 3- Normas utilizadas nas propriedades físico-mecânica 34

Tabela 4- Morfologia da fibra na celulose fluff branqueada procedente da madeira de Southem pines dos Estados Unidos (Equipamento: Kajaani FS-200) 36

Tabela 5- Morfologia da fibra na celulose branqueada procedente de madeira com menor e maior densidade básica do híbrido de *E. grandis x E. urophylla* Equipamento: Kajaani FS-200) 39

Tabela 6- Resultados médios da morfologia da fibra das três amostras de celulose de *Pinus* (Tabela 1), das duas amostras de celulose do híbrido de *E. grandis x E. urophylla* (Tabela 2) e análise comparativa 41

Tabela 7- Resultados médios da classificação de fibras em Bauer McNett da celulose branqueada de *E. globulus*. 43

Tabela 8- Resultados médios da morfologia da fibra de celulose Kraft branqueada de mercado de *E. globulus.* classificada em classificador de fibras Bauer McNett. 43

Tabela 9- Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas de *E. globulus* integral e classificada em três tempos de refino. 47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de funcionamento de um analisador optico automático. 22

Figura 2- Analisador óptico automático de fibras Kajaani FS-300 30

Figura 3- Classificador de fibras Bauer McNett 31

Figura 4- Moinho centrífugo Jokro Mühle. REGEMED-MJ/K6 32

Figura 5- Equipamento para determinação do grau de refino (Schopper Riegler - °SR). REGMED-SR-A 32

Figura 6- Aparelho formador de folhas tipo Köthen rapid. REGMED-F/SS-2 33

Figura 7- Corpos de prova 33

Figura 8- Relações entre “coarseness” e população fibrosa com comprimento da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede 38

Figura 9- Morfologia da fibra da celulose Kraft branqueada de *E. globulus* integral e com classificação em Bauer McNett na forma gráfica. 45

Figura 10- Morfologia da fibra da celulose Kraft branqueada de *E. globulus* integral e com classificação em Bauer McNett na forma gráfica 48

RESUMO

Buscando alternativas para o aperfeiçoamento dos recursos florestais nas indústrias de celulose e papel, o presente trabalho teve como objetivo analisar as características morfológicas de celuloses branqueadas de *Pinus* e *Eucalyptus* em analisador óptico automático de fibras devido a grande importância nas características e propriedades do papel. Foram comparadas a morfologia de três amostras de celulose fofa ("fluff pulp") Kraft branqueada de fibra longa de mercado procedente dos Estados Unidos e duas amostras de celulose branqueadas do híbrido de *E urophylla x E. grandis*, sendo uma amostra obtida de clone de menor densidade básica da madeira, e a outra amostra de clone de maior densidade básica da madeira, utilizando o analisador óptico de fibras Kajaani FS-200. Em seguida foram comparadas as diferenças de morfologia de fibras entre celuloses branqueadas de fibra longa (*Pinus*) e fibra curta (*E. urophylla x E. grandis*). Utilizando equipamento Kajaani FS-300, foi analisada a influência do refino (0, 15 e 30 minutos) em amostras de celulose branqueadas integral e classificada em equipamento Bauer McNett de *E. globulus* em relação à morfologia de fibras e propriedades de resistências físico-mecânicas da celulose. Nas amostras de celulose branqueada de *Pinus*, houve uma variação nos valores das dimensões em relação

comprimento, espessura da parede e diâmetro do lume; a largura foi à dimensão mais estável. Obteve-se relação positiva entre espessura da parede, fração parede e “coarseness”, e relação negativa destes parâmetros com o índice de curvatura da fibra. O comprimento da fibra relacionou positivamente com a espessura da parede, índice de enfeltramento e “coarseness”, e negativamente com o diâmetro do lume e população fibrosa. As dimensões de fibras variaram nas duas amostras de celulose de *Eucalyptus* provenientes de madeira de diferentes densidades básica. As fibras na celulose provenientes da madeira de menor densidade básica apresentou maior espessura da parede, maior fração parede e menor “coarseness” e vice-versa. A “coarseness” das fibras foi o parâmetro que melhor relacionou com a densidade da madeira. Obteve-se relação positiva entre espessura da parede, fração parede e índice de curvatura, e relação negativa destes parâmetros com a “coarseness”. A comparação morfológica de fibras longas e curtas mostrou as grandes diferenças. A fibra longa tem em relação à fibra curta 2,9x mais comprimento, 2,0x mais espessura da parede, 1,6x mais largura e 1,4x mais diâmetro do lume, 1,8x mais índice de enfeltramento, 1,3x mais fração parede, 3,5x mais “coarseness” e baixa população fibrosa. A morfologia de fibras em celuloses classificadas de *E. globulus* mostrou relação positiva do comprimento com a largura, “coarseness” e curvatura das fibras, e negativamente com a população fibrosa. A classificação das fibras em Bauer McNett promoveu alterações na refinabilidade da polpa e nas propriedades de resistências físico-mecânicas avaliadas.

Palavras-chave: Celulose, morfologia de fibras, analisador de fibras kajaani, fibra longa, fibra curta.

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BLEACHED PULPS EUCALYPTUS AND PINE IN AUTOMATIC ANALYZER OPTICAL FIBRE. Botucatu, 2012. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
Author: MIGUEL LARA MENEGAZZO
Adviser: CLÁUDIO ANGELI SANSÍGOLO

SUMMARY

Seeking alternatives for the improvement of forest resources in the industries of pulp and paper, this study aimed to analyze the morphological characteristics of bleached pulps from *Pinus* and *Eucalyptus* in analyzer automatic optical fiber due to the great importance of the characteristics and properties of paper. Compared the morphology of three samples of pulp fluff bleached softwood kraft market from the United States and two samples of bleached pulp and the hybrid *E. urophylla* x *grandis*, and a sample obtained from clone lower basic density, and another sample of clone high basic density of wood, using the analyzer optical fiber Kajaani FS-200. Following the differences were compared in morphology of pulp fibers from bleached softwood (pine) and hardwood (*E. urophylla* x *E. grandis*). Using equipment Kajaani FS-300, we analyzed the effect of beating (0, 15 and 30 minutes) in full samples of bleached pulp and classified pulp in equipment Bauer McNett of the *E. globulus* in relation to morphology and properties of pulp physical and mechanical resistance. Samples of pine pulp bleached, there was a variation in the values of the dimensions in relation length, wall thickness and lumen diameter, the width of the scale was more stable. Positive relation was obtained between wall thickness, wall fraction and coarseness, and negative relationship of these parameters with the index of curvature of the fiber. The fiber length correlated positively with the thickness of the wall, felting index and "coarseness", and negatively associated with lumen diameter and fiber population. The dimensions of fibers varied in two samples of *Eucalyptus* pulp from wood of different densities basic. The pulp fibers in wood from the lower basic density showed increased wall thickness, higher wall fraction and lower coarseness" and vice versa. The coarseness of the fibers was the parameter that best correlated with the wood density. Positive relation was obtained between wall thickness, wall fraction

and index of curvature, and negative relationship of these parameters with the coarseness. The morphological comparison of long and short fibers showed large differences. The softwood fiber in relation the hardwood fiber is about 2.9x more length, 2.0x more wall thickness, 1.6x more width, 1.4x more lumen diameter, 1.8x more felting index, 1.3x more fraction wall, 3.5x more coarseness and lower fibrous population. The morphology of fiber pulps classified of the *E. globulus* showed positive correlation between length and width, coarseness and curvature of the fibers, and negatively with the fibrous population. The fiber classification in Bauer McNett promotes changes in the beating pulp and in the properties of physico-mechanical resistance evaluated.

Keywords: Pulp, fiber morphology, Kajaani fiber analyzer, softwood, hardwood.

1. INTRODUÇÃO

A retrospectiva do ano de 2010 mostra o bom desempenho alcançado pela indústria brasileira de celulose e papel. A produção de celulose somou 14,1 milhões de toneladas, apresentando variação positiva de 6,4% em relação ao total produzido em 2009. Deste total, 59% foram destinados à exportação, 30% para consumo próprio e 11% para vendas no mercado doméstico. A produção de papel totalizou 9,8 milhões de toneladas produzidas em 2010, quantidade 4,4% superior ao do ano anterior. No cenário mundial, o Brasil é o quarto maior produtor de celulose, o maior produtor de celulose de mercado de *Eucalyptus* e o décimo maior produtor de papel. A celulose Kraft branqueada de mercado do gênero *Eucalyptus* (BHKP – Bleached Hardwood Kraft Pulp) apresenta diferentes características e propriedades atribuídas, principalmente, as várias espécies e híbridos utilizados. No Brasil, as espécies tradicionais utilizadas como matéria prima podem ser representadas pelo *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. tereticornis*, e pelo híbrido de *E urophylla x E. grandis*. Em Portugal e Espanha, a espécie tradicional é o *E. globulus*. As celuloses Kraft branqueadas de *Eucalyptus* produzidas nestes países são as maiores concorrentes das celuloses brasileiras.

A celulose branqueada de fibra longa da região sul dos Estados Unidos (SBSKP – Southern Bleached Softwood Kraft Pulp) é produzida principalmente a partir das espécies de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Ela caracteriza por apresentar alta alvura, excelente grau de limpeza, e elevadas resistências mecânicas.

As morfologias e quantidades de fibras, vasos e células de parênquima são fatores intrínsecos das espécies e híbridos de *Eucalyptus* utilizadas na fabricação de celulose Kraft branqueada. Estas diferentes características das madeiras de *Eucalyptus* produzem celulose e papel com qualidades diferentes. Os fabricantes de papéis, sabendo destas diferenças, preferem determinados tipos de celulose quando da fabricação de papéis para imprimir / escrever ou para fins sanitários, as quais são as maiores utilizações da celulose branqueada de *Eucalyptus*. O processo de produção de celulose (deslignificação Kraft da madeira e branqueamento da celulose) tem também influência na qualidade final da celulose, e deve ser considerado para a fabricação de determinado tipo de papel. A morfologia de fibras em celulose de *Pinus* tem a mesma importância quando comparada com a celulose de *Eucalyptus*, e deve ser considerada como parâmetro de qualidade para sua utilização.

As dimensões de fibras, relações entre dimensões de fibras, dimensões de elementos de vasos e cortes histológicos para observação dos elementos anatômicos da madeira por microscopia, e suas relações com a qualidade da celulose e papel, foram exaustivamente estudados. Mais recentemente, as indústrias de celulose e papel não estão mais fazendo estas análises na madeira. A morfologia e quantidade dos elementos anatômicos estão sendo feitas na celulose branqueada utilizando os analisadores ópticos automáticos de fibras, desenvolvidos especificamente para esta finalidade.

A morfologia dos elementos anatômicos efetuados na madeira tem algumas diferenças em relação à determinação na celulose branqueada. As fibras na celulose podem ter sofrido alguns cortes durante a picagem da madeira; as condições de polpação da madeira e branqueamento da celulose podem alterar as dimensões das fibras, devido a retirada de lignina e hemiceluloses; e os tratamentos mecânicos que as fibras sofrem durante o processamento (misturadores, desintegradores, bombeamentos e espessadores) podem provocar curvatura e torção nas fibras.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo foi analisar as características morfológicas de celuloses branqueadas de *Pinus* e *Eucalyptus* em analisador óptico automático de fibras devido a sua importância nas características e propriedades do papel. Os objetivos específicos foram os seguintes:

- comparar a morfologia de fibras em três amostras de celulose fluff branqueadas de *Pinus* em equipamento Kajaani FS-200, para produção de fraldas descartáveis.

- comparar a morfologia de fibras em duas amostras de celulose branqueadas do híbrido de *E urophylla x E. grandis,* sendo uma amostra obtida de clone de menor densidade básica da madeira, e a outra amostra de clone de maior densidade básica da madeira, em equipamento Kajaani FS-200, para produção de papeis de imprimir e fins sanitários.

- comparar as diferenças de morfologia de fibras entre celuloses branqueadas de fibra longa (*Pinus*) e fibra curta (*E urophylla x E. grandis*) em equipamento Kajaani FS-200.

- analisar a influência do refino em amostras de celulose branqueadas integral e classificada (Bauer McNett) de *E. globulus* em relação à morfologia de fibras (equipamento Kajaani FS-300) e propriedades de resistências físico-mecânicas da celulose.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Celulose de Eucalipto

A matéria prima *Eucalyptus* é utilizada para diferentes fins como; celulose, papel, chapa de fibras, madeira serrada, móveis, painéis e óleos essenciais. Outras vantagens adicionais são a proteção do solo contra erosões, capacidade de captação de CO_2, geração de energia (carvão e lenha), tanino (curtimento do couro) e mel (visando a polinização). Com isso, o *Eucalyptus* pode ser uma fonte de riqueza econômica e social, gerando empregos diretos e indiretos (SILVA, 2005).

Em plantios florestais brasileiros, o eucalipto esta sendo extensivamente utilizado, atualmente com 81,2% de toda floresta plantada no país (BRACELPA, 2011); isso vem ocorrendo por diversas razões: pela grande plasticidade do gênero, devido à diversidade de espécies adaptadas a diferentes condições de clima e solo; pela elevada produção de sementes e facilidade de propagação vegetativa; pelas características silviculturais desejáveis, como rápido crescimento e produtividade; em função do melhoramento genético e pela adequação aos mais diferentes usos industriais, com ampla aceitação no mercado (SILVA, 2005). Segundo relatório anual da ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas a maior concentração de plantios florestais (*Eucalyptus e Pinus*) ocorre nas regiões sul e sudeste do país (75,2%), onde também estão

localizadas as principais unidades industriais dos segmentos de celulose, papel, painéis de madeira industrializada e siderurgia a carvão vegetal (ABRAF 2011).

Corniani (2009) cita que o *E. urophylla* e *E. grandis* são espécies de maior interesse para a eucaliptocultura no Brasil, tendo diferentes utilidades como: fabricação de celulose, chapas duras, produção de carvão e outros fins.

O uso da madeira de eucalipto como matéria prima produtora de celulose de fibra curta é uma evidência e se reveste de uma grande importância estratégica para a economia do Brasil. Atualmente, é o primeiro produtor mundial de celulose de eucalipto (BRACELPA, 2011).

Campos (1997) comenta que o eucalipto produz o maior volume de madeira por unidade de superfície, em ciclo curto. A celulose de eucalipto transformou o Brasil de importador a exportador do produto, tornando o país que possui a maior produção mundial de celulose de eucalipto.

Devido à grande diversidade de espécies existentes, é difícil considerar o gênero *Eucalyptus* um fornecedor de madeira bem definida para a produção de celulose, embora se constitua numa das principais fontes de matéria prima de fibra curta (FOELKEL; BARRICHELO, 1975).

No começo da utilização da celulose de eucalipto, esta era vista como fibra secundária, de pouco valor, porém com o passar do tempo, passou a ser muito requisitada pela indústria de celulose e papel, em função das características únicas das fibras. As polpas de eucaliptos são recomendadas para a fabricação de um grande número de papéis devido às excelentes qualidades que elas podem conferir aos mesmos, como por exemplo: volume específico aparente, opacidade, formação, maciez, porosidade, lisura, absorção, estabilidade dimensional, etc. (FOELKEL, 2007).

Segundo Ribeiro (1976), comenta que um dos pontos positivos com relação à celulose branqueada de eucalipto e que, diferentemente do que se acreditava anteriormente, é possível, somente com a utilização desta, produzir satisfatoriamente papéis cuja aplicação não demanda altos níveis de resistência à tração ou ao arrebentamento como são os papéis para impressão e escrita por exemplo. É comum definir a qualidade da celulose branqueada de eucalipto para a fabricação de papéis de impressão e escrita, e mesmo para as fabricações de outros papéis como os sanitários, por exemplo, especificando-se a faixa

desejada de valores de alvura, viscosidade intrínseca, solubilidade em solução de $NaOH_{5\%}$ (S_5), pH, umidade da folha comercial, percentual de sujeira e pintas, além de resistências físico-mecânicas a certos níveis de drenabilidade (Grau Schopper Riegler - ^{0}SR ou Canadian Standard Freeness - CSF).

O comprimento e largura das fibras de celulose variam de acordo com a fonte. Por exemplo, as fibras de eucalipto são mais curtas e mais espessas (em média: 850 µm de comprimento e 20 µm de espessura) que as fibras de algodão (em média: 9000 µm e 15 µm de comprimento e espessura, respectivamente (FIDALE, 2010).

3.2 Celulose de *Pinus*

Dentre as espécies florestais plantadas comercialmente nos Estados Unidos, o *Pinus teada* é a de maior importância. Sua cobertura florestal é estimada em 11,7 milhões de hectares, essas florestas se encontram nas regiões sul e sudeste (SHIMIZU, 2008).

No Brasil, a produção de *Pinus* ocorre com maior frequência na região sul e sudeste, abrangendo aproximadamente 1,7 milhões de hectares. Sua produção teve uma queda de 2,1% em relação à produção de 2009. Essa queda de área cultivada evidencia a tendência de estagnação ou até mesmo ligeira redução dos plantios desse gênero, devido em parte à substituição dessas áreas por plantios de *Eucalyptus*, cujo rendimento em volume é superior ao do *Pinus* (ABRAF 2011).

As espécies de *Pinus teada e Pinus elliottii* são as de maior importância comercial, sendo conhecida por softwood e podendo ser utilizadas para diversos fins, como: produção de celulose, papel, madeira serrada, chapas, madeira reconstituída, produção de resina entre outros.

O gênero *Pinus sp* é considerado uma conífera, essas madeiras apresentam uma estrutura relativamente simples, sua constituição é de 90 a 95% de traqueóides ou traqueídes axiais, os quais são células compridas e delgadas, com extremidades fechadas mais ou menos afiladas, variando de acordo com a espécie (KLOCK et al., 2005).

Dueñas(1997) citado por Klock (2005) afirmam que os traqueóides axiais comumente chamados de fibras, cumpre a dupla função de transportar líquidos e servir

de sustentação à estrutura lenhosa, e estudos mostram que os traqueóides possuem dimensões que podem variar entre 2,50 mm e 3,80 mm para o comprimento e larguras que podem oscilar de 20 μm a 70 μm, porém, variações maiores são encontradas na literatura.

Há uma variação do comprimento dos traqueóides em diferentes partes de uma árvore; no lenho juvenil que compreende os anéis de crescimento mais próximos a medula, os traqueóides são sempre mais curtos do que no lenho adulto.

Hillman (2005) ressaltou que as principais propriedades da celulose "fluff", provenientes de *Pinus* são: alvura, comprimento da fibra, capacidade total de absorção de água, limpeza e pureza. Além disso, podemos sugerir: volume específico, teor de finos, rigidez oferecida pela sua "coarseness".

Este mesmo autor comenta que 46% da polpa "fluff" produzida nos Estados Unidos eram utilizados para a confecção de fraldas infantis; outros 23% eram usados para absorventes íntimos femininos; 22% para fabricar fraldas geriátricas e os 9% restantes foram utilizados para a confecção de produtos porosos (não-tecidos para uso como toalhas, guardanapos para uso domésticos, industriais e médicos). Ressalta ainda que o mercado que mais crescente é o de fraldas descartáveis, uma vez que há o envelhecimento cada vez mais acentuado da população dos países desenvolvidos, considerados os maiores consumidores de fraldas descartáveis, tanto geriátricas como infantis.

3.3 A morfologia da fibra como fator chave da qualidade da celulose

A morfologia da fibra tem uma influencia dominante na qualidade da celulose e abrange uma grande variedade de tipos de elementos anatômicos. Em coníferas têm-se as fibras do lenho inicial e lenho tardio, as fibras da madeira de compressão e normal, e as finas células de parênquima. Em folhosas aparecem às fibras libriformes, as fibras de madeira de tensão e normal, os elementos de vaso (problemático em papéis para imprimir, devido às poucas ligações destes elementos na rede fibrosa) e células de parênquima. Nos dois grupos de madeira têm-se ainda as diferenças entre as fibras de madeira juvenil e adulta. (FOELKEL, 2007).

As dimensões geométricas mais importantes da fibra são comprimento, largura e espessura da parede. Além das dimensões das fibras, a distribuição destas devem também ser considerada.

Annergren (1999) afirma que a celulose de coníferas tem duas populações fibrosas: as fibras provenientes do lenho inicial e as fibras provenientes do lenho tardio. Estas duas fibras são bem diferentes e são características das madeiras de coníferas. O comprimento da fibra é outra característica importante, devido à relação com as resistências das fibras celulósicas. As fibras mais longas na celulose têm maior "coarseness" (fibras mais pesadas), o que significa menor número de fibras por unidade de peso. As fibras do lenho inicial apresentam menor espessura da parede, menor "coarseness" (fibras mais leves), maior flexibilidade, maior colapso, resultando em maior ligação entre fibras, quando comparadas às fibras do lenho tardio. Em árvores individuais, a madeira de reação (compressão em madeira de conífera e tensão em madeira de folhosa) apresenta diferenças em relação à madeira normal. As fibras da madeira de compressão apresentam menor qualidade que as fibras da madeira normal. As fibras da madeira de tensão em folhosas causam menos problemas que as fibras da madeira de compressão em coníferas.

As características das folhosas são as suas fibras curtas, as quais tem maior dificuldade de conferir resistências à celulose quando comparada com as fibras longas de conífera. As fibras curtas apresentam maior número de fibra por peso de celulose e alta área superficial especifica. A presença de vasos nesta celulose pode ser considerada uma desvantagem desta matéria prima (ANNERGREN, 1999).

As polpas brasileiras obtiveram uma grande expansão a partir da década de 1980, feitas a partir de uma única espécie de folhosa, o eucalipto. Ao invés de florestas naturais, a madeira neste caso provém de plantações, assim as colheitas passaram a ser feitas com uma idade média definida. Assim, as fibras das celuloses de eucalipto brasileiro exibiam uma homogeneidade morfológica superior às demais polpas disponíveis àquela época. Estas celuloses permitiam ao papeleiro maior controle sobre as propriedades esperadas no produto final, e estimularam vários estudos a respeito da aplicação industrial do conhecimento da morfologia das fibras (CARPIM et al., 1987, DEMUNER et al., 1991, SILVA JR. et al., 1982, MANHÃES, 2011).

Foelkel (2007) relata que as fábricas de papel possuem metas para produtividade, qualidade, custos e eficiência. As celuloses são matérias primas fibrosas para diversos e inúmeros tipos de papéis. Para cada tipo de papel e para cada desenho de fábrica e de suas máquinas, as exigências em qualidade da celulose podem ser diferentes. Isso significa que não existe uma polpa universal, sua morfologia e seus constituintes químicos são muito importantes para se permitir previsões acerca do comportamento da polpa em condições operacionais de processo. Dentre suas dimensões fundamentais, a largura e o comprimento das mesmas são relativamente similares para as polpas de eucaliptos.

Manhães (2011) comenta que um exemplo da importância da morfologia da fibra é a diferenciação entre polpas de fibra longa (que têm como matéria prima coníferas) e polpas de fibra curta (feitas a partir de folhosas), que definem duas diferentes classes de commodities dentro do grupo de polpas kraft branqueadas: BHKW e BSKP, respectivamente Bleached Hardwood (folhosas) e Bleached Softwood (coníferas) Kraft Pulp. As espécies de folhosas apresentam fibras com comprimento médio geralmente inferior a 1,5 mm, enquanto coníferas apresentam fibras mais longas, podendo variar de 3,5 a 4,0 mm.

Santos (2005), citando Dinwoodie (1965), afirmam que a densidade da fibra (espessura de parede celular e porcentagem de madeira juvenil), comprimento de fibra e resistência da fibra as os três principais fatores que controlam a resistência do papel.

Quando a madeira possui uma alta densidade, a resistência do papel é reduzida e a estrutura do papel torna-se mais porosa. Madeiras densas têm fibras com paredes espessas e diâmetros do lume pequenos, consequentemente, são mais rígidas e têm baixas propriedades de colapsabilidade durante o processamento. O consumo de energia do refino de fibras com paredes mais espessas é maior. Ao mesmo tempo, a ligação interfibras é fraca, dando baixa resistência ao papel (VALENTE, 1992; SANTOS, 2005).

A espessura da parede varia bastante e é ela uma das mais importantes de suas propriedades. Conforme variam as dimensões das fibras e a sua morfologia, existem importantes características nos processos de fabricação do papel que também são afetadas. A população fibrosa e a “coarseness” das fibras podem, até certo ponto, refletir bastante nesse comportamento potencial das polpas e no seu desempenho em termos papeleiros (FOELKEL, 2007).

Segundo Silva (1996), a espessura da parede celular tem sido considerada de grande importância na qualidade da polpa. A flexibilidade, ou melhor, a capacidade de colapsamento da fibra aumenta com a redução da espessura da parede celular, enquanto sua resistência mecânica diminui.

A relação porcentual entre a espessura da parede celular e a metade da largura da fibra, é denominada fração parede. Em geral admite-se que quando a fração parede é maior que 40%, as fibras serão extremamente rígidas, pouco flexíveis e haverá dificuldades na interligação das mesmas. Esta relação mantém maior proporcionalidade com resistência ao rasgo e menor com tração, ao arrebentamento e peso específico aparente (FOELKEL e BARRICHELO, 1975).

O peso por unidade de comprimento da fibra, expressada como miligramas por 100 m, é definida como “coarseness”, a mesma é uma propriedade importante das fibras para fazer papel, afetando as respostas das fibras na fabricação do papel e altera várias propriedades de estrutura, resistência e óptica do produto (SANTOS, 2005).

Segundo Foelkel (2009), altas “coarseness” em polpas de eucalipto estão associadas com fibras de paredes espessas e grossas (“coarse fibers”). Essas fibras produzem um papel de rede mais solta e frouxa, sem muita ligação entre fibras. Essas fibras de paredes espessas são rígidas e mais difíceis de se colapsarem. A ligação entre fibras e a consolidação da folha de papel não são favorecidas com essas fibras cilíndricas e rígidas na rede do papel. Os papéis correspondentes são mais porosos, volumosos, rugosos e absorventes.

Esse mesmo autor em trabalhos realizados, notou, que a “coarseness” em polpas de eucaliptos pode variar de 4,5 a 11 mg/100m. A população fibrosa por sua vez varia de 12 a 30 milhões de fibras por grama de polpa seca. Essas duas propriedades possuem uma ampla faixa de variação e por essa razão permitem importante diferenciação em qualidades do papel e das celuloses.

As polpas com baixo teor de hemiceluloses ou alta “coarseness” conduzem à formação de papéis com baixa coesão, baixa consolidação e escassa ligação entre fibras. Essas fibras cilíndricas, ao invés de se colarem ou se unirem umas às outras, apenas se tocam, ficando as estruturas do papel mais frouxas. Fibras leves, com baixa “coarseness” e com alta população fibrosa, formam folhas mais bem consolidadas, lisas e densas. Esses tipos de folhas se adequam muito bem a certos tipos de papéis de impressão (FOELKEL, 2007).

Para Seth (1997), a resistência intrínseca, o comprimento e "coarseness" são identificadas como importantes propriedades físicas das fibras para a fabricação de papel. Enquanto um decréscimo na resistência intrínseca ou comprimento da fibra diminui a resistência da folha, principalmente, uma alteração no "coarseness" influencia significativamente todas as propriedades da pasta celulósica tais como drenagem, resistência a úmido, propriedades estruturais, mecânicas e ópticas da folha seca.

Cotterill e Macrae (1997) estudando quatro espécies de *Eucalyptus* verificaram que a maior "coarseness" é normalmente associada com a rigidez absoluta das fibras, que requer mais refino para colapsar e gerar polpas com razoáveis níveis de resistência à tração.

O coeficiente de flexibilidade é a relação percentual entre a largura média do lume e a largura média das fibras. Quanto maior for o coeficiente de flexibilidade, mais flexíveis são as fibras e maior é a possibilidade de ligação entre elas. Em consequência, aumentam o comprimento de auto-ruptura e/ou índice de tração (D'ALMEIDA, 1988).

O índice de Runkel é a razão entre duas vezes a espessura da parede celular e o diâmetro do lume. Runkel (1952) citado por Rocha et al. (2007), estabeleceu que o índice de Runkel forneceria um determinante diagnóstico do uso das fibras para papel, seus valores podem ser agrupados em cinco grupos, as fibras classificadas no grupo I (até 0,25) são consideradas excelente para papel, do grupo II (0,25 - 0,5) muito boas para papel, no grupo III (0,5 - 1,0) boas para papel, no grupo IV (1,0 - 2,0) regulares para papel e no grupo V (acima de 2,0) não devem ser usadas para papel tendo em vista que o grau de colapso é muito baixo. Inúmeras pesquisas mostraram que este índice guarda o mesmo tipo de relação com a qualidade da polpa que a espessura da parede celular e a fração parede

Barrichelo e Brito (1976) mostra que as dimensões das fibras e suas relações, estão correlacionadas com algumas propriedades do papel. Estas correlações aparecem na Tabela 1. No caso de correlação positiva consta o símbolo (+) ao lado direito da relação dimensional e o símbolo (-), no caso de correlação negativa.

Tabela 1- Correlações qualitativas entre propriedades da fibra e propriedade do papel (BARRICHELO e BRITO, 1976)

Propriedade do papel	Propriedade da fibra
Resistência à tração	Comprimento da fibra (+)
	Diâmetro do lume (+)
	Espessura da parede da fibra (-)
	Coeficiente de flexibilidade (+)
	Fração parede (-)
	Índice de Runkel (-)
Resistência ao rasgo	Comprimento da fibra (+)
	Diâmetro do lume (+)
	Espessura da parede da fibra (+)
	Largura da fibra (-)
	Coeficiente de flexibilidade (-)
	Índice de enfeltramento (+)
	Fração parede (+)
	Índice de Runkel (+)
Resistência ao arrebentamento	Comprimento da fibra (+)
	Diâmetro do lume (+)
	Espessura da parede da fibra (-)
	Largura da fibra (-)
	Coeficiente de flexibilidade (+)
	Índice de Runkel (+)
Peso específico	Espessura da parede da fibra (+)
	Coeficiente de flexibilidade (+)
Opacidade	Espessura da parede da fibra (+)

3.4 Refino

As fibras naturais não apresentam características que possibilitam, com sucesso, sua utilização na fabricação de papéis que requeiram níveis mínimos de resistência mecânica, tais como os destinados à escrita e impressão, embalagens, etc. As celuloses devem ser submetidas a um tratamento que as modifique, permitindo uma melhor ligação entre as fibras na folha de papel e conferindo a resistência mínima necessária à estrutura desse papel. Esse tratamento é o refino (MANFREDI, 1998).

Conforme D'Almeida (1988), pode-se dizer que praticamente todos os grupos hidroxilas da celulose e das hemiceluloses estão ligados por pontes de hidrogênio. Quando a polpa é refinada, as pontes de hidrogênio existentes são rompidas e os grupos hidroxilas libertados se unem de novo, só que agora com as moléculas de água, que entram na fibra devido a fibrilação externa. Estes efeitos produzem um arrancamento total ou parcial das camadas mais externas da fibra, facilitando assim a entrada da água. A fibra sofre um inchamento cuja extensão aumenta quanto maior for a quantidade de água associada à fibra. Em suma, supõe-se que a fibrilação interna produza uma ruptura das ligações por ponte de hidrogênio existentes inicialmente no interior das fibras, entre as moléculas de celulose e hemiceluloses, e as transformem em novas pontes de hidrogênio, só que agora entre os grupos hidroxilas das cadeias de celulose e hemiceluloses, e as moléculas da água que produziram o inchamento da fibra.

Busnardo (1990), citado por Rosa (2003), comenta que refino, em sua conceituação mais ampla, é o tratamento mecânico efetuado sobre fibras em suspensão, objetivando efetuar modificações estruturais, às quais são produzidas através de impactos sobre as fibras. A etapa de refino pode ser classificada como uma das mais importantes da fabricação do papel, e é caracterizada por um elevado consumo de energia. Nesta fase, serão desenvolvidas as propriedades que irão contribuir para caracterizar a qualidade final do papel, podendo direcioná-lo para aplicações específicas.

Na refinação das fibras, o tempo de duração é um fator de máxima importância. porque dele depende as modificações ocorridas, tais como, corte de fibras, desfibrilação e hidratação, segundo SILVA (1969). Mantidas constantes as outras variáveis tais como pressão específica, concentração da massa e escolha das máquinas refinadoras, as

propriedades finais do papel serão função direta do tempo de refinação pelas alterações na parede celular e no comprimento das fibras.

Determina-se o grau de refino para estabelecer comparativos entre polpas e também para padronizar uma determinada receita de fabricação de papel. Assim, pode-se fabricar papéis com características muito próximas, quando utilizado um determinado grau de moagem para uma polpa fabricada em determinado processo (FOELKEL, 2009).

Segundo Ferreira (2000), a drenabilidade das polpas, depende da sua resistência à passagem de água, a qual aumenta com a refinação, não apenas devido ao aumento das fibras (e dos finos), mas também devido à perda de porosidade da matriz fibrosa, como consequência da fibrilação externa e dos ganhos de flexibilidade e de colapsabilidade das fibras, e ainda como consequência do acréscimo na quantidade de finos das polpas. Existem principalmente dois métodos para a medição da drenabilidade das polpas: o grau Schopper-Riegler (ºSR) e o grau Canadian Standart Freeness (ºCSF). Ambos os métodos baseiam no escoamento de uma suspensão de fibras com um determinado volume e concentração através de uma polpa que se vai formando sobre uma malha metálica, medindo-se depois o volume de água que passa através da polpa.

As classificações dos efeitos do refino são: primários (fibrilação interna, fibrilação externa, formação de finos e encurtamento das fibras) e secundários que estão relacionados com as propriedades físicas da folha formada (D'ALMEIDA, 1988; COMELATO, 2011).

Foelkel (2009) comenta que alguns dos principais efeitos da refinação são: o corte e o colapso/achatamento das fibras, a liberação das fibrilas (desfibrilamento) e o rompimento da parede celular (micro-fraturas). As dimensões das fibras se alteram tanto no seu comprimento, como largura. Essas ações mecânicas aumentam a ligação entre as fibras, o que é fundamental para o aumento das resistências das folhas de papel. Caso não provoquemos esse aumento das ligações entre as fibras, a folha de papel será fraca e as quebras de folha se tornarão mais frequentes ao longo da fabricação do papel. Também o produto final terá pior desempenho nas gráficas, nas embalagens, etc.

Com a refinação observa-se um aumento geral das resistências mecânicas, da resistência ao ar e da densidade das folhas, e uma diminuição do coeficiente

específico de dispersão de luz (ASTALS, 1988, BRINDLEY, 1996, CLARK, 1985, DILLNER e JONSSON, 1979, PAAVILAINEN, 1993 e SANTOS, 2005).

O tempo de refinação da polpa está relacionado diretamente com o consumo de energia. O aumento do refino da celulose conduz a decréscimos de propriedades, tais como opacidade, porosidade e volume específico aparente (MANFREDI *et al.*, 1986). A celulose ideal é aquela que consome baixa energia de refino e conserve ao máximo as propriedades importantes para cada tipo específico de papel. O aumento do tempo de refinação aumenta as propriedades de arrebentamento e tração, devido ao grande contato fibra-fibra. A propriedade de rasgo sofre um decréscimo com o aumento da refinação, devido ao grande número de cortes nas fibras. Já alvura, opacidade e porosidade sofrem declínio com a refinação, pois as folhas tornam-se mais densas (SMOOK, 1987).

3.5 Finos

No processo de ligação entre fibras, os finos desempenham papel fundamental, pois sendo elementos menores e com muito maior área superficial (por unidade de peso), conseguem-se distribuir muito bem na estrutura da folha, colaborando para o aumento dos pontos de contato entre as partículas presentes.

Conforme Foelkel (2009), mesmo quando a polpa ainda sequer foi refinada, ela já contém quantidades significativas desses finos, que são, por essa razão mesmo denominados de finos primários. Os finos primários consistem então de células de parênquima, fibras pequenas e fibras quebradas/partidas e alguns elementos de vaso (os mais curtos e estreitos). Muitas dessas fibras quebradas e pontas de fibras se formam das ações de picagem da madeira, que cortam a mesma em cavacos. Os finos secundários. são as partículas pequenas geradas pela refinação e intenso tratamento mecânico que as polpas sofrem na fabricação do papel. Alguns dos principais efeitos da refinação são: o corte e o colapso/achatamento das fibras, a liberação das fibrilas (desfibrilamento) e o rompimento da parede celular (micro-fraturas). As dimensões das fibras se alteram tanto no seu comprimento, como largura. Essas ações mecânicas aumentam a ligação entre as fibras, o que é fundamental para o aumento das resistências das folhas de papel.

Os finos secundários são aqueles gerados no refino da celulose e também no processo de reciclagem do papel. Nesse último caso, são também referidos como finos terciários. Esses finos são colocados parcial ou totalmente na suspensão fibrosa e apresentam altíssima capacidade de ligação. Isso porque mostram enorme área superficial por unidade de peso. São muito higroscópicos e hidrofílicos. Com isso, facilitam a ligação entre fibras, mas prejudicam a drenagem, o desaguamento e a secagem da folha na máquina de papel. Em termos de área superficial por unidade de peso seco, os finos secundários chegam a apresentar valores entre 5 a 10 vezes superiores aos encontrados para finos primários. Entretanto, os próprios finos primários colaboram para esse número, pois eles são também refinados junto com as fibras e por serem menos rígidos, também geram muitos finos secundários com o refino (FOELKEL, 2009).

3.6 Propriedades físico e mecânicas da polpa celulósica

Segundo Klock (2009), para o desempenho de um papel com fim determinado, só um ensaio mecânico não é significativo para poder deduzir se o papel reúne as condições necessárias para sua utilização. É muito importante obter pelo menos um par de ensaios mecânicos diferentes, significativos para uma determinada aplicação. Existem vários ensaios de resistência que podem ser feitos no papel; os mais comuns são: resistência à tração, resistência ao arrebentamento ou estouro, resistência ao rasgo e resistência a dobras duplas. Nenhum destes ensaios é uma medida fundamental, mas uma combinação de vários fatores, como flexibilidade, ligações de fibras e resistência da fibra.

Segundo esse mesmo autor, tais fatores dependem, entre outros, do tipo de fibras, do comprimento e espessura das fibras, da flexibilidade das fibras individuais, do número de ligações entre fibras, da resistência das ligações individuais, da gramatura do papel, da densidade aparente e da umidade.

Comelato (2011) citando D’Almeida (1988) descreve algumas dessas propriedades a seguir:

Gramatura: Afeta todas as propriedades mecânicas e algumas propriedades ópticas. É importante do ponto de vista econômico na venda e compra do papel. Expressa em gramas por metro quadrado (g/m^2).

Lisura: exprime a existência de irregularidades na superfície do papel. Afeta o desempenho, a aparência e uso final do papel. Quanto mais liso for o papel, melhor e mais homogênea será a impressão. É expressa pelo tempo (em segundos) necessário para a passagem de um volume de ar pela superfície do papel.

Resistência à tração: é a força de tensão necessária para arrebentar o papel. Para a realização desse teste utiliza-se um dinamômetro e submete-se o corpo de prova a um esforço de tração uniformemente crescente até a sua ruptura. A resistência individual das fibras, comprimento médio, formação e estrutura do papel afetam esse teste. A resistência à tração pode ser expressa pelo comprimento de auto-ruptura, que é o comprimento necessário para uma fita de papel romper-se devido ao seu próprio peso quando suspensa por uma de suas extremidades.

Resistência ao arrebentamento: definida como a pressão necessária para produzir a ruptura do material transmitida por um diafragma elástico de área circular. O aparelho mais utilizado é o do tipo Mullen. A resistência ao arrebentamento é afetada por fatores como grau de refinação, gramatura e espessura.

Resistência ao rasgo: é a medida do trabalho total necessário para o rasgamento completo do papel, a uma distância fixada depois do rasgo ter sido iniciado, e é medida em um aparelho tipo pêndulo Elmendorf. Entre os fatores que afetam essa propriedade, estão o comprimento das fibras e ligação entre elas.

3.7 Equipamentos para avaliação da morfologia de fibras em celulose

Os métodos desenvolvidos para determinar as dimensões das fibras podem ser divididos em métodos manuais e automatizados. As dimensões da fibra podem ser determinadas por meio de medições diretas (por exemplo, microscópica, análise de imagem, a partir de suspensão de fibras) ou por um método de fracionamento indireto. Hoje, o comprimento da fibra é facilmente determinado em curto espaço de tempo utilizando

modernos analisadores de imagens. Além disso, houve um grande avanço tecnológico nos programas utilizados para o processamento de imagens (YALIN PR e HANNU MAKKONEN, 2007).

Yalin Pr e Hannu Makkonen (2007), comenta que um dos primeiros analisadores ópticos automáticos de fibras foi o Kajaani FS-100, introduzido na indústria de celulose e papel em 1980. Este equipamento continha um dispositivo óptico para medições de comprimento de fibra e de "coarseness". Piirainen (1985) relata que este equipamento foi projetado para fazer medições em poucos minutos com um procedimento de medição simples. É constituído por um tubo capilar (0,2 mm) através da qual passa uma suspensão aquosa de fibras. Em um lado deste capilar está localizada uma fonte de luz e do lado oposto um detector. Quando uma fibra passa através do tubo capilar, a sua imagem polarizada é projetada sobre o detector, que fornece dimensão da fibra, e uma bomba de vácuo de baixa pressão recolhe as fibras analisadas.

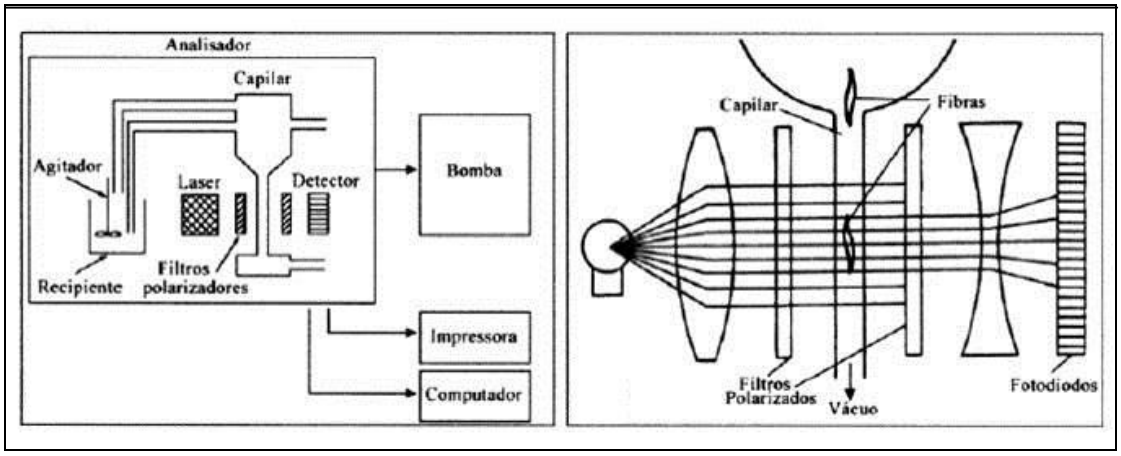

Figura 1- Esquema de funcionamento de um analisador óptico automático.

O equipamento Kajaani FS-200 foi desenvolvido especificamente para analisar a distribuição do comprimento da fibra em polpas celulósicas. As medidas são efetuadas devido à habilidade das fibras desviarem a direção da luz polarizada. O FS-200 é extensivamente utilizado nas indústrias de celulose e papel porque é muito rápido (usualmente

analisa 20.000 fibras em aproximadamente 10 minutos) e simples de ser utilizado (CARVALHO et al., 1997).

Este mesmo autor cita que o equipamento Galai CIS-100 é um analisador de tamanho de partículas baseado na visualização direto das fibras. Devido a esta característica, o CIS-100 tem aplicações mais generalizadas, podendo ser utilizado para fibras celulósicas e outros materiais.

Em estudo realizado por Carvalho et al. (1997), comparando dois analisadores ópticos automáticos, mostra que o comprimento ponderado médios das fibras para o kajaani FS-200 foram de 10-20% mais baixo do que aqueles para os o Galai CIS-100. Em geral os analisadores ópticos automáticos são precisos e rápidos.

3.8. Morfologia de fibras da celulose em analisador óptico automático

As dimensões das fibras se alteram quando determinadas na madeira e na celulose branqueada devido a três fatores (LEVLIN E SÖDERHJEM, 1999). Primeiro, a madeira é reduzida a cavacos e esta operação pode cortar fibras se não for efetuada de forma correta. Segundo, as condições de polpação e branqueamento alteram as dimensões das fibras. Durante estes processos, lignina e hemiceluloses são solubilizadas da parede celular e tornam as fibras mais finas e mais flexíveis. Terceiro, as fibras durante o processamento da celulose sofrem tratamentos mecânicos em misturadores, desintegradores, bombeamentos e espessadores, os quais deformam a fibra e induzem curvatura gradual e contínua (em inglês curl) e curvatura torcida (em inglês kink) que tem influência no comprimento da fibra.

Trepanier (1998) relata que o comprimento e a forma da fibra se alteram durante a polpação e branqueamento. Estas alterações podem afetar fortemente a qualidade e o desempenho do produto.

Braaten e Molteberg (2004) relatam que a seção transversal da fibra pode deformar ou colapsar durante polpação, significando desvios das verdadeiras dimensões das fibras.

3.8.1 Comprimento da fibra

Há vários métodos ópticos para medir o comprimento da fibra. O princípio primário é obter uma suspensão de fibras para poder fluir através de uma cubeta. A fonte de luz ilumina o fluxo para detectar as fibras com uma câmara. A técnica de análise de imagem aumenta a resolução dos valores das dimensões das fibras. O método óptico é descrito na norma TAPPI T 271 pm-98.

Hoje, o equipamento Kajaani FS-200 é o analisador óptico automático mais usual para medir as dimensões de fibras. Ele mede a distribuição do comprimento da fibra, o comprimento médio da fibra e o "coarseness" de uma amostra de polpa obtida com alta precisão (LEVLIN E SÖDERHJEM, 1999).

Segundo Carvalho et al. (1997), o equipamento Kajaani FS-200 foi projetado especificamente para medir a distribuição do comprimento de fibras da celulose. As medidas são baseadas na habilidade dessas fibras alterarem a direção da luz polarizada. O FS-200 é usado extensivamente na indústria de celulose e papel porque é muito rápido (ele pode medir 20.000 fibras em aproximadamente 10 minutos) e simples de usar.

O comprimento médio das fibras pode ser expresso de três formas conforme mostrado a seguir. O comprimento médio ponderado por comprimento é o mais utilizado porque se relaciona melhor com as propriedades do papel e não é tão dependente da proporção de finos (CARVALHO et. al.,1997).

Média aritmética, Ln	Média ponderada por comprimento, Llw	Média ponderada por peso, Lww
$Ln = \frac{\sum_{i=1}^{n} ni.Li}{\sum_{i=1}^{n} ni}$	$Llw = \frac{\sum_{i=1}^{n} ni.Li^2}{\sum_{i=1}^{n} ni.Li}$	$Lww = \frac{\sum_{i=1}^{n} wi.Li}{\sum_{i=1}^{n} wi}$

Sendo:

ni = número de fibras na classe i;

Li = comprimento médio na classe i;

wi = peso de fibras na classe i.

O princípio é detectar o início e o final da fibra e calcular o comprimento com estas informações e velocidade de fluxo.

3.8.2 Largura e Espessura da parede da fibra

Hoje, os analisadores da qualidade da fibra medem o comprimento da fibra na polpa de forma muito rápida. A largura e a espessura da parede também podem ser determinadas, mas somente os analisadores de custo elevado têm esta capacidade. A precisão destas medidas pode ser questionada, desde que há possibilidade da seção transversal deformar ou colapsar durante polpação, significando desvio das verdadeiras dimensões da fibra (BRAATEN E MOLTEBERG, 2004). Estes autores propõem um método matemático para determinar a espessura da parede celular e largura da fibra na polpa baseado no "coarseness" da fibra, rendimento da polpação e densidade da madeira.

3.8.3 "Coarseness"

A "coarseness" é definida como peso por unidade de comprimento da fibra, expressa como miligramas por 100 m de fibra (ou decigramas por 10 km). É uma propriedade importante das fibras para fazer papel. A "coarseness" afeta as respostas das fibras na fabricação do papel e altera várias propriedades de estrutura, resistência e óptica do produto.

Segundo Foelkel (2009) o alto valor de "coarseness" (fibras pesadas) implica em alto rasgo, alto volume específico aparente, alta porosidade, fraca folha úmida, alta opacidade, alta rapidez para absorver água, drenagem rápida, superfície rugosa, baixa população fibrosa e ligação interfibras prejudicada. O baixo valor de "coarseness" (fibras leves) implica em alta tração e arrebentamento, baixo volume específico aparente, baixa porosidade, folha úmida resistente, baixa opacidade, alta colapsabilidade, alta retenção de água, drenagem lenta, superfície lisa, alta população fibrosa e ligação interfibras favorecida.

Segundo Kerekes e Schell (1995), a “coarseness” exerce sua influência na uniformidade da folha através do número de contatos por fibras, tamanho dos flocos e mobilidade das fibras durante a formação.

Cotterill e Macrae (1997) estudando quatro espécies de *Eucalyptus* verificaram que a maior “coarseness” é normalmente associada com a rigidez absoluta das fibras, que requer mais refino para colapsar e gerar polpas com razoáveis níveis de resistência à tração.

A determinação correta da “coarseness” das fibras sempre tem sido um desafio. O método comum é a medida do comprimento projetado total de uma massa de polpa conhecida usando um analisador de comprimento de fibra óptico como um Kajaani FS-100 ou FS-200. A “coarseness” resulta da divisão da massa de polpa pelo comprimento total das fibras. Na prática, a equação seguinte é utilizada para o cálculo da “coarseness” (SETH E CHAN, 1997).

$$C = \frac{m}{n.L}$$

Sendo:

C = “coarseness”;

m = massa pequena de fibras s.e. introduzida no analisador;

L = comprimento médio aritmético das fibras

n = número total de fibras na massa m.

3.8.4 Curvatura das fibras

A curvatura da fibra é o desvio da linha reta em relação ao eixo da fibra. As fibras na madeira são retas. Entretanto, as fibras se curvam durante a polpação, processamento da polpa e refino (ROBERTSON et al., 1999).

Há duas maneiras usuais de avaliar a forma da fibra (TREPANIER, 1998). O índice de curvatura da fibra (em inglês curl index), definido como uma curvatura gradual e contínua da fibra, é determinado através da seguinte expressão:

$$IC = \left(\frac{L}{l}\right) - 1$$

Sendo:

IC = índice de curvatura da fibra;

l = comprimento de contorno da fibra (maior comprimento);

L =comprimento projetado (menor comprimento).

O índice de curvatura torcida das fibras (em inglês kink index) é a soma ponderada das curvaturas N com determinados intervalos de ângulos, conforme mostrado a seguir:

$$IK = \frac{\left(2N_{21-45} + 3N_{46-90} + 4N_{90-180}\right)}{L_{total}}$$

Sendo:

IK = índice de kink da fibra;

N = número de curvaturas;

L_{total} = comprimento projetado total

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 *Pinus*

Três amostras de celulose fofa (“fluff pulp”) Kraft branqueada de fibra longa de mercado procedente dos Estados Unidos (celulose A, celulose B e C). Estas amostras foram coletadas na empresa Kimberly Clark Kenko, localizada em Suzano-SP, e utilizadas na confecção de fraldas descartáveis.

As madeiras utilizadas como matéria prima para a fabricação destas celuloses “fluff” são do gênero *Pinus* e denominadas nos Estados Unidos como Southem pines (*Pinus taeda*-slash pine e *Pinus elliottii*-loblolly pine), conforme relata Levlin e Söderhjelm (1999).

As folhas de celulose coletadas tinham as seguintes características, conforme a tabela 2.

Tabela 2- Características das três amostras de celulose fofa (“fluff pulp”) Kraft branqueada de fibra longa de mercado procedente dos Estados Unidos.

Parâmetros da folha de celulose	Celulose A	Celulose B	Celulose C
Teor de secos, %	91,95	92,99	93,32
Espessura, mm	1,240	1,226	1,130
Gramatura, g/m^2	709,80	720,60	711,82
Peso específico aparente, g/cm^3	0,572	0,588	0,630

4.1.2 *Eucalyptus*

Duas amostras de celulose Kraft branqueada de laboratório utilizando como matéria prima à madeira do híbrido de *E. urophylla x E. grandis*. Uma das amostras denominada D foi procedente da madeira de um clone de menor densidade básica (0,440 g/cm^3), e a outra amostra denominada E, a partir de um clone de maior densidade básica (0,508 g/cm^3). Estas amostras de celulose foram obtidas de estudos desenvolvidos anteriormente por Santos e Sansigolo (2007).

Uma amostra de celulose Kraft branqueada de mercado de *E. globulus* procedente de Portugal (amostra de celulose F – Portucel).

4.2. Métodos

4.2.1 Caracterizações da morfologia de fibras

As caracterizações da morfologia de fibras das amostras de celulose de *Pinus* e de *E urophylla* x *E. grandis* foram efetuadas em equipamento Kajaani FS-200 no laboratório de pesquisa da Votorantin Celulose e Papel (atualmente Fibria), localizado na cidade de Jacareí – SP. As dimensões de fibras avaliadas foram comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede. As relações entre dimensões de fibras determinadas foram índice de enfeltramento, coeficiente de flexibilidade, fração parede e índice de Runkel. As outras determinações analisadas foram índice de curvatura, “coarseness”, população

fibrosa e teor de finos < 0,1 mm e < 0,2 mm. As caracterizações morfológicas das amostras de celuloses de *E. globulus* integrais e classificadas em Bauer Mcnett foram efetuadas em equipamento Kajaani FS-300 no laboratório de pesquisa da Lwarcel Celulose e Papel, localizada na cidade de Lençóis Paulista – SP. Neste equipamento foram determinados comprimento da fibra, largura da fibra, índice de curvatura da fibra, índice de torção da fibra, comprimento do vaso, largura do vaso (para todas estas análises obteve-se resultados aritmético, ponderado por comprimento e ponderado por peso), teor de finos (aritmético e ponderado por comprimento), população fibrosa, "coarseness" das fibras e número de vasos (por metro de fibra ou por peso de fibra). A Figura 2 mostra um analisador óptico automático de fibras Kajaani FS-300.

Figura 2- Analisador óptico automático de fibras Kajaani FS-300

4.2.2 Classificação de fibras da amostra de celulose de *E. globulus*

A classificação de fibras da amostra de celulose de *E. globulus* foi efetuada em classificador de fibras Bauer McNett (TAPPI T233 cm-95). Este equipamento é dotado de cinco tanques em cascata com peneiras de 16 - 30 - 50 - 100 e 200 mesh, correspondendo às aberturas de 1,190 - 0,595 - 0,297 - 0,149 - 0,074 mm. Em cada determinação utiliza-se o equivalente a 10 g s.e. de polpa durante 10 minutos e classifica a

polpa em cinco frações. Foram efetuadas determinações em duplicata para quantificar as retenções da polpa nas cinco peneiras. Posteriormente, foram efetuadas várias dezenas de classificações (10 g s.e. de polpa durante 10 minutos) para obter quantidades suficientes de polpa em cada peneira de classificação para realização de análises de propriedades físico-mecânicas e morfologia de fibras. A Figura 3 mostra um classificador de fibras Bauer McNett.

Figura 3- Classificador de fibras Bauer McNett

4.2.3 Refino e propriedades físico-mecânicas da polpa integral e das frações obtidas no Bauer McNett de *E. globulus*

A polpa integral e das três frações retidas nas peneiras 16/30, 30/50 e 50/100 mesh foram refinadas em moinho centrífugo Jokro Mühle (Figura 4), 150rpm, utilizando 16g s.e. por panela, a uma consistência de 6%, nos tempos de 15 e 30 minutos. O grau de refino foi avaliado através da determinação do grau Schopper-Riegler (Figura 5), conforme norma SCAN-C19:65. As folhas para os ensaios físicos-mecânicos, com gramatura aproximada de 60g/m2, foram formadas em aparelho formador tipo Köthen rapid (Figura 6), e acondicionadas em ambiente climatizado, nas condições de 50 ± 2% de umidade relativa e temperatura de 23 ± 2ºC (TAPPI T 402 om-93). A Figura 7 mostra os corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas do papel.

Figura 4- Moinho centrífugo Jokro Mühle. REGEMED-MJ/K6

Figura 5- Equipamento para determinação do grau de refino **(**Schopper Riegler - °SR**).** REGMED-SR-A

Figura 6- Aparelho formador de folhas tipo Köthen rapid. REGMED-F/SS-2

Figura 7- Corpos de prova

As propriedades físico-mecânicas avaliadas constam na Tabela 3, elas foram realizadas no laboratório de Celulose e Papel no departamento de ciências florestais.

Tabela 3- Normas utilizadas nas propriedades físico-mecânica

Propriedades	**Normas**
Peso Específico Aparente	TAPPI T 220 sp-96
Volume Específico Aparente	TAPPI T 220 sp-96
Resistência ao rasgo	TAPPI T 414 om-98
Índice de rasgo	TAPPI T 414 om-98
Resistência ao arrebentamento	TAPPI T 403 om-97
Resistência ao ar	TAPPI T 406 om-96
Resistência a tração	TAPPI T 494 om-96
Índice de tração	TAPPI T 494 om-96
Comprimento de auto-ruptura	TAPPI T 494 om-96
Alongamento	TAPPI T 494 om-96
Trabalho de ruptura	TAPPI T 494 om-96
Energia absorvida na tração	TAPPI T 494 om-96
Índice de energia absorvida na tração	TAPPI T 494 om-96
Módulo de elasticidade	TAPPI T 494 om-96
Rigidez à tração	TAPPI T 494 om-96
Índice de rigidez na tração	TAPPI T 494 om-96

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Morfologia de fibras em três amostras de celulose branqueadas de *Pinus*

A Tabela 4 mostra a morfologia da fibra de três amostras de celulose branqueada de Pinus procedentes dos Estados Unidos. O comprimento da fibra é a principal dimensão devido às relações positivas com as resistências do papel. A amostra B apresentou fibras com maior comprimento, menor diâmetro do lume e maior espessura da parede em relação às amostras A e C. Os valores de comprimento de fibra das três amostras de polpa estão um pouco abaixo dos citados na literatura. Levlin e Söderhjelm (1999) citam valores de 2,60 a 2,70 mm para comprimento de fibra destas polpas. Contudo, os valores encontrados no presente estudo estão compatíveis aos encontrados por outros autores ao estudarem a morfologia de *Pinus* (KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003; RIGATTO, 2004).

Tabela 4- Morfologia da fibra na celulose fluff branqueada procedente da madeira de Southem pines dos Estados Unidos (Equipamento: Kajaani FS-200)

Parâmetros	Unidade	Amostra A	Amostra B	Amostra C
Comprimento	mm	2,24	2,52	2,34
Largura	μm	27,06	27,40	27,70
Diâmetro do lume	μm	15,57	14,92	15,79
Espessura da parede	μm	5,74	6,24	5,98
Índice de enfeltramento	%	82,76	91,97	85,18
Coeficiente de flexibilidade	%	57,55	54,45	56,99
Fração parede	%	42,45	45,55	43,01
Índice de Runkel		0,74	0,84	0,75
Índice de curvatura	%	13,93	11,67	11,70
Coarseness	mg/100m	22,03	24,51	23,38
População fibrosa	x 10^6	4,34	3,72	3,80
Finos < 0,1 mm aritmético	%	0,99	1,10	0,90
Finos < 0,2 mm aritmético	%	2,99	3,20	2,70

As relações entre dimensões de fibras são muito utilizadas na fabricação de papel e são mais importantes que as dimensões de fibras de forma isolada, pois se relacionam melhor com as características e propriedades do produto. Os índices de enfeltramento foram elevados nas fibras de *Pinus*, principalmente na amostra B. O maior valor para este índice significa que há maior possibilidade de ligação das fibras às outras, e consequentemente maior resistência do papel. A amostra B caracterizou por apresentar menor coeficiente de flexibilidade (percentual de lume em relação à largura da fibra) ou maior fração parede (percentual de parede celular em relação à largura da fibra) quando da comparação com as demais amostras. A celulose contendo fibras com menor coeficiente de flexibilidade (ou maior fração parede) formará um papel mais volumoso e com menores resistências que dependem da ligação interfibra (tração, alongamento, estouro e dobras), devido a maior rigidez das fibras. O oposto, celulose com fibras de maior coeficiente de flexibilidade (ou menor fração parede) formará um papel mais denso e com melhores resistências. O maior valor do

índice de Runkel foi obtido para a amostra B, significando que as suas fibras são mais rígidas. Este índice é definido como a relação entre duas vezes à espessura da parede e o diâmetro do lume.

Os resultados para índice de curvatura mostram menor valor para amostra B e maior valor para a amostra A. Este comportamento aconteceu porque as fibras da amostra B são mais rígidas (maior fração parede), e da amostra A são mais flexíveis (menor fração parede). Pode ser observada boa relação entre fração parede das fibras e índice de curvatura. Este índice é o desvio da linha reta em relação ao eixo da fibra. As fibras se curvam durante a polpação, processamento da polpa e refino (Robertson et al., 1999). As fibras durante o processamento da polpa sofrem tratamentos mecânicos em misturadores, desintegradores, bombeamentos e espessadores, os quais deformam a fibra e induzem curvatura gradual e contínua, que tem influência no comprimento da fibra. As fibras na madeira são retas (LEVLIN E SÖDERHJEM, 1999).

A coarseness das fibras é definida como o peso de fibras por unidade de comprimento linear. Pode-se observar valores decrescentes de "coarseness" das fibras na seguinte ordem: amostra B, amostra C e amostra A. Observa-se boas relações desta propriedade com espessura da parede da fibra e fração parede. Os valores da "coarseness" da fibra das três amostras de celulose estão pouco abaixo dos valores citados na literatura. Levlin & Söderhjelm (1999) citam valores de 33 a 36 mg/100 m para a "coarseness" destas fibras na celulose.

O resultado para a população fibrosa, expressa em milhões de fibras por grama de celulose, mostra valores decrescentes na seguinte ordem: amostra A, amostra C e amostra B. Pode-se observar boa relação entre população fibrosa e comprimento da fibra.

Para a confecção de fraldas descartáveis, o maior comprimento da fibra ou maior índice de enfeltramento são propriedades altamente desejáveis, e nestes requisitos a amostra B foi superior quanto comparada às amostras A e C.

A Figura 8 mostra as relações entre a "coarseness" e espessura da parede da fibra, comprimento da fibra e fração parede. Podem ser visualizadas, também, as relações entre população fibrosa e comprimento da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede para celulose do *Pinus*.

Nota-se que a "coarseness" tem relação positiva com a espessura da parede, comprimento de fibra e a porcentagem de fração parede. No entanto o comprimento de fibra, espessura da parede e fração parede tem relação negativa com a população fibrosa.

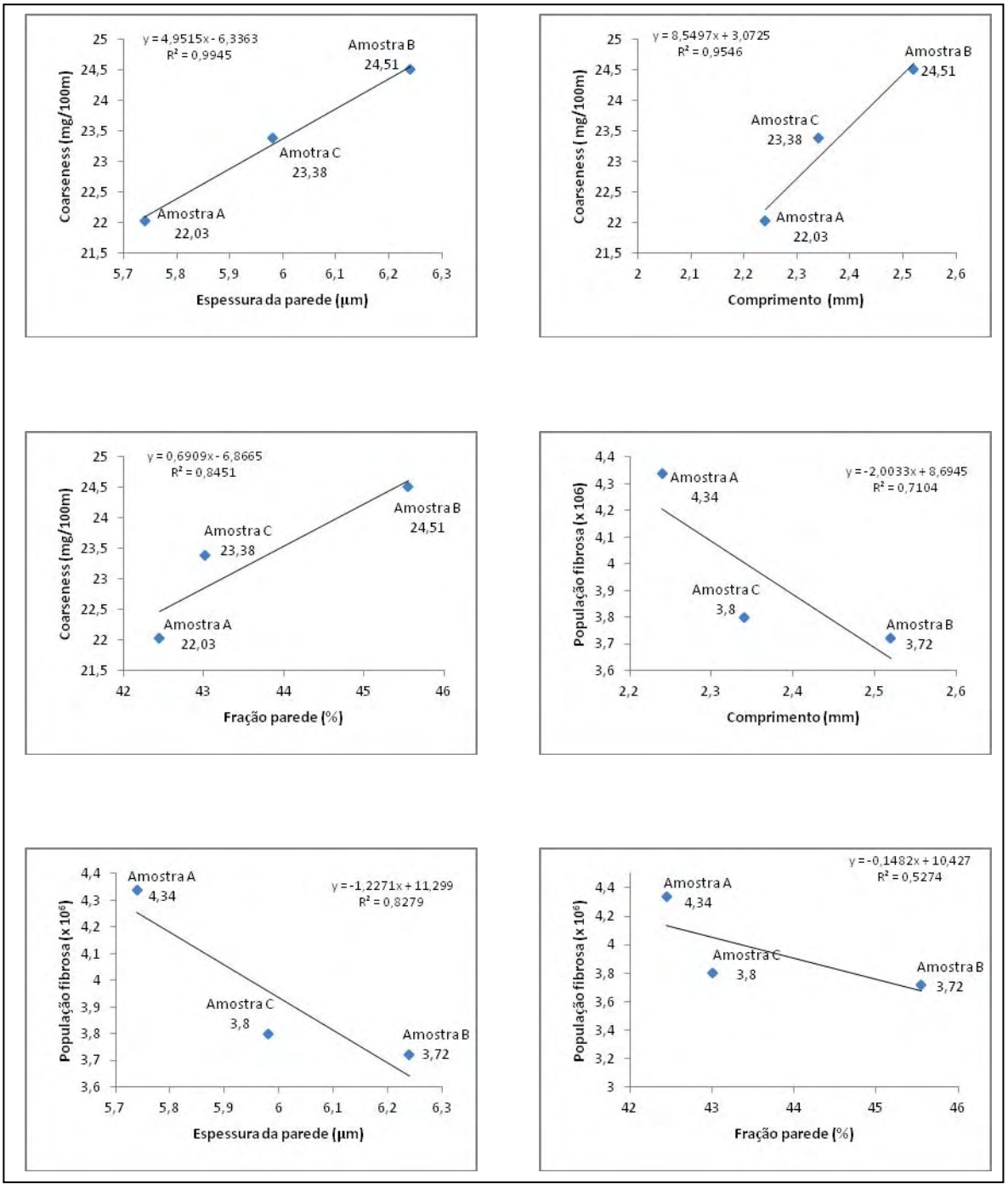

Figura 8- Relações entre "coarseness" e população fibrosa com comprimento da fibra, espessura da parede da fibra e fração parede.

5.2 Morfologia de fibra de celulose branqueada dos híbridos de *E. urophylla x E. grandis.*

A Tabela 5 mostra a morfologia da fibra na celulose branqueada procedente de madeira com menor e maior densidade básica do híbrido de *E. urophylla x E. grandis.* Este resultado está a principio em desacordo com vários trabalhos de literatura que relatam que maior densidade básica apresenta fibras na madeira com maior espessura de parede e maior fração parede.

Tabela 5- Morfologia da fibra na celulose branqueada procedente de madeira com menor e maior densidade básica do híbrido de *E. grandis x E. urophylla* (Equipamento: Kajaani FS-200)

Parâmetros	Unidades	Clone de menor densidade básica Amostra D	Clone de maior densidade básica Amostra E
Comprimento	mm	0,856	0,774
Largura	μm	17,39	17,06
Diâmetro do lume	μm	10,92	11,53
Espessura da parede	μm	3,23	2,76
Índice de enfeltramento	%	49,32	45,44
Coeficiente de flexibilidade	%	62,80	67,62
Fração parede	%	37,21	32,39
Índice de Runkel		0,60	0,48
Índice de curvatura	%	20,87	20,68
Coarseness	mg/100m	6,43	6,91
População fibrosa	x 10^6	21,26	21,76
Finos < 0,1 mm aritmético	%	1,87	1,48
Finos < 0,2 mm aritmético	%	5,55	5,07

A diferença do presente estudo é que as dimensões de fibras foram efetuadas na polpa branqueada, ou seja, fibras que passaram pelas condições dos processos de

polpação e branqueamento. As dimensões das fibras se alteram quando determinadas na madeira e na polpa branqueada devido a três fatores segundo Levlin e Söderhjem (1999). Primeiro, a madeira é reduzida a cavacos e esta operação pode cortar fibras se não for efetuada de forma correta. Segundo, as condições de polpação e branqueamento alteram as dimensões das fibras. Durante estes processos, lignina e hemiceluloses são solubilizadas da parede celular e tornam as fibras mais finas e mais flexíveis. Terceiro, as fibras durante o processamento da polpa sofrem tratamentos mecânicos em misturadores, desintegradores, bombas e espessadores, os quais deformam a fibra e induzem curvatura gradual e contínua e curvatura torcida que tem influência no comprimento da fibra. Trepanier (1998) relata que o comprimento e a forma da fibra se alteram durante a polpação e branqueamento. Estas alterações podem afetar fortemente a qualidade e o desempenho do produto. Braaten e Molteberg (2004) relatam que a seção transversal da fibra pode deformar ou colapsar durante polpação, significando desvios das verdadeiras dimensões das fibras. Santos (2005) estudou a influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada. Obteve decréscimo na largura e no diâmetro do lume na fibra proveniente de polpa branqueada quando da utilização de maiores cargas de álcali ativo na polpação. Dinus e Welt (1997) relatam que a alta densidade básica em híbridos de *Eucalyptus* pode ser devido a um elevado número de fibras com lume estreito e paredes celulares relativamente finas e flexíveis. Considerando os resultados obtidos no presente trabalho e a literatura consultada, as relações entre densidade básica e dimensões de fibras na madeira e polpa branqueada de híbridos de *Eucalyptus* precisam ser mais bem estudadas. As fibras branqueadas provenientes da madeira de maior densidade básica apresentaram maior massa por unidade de comprimento de fibra (“coarseness”) estando de acordo com o esperado.

5.3 Análise comparativa da morfologia das fibras de celulose de Pinus e da celulose do híbrido de *E. grandis x E. urophylla*

A Tabela 6 mostra os resultados médios da morfologia das três amostras de celulose de *Pinus*, das duas amostras de celulose do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e análise comparativa das propriedades determinadas anteriormente.

Tabela 6- Resultados médios da morfologia da fibra das três amostras de celulose de *Pinus* (Tabela 4), das duas amostras de celulose do híbrido de *E. grandis x E. urophylla* (Tabela 5) e análise comparativa

Parâmetros	Unidades	Celulose de *Pinus*	Celulose de *E. grandis x E. urophylla*	Análise comparativa
Comprimento	mm	2,37	0,82	*FL = 2,9 x FC
Largura	μm	27,39	17,23	FL = 1,6 x FC
Diâmetro do lume	μm	15,43	11,23	FL = 1,4 x FC
Espessura da parede	μm	5,99	3,00	FL = 2,0 x FC
Índice de enfeltramento	%	86,64	47,38	FL = 1,8 x FC
Coeficiente de flexibilidade	%	56,33	65,21	FC = 1,2 x FL
Fração parede	%	43,67	34,80	FL = 1,3 x FC
Índice de Runkel		0,78	0,54	FL = 1,4 x FC
Índice de curvatura	%	12,43	20,78	FC = 1,7 x FL
Coarseness	mg/100m	23,31	6,67	FL = 3,5 x FC
População fibrosa	x 10^6	3,95	21,51	FC = 5,4 x FL
Finos < 0,1 mm aritmético	%	1,00	1,68	FC = 1,7 x FL
Finos < 0,2 mm aritmético	%	2,96	5,31	FC = 1,8 x FL

* FL = Fibra Longa e FC = fibra Curta

Conforme pode ser observado, as dimensões das fibras da celulose de *Pinus* aumentaram de forma desproporcional em relação à celulose do híbrido de *E. grandis x E. urophylla*. As fibras de Pinus caracterizaram por apresentar 2,9 mais comprimento, 2,0 mais espessura da parede, 1,6 mais largura e 1,4 mais diâmetro do lume que as fibras da celulose do híbrido. O comprimento da fibra é a maior dimensão, e esta de acordo com o relatado por Button (2006), que relata que as fibras de coníferas são de 2 a 3 vezes mais longas que as fibras de folhosas. As relações entre dimensões de fibras mostram elevado índice de enfeltramento para as fibras longas em relação às fibras curtas, como era esperado. As fibras de coníferas (madeira mole ou com menor densidade básica) apresentaram maior espessura da parede e maior fração parede em relação às fibras de folhosas (madeira dura ou com maior

densidade básica). Este resultado mostra que as relações entre densidade básica da madeira e espessura da parede e/ou fração parede não são válidas para grupos de madeira muito distintos (coníferas e folhosas). O índice de curvatura das fibras na celulose de *Pinus* foi menor quando comparado ao do híbrido, podendo ser atribuído a maior rigidez destas fibras (maior fração parede). Os resultados do "coarseness" mostram valores bem mais elevado para as fibras longas (3,5 x maior) quando comparados com as fibras curtas. Button (2006) relata que as fibras de coníferas apresentam de 2 a 3 mais "coarseness" que as fibras de folhosas. A população fibrosa foi 5,4 vezes maior para a fibra de folhosa e atribuída ao menor comprimento de suas fibras. Os teores de finos mostram valores mais elevados na celulose de fibra curta devido ao maior teor de células de parênquima e presença de pequenos elementos de vaso.

5.4 Morfologia da fibra da celulose branqueada de *E. globulus*

A Tabela 7 mostra os resultados médios da classificação de fibras em classificador de fibras Bauer McNett da celulose branqueada de *E. globulus*. Foelkel (2009) aponta o classificador de fibras como um grande aliado à indústria, por ter a função de recuperar fibras e de classificar o material em: fibras longas, fibras media, finos, cargas minerais e etc. Podendo assim compor receitas para otimização do processo industrial. Nota-se que nas peneiras com aberturas 16-30 e 30-50 foram as que obtiveram a maior retenção de fibras, 41,4 e 38,5% respectivamente. Carvalho et al. (1997) encontraram valores semelhantes, de 45,05% na peneira 48 mesh, e 39,78 na peneira de 100 mesh. As frações encontradas nessas peneiras são as que possuem maior comprimento e maior "coarseness". A porcentagem de 8,8%, encontrada na peneira <200, são os finos celulósicos, esse valor esta de acordo com o citado por Foelkel (2009), de cerca de 6 a 12%. Esse mesmo autor comenta que quando o tamanho das partículas diminui, nota-se a presença de quebradas colapsadas e dobradas. Ou seja, maior presença de pedaços de fibras, parede e de fibras deformadas.

Tabela 7- Resultados médios da classificação de fibras em Bauer McNett da celulose branqueada de *E. globulus*.

	Aberturas das peneiras do classificador, mesh					
	>16	16-30	30-50	50-100	100-200	<200
Retenção, %	0,3	41,4	38,5	9,3	1,7	8,8

A Tabela 8 mostra os resultados médios da morfologia da fibra da celulose branqueada de *E. globulus* em equipamento Kajaani FS-300. As análises foram efetuadas na amostra integral e nas frações retidas nas peneiras 16-30, 30-50 e 50-100. Segundo Foelkel (2009), o uso de classificadores permite diferenciar produtos, aumentar a eficiência industrial e ter um melhor controle de qualidade do processo.

Tabela 8- Resultados médios da morfologia da fibra de celulose Kraft branqueada de mercado de *E. globulus.* classificada em classificador de fibras Bauer McNett.

Parâmetros	Unidades	Médias	Não Classificada	Peneira 16-30	Peneira 30-50	Peneira 50-100
Comprimento da fibra	mm	L(n)	0,63	0,82	0,73	0,56
		L(l)	0,77	0,90	0,80	0,62
		L(w)	0,86	0,97	0,86	0,69
Largura da fibra	µm	W(n)	12,8	13,3	12,7	12,4
		W(l)	13,0	13,4	12,7	12,5
		W(w)	15,4	14,5	13,8	15,1
Comprimento do vaso	mm	L(n)	0,29	0,33	0,30	0,26
		L(l)	0,33	0,38	0,33	0,30
		L(w)	0,40	0,44	0,37	0,38
Largura do vaso	µm	W(n)	108	122	114	102
		W(l)	111	130	116	108
		W(w)	124	143	124	121
Torção das fibras	-	T(n)	929	1485	1463	1539
		T(l)	1364	1565	1564	1665
		T(w)	1861	1653	1674	1805
Curvatura das fibra	%	C(n)	15,6	18,6	16,5	13,8
		C(l)	17,0	19,6	17,4	14,8
		C(w)	18,5	21,1	18,3	15,7
Teor de finos	%	F(n)	10,6	1,8	1,6	2,1
		F(l)	1,82	0,24	0,25	0,50
Coarseness da fibra	mg/100m	-	7,5	7,8	7,2	6,3
População fibrosa	milhões/g	-	21,4	15,8	19,2	28,6

Observa-se que para as frações de maior comprimento de fibra (16-30), tem maior valor “coarseness”, largura da fibra, comprimento do vaso, largura do vaso, curvatura das fibras e menor população de fibras. A fração com menor comprimento de fibra (50-100) apresentou uma menor largura de fibra, “coarseness” e curvatura de fibras, conseqüentemente aumentou o teor de finos e a população fibrosa, essas características apresentadas facilitam as ligações entre fibras. O alto valor de “coarseness” tem influencia direta em algumas propriedades do papel como: alto rasgo, alto volume específico aparente, alta porosidade, fraca folha úmida, baixa opacidade, alta rapidez para absorver água, drenagem rápida, superfície rugosa, baixa população fibrosa e ligação interfibras prejudicada (Foelkel 2009). Os resultados obtidos estão de acordo com o relatado por Foelkel (2007), que relata que os comprimentos das fibras (ponderado) podem variar de 0,6 a 0,85, o valor de “coarseness” varia de 4,5 a 11mg/100m e a população fibrosa que fica entre 12 a 30 milhões de fibras/grama de polpa seca.

A Figura 9 mostra a morfologia da fibra da celulose Kraft branqueada de *E. globulus* integral e com classificação em Bauer McNett na forma gráfica.

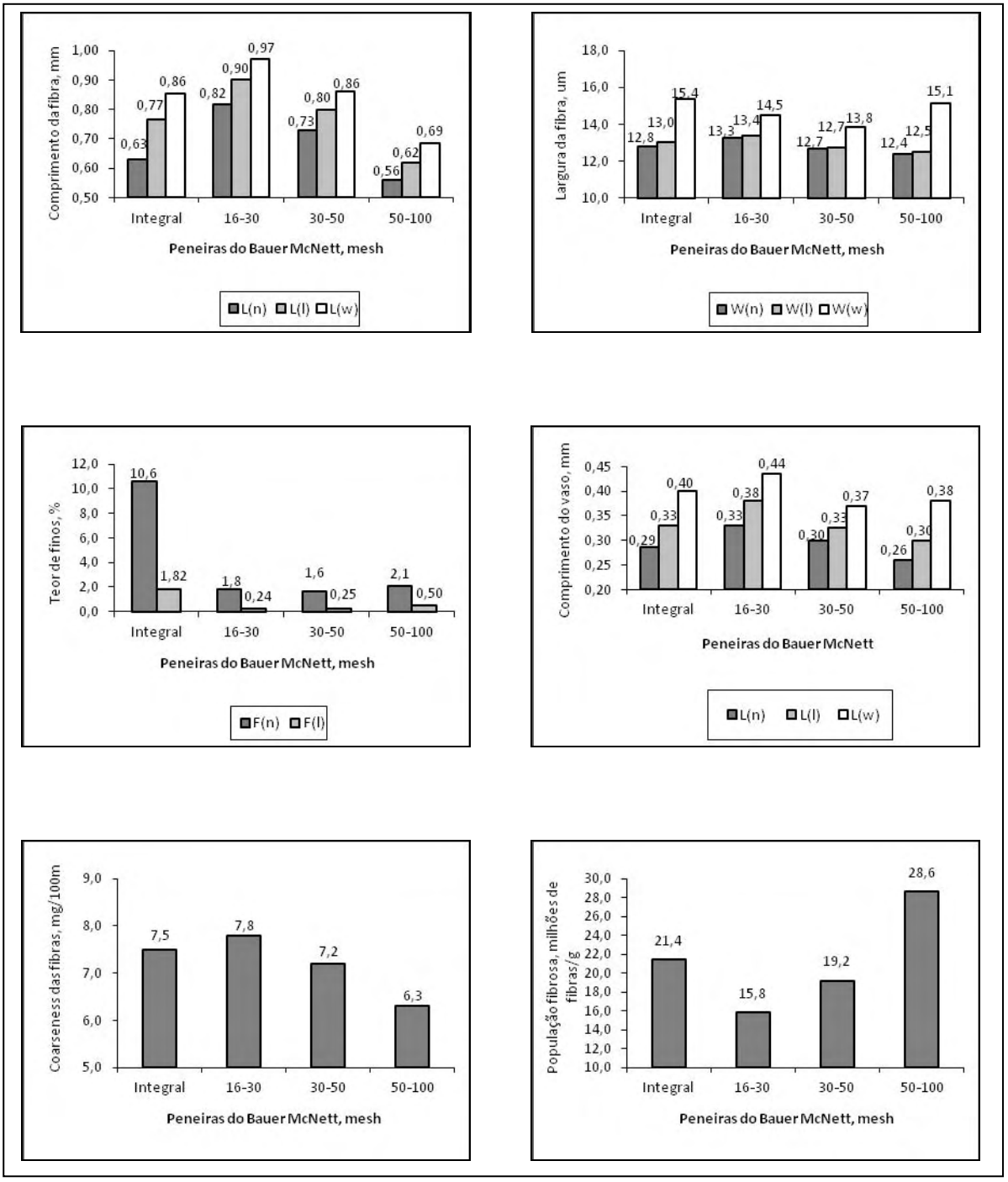

Figura 9- Morfologia da fibra da celulose Kraft branqueada de *E. globulus* integral e com classificação em Bauer McNett na forma gráfica.

5.5 Propriedades físico-mecânicas da polpa de *E. globulus*

Os resultados obtidos para as propriedades físico-mecânicas da polpa de *E. globulus* integral e classificada em Bauer McNett em três tempos de refino estão apresentados na tabela 9 e na Figura 10.

A capacidade do refino de cada amostra foi quantificada em função de sua drenagem. A resistência à drenagem, expressa em graus Schopper Riegler (°SR), é um indicativo da dificuldade com que a água escoa através da camada de fibras. O grau de refino torna-se maior com o aumento da energia aplicada nesta operação. A Tabela 9 e Figura 10 mostram o comportamento da resistência à drenagem em função do tempo de refino de cada uma das amostras de polpas branqueadas. Nota-se que quanto o maior tempo de refinação, maior o °SR, mais difícil o escoamento d'água, ou seja, diminuindo a drenabilidade. Resultados semelhantes foram observados por Pedrazzi (2010) ao estudar as propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. A classificação da celulose tendeu a reduzir o grau Schopper Riegler em algumas amostras devido à remoção dos finos.

Tabela 9- Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas de *E. globulus* integral e classificada em três tempos de refino.

Propriedades	Unidades	IT 0	IT 15'	IT 30'	P2 0	P 2 15"	P 2 30'	P 3 0	P3 15'	P3 30'	P4 0	P4 15'	P4 30'
Grau Schopper Riegler °SR		14	26	44	14	22	40	17	22	47	14	26	38
Peso específico aparente	g/cm^3	0,237	0,39	0,433	0,225	0,385	0,438	0,232	0,385	0,466	0,244	0,385	0,438
Volume específico aparente	cm^3/g	4,224	2,563	2,307	4,446	2,595	2,284	4,309	2,598	2,145	4,102	2,598	2,283
Índice de rasgo	$mN.m^2/g$	0,86	3,71	2,28	0,57	4,24	2,9	0,72	3,52	3,65	0,85	3,87	5,15
Índice de arrebentamento	$kPa.m^2/g$	0,05	0,94	1,3	0,00	1,01	1,28	0,04	0,96	1,36	0,06	1,03	1,37
Resistência ao ar	s/100mL	0,6	2,7	8	0,5	1,8	6,4	0,5	1,7	9,6	0,8	3,9	7,2
Índice de tração	N.m/g	1,81	20,93	31,48	1,29	20,71	25,2	1,41	22,99	25,19	1,21	21,18	25,45
Alongamento	%	0.93	1,62	2,02	0,94	1,54	2,25	0,98	1,8	2,03	0,86	2,08	2,62
Ind. de energia absorvida na Tração	kJ/kg	0,00	0,24	0,44	0.00	0,22	0,39	0,00	0,30	0,37	0,00	0,31	0.48
Índice de rigidez à tração	kN.m/kg	74,76	294,86	315,15	55,94	314,65	228,96	56,26	310,68	240,74	53,24	241,4	223,17

Em que: IT = Integral (0, 15 e 30 minutos de refino); P2 (peneira 16/30 mesh); P3 (peneira 30/50 mesh) e P4 (peneira 50/100 mesh)

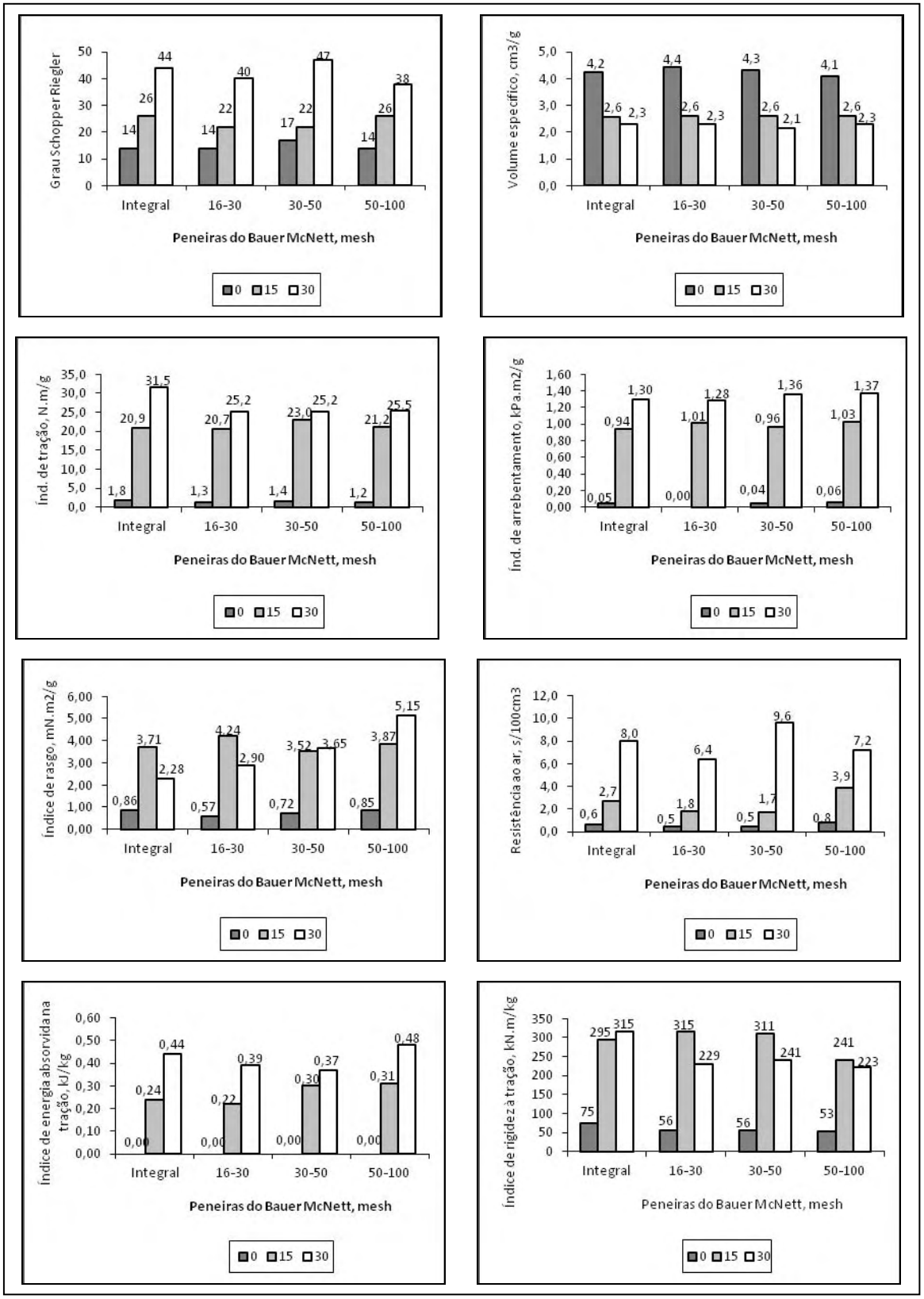

Figura 10- Morfologia da fibra da celulose Kraft branqueada de *E. globulus* integral e com classificação em Bauer McNett na forma gráfica.

O volume específico aparente (VEA) se comportou de maneira oposta ao peso específico aparente (PEA). Apesar de as polpas terem sido refinadas ao mesmo número de revoluções, a classificação das fibras afetou o VEA. Este fato está relacionado ao menor número de ligações entre as fibras, devido à redução da concentração de finos na polpa. Conseqüentemente há um aumento dos espaços vazios, da espessura e do VEA das folhas. Maiores volumes específicos são considerados importantes principalmente na fabricação de papéis sanitários, pois se aumenta a absorção e maciez dos mesmos. Resultados semelhantes foram encontrados por Pedrazzi, et al. (2010) e Tamezava (1981), que observaram que com o aumento do grau Schopper Riegler (°SR) há uma diminuição constante do VEA.

O índice de tração de tração sofreu reduções consideráveis devido à remoção dos finos após classificação em Bauer McNett, principalmente no maior tempo de refino. Queiroz (2004) estudando a Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones hibrídos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, relata que com a diminuição do VEA faz com que o índice de tração aumenta, esses resultados são compatíveis com os encontrados no presente trabalho.

O índice de arrebentamento (I.A.) é influenciado, principalmente, pelo número de ligações interfibras e pela força destas ligações, portanto, com o aumento do grau de refino, ocorre colapsamento das fibras resultando em maior compactação e maior área de contato entre elas, favorecendo o número e a força das ligações. Consequentemente, ocorre aumento da resistência ao arrebentamento. Com o excesso do aumento do grau de refino, o I.A. decresce. 0 índice de arrebentamento tendeu a se elevar nas fibras provenientes das peneiras 30/50 e 50/100.

O índice de rasgo tendeu a se elevar nas polpas classificadas em relação a polpa integral. O índice de rasgo é uma propriedade que depende principalmente da resistência intrínseca das fibras e, portanto este comportamento era esperado.

A energia absorvida na tração da polpa foi alterada devido a sua classificação. A energia absorvida na tração é uma medida da habilidade do papel absorver energia e indica a durabilidade do papel quando submetido a esforços ou tensões repetitivas ou dinâmicas. A energia absorvida na tração expressa a rijeza da folha. É definida pelo trabalho de ruptura por unidade de área (comprimento x largura da tira de papel).

A rigidez à tração, calculada pelo produto do módulo de elasticidade x espessura do papel, foi superior para a polpa integral em relação as polpas classificadas. A rigidez à tração é a melhor indicação de resposta mecânica da folha para converter forças.

A resistência ao ar é a propriedade que mostra como uma folha de papel deixa-se atravessar por uma certa quantidade de ar, quando submetida a uma diferença de pressão conhecida. Ela se relaciona inversamente com a porosidade do papel. É uma consequência, principalmente, do grau de refino das fibras que compõem o papel, como observado na tabela 9. Entretanto, outros fatores também podem influenciar os seus resultados, como distribuição das fibras, densidade, teor de carga, etc. A força de tensão necessária para arrebentar o papel e denominada resistência a tração. A resistência individual das fibras, comprimento médio, formação e estrutura do papel afetam esse teste. A resistência à tração pode ser expressa pelo comprimento de auto-ruptura, que é o comprimento necessário para uma fita de papel romper-se devido ao seu próprio peso quando suspensa por uma de suas extremidades. A resistência à tração depende principalmente do grau de ligação entre fibras e pode ser utilizada como um método para avaliar a capacidade de ligação entre fibras. A tabela 9 mostra que com o maior grau de refino o índice de tração tem um aumento considerável em relação às amostras que não tiveram refino.

O alongamento é a deformação máxima que apresenta um corpo de prova, de largura e comprimento especificados, no momento de sua ruptura, ele é determinado juntamente com a resistência a tração (D’ALMEIDA 1988). Os resultados mostram que dobra a porcentagem das polpas refinadas com 30 minutos em relação as polpas sem refino, e não há grande diferença entre P3 15’ e P3 30’.

6. CONCLUSÃO

As dimensões das fibras nas três amostras de celulose de *Pinus* variaram em relação ao comprimento, espessura da parede e diâmetro do lume. A largura da fibra foi à dimensão mais estável. Obteve-se relação positiva entre espessura da parede, fração parede e "coarseness", e relação negativa destes parâmetros com o índice de curvatura da fibra. O comprimento da fibra relacionou positivamente com a espessura da parede, índice de enfeltramento e "coarseness", e negativamente com o diâmetro do lume e população fibrosa. A amostra B caracterizou por apresentar maior comprimento de fibra e mais indicadas para confecção de fraldas descartáveis.

As dimensões de fibras variaram nas duas amostras de celulose de *Eucalyptus* provenientes de madeira de diferentes densidades básica. As fibras na celulose provenientes da madeira de menor densidade básica apresentou maior espessura da parede, maior fração parede e menor "coarseness" e vice-versa. A "coarseness" das fibras foi o parâmetro que melhor relacionou com a densidade da madeira. Obteve-se relação positiva entre espessura da parede, fração parede e índice de curvatura, e relação negativa destes parâmetros com a "coarseness". O comprimento da fibra relacionou positivamente com a espessura da parede e índice de enfeltramento, e negativamente com a "coarseness" diâmetro do lume e população fibrosa.

A análise conjunta de fibras longas e curtas mostrou as grandes diferenças morfológicas existentes. A fibra longa tem em relação à fibra curta 2,9x mais comprimento, 2,0x mais espessura da parede, 1,6x mais largura e 1,4x mais diâmetro do lume, 1,8x mais índice de enfeltramento, 1,3x mais fração parede, 3,5x mais "coarseness" e baixa

população fibrosa. Obteve-se relação positiva entre espessura da parede, fração parede e "coarseness", e relação negativa destes parâmetros com o índice de curvatura da fibra. O comprimento da fibra relacionou positivamente com o índice de enfeltramento e "coarseness", e negativamente com a população fibrosa.

A morfologia de fibras em celuloses classificadas de *E. globulus* mostrou relação positiva do comprimento com a largura, "coarseness" e curvatura das fibras, e negativamente com a população fibrosa.

A classificação das fibras em Bauer McNett promoveu alterações na refinabilidade da polpa e nas propriedades de resistências físico-mecânicas avaliadas

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010** / ABRAF. – Brasília: 2011. 130p.

ANNERGREN, G. Fundamentals of Pulp Fiber Quality and Paper Properties, **Tappi pulping conference proceedings**, 1999.

ASTALS, F.; COMA, I. **Naturaleza, efectos y medida del refinado:** Últimos avances en la tecnologia del refinado. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNA (ETSEIT), Ed. Terrassa, 1988, p.43-72.

BARRICHELLO, L.E.G.; BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel.** Brasília PNUD/FAO/IBDF/BRA, 1976. 145 p.

BRAATEN, K. R.; MOLTEBERG, D. A mathematical method for determining fiber wall thickness and fiber width. **Tappi Journal**, v.3, n.2, p.9-12, 2004.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. "**Relatório estatístico florestal 2010/2011".** 49p. 2011.

BRINDLEY, C. L.; KIBBLEWHITE, R. P. Comparison of refining response of eucalypt and a mixed hardwood pulp and their blends with softwood. **Appita Journal**, v.49, n.1, p.37-42, 1996.

BUSNARDO, C. A. Refinação de polpa de eucalipto e suas aplicações em diferentes tipos de papéis. **Relatório Técnico**: Riocell, n.368, p.25, 1990.

CAMPOS, E. S. **Análise comparativa de pastas celulósicas branqueadas de eucaliptos para a fabricação de papéis de impressão e escrita.** 1997. 93f. 104 Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1997.

CAMPOS, E.S.; MARTINS, M.A.L.; FOELKEL, C.E.B.; FRIZZO, S.M.B. Seleção de critérios para a especificação de pastas celulósicas branqueadas de eucaliptos na fabricação de papéis de impressão offset. **Ciência Florestal** 10(1): 57 . 75. (2000).

CARPIM, M. A., BARRICHELO, L. E. G,, CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. & DIAS, R. L. V. 1987. **A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel.** 20° Congresso Anual da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. São Paulo, 1987.

CARVALHO, M. G.; FERREIRA, P. J.; MARTINS, A. A.; FIGUEIREDO, M. M. A comparative study of two automated techniques for measuring fiber length. **Tappi Journal**, v.80, n.2, p. 137-142, 1997.

CLARK, J d`A. **Pulp technology and treatment for paper**. 2. ed. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1985, 878 p., Cap. 3, p.452-629.

SILVA JR., C.; MARTON, R.; GRANZOW, S. 1982. Effect of beating on wet web properties. **Tappi Journal**, 65, 99-103.

COMELATO, J. S. E**feito de reagentes de branqueamento nas propriedades físicas e mecânicas da polpa de celulose kraft de eucalipto.** 2011. 1132 f. Dissertação (Mestrado) - Unesp, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

CORNIANI, N. **Relação entre estresse de radiação UV-B e óxido nítrico em plantas de eucalipto.** 2009 Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2009.

COTTERILL, P.; MACRAE, S. Improving eucalyptus pulp and paper quality using genetic selection and good organization. **Tappi Journal**, v.80, n.6, p. 82-89, 1997.

CRUZ, M. P. et al. Caracterização química do "pitch" em indústria de celulose e papel de Eucalyptus. **Quím. Nova**. 2006, vol.29, n.3, pp. 459-466.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel - Tecnologia de fabricação do papel**. 2. ed. São Paulo: SENAI-IPT. v. 2. 1988. 964p.

DEMUNER, B. J., DORIA, E. L. V., CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. & MANFREDI, V. 1991. The influence of eucalypt fiber characteristics on paper properties. 1991 **International Paper Physics Conference**, Book 1 and 2,185-196.

DILLNER, B.; JONSSON, P. **A classification of hardwood pulps for paper, in New pulps for the paper industry.** HAAS, L. E. San Francisco: Miller Freeman Publications, 1979. p. 25-35.

DINUS, R. J.; WELT, T. Tailoring fiber properties to paper manufacture: Recent developments. **Tappi Journal**, v.80, n.4, p.127-139, 1997.

DINWOODIE, J.M. The relationship between fiber morphology and paper properties: A review of literature. **Tappi Journal**, v.48, n.8, p.440-447, Aug. 1965.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties.** Australia: CSIRO Publishing, 1997. 132 p.

DUEÑAS, R.S. **Obtención de pulpas y propriedades de las fibras para papel**. Guadalajara. Universidad de Guadalajara. ed.1, 293p. 1997.

FERREIRA, P.J.T. **Estudos de pastas kraft de Eucalyptus globulus: Características estruturais e aptidão papeleira**. 2000. 366p. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra, 2000.

FIDALE, L.C. Biopolímeros **Modificados: Aspectos de Derivatização de celulose sob Condições Homogêneas de Reação.** 2010. 248p. Tese Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Química Orgânica. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FOELKEL, C. As fibras dos eucaliptus e as qualidades requeridas na celulose Kraft para fabricação de papel. In: **Eucalyptus Online Book**, 2007. 48p.

FOELKEL, C. Propriedades papeleiras das árvores, madeiras e fibras celulósicas dos eucaliptos. In: **Eucalyptus Online Book**, cap.14, 2009. 110p.

FOELKEL, C. E. B. **Qualidade da Madeira de eucalipto para atendimento das exigências do mercado de celulose e papel**. º Celsius Degree / Grau Celsius.

FOELKEL, C. B.; BARRICHELO, L. E. G. **Tecnologia de celulose e papel**. Piracicaba: ESALQ/USP, ESALQ, 1975. 207p.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP – Semana do Papel, 8. São Paulo, 1975. **Anais** São Paulo: ABTCP, 1975. p.40-53.

GONÇALEZ, J. C.; GOMIDE, J. L.; VITAL, B. R. Estudos tecnológicos da madeira de brotações de Eucalyptus grandis para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, v.10, n.1, p.1-15, 1986.

GUENTHER, E. **History, Origin in Plants, production and analysis**. In: The Essential Oils, 4. ed. New York: Van Nostrand, 1977.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de Pinus taeda L. de procedência da África do Sul**. 107p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.

HILLMAN, D. **Fluff pulp: a sellers' market in 2005.** Paper Asia (Janeiro/Fevereiro): 16-17p. (2005).

KEREKES, R. J.; SCHELL, C. J. Effects of fiber length and coarseness on pulp flocculation. **Tappi Journal**, v.78, n.2, p.133-139, 1995.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Morre**. 297p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed., Curitiba, FUPEF, 2005. 85 f.

LEVLIN, J. E.; SÖDERHJELM, L**.** Pulp and paper testing. Atlanta: **Tappi Press**, 1999. v.17, 288 p. 1999.

MANFREDI, V. **O refino da celulose**. In: Curso de especialização em papel. Módulo 6 – preparação da massa. ABTCP/UFV: Mucuri, 42p., 1998.

MANFREDI, V.; VILELA, C. B.; SILVA JÚNIOR, C. Efeitos das variáveis operacionais do refino na evolução das propriedades da polpa refinada. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 19, 1986. Anais... São Paulo: **ABTCP,** p. 189-207, 1986.

PAAVILAINEN, L. Effect of sulfate cooking parameters on the papermaking potential of pulp fibres. Paperi ja Puu **– Paper and Timber**, v.71, n.4, p.356- 363, 1989.

PAAVILAINEN, L. Importance of cross-dimensional fibre properties and coarseness for the characterization of softwood sulfate pulp. Paperi ja Puu – **Paper and Timber**, v.75, n.5, p.343-351, 1993.

PEDRAZZI, C. et al. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 123-135, jan.-mar., 2010.

PIIRAINEN, R. Optical method provides quick and accurate analysis of fiber length. **Pulp Paper**, 59: 69-71.1985.

PRYOR, L.D.; WILLIAMS, E.R.; GUNN, B.V. A morphometric analysis of Eucalyptus urophylla and related taxa with descriptions of two new species. **Australian Systematic Botany**, v.8, p.57-70, 1995.

QUEIROZ, S.C.S. et al. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones hibrídos de *Eucalyptus grandis* w. hill ex Maiden x *Eucalyptus Urophylla* s. t. Blake. **R. Árvore,** Viçosa-MG, v.28, n.6, p.901-909, 2004.

RIBEIRO JR., A. Considerações gerais sobre o uso de celulose de eucalipto na fabricação de papel, in: Convenção anual da ABCP, 9., 1976, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1976 p. 47-49.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**. Viçosa. v.29, n.5, p.701-709, 2005.

ROBERTSON, G.; OLSON, J.; ALLEN, P.; CHAN, B., SETH, R. Measurement of fiber length, coarseness, and shape with the fiber quality analyzer. **Tappi Journal**, v.82, n. 10, p.93-99. 1999.

ROCHA, C. B. R.; POTIGUARA R. C. V. Morfometria das fibras das folhas de Astrocaryum murumuru var. murumuru Mart. (ARECACEAE). **Acta Amaz.,** 2007, vol.37, no.4, p.511-516.

ROSA, C. A. B. I**nfluência do teor de lignina da madeira de *eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft.** 2003. 50 f. Dissertação (Mestrado) - UfSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2003.

RUNKEL, R.O.H. 1952. **Pulp from tropical wood**. TAAP, 35 (4): 174-178.

SANTOS, S. R. dos; SANSIGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones *de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophyllana* qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal.** Santa Maria, v.17, n.1, p. 53-63. 2007.

SANTOS, C. R. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-AQ.** 2000. 117p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, S. R.. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla e do processo kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD - SCAN. **Normas técnicas**. Stockholm, 1980. Alkali solubility of pulp, Norma SCAN C2:61. Drainability by the Schopper-Riegler Method, Norma SCAN C 19:65.

SETH, R. S.; CHAN, B. K. Measurement of fiber coarseness with optical fiber length analyzers. **Tappi Journal**, v. 80, n.5, p.217-221, 1997.

SHIMIZU, J. Y. **Cultivo do pinus**. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 5 ISSN 1678-8281 Versão Eletrônica Nov./2005.

SILVA, A.P. Considerações sobre a refinação de fibras**. O Papel.** p. 29-34. 1969.

SILVA, D.J. **Impacto na qualidade da madeira na deslignificação do branqueamento e nas propriedades físico–mecânica da polpa de eucalipto.** 1996. 115 p. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1996.

SILVA, J. C. Cresce presença do eucalipto no Brasil**. Revista da Madeira**, n. 92, p.61-66, 2005.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 4. ed. Atlanta: TAPPI press, 1987. 396 p.

TAMEZAVA, J.; FOELKEL, C. E. B.; REGAZZI, A. J. Influência de alguns aditivos nas propriedades de papéis kraft de Pinus strobus var. chiapensis e de Eucaliptos grandis**.** In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, São Paulo, 1981. **Anais**. p. 397-477.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **Normas técnicas**. Atlanta, 1999.

TREPANIER, R. J. Automatic fiber length and shape measurement by image analysis. **Tappi Journal**, v.81, n.6, p. 152-154, 1998.

VALENTE, C.A.; FURTADO, F.P.; SOUZA, A.P.M. et al. Improvement program for Eucalyptus globulus at PORTUCEL: Technogical component. **APPITA**, v. 45. n. 6, p. 403-407, nov. 1992.

WRIGHT, P. J.; WALLIS, A. F. A. Rapid determination of cellulose in plantation eucalypt woods to predict Kraft pulp yields. **Tappi Journal**, v.81, n.2, 1998.

YALIN PR E HANNU MAKKONEN,. Precision and Accuracy Studies with Kajaani Fiber Length Analyzers**.** ***Journal of Applied Sciences****,* 7: 1043-1047. 2007.

APÊNDICE

Apêndice 1- Relações de dimensões das fibras.

Fração parede (FP)

$$FP = \left(\frac{2 \times E}{L}\right) \times 100$$

E = espessura da parede

L = largura da fibra

Coeficiente de flexibilidade (CF)

$$CF = \left(\frac{DL}{L}\right) \times 100$$

L = largura da fibra

DL = diâmetro do lume

Índice de Runkel (IR)

$$IR = \left(\frac{2 \times E}{DL}\right)$$

E = espessura da parede

DL = diâmetro do lume

Apêndice 2- Fórmulas utilizadas para os cálculos das propriedades de resistências físico-mecânicas.

Peso Específico Aparente (TAPPI T 220 sp-96)

$$PEA = \frac{G}{E}$$

PEA = Peso Específico Aparente, g/cm3

G = Gramatura, g/m2

E = Espessura, mm

Volume Específico Aparente (TAPPI T 220 sp-96)

$$VEA = \frac{E}{G} = \frac{1}{PEA}$$

VEA = Volume Específico Aparente, cm3/g

G = Gramatura, g/m2

E = Espessura, mm

Resistência ao rasgo (TAPPI T 414 om-98)

$$RR = \frac{L.16}{N}.9{,}81$$

RR = Resistência ao rasgo, mN

L = Média das leituras, gf

N = Número de folhas

Índice de rasgo (TAPPI T 414 om-98)

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

IR = Índice de rasgo, mN.m2/g

RR = Resistência ao rasgo, mN

G = Gramatura, g/m2

Resistência ao arrebentamento (TAPPI T 403 om-97)

$$RA = P$$

RA = Resistência ao arrebentamento, kPa
P = Pressão média, kPa

Índice de arrebentamento (TAPPI T 403 om-97)

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

IA = Índice de arrebentamento, kPa.m2/g

P = Pressão média, kPa

G = Gramatura, g/m2

Propriedades de Tração (TAPPI T 494 om-96)

Resistência à tração

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

RT = Resistência à tração, kN/m

FM = Força máxima, N

L = Largura da tira, mm

Índice de tração

$$IT = \frac{RT.1000}{G}$$

IT = índice de tração, N.m/g

RT = Resistência à tração, kN/m

G = Gramatura, g/m2

Comprimento de auto-ruptura

$$AR = \frac{RT.1000}{G.9{,}81}$$

AR =Comprimento de auto-ruptura, km

RT = Resistência à tração, kN/m

G = Gramatura, g/m2

Alongamento

$$A = \frac{D}{C}.100$$

A =Alongamento, %

D = Deformação, mm

C = Comprimento inicial, mm

Trabalho da ruptura

$$U = \int_{A=0}^{A=max} RT\,dA/9{,}81$$

U = Trabalho, J

$$U = \int_{A=0}^{A=max} RT\,dA = \text{Área sob a curva Resistência à tração/alongamento}$$

Energia absorvida na tração

$$TEA = \frac{U.10^6}{L.C}$$

TEA = Energia absorvida na tração, J/m2

U = Trabalho, J

L = Largura da tira, mm

C = Comprimento inicial, mm

Índice de energia absorvida na tração

$$ITEA = \frac{TEA}{G}$$

ITEA = Índice de energia absorvida na tração, kJ/kg

TEA = Energia absorvida na tração, J/m2

G = Gramatura, g/m2

Módulo de elasticidade

$$ME = \frac{FM.10^3}{C.A}$$

ME = Módulo de elasticidade, MPa

FM = Força Máxima, N

C = Comprimento inicial, mm

A = Alongamento, mm

Rigidez à tração

$$RIT = ME.E$$

RIT = Rigidez à tração, kN/m

ME = Módulo de elasticidade, MPa

E = Espessura da folha, mm

Índice de rigidez à tração

$$IRIT = \frac{RIT.10^3}{G}$$

IRIT = Índice de rigidez à tração
RIT = Rigidez à tração, kN/m
G = Gramatura, g/m2