

**CAMILLA GABRIELA MELO AMPESSAN**

**IDADE DA MADEIRA NA QUALIDADE DA POLPA E DO  
PAPEL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Polliana D'Angelo Rios  
Coorientadora: Dra. Martha Andreia Brand  
Coorientador: Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha

**LAGES, SC  
2015**

Ampessan, Camilla Gabriela Melo

Idade da madeira na qualidade da polpa e do papel / Camilla Gabriela Melo Ampessan. - Lages, 2015.

134 p.: il.; 21 cm

Orientador: Polliana D'Angelo Rios

Coorientadores: Martha Andreia Brand

Alexsandro Bayestorff da Cunha

Inclui bibliografia

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2015.

1. Celulose Kraft. 2. madeira. 3. *Pinus taeda*. 4. Kappa. I. Ampessan, Camilla Gabriela Melo. II. Rios, Polliana D'Angelo. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título

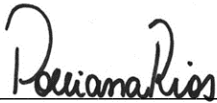
Ficha catalográfica elaborada pelo aluno.

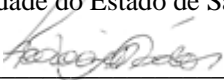
**CAMILLA GABRIELA MELO AMPESSAN**

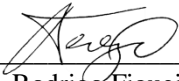
**IDADE DA MADEIRA NA QUALIDADE DA POLPA E DO  
PAPEL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal,  
do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de  
Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora**

**Orientador:**   
Prof. Dra. Polliana D'Angelo Rios  
Universidade do Estado de Santa Catarina

**Membro:**   
Prof. Dra. Franciane Andrade de Pádua  
Universidade Federal de São Carlos

**Membro:**   
Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo  
Universidade do Estado de Santa Catarina- UDESC

**Lages-SC, 31/07/2015**



A Deus e minha família, dedico.



## AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre me acompanha e guia meus caminhos.

Ao Centro de Ciências Agroveterinárias CAV – UDESC pela realização do mestrado.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus avós, Iolita e Tubalcaim (em memória), por seu amor e afeto, pelo modo simples de me ensinar a ser uma pessoa melhor, quem tanto orgulho de dizer que são meus segundos pais, grata serei eternamente por vocês existirem.

À minha mãe Clara que sempre me incentivou, me protegeu e ensinou a correr atrás de meus objetivos, por ser pai e mãe, por ser tudo.

Ao meu pai Antônio Cláudio pelo carinho e força dada sempre em minha vida, por suas palavras de apoio e compreensão, à minha irmã Claudia por ser uma amiga e companheira.

À minha professora orientadora Polliana D'Angelo Rios, pela oportunidade de crescimento, ensinamentos, confiança, orientação e amizade.

À empresa Klabin S.A., pela estrutura e apoio para a realização deste estudo, em especial os engenheiros Romullo Luiz Simão e Ana Gabriela Narciso, pela dedicação e tempo dados para auxiliar na execução deste estudo, por todos os profissionais da empresa que me ajudaram nas análises e pela amizade.

A todas minhas amigas Bárbara, Francis, Aline, Marcela, Maria Fernanda, Daniela Coelho, Daniela Dambrós, Bruna Damasceno, Karollyne, Suyane, Larissa, Bruna Fernandes, Janara e às amigas da faculdade que mesmo em caminhos diferentes, nossa amizade continua forte e verdadeira. As amigas do mestrado, Alana, Helena, Ana Claudia e Ariane pela amizade e dedicação, obrigada por tudo.





“Há vitórias que exaltam outras que corrompem; derrotas que matam outras que despertam.”

Antoine de Saint-Exupéry



## RESUMO

AMPESSAN, Camilla Gabriela Melo **Idade da madeira na qualidade da polpa e do papel**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Área: Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2015.

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da idade na qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes condições de cozimento, compreendendo aos números Kappa de 40, 50 e 60 da polpa celulósica, buscando a redução da idade de corte da floresta e aumentando a qualidade da celulose para papéis mais resistentes. As árvores amostradas neste estudo foram provenientes de áreas de reflorestamento localizadas no Município de Otacílio Costa pertencentes à empresa Klabin S.A., Estado de Santa Catarina. A amostragem foi realizada em árvores com 14, 16 e 19 anos de idade, onde foi determinada a densidade básica dos discos, características químicas (holocelulose, lignina, extrativos totais, hidróxido de sódio e teor de cinzas) e características anatômicas (comprimento, largura, diâmetro do lume, espessura da parede, índice de enfeltramento, coeficiente de flexibilidade, fração parede e índice de Runkel) da madeira. Foi avaliado também o processo Kraft de obtenção de celulose nos diferentes números Kappa (rendimentos bruto e depurado, teor de rejeitos, número Kappa, viscosidade), as características anatômicas das polpas (comprimento, *Coarseness*, largura, Curl e Kink) e as propriedades do papel (gramatura, espessura, densidade, índice de tração, índice de arrebentamento, alongamento, TEA, índice de rasgo e resistência ao ar). Os valores observados foram submetidos a análise de variância fatorial (ANOVA). Os resultados demonstraram que houve diferença significativa



entre todas as idades, para a densidade da madeira e as características anatômicas analisadas. Já para as análises químicas os resultados de extrativos totais apresentaram diferenças significativas entre as idades, com maior valor para 19 anos. Para o teor de cinza a idade 14 apresentou diferença significativa sobre as demais idades. As variáveis de cozimento: rendimentos bruto e depurado não apresentaram variações entre idades, apenas entre os Kappa. A viscosidade e o teor de rejeitos variaram pelos diferentes Kappa aplicados e também idades da madeira. Quanto a morfologia das fibras, todas as características analisadas sofreram influência da idade e Kappa, exceto, a largura que apresentou diferenças significativas apenas para o Kappa. Variações nas características do papel em função das diferentes idades e Kappa foram observadas, podendo concluir que as variáveis aplicadas nos cozimentos exerceram influência sobre as propriedades da celulose e do papel.

**Palavras-chave:** Celulose Kraft, madeira, *Pinus taeda*, Kappa.



## ABSTRACT

AMPESSAN, Camilla Gabriela Melo **Wood age in quality of pulp and paper**. 2015. 134f - Dissertation (Master in Forest Engineering – Area: Forest Engineering) – Santa Catarina State University. Forestry Engineering Graduate Program, Lages, 2015.

The objective of this study was to investigate the influence of age on quality of *Pinus taeda* wood in different cooking conditions, including the Kappa numbers 40, 50 and 60 of the cellulosic pulp, seeking the reduction of forest cutting age and increasing the quality of pulp to produce tougher Kraft paper. The sampled trees in this study were from reforestation areas located at the city of Otacílio Costa belonging to the company Klabin S.A., state of Santa Catarina. The sampled trees were 14, 16 and 19 years old where was determined the basic density of the discs, chemical characteristics (holocellulose, lignin, extractives, sodium hydroxide and ash content) and anatomical characteristics (length, width, lumen diameter, wall thickness, felting index, coefficient of flexibility, wall fraction and Runkel ratio) of the timber. The Kraft process of obtaining cellulose was also rated (rough and debugged yields, waste content, Kappa number, viscosity), the anatomical characteristics of the fibers (length, Coarseness, width, Curl and Kink) and the paper properties (weight, thickness, density, tensile index, burst index, stretching, TEA, tear index and air resistance). The values were submitted to the factor variance analysis (ANOVA). The results showed a significant difference among all ages, to the wood density and all the anatomical characteristics analyzed. For the chemical characteristics the extractives results showed significant differences between ages, with the higher value for 19 years old. The ash content of 14 years old showed significant difference over the other ages. The cooking variables, rough and debugged yields did not vary





between ages, only the Kappa factor influenced. The viscosity and the waste content were influenced by the different applied Kappa and also by the wood ages. In relation to the morphology of the fibers, all the characteristics analyzed suffered influence of the age and Kappa, except the width that showed significant differences only for Kappa. Changes in the paper characteristics due to the variation of age and Kappa were observed, which may conclude that the applied variables had an influence on the properties of pulp and paper.

Keywords: Kraft cellulose, wood, *Pinus taeda*, Kappa.



## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1-Distribuição de plantios florestais com <i>Pinus</i> nos estados do Brasil, 2012.....                           | 37  |
| Figura 2- Esquema ilustrativo do procedimento de coleta.....   | 76  |
| Figura 3- Esquema da análise da qualidade da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....   | 77  |
| Figura 4- Comportamento da densidade básica ( $\text{kg/m}^3$ ) ao longo do fuste em diferentes idades .....             | 80  |
| Figura 5-Análise química quantitativa da madeira em diferentes idades .....  | 84  |
| Figura 6- Esquema ilustrativo do procedimento de coleta para cozimento .....   | 104 |
| Figura 7- Esquema dos procedimentos, análises e testes .....   | 105 |
| Figura 8-Vista parcial do digestor (A), depurador (B) e refinador (C) utilizados para obtenção da polpa celulósica ..... | 107 |
| Figura 9 - Analisador óptico automático Metso Fiber Image Analyzer FS5 (A), e a imagem da fibra (B) .....                | 109 |
| Figura 10- Esquema dos corpos de prova para ensaios do papel .....   | 110 |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1- Comparação de altas e baixas densidades para produção de celulose e papel.....   | 49  |
| Tabela 2-Propriedades do papel .....   | 57  |
| Tabela 3- Procedimentos para análise química da madeira de acordo com as normas. ....  | 78  |
| Tabela 4 - Valores médios de densidade básica para as diferentes idades da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....   | 82  |
| Tabela 5- Morfologia dos traqueóides das madeiras de <i>Pinus taeda</i> em diferentes idades. ....   | 87  |
| Tabela 6- Parâmetros de controle nos cozimentos Experimentais.....   | 106 |
| Tabela 7 - Relação dos parâmetros de controle utilizados na confecção das folhas de papel. ....  | 109 |
| Tabela 8- Relação dos procedimentos utilizados na avaliação das características físicas, de resistência e óticas do papel e equipamentos utilizados..... | 111 |
| Tabela 9- Resultados de rendimento bruto e depurados do processo de polpação Kraft da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....                                | 112 |
| Tabela 10- Resultados encontrados para rendimento bruto e depurado para <i>Pinus taeda</i> para diversos autores .....                                   | 113 |
| Tabela 11- Resultados do teor de rejeitos do processo de polpação Kraft da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....   | 114 |
| Tabela 12- Resultados da viscosidade da polpa no processo de polpação Kraft da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....                                       | 115 |
| Tabela 13- Morfologia da fibra da fibra de <i>Pinus taeda</i> em três diferentes idades e nos três números Kappa.....                                    | 117 |
| Tabela 14- Propriedades físicas do papel em diferentes idades e número Kappa .....   | 121 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabela 15- Propriedades de resistência do papel em diferentes idades e número Kappa ..... | 124 |
| Tabela 16- Alvura em papel de diferentes idades e número Kappa.....                       | 128 |





## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AA- Álcali Ativo

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAF- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

BRACELPA- Associação Brasileira de Celulose e Papel

CF- Coeficiente de Flexibilidade

CV- Coeficiente de Variação

DAP- Diâmetro a altura do peito

FP- Fração de Parede

H- Fator que representa o produto do tempo pela temperatura de cozimento

HC- Altura Comercial

IAWA- International Association of Wood Anatomy

IE- Índice de Enfeltramento

IR- Índice de Runkel

ISO- International Standards Organization

K- Kappa

Mesh- Números de vazios por polegada linear

NBR- Norma Brasileira

pH- Potencial Hidrogeniônico

TAPPI- Technical Association of Pulp and Paper Industry

UDESC- Universidade do Estado de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$ - Micrometros

Al- Alumínio

Ca- Cálcio

Cl- Cloro

Fe- Ferro

g- Gramas

g/m- Gramas por metro

g/m<sup>3</sup>- Gramas por metro cúbico

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- Ácido Sulfúrico

J/m<sup>2</sup>- Joules por metro quadrado

kg/m<sup>3</sup>- Quilograma por metro cúbico

KMnO<sub>4</sub>- Permanganato De Potássio

kN/m- Quilo newtons por metro

K1- Potássio

mg/100m- miligrama por cem metros

Mg- Magnésio

mm- Milímetros

Na- Sódio

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>- Carbonato

Na<sub>2</sub>S- Sulfeto de sódio

Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Tiosulfato

Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>- Sulfito

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- Sulfato

NaOH- Hidróxido De Sódio

°C- Graus Celsius

P- Fósforo

Zn- Zinco



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>  | <b>36</b> |
| 2.1 GÊNERO <i>PINUS</i> .....  | 36        |
| 2.1.1 <i>Pinus taeda</i> .....   | 37        |
| 2.2 QUALIDADE DA MADEIRA DE <i>PINUS SP.</i> PARA<br>CELULOSE E PAPEL .....                  | 38        |
| 2.2.1 Características químicas da madeira .....  | 39        |
| 2.2.1.1 Celulose .....   | 39        |
| 2.2.1.2 Hemicelulose .....   | 39        |
| 2.2.1.3 Lignina.....   | 40        |
| 2.2.1.4. Extrativos.....   | 41        |
| 2.2.1.5 Materiais inorgânicos.....   | 42        |
| 2.2.2 Características anatômicas da madeira de coníferas .....                               | 43        |
| 2.2.2.1 Dimensões dos traqueóides.....   | 43        |
| 2.2.3 Densidade da madeira .....   | 44        |
| 2.2.4 Influência da idade na qualidade da madeira de coníferas na produção<br>de papel ..... | 45        |
| 2.3 OBTENÇÃO DE CELULOSE PARA PAPEL .....  | 46        |
| 2.3.1 Obtenção de polpa celulósica.....  | 46        |
| 2.3.1.1 Influência das propriedades da madeira sobre o processo Kraft ....                   | 47        |
| 2.3.1.1.1 Densidade da madeira .....   | 47        |
| 2.3.1.1.2 Propriedades químicas .....  | 49        |
| 2.3.1.1.3 Propriedades anatômicas .....  | 50        |
| 2.3.1.2 Influência das condições de cozimento na polpa pelo processo Kraft<br>.....          | 51        |
| 2.3.1.2.1 Licor de cozimento no processo Kraft.....  | 51        |
| 2.3.1.2.2 Álcali ativo.....  | 52        |
| 2.3.1.2.3 Sulfidez .....   | 52        |
| 2.3.1.2.4 Número Kappa .....   | 53        |
| 2.3.1.2.5 Viscosidade .....  | 53        |
| 2.3.1.2.5 Tempo e temperatura de cozimento .....   | 54        |
| 2.3.1.3 Morfologia da fibra da polpa celulósica pelo processo Kraft.....                     | 55        |
| 2.3.1.3.1 Comprimento da fibra .....   | 55        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.1.3.2 Largura e espessura da parede da fibra ..... | 55        |
| 2.3.1.3.3 <i>Coarseness</i> .....                      | 56        |
| <b>2.4 PRODUÇÃO DE PAPEL .....</b>                     | <b>56</b> |
| 2.4.1 Papel <i>Sack-Kraft</i> .....                    | 59        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                | <b>60</b> |

## **CAPÍTULO 2: QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* PARA A PRODUÇÃO DE POLPA E PAPEL .....70**

|  |           |
|--|-----------|
| RESUMO.....                                | 70        |
| ABSTRACT .....                             | 71        |
| 1 INTRODUÇÃO .....                         | 72        |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS.....                  | 76        |
| 2.1 Determinação da densidade básica ..... | 77        |
| 2.2 Análises químicas.....                 | 78        |
| 2.3 Morfologia dos traqueóides.....        | 78        |
| 2.4 Análise Estatística .....              | 80        |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....             | 80        |
| 3.1 Densidade básica da madeira .....      | 80        |
| 3.2 Análise química da madeira .....       | 83        |
| 3.3 Morfologia dos traqueóides.....        | 87        |
| 4 CONCLUSÕES.....                          | 91        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                    | <b>92</b> |

## **CAPÍTULO 3: QUALIDADE DA POLPA E DO PAPEL EM *Pinus taeda*: INFLUÊNCIA DA IDADE E NÚMERO KAPPA.....99**

|  |     |
|--|-----|
| RESUMO.....  | 99  |
| ABSTRACT .....   | 100 |
| 1 INTRODUÇÃO .....   | 101 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS.....  | 104 |
| 2.1 Obtenção e caracterização da polpa celulósica.....               | 104 |
| 2.1.1 Rendimento bruto, rendimento depurado e teor de rejeitos ..... | 107 |
| 2.1.2 Número Kappa .....   | 108 |
| 2.1.3 Viscosidade .....  | 108 |
| 2.2 Morfologia da Fibra .....  | 108 |
| 2.3 Produção e caracterização do papel.....                          | 109 |

|   |            |
|---|------------|
| 2.4 Análise Estatística .....                   | 111        |
| <b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>           | <b>111</b> |
| 3.1 Propriedades da polpa celulósica .....      | 111        |
| 3.2 Morfologia da fibra .....                   | 116        |
| 3.3 Propriedades do papel .....                 | 120        |
| 3.3.1 Propriedades físicas do papel .....       | 120        |
| 3.3.2 Propriedades de resistência do papel..... | 123        |
| 3.3.3 Propriedade ótica do papel .....          | 128        |
| <b>4 CONCLUSÕES .....</b>                       | <b>129</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                        | <b>129</b> |





## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

O setor papeleiro vem apresentando ao longo dos anos um desenvolvimento expressivo em termos de demanda e produção, exigindo que as empresas melhorem seus processos industriais para atender esse crescimento. Além disso, expandiu também a demanda de madeira para diversos fins, especialmente, para a produção de celulose e papel (POTULSKI, 2012).

A utilização da madeira de *Pinus spp.* para produção de celulose e papel demonstrou crescimento devido a oferta da madeira a custos relativamente baixos e passou a ser a matéria-prima mais importante no Sul do Brasil (MOCELIN, 2005).

Segundo dados da Bracelpa (2013), grandes investimentos da indústria e o próprio desenvolvimento econômico nacional impactaram de forma expressiva na produção de celulose na última década, em que praticamente dobrou o volume de celulose produzido nesse período.

Desse modo, a competição entre os produtores de celulose e papel é cada vez maior, onde o objetivo é oferecer produtos de qualidade a preços acessíveis, aumentando sua participação no mercado mundial. Devido a isso, esse setor tem procurado produzir polpas que possibilitem atingir as características desejadas ao produto final (SANTOS, 2005).

Samistraro (2008) afirma que o produto final, devido as variáveis de polpação e as propriedades do papel, tem relações diretas com as características da matéria-prima, onde se tornam cada vez mais objeto de estudo e pesquisas, com o objetivo de oferecer subsídios para tomadas de decisões corretas no processo produtivo, embasadas nos estudos realizados.

Punches (2004) relata que a qualidade da madeira é composta por muitas características e é avaliada corretamente somente quando é relacionada a uma aplicação específica, onde

dependendo do uso final da madeira as características são fatores que devem ser levados em consideração.

A qualidade do produto final é afetada por diversas variáveis do processo e também da matéria-prima, como a idade, por exemplo. O efeito da idade das madeiras na constituição química, nas variáveis de processo e nas características finais da polpa, torna-se um fato de grande interesse para as indústrias do setor, especialmente se considerando a possibilidade de cortes cada vez mais precoces (MORAES, 2008).

Diante desses fatores, é necessário conhecer as características da madeira em diversas idades, determinando uma idade de corte para obter produtos de qualidade. Nesse contexto, o estabelecimento de uma idade ideal de corte conduz a facilidade dos processos de produção do papel.

Além da matéria prima, as condições do processo de polpação também definem a qualidade do papel como foi acima mencionado. Samistraro (2008) afirma que para conseguir um produto uniforme com qualidade compatível às especificações, deve-se durante o processo de produção de celulose e papel obter a menor variação durante o seu processamento, ao mesmo tempo buscando a qualidade da celulose e o controle das variáveis de polpação.

O conhecimento da matéria prima e das condições ideais aplicadas ao processo de polpação eleva a qualidade do papel produzido, visto que inúmeras variáveis durante o processo são aplicadas e podem ser condicionadas à matéria prima disponível, já que se conhece que as características são diferenciadas principalmente pela idade.

Segundo Neuberger (2008), o processo Kraft tem por objetivo chegar a um número Kappa estabelecido e, devido às diferenças na madeira, poderão ocorrer variações no resultado do cozimento. Nesse processo o Kappa é uma variável de extrema importância para bons resultados operacionais. Essa variável representa o grau de deslignificação da polpa, assim a

medida do número Kappa é uma maneira tradicional de verificar a qualidade da polpa obtida no final do processo de cozimento dos cavacos (KLOCK, 2000).

Diante disso, o objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de papel, especialmente Sack-Kraft, em diferentes idades (14, 16 e 19 anos), quanto às propriedades físicas, químicas e anatômicas, bem como analisar a polpa e o papel produzido com diferentes condições de cozimento.

Esta dissertação é apresentada em três capítulos:

1º Capítulo: Referencial Teórico

2º Capítulo: Artigo Científico- "Qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes idades para a produção de polpa e papel"

3º Capítulo: Artigo Científico- "Qualidade da polpa e do papel em *Pinus taeda*: Influência da idade e número Kappa"

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 GÊNERO *Pinus*

As espécies de *Pinus* vem sendo plantadas, em escala comercial, no Brasil, há mais de 30 anos. As primeiras introduções desse gênero foram de *Pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias, no Rio Grande do Sul, em torno de 1880 (MEDRADO, 2005).

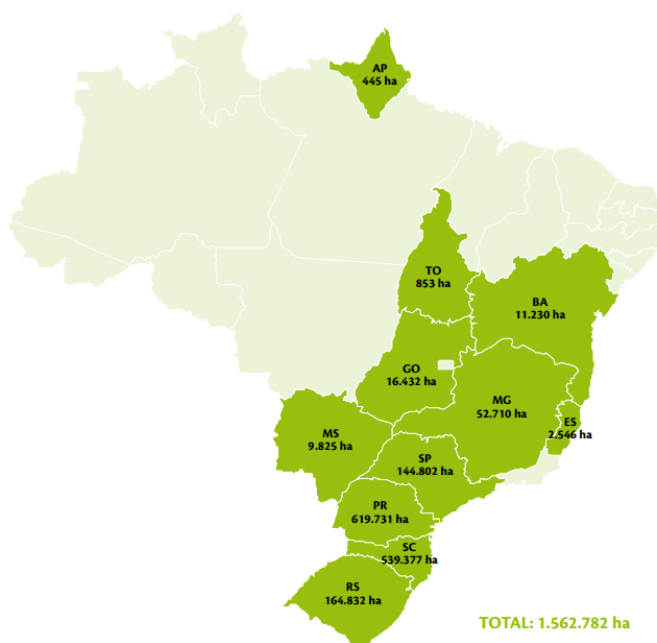
A expansão da espécie a partir da década de 60 ocorreu por motivo de incentivo fiscal e passou a ser utilizado em todos os segmentos da indústria de base florestal, aliviando a pressão pelo consumo de madeiras nativas do norte do país (RECH, 2002).

De acordo com a Bracelpa (2014), a área total de *Pinus* plantados no Brasil é de 1,8 milhões de hectares, e se destinam a diversas utilidades industriais.

Além disso, em 2012, a área brasileira de plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* atingiu 6,66 milhões de hectares, um crescimento de 2,2% em relação ao indicador de 2011 (ABRAF, 2013).

A distribuição geográfica das áreas de plantios florestais de *Pinus* em 2012 é ilustrada na Figura 1.

Figura 1-Distribuição de plantios florestais com *Pinus* nos estados do Brasil, 2012.



Fonte: Associadas individuais e coletivas da ABRAF (2013)

### 2.1.1 *Pinus taeda*

A espécie *Pinus taeda* nativa é encontrada no Sul dos Estados Unidos e o nome “*taeda*” deve-se a palavra ancestral que denomina pinheiro resinoso (KLOCK, 2000). Shimizu (2004) relata que o *Pinus taeda* tem uma ampla distribuição geográfica no Leste e Sudeste dos Estados Unidos.

Introduzida no Brasil, a espécie se adaptou ao sul do país, sendo utilizada, principalmente, para a produção de polpa celulósica, dando origem a papéis de alta resistência (BARRICHELO et al., 1977).

Dentre as espécies de *Pinus* mais plantadas no país o *P. taeda* é a que apresenta maior destaque, cultivado principalmente na região do planalto do Sul e Sudeste (SOUSA et al., 2007).

As características do *Pinus taeda*, tem reflexo direto no valor econômico da madeira, e estão sob controle genético moderado a alto, podendo ser melhorado através da seleção de matrizes e reprodução controlada entre elas. A madeira de *Pinus taeda* é utilizada para processamento mecânico na produção de peças serradas para estruturas, confecção de móveis, embalagens, molduras e chapas de diversos tipos. Para esses usos, a qualidade da matéria-prima aumenta à medida que aumenta a densidade da madeira, dentro dos limites normais da espécie. No entanto, na produção de celulose de fibra longa, a madeira juvenil desta espécie, de baixa densidade, é muitas vezes preferida (SHIMIZU, 2004).

## 2.2 QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus sp.* PARA CELULOSE E PAPEL

Para a utilização da madeira em fins industriais, deve-se obter conhecimento e análise adequada de suas propriedades físicas, químicas e anatômicas. A madeira é higroscópica, heterogênea, anisotrópica e composta basicamente por celulose, poliose, lignina e extrativos, e assim apresenta uma enorme versatilidade de usos onde se obtém uma série de produtos (KLOCK, 2000).

Ainda para Klock (2000), é necessário o conhecimento adequado das características e comportamento da madeira, assim consegue-se o aprimoramento de novas tecnologias para transformação e uso racional da madeira, já que a mesma é um recurso natural renovável e continuará tendo possibilidades de utilização infindáveis.

## 2.2.1 Características químicas da madeira

A constituição química da madeira apresenta diferentes substâncias as quais se classificam em holocelulose (parte composta de celulose e hemicelulose), lignina, extrativos e compostos inorgânicos, sendo que os dois últimos são componentes que apresentam-se em menores quantidades (FENGEL; WEGENER, 1989).

### 2.2.1.1 Celulose

A celulose é o componente majoritário na madeira, compreendendo de 30 a 45% de sua constituição, sendo um polímero linear de alto peso molecular, formado por unidades monoméricas de  $\beta$ -D-glucose, e sua função na parede celular é estrutural (SJÖSTRÖM, 1981; IPT, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989).

As madeiras provenientes de espécies de coníferas apresentam valores menores deste componente quando comparados às folhosas (MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997), sendo de aproximadamente 42% para coníferas e 45% para folhosas.

O termo celulose no Brasil e em outros países, também tem significado técnico, onde a celulose corresponde ao produto do desfibramento ou da deslignificação total ou parcial de materiais fibrosos, sendo comum também se aplicar as denominações de polpa celulósica, polpa, pasta e massa (ANDRADE, 2006).

### 2.2.1.2 Hemicelulose

As hemiceluloses (Polioses) compõe 20 a 30% da massa da madeira, consideradas heteropolissacarídeos se encontram em estreita associação com a celulose na parede celular. Por possuírem cadeias mais curtas, as hemiceluloses

possuem conseqüentemente menor massa molecular, quando comparado à celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos (D'ALMEIDA, 1988a; SJÖSTRÖM; ALÉN, 1998; WENZIL 1970).

São compostas principalmente por cinco açúcares neutros, as hexoses: glucoses, manose e galactose; e as pentoses: xilose e arabinose e algumas hemiceluloses contém adicionalmente ácidos urônicos. Também há diferença de quantidade e composição de hemiceluloses entre espécies de coníferas e folhosas, sendo que as últimas possuem valores superiores (IPT, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989; MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997; WENZIL 1970; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000).

### 2.2.1.3 Lignina

A lignina é uma substância macromolecular presente na madeira, formada diferentemente dos polissacarídeos, sendo constituída de unidades de fenil-propano, no sentido de que os diferentes elementos estruturais não estão ligados uns aos outros em ordem sistemática, e sim de forma aleatória. Compreende de 20% a 35% de toda massa da madeira. Ainda, as coníferas possuem maiores teores de lignina e diferenças estruturais quando comparadas as folhosas (KLOCK, 2000; BIERMANN, 1996; DUEÑAS, 1997; FENGEL; WEGENER, 1989; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000; IPT 1988).

De maneira morfológica a lignina é um polímero amorfo localizado principalmente na lamela média, bem como na parede secundária. Durante o desenvolvimento celular, a lignina é incorporada como o último componente na parede, interpenetrando as fibrilas e assim fortalecendo e enrijecendo as paredes celulares (IPT, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989).

De acordo com Zakis (1994) a lignina contém em sua estrutura diversos grupamentos químicos, destacando os grupos metoxílicos, grupos hidroxílicos fenólicos, grupos hidroxílicos



alifáticos e grupos carboxílicos, distinguem-se em proporção dependo da sua origem.

Os autores Gullichsen; Paulapuro (2000) relatam que a forma dos diferentes vínculos entre lignina e carboidratos é altamente complexa e difícil de ser compreendida, porém aceita-se que a lignina esteja quimicamente ligada com uma parte de hemiceluloses da madeira.

Desse modo para a caracterização de polpas celulósicas é importante realizar a análise do teor de lignina, onde a sua remoção é o principal objetivo dos processos de obtenção de polpa celulósica e branqueamento. Assim a determinação do conteúdo de lignina na madeira e na polpa celulósica auxilia na avaliação e aplicação em processos. Aspectos como rendimento, branqueabilidade e alvura são propriedades da polpa celulósica associadas com o conteúdo da lignina (FENGEL; WEGENER, 1989; MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997).

#### 2.2.1.4. Extrativos

Os extrativos, comumente denominados de materiais acidentais, são responsáveis por muitas propriedades da madeira, como: cheiro, gosto, cor e resistência natural ao apodrecimento. Estes componentes contribuem somente com uma pequena porcentagem da massa da madeira, porém apresentam uma grande influência nas propriedades e na qualidade do processamento das madeiras (WENZIL, 1970; IPT, 1988).

Tais componentes pertencem às classes diferentes em termos de composição química, e são geralmente caracterizados por terpenos, compostos alifáticos e compostos fenólicos quando presentes. Ainda, os extrativos são compostos químicos da madeira que podem ser extraídos mediante a sua solubilização em solventes de diversas polaridades. Estas substâncias podem ser tanto lipofílicas e hidrofílicas e são

consideradas como componentes não estruturais da madeira. Podem ser quantificados e isolados com o propósito de um exame detalhado da estrutura e composição da madeira (FENGEL; WEGENER, 1989; DUEÑAS, 1997; KLOCK, 2000).

Em coníferas, os extrativos localizam-se principalmente nos canais resiníferos, nas células de parênquima e no cerne, também estão presentes nas cavidades celulares, principalmente aqueles solúveis em água (SJÖSTRÖM, 1981).

Para o setor de celulose e papel elevados teores de extrativos são prejudiciais, pois causam o consumo de parte dos reagentes utilizados na deslignificação, podendo dificultar a depuração e o branqueamento da polpa celulósica, formar incrustações em diversos equipamentos, além de propiciar manchas no papel produzido (MIMMS, 1993; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000; FENGEL; WEGENER, 1989).

#### 2.2.1.5 Materiais inorgânicos

Para o crescimento das plantas são necessários constituintes minerais, estes são retirados do solo e encontrados na madeira, correspondendo de 0,1% a 5%, sendo alguns destes minerais considerados essenciais para o desenvolvimento fisiológico da árvore (SJÖSTRÖM, 1981; FENGEL; WEGENER, 1989; IPT, 1988; D'ALMEIDA, 1988; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000).

O material inorgânico da madeira (cinzas) é constituído, principalmente, de carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos de potássio, cálcio e magnésio (IPT, 1988; FENGEL; WEGENER, 1989; DUEÑAS, 1997; D'ALMEIDA, 1988; SJÖSTRÖM, 1981).

Em geral, madeiras de zonas temperadas contêm 0,2 a 0,9% e quase sempre o valor é inferior a 0,5% desse componente, já em zonas tropicais o valor pode conter até 5%

de teores de cinzas (SJÖSTRÖM, 1981; FENGEL; WEGENER, 1989).

## 2.2.2 Características anatômicas da madeira de coníferas

As madeiras de coníferas possuem uma estrutura anatômica relativamente simples, sendo constituídas apenas por dois tipos de células: células de raio e traqueóides axiais. Os traqueóides compreendem as células compridas e delgadas com extremidades fechadas e mais ou menos afiladas. Dependendo da espécie, essas células constituem cerca de 90 a 95% da madeira, enquanto que as células de raio constituem somente 5 a 10% (SJÖSTRÖM, 1981; KLOCK, 2000).

O conhecimento da anatomia da madeira para muitos autores é de suma importância para a produção de celulose e papel, uma vez que a madeira é matéria prima para a produção de polpa e suas características anatômicas são parte fundamental para constituição do papel (D'ALMEIDA, 1988; MIMMS, 1993; BIERMANN, 1996; DUEÑAS, 1997; KLOCK, 2000).

### 2.2.2.1 Dimensões dos traqueóides

Os traqueóides são comumente chamados de elementos fibrosos e fibra. São células alongadas e fusiformes, possuem extremidades finas e com pontuações. A função dos traqueóides é o transporte de líquidos e servem ainda como sustentação da estrutura lenhosa (DUEÑAS, 1997; KLOCK, 2000).

As dimensões dos traqueóides podem variar entre 2,50 mm e 3,80 mm para o comprimento e de 20  $\mu$ m a 70  $\mu$ m para a largura (DUEÑAS, 1997; KLOCK, 2000; HASSEGAWA, 2003; NISGOSKI, 2005).

Klock (2000) relata que os traqueóides são arranjados em filas radiais e sua extensão longitudinal é orientada na direção do eixo axial do tronco

É importante o conhecimento das dimensões dos traqueóides e a sua influência nas propriedades do papel, assim folhas de papel formadas com traqueóides com comprimentos, larguras ou espessuras de paredes diferentes apresentam propriedades físicas e de resistência distintas (MIMMS, 1993; BIERMANN, 1996).

Desse modo, as dimensões dos traqueóides são responsáveis pelas coníferas serem conhecidas como fontes produtoras de papel de alta qualidade (BURGER; RICHTER, 1991). Para Paine; Paine (1993) as coníferas possuem grande potencial para a produção de papel de alta resistência.

### 2.2.3 Densidade da madeira

A densidade básica da madeira é definida por Kollmann (1959) como a razão da massa completamente seca dividida pelo volume em estado saturado de uma amostra. Ainda os autores Foelkel et al. (1990) e Kollmann (1959) ressaltam que é uma propriedade importante quando se deseja avaliar a utilização da madeira.

A densidade da madeira é variável de acordo com a sua estrutura anatômica (proporção lenho inicial e lenho tardio, elementos de vasos em angiospermas, etc.) e química (teores variáveis de celulose, hemicelulose, lignina etc.), não sendo uma característica única, ocorrendo como consequência dos elementos anatômicos que compõe a madeira, dependendo das proporções de lenho inicial e tardio, do número e tamanho de fibras e sua espessura (FOELKEL et al., 1990; PANSIN; DE ZEEUW, 1980; DINUS; WELT, 1997).

## 2.2.4 Influência da idade na qualidade da madeira de coníferas na produção de papel

Dentre muitos fatores, a idade exerce grande influência na qualidade da madeira para inúmeros fins, sendo uma variável bastante analisada.

Silva, (2011) descreve que as características da madeira de um determinado material genético se alteram com a idade da árvore, devido suas alterações fisiológicas. Em paralelo a idade de corte é um importante componente do manejo e representa um parâmetro importante no planejamento florestal e na composição do custo da madeira.

Também a idade de corte é um fator importante dentre os critérios para seleção de clones superiores, visando à melhoria da qualidade da madeira, pois durante o estágio de desenvolvimento da planta, influência nas propriedades físico químicas da madeira, as quais desempenham papel decisivo nas características da polpa e nas outras propriedades do papel produzido (BILLA et al., 2000).

Desse modo praticamente todas as propriedades da madeira são afetadas pela idade, onde o tecido meristemático cambial, responsável pelo crescimento secundário da árvore, passa por mudanças ao longo dos anos. Essas mudanças ocasionam variações na madeira produzida em cada idade, e como consequência, a madeira nos primeiros anos é significativamente diferente das idades mais avançadas (FERREIRA et al., 1978).

Trugilho (1996), descreve que o aumento da idade da árvore afeta positivamente teor de holocelulose da madeira, sua densidade básica e comprimento de fibra espessura da parede, sendo observado o inverso com o teor de cinzas, lignina e extrativos totais.

De acordo com Cardoso (2006), o tamanho da fibra, o teor de celulose e a densidade básica da madeira são afetados pela idade do povoamento florestal, uma vez que diminui a

proporção da madeira juvenil, tanto em peso, quanto em volume.

## 2.3 OBTENÇÃO DE CELULOSE PARA PAPEL

### 2.3.1 Obtenção de polpa celulósica

O processo de polpação consiste na separação das fibras da madeira, através de diferentes processos. A qualidade, propriedades e utilização da polpa e papel são determinadas pelo tipo de processo aplicado (CASEY, 1981; SMOOK, 1989; KLOCK et al., 2005).

A obtenção de fibras celulósicas é a fase inicial da manufatura de papel, sendo que é impossível produzir papel sem a redução inicial da matéria-prima madeira ao estado de pasta fibrosa (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989).

Todos os processos de obtenção de polpa celulósica buscam promover a separação ou individualização dos elementos fibrosos e isto pode ser realizado pela ação mecânica ou por meio de agentes químicos (MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997).

Nos processos químicos, a separação ou individualização das fibras é conseguida através da ação de reagentes químicos, em condições específicas de temperatura, pressão e concentração de reagentes, que agem principalmente sobre a lignina que compõe a lamela média. Além da lignina, os reagentes acabam degradando uma fração de hemicelulose e celulose onde reduz o rendimento, afeta as características da polpa celulósica e influencia nas propriedades do papel (MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997; KLOCK, 2000; D'ALMEIDA, 1981; SMOOK, 1989).

Dentre os processos químicos, o processo Kraft é o mais importante e o dominante em todo o mundo, este processo envolve o cozimento de cavacos de madeira em um vaso de

pressão, o digestor, com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) como reagentes químicos deslignificantes. O sulfeto de sódio proporciona aumento da velocidade de reação e de qualidade da polpa, mas tem a desvantagem de formar mercaptanas e H<sub>2</sub>S responsáveis pelo odor característico deste processo (SMOOK, 1989).

As principais características do processo Kraft são a sua versatilidade em utilizar diversas matérias-primas (coníferas, folhosas, resíduos agrícolas, etc.), a capacidade de apresentar excelentes características da polpa obtida em termos de resistência e a possibilidade de recuperação econômica do licor negro residual (WENGER, 1984; IPT, 1988; KLINE, 1991; MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997).

Deste modo, para o processo Kraft os principais parâmetros de controle são a carga de álcali aplicado, o tempo e a temperatura (DUEÑAS, 1997).

### 2.3.1.1 Influência das propriedades da madeira sobre o processo Kraft

Inúmeros autores confirmam a influência das propriedades da matéria prima sob a qualidade final da polpa celulósica e do papel obtidos pelo processo Kraft, sendo estas propriedades: físicas, químicas e anatômicas (IPT, 1988; SMOOK, 1989; MIMMS, 1993; BIERMANN, 1996; DUEÑAS, 1997; D'ALMEIDA, 1981; SMOOK, 1989; GULLICHSEN; FOGELHOLM, 2000).

#### 2.3.1.1.1 Densidade da madeira

A densidade é importante na produção de celulose, sendo que esta característica influencia diretamente nas propriedades do papel, assim serve como um índice de qualidade da madeira.

Segundo Dinus; Welt (1997) a densidade básica é uma característica da madeira que deve ser avaliada nas indústrias papeleiras, estando diretamente relacionado com a resistência do produto final, o papel. Ainda a importância desta característica está relacionada diretamente no rendimento volumétrico do digestor e custos do processo, pois, espécies com alta densidade da madeira facilitam o manuseio, havendo assim, um volume de toras e cavacos menores, para uma mesma quantidade de massa. Desse modo a capacidade da unidade de cozimento é elevada com o acréscimo da densidade básica, aumentando o potencial de produção da indústria.

Entretanto, o aumento dessa propriedade da madeira também pode dificultar a conversão das toras em cavacos, aumentar o consumo de reagentes, dificultar a impregnação e deslignificação e pode levar a maiores quantidades de rejeitos no processamento da polpa (MIMMS, 1993; SHIMOYAMA, 1990; VALENTE, 1992).

Madeiras com alta densidade possuem fibras com paredes espessas e diâmetro do lume pequeno, onde, são mais rígidas e tem baixas propriedades de colapsabilidade durante o processamento. A polpa tem rápida drenagem e produz uma estrutura volumosa e, em consequência, um papel com alta porosidade e opacidade. Fibras com paredes mais espessas também demandam maior consumo de energia no refino. Ao mesmo tempo, a ligação interfibras é fraca, dando baixa resistência ao papel (VALENTE, 1992).

Desse modo, a uniformidade da densidade é uma característica importante na tecnologia de polpação e para a produção de papel geralmente deve variar de 450 a 550 kg/m<sup>3</sup> (WHER; BARRICHELO, 1993).

Na tabela 1 são apresentadas as comparações entre densidades baixas e altas para produção de polpa celulósica, conforme relatado por Gomes (1998):



Tabela 1- Comparação de altas e baixas densidades para produção de celulose e papel

| <b>Baixa densidade básica<br/>(400 a 480 kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Alta densidade básica<br/>(480 a 560 kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|--|---|
| Menor custo de exploração                                      | Menor custo com transporte                                    |
| Menor teor de casca  | Maior capacidade de armazenamento no pátio                    |
| Menor consumo de facas no picador                              | Menor consumo específico de madeira                           |
| Menor consumo de álcali  | Maior espessura de parede                                     |
| Maior rendimento   | Maior índice de rasgo   |
| Maior facilidade de impregnação                                | Maior volume específico                                       |
| Menor energia de refino  | Maior porosidade do papel                                     |

### 2.3.1.1.2 Propriedades químicas

Durante o processo Kraft ocorrem intensas reações e de forma majoritária com a lignina (ANDRADE, 2006). O processo de deslignificação pode ser dividido em três fases distintas: deslignificação inicial, deslignificação principal e deslignificação residual (SMOOK, 1989; DUEÑAS, 1997; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000).

Durante o cozimento Kraft aproximadamente 80 % de lignina, 50% de hemicelulose e 10% de celulose são dissolvidos (SMOOK, 1989).

A degradação de carboidratos gera grupos ácidos que consomem parte do álcali disponível para deslignificação. Aproximadamente 75% dos carboidratos dissolvidos na faixa de 100 a 130°C são glucomananas, já as xilanas dissolvem-se a uma temperatura maior que 40°C (GULLICHSEN; FOGELHOLM, 2000).

A celulose, por possuir regiões cristalinas, dificulta a acessibilidade dos íons hidróxido e devido a isso ocorre uma baixa dissolução da mesma (SMOOK, 1989).

Desse modo, as reações dos carboidratos (celulose e hemiceluloses) da madeira no processo Kraft, têm efeito importante no consumo dos reagentes, rendimento do processo e propriedades físicas da polpa celulósica. Esses polissacarídeos podem, ainda, serem dissolvidos no licor de cozimento, degradarem e formarem produtos de baixo peso molecular, permanecer nos elementos fibrosos ou manterem sua forma original. As reações de degradação são complexas e incluem tanto a hidrólise alcalina como a separação em grupos terminais; estas reações são essencialmente independentes do conteúdo de enxofre presente no licor de cozimento, apesar de acelerarem a velocidade da remoção da lignina, a presença do sulfeto de sódio reduz o tempo de exposição dos polissacarídeos à ação do álcali (SJÖSTRÖM, 1981; DUEÑAS, 1997).

Cerca de 90% dos extrativos são removidos durante a fase de extração do cozimento. As gorduras e ácidos são removidos junto com o licor residual e a terebintina pode ser recuperada (SMOOK, 1989).

Devido a isso, parte dos extrativos contidos na madeira, como resinas e os ésteres de ácidos graxos, durante o processo de deslignificação, podem formar colóides e emulsões no licor negro. Estas substâncias devem ser removidas da polpa celulósica, pois podem ser fontes de problemas como depósitos nas folhas de papel e incrustações nos equipamentos (DUEÑAS, 1997; BIERMANN, 1996).

#### 2.3.1.1.3 Propriedades anatômicas

Dentre as propriedades da madeira, três principais fatores contribuem para a resistência do papel: densidade da fibra (espessura de parede celular e porcentagem de madeira juvenil), comprimento de fibra e resistência da fibra (DINWOODIE, 1965).

Os parâmetros mais importantes das fibras são o comprimento e a espessura da parede e exercem influência sobre o coeficiente de flexibilidade, sobre a fração parede e sobre o índice de Runkel. O comprimento da fibra não é independente da flexibilidade da fibra e o comprimento da fibra é considerado uma variável chave apenas para resistência ao rasgo (AMIDON, 1981).

Além do comprimento, a largura da fibra também é um parâmetro importante, em que as mais largas produzirão papéis com menor resistência ao ar, maior volume específico aparente e maior resistência ao rasgo. Por outro lado, as resistências à tração e ao arrebentamento são prejudicadas quando as fibras são mais largas, devido ao ajuste imperfeito das fibras no papel, prejudicando as ligações entre elas. Ainda, a espessura da parede é uma característica anatômica tão importante quanto à largura da fibra e geralmente está relacionada com a rigidez da fibra (SANTOS, 2005).

### 2.3.1.2 Influência das condições de cozimento na polpa pelo processo Kraft

O rendimento e a qualidade final da polpa celulósica sofrem influência de inúmeros fatores das condições de cozimento sendo as principais: álcali ativo, sulfidez, temperatura, razão licor: madeira, tempo e temperatura de cozimento (expressos como uma única variável chamada Fator H) e grau de designificação (número Kappa) (D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989; MIMMS, 1993; BIERMANN, 1996; DUEÑAS, 1997; GULLICHSEN; FOGELHOLM, 2000).

#### 2.3.1.2.1 Licor de cozimento no processo Kraft

O licor de cozimento no processo Kraft, como mencionado anteriormente, é uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S). Essas duas

substâncias que causam a deslignificação, no entanto o licor industrial contém uma série de outros sais de sódio que aparecem durante o cozimento ou na recuperação do licor. Os principais são: carbonato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), sulfato ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), sulfito ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) e tiosulfato ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989; DUEÑAS, 1997).

Dentre as variáveis do processo relacionadas com a composição do licor de cozimento estão o álcali-ativo (AA) e sulfidez (SMOOK, 1989).

#### 2.3.1.2.2 Álcali ativo

O Álcali ativo é a soma das concentrações de NaOH e  $\text{Na}_2\text{S}$  existentes no licor de cozimento, expressa em g/l . Quando todas as variáveis envolvidas no cozimento não são alteradas, o aumento do álcali ativo conduz a uma diminuição do rendimento, porcentagem de rejeitos, teor de lignina residual, etc. (MOCELIN, 2005).

Segundo Mocelin (2005) para a obtenção da celulose, a diminuição do álcali ativo geralmente requer em contrapartida, menor relação licor: madeira, maior temperatura ou maior tempo de cozimento.

Altas concentrações de álcali ativo não são recomendadas, pois a celulose e as polioses podem sofrer um ataque, diminuindo o rendimento e produzindo polpas de resistências inferiores (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989).

#### 2.3.1.2.3 Sulfidez

A sulfidez é expressa pela presença de  $\text{Na}_2\text{S}$  no licor de cozimento, onde normalmente se adiciona de 20 a 30% de sulfidez correspondendo de 2 a 6 % de  $\text{Na}_2\text{S}$  (MOCELIN, 2005). O  $\text{Na}_2\text{S}$  aumenta a velocidade e efetividade da remoção da lignina, isto durante o cozimento Kraft, forma-se tiolignina

juntamente com lignina sódica (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989).

Outra vantagem da presença de sulfeto de sódio é a inibição, em parte, do ataque do hidróxido de sódio sobre a celulose fazendo com que a qualidade da polpa celulósica seja melhor. A natureza redutora do  $\text{Na}_2\text{S}$  evita a oxidação da celulose dando como resultado, polpa celulósica com reduzidos teores de oxi-celulose (D'ALMEIDA, 1988).

#### 2.3.1.2.4 Número Kappa

O número Kappa indica o grau de deslignificação de um cozimento e a quantidade de produtos químicos necessários ao branqueamento, esse parâmetro é obtido através da oxidação de certa quantidade de polpa em solução de permanganato de potássio, (SMOOK, 1989).

Desse modo alguns fatores que podem influenciar o número Kappa sendo o tempo de cozimento, concentração de álcali ativo, sulfidez e temperatura (D'ALMEIDA, 1981).

#### 2.3.1.2.5 Viscosidade

Além do número Kappa, a qualidade da celulose é avaliada por meio de alguns parâmetros, dentre eles a viscosidade da polpa que estima o grau médio de polimerização da celulose, fornecendo um indicativo do quão severo foi o ataque químico às fibras e propriedades físico-mecânicas (SAMISTRARO, 2008).

Durante a deslignificação, ocorre uma redução na viscosidade da polpa, o que faz com que atinja um nível crítico, assim a resistência da polpa diminui drasticamente (MOCELIN, 2005).

Devido a isso, a manutenção da viscosidade da polpa é a principal razão para que o cozimento Kraft deva ser

terminado a um ponto onde um teor substancial de lignina residual permaneça nas fibras (MOCELIN, 2005).

### 2.3.1.2.5 Tempo e temperatura de cozimento

O tempo de cozimento é expresso em função do "tempo até temperatura máxima" este tempo oscila de 1 a 2 horas e o tempo à temperatura máxima entre 30 minutos a 1 hora para madeira de folhosas e entre 1 a 2 horas para madeira de coníferas (D'ALMEIDA, 1981).

Desse modo, o tempo de cozimento está associado a outros fatores como a temperatura, concentração, relação licor: madeira, etc, portanto qualquer alteração nestas variáveis tende a aumentar ou reduzir o tempo de cozimento para se conseguir uma celulose a um dado rendimento e qualidade (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989).

Assim, as temperaturas máximas utilizadas no cozimento variam entre 160 e 180°C. O licor de cozimento à temperatura ambiente dissolve apreciáveis quantidades da madeira e a velocidade de dissolução é aumentada a altas temperaturas, quando chega a dobrar a cada acréscimo de 10°C. O efeito da temperatura não é muito relevante sobre a resistência da celulose, porém com o aumento da temperatura o rendimento tende a reduzir, pois a altas temperaturas, a remoção da holocelulose excede a remoção da lignina, (RYDHOLM, 1965; D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1989).

O processo de cozimento da madeira, ou seja, a deslignificação pode ser modelada como uma reação de primeira ordem, (DUEÑAS, 1997). Para expressar a temperatura e o tempo de cozimento foi desenvolvida uma variável chamada de fator H.

### 2.3.1.3 Morfologia da fibra da polpa celulósica pelo processo Kraft

#### 2.3.1.3.1 Comprimento da fibra

O comprimento da fibra pode ou não ser preservado após o processo Kraft, pode-se ainda observar que os valores medidos nas pastas tendem a ser diferentes dos medidos na madeira, provavelmente porque após esta operação, as fibras são mais flexíveis e por isso são menores (a qual é muitas vezes tomada como a medida do comprimento) (PAAVILAINEN, 1991; REEVES, 1991; TREPANIER, 1998).

Para a medição do comprimento da fibra após a polpação, existem inúmeros métodos ópticos. 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 (SANTOS, 2005).

#### 2.3.1.3.2 Largura e espessura da parede da fibra

Quanto à espessura da parede, no cozimento Kraft, a entrada de licor pode induzir o afastamento das microfibrilas a um nível tal que, a espessura da parede depois do cozimento é, mesmo após secagem, eventualmente igual ou superior à espessura inicial (FERREIRA, 2000).

Por outro lado, Paavilainen (1993) cita reduções da largura da fibra e da espessura da parede com o cozimento respectivamente da ordem dos 15 e dos 50%.

A análise da largura e a espessura da parede podem ser determinadas na prática, mas somente os analisadores de custo elevado tem 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; MOLTEBERG, 2004).

### 2.3.1.3.3 *Coarseness*

A *Coarseness* é uma propriedade importante das fibras e é definida como peso por unidade de comprimento da fibra, expressada como miligramas por 100 m (ou decigramas por 10 km). Afeta as fibras na fabricação do papel e altera várias propriedades de estrutura, resistência e óptica do produto (SANTOS, 2005).

O alto valor de *Coarseness* (fibras pesadas) causa valor alto de rasgo, alto volume específico aparente, alta porosidade, formação de folhas úmidas fracas, baixa opacidade, alta rapidez para absorver água, drenagem rápida, superfície rugosa, baixa população fibrosa e ligação interfibras prejudicada. Entretanto, o baixo valor de *Coarseness* (fibras leves) implica em alta colapsabilidade, alta retenção de água e drenagem lenta (FOELKEL, 2009).

Segundo Kerekes; Schell (1995), a *Coarseness* influencia na uniformidade da folha através do número de contatos por fibras, tamanho dos flocos e mobilidade das fibras durante a formação. Porém, é nas dimensões transversais das fibras que ocorrem mais alterações no cozimento Kraft. Desse modo, a *Coarseness* das fibras diminui em virtude da remoção de material da parede, em especial da parede primária (KLINE, 1990; PAAVILAINEN, 1991; REEVES 1991; HIGGINS et al., 1991).

## 2.4 PRODUÇÃO DE PAPEL

O papel é uma fina camada de fibras celulósicas orientadas aleatoriamente e unidas por ligações de hidrogênio,



sendo esta definição empregada para todos os tipos de papéis (KLINE, 1991).

As etapas dos processos de fabricação de papel, de acordo com Biermann (1996) consistem basicamente em:

- Formação do papel: Aplicação da polpa celulósica sobre uma tela;
- Drenagem: remoção inicial da água através de escoamento por gravidade ou uma diferença de pressão;
- Consolidação: compactação do colchão de polpa celulósica;
- Secagem: remoção da água através de fenômenos de transporte de energia por contato com superfícies aquecidas.

Hanlon et al. (1998) descreve que durante o processo de fabricação do papel pode-se utilizar inúmeras substâncias que facilitam o controle do processo, sendo estas: as colas, cargas minerais, corantes e agentes de retenção.

Para a avaliação da qualidade do papel é necessário a realização de alguns testes mediante a determinação de alguns parâmetros conforme a Tabela 2. (BIERMANN, 1996; DUEÑAS, 1997; MARK et al., 2001; GULLICHSEN; PAULAPURO, 2000; SMOOK, 1989; SANJUAN, 1997).

Tabela 2-Propriedades do papel

| Propriedades do papel |                |        |
|-----------------------|----------------|--------|
| Físicas               | Resistência    | Óticas |
| Gramatura             | Tração         | Alvura |
| Espessura             | Arrebentamento |        |
| Umidade               |                |        |
| Densidade             | Rasgo          | Cor    |
| Permeância            |                |        |
| Absorção              | Rigidez        |        |
| Lisura                |                |        |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Esses testes tem por objetivo o controle econômico, do processo, e da qualidade (SMOOK, 1989).

As propriedades físicas avaliadas no papel estão sujeitas à influência de diversos fatores, dentre eles, a gramatura, a pressão exercida na formação das folhas, o tratamento mecânico aplicado nas fibras (processo de refinação), a adição de outras substancias no papel, o tipo de fibra utilizada na formação das folhas e o conteúdo de umidade do papel (SCOTT et al., 1995). As propriedades físicas do papel, por exemplo, a gramatura e a umidade, podem exercer grande influência sobre as características de resistência do papel (CASEY, 1991; KOCUREK, 1992; SCOTT et al., 1995; DUEÑAS, 1996; BIERMANN, 1996).

As propriedades do papel podem descritas conforme D'Almeida, (1981):

- Gramatura: esta propriedade influencia todas as propriedades mecânicas e algumas propriedades óticas. É importante do ponto de vista econômico na venda e compra do papel. Expressa em gramas por metro quadrado ( $\text{g/m}^2$ ).

- Resistência à tração: é a força de tensão necessária para arrebentar o papel, nesse teste utiliza-se um dinamômetro e submete-se o corpo de prova em ambas as direções transversal e longitudinal a um esforço de tração uniformemente crescente até sua ruptura. A resistência individual das fibras, comprimento médio, formação e estrutura do papel afetam esse teste.

- Resistência ao arrebentamento: é a pressão necessária para produzir a ruptura do material transmitida por um diafragma elástico de área circular, para esse teste utiliza-se o aparelho 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 de o rasgo ter sido iniciado. Para esse

teste utiliza-se um aparelho tipo pêndulo “Elmendorf”. Entre os fatores que afetam essa propriedade estão o comprimento das fibras e ligação entre elas.

- Resistência a passagem do ar: essa propriedade é expressa pelo tempo (em segundos) necessário para a passagem de um volume de ar através de uma superfície do papel.

#### 2.4.1 Papel *Sack-Kraft*

Tem-se o conhecimento que o *Sack-Kraft* é um dos principais materiais para utilização em embalagens em todo mundo. Com o desenvolvimento e concorrência de outros materiais para embalagens, tais como sacos plásticos, os produtores de papel para sacaria estão continuamente sob pressão para melhorar a qualidade do produto (LAN et al., 2011).

A expressão *Sack-Kraft* refere-se ao papel produzido pelo método Kraft que pode ser branqueado ou não, este papel possui alta resistência e pode ter gramatura variando dentro de 60-150 g/m<sup>2</sup>, e é adequado para a produção de sacos industriais (CASEY, 1991).

Para esse tipo de papel as propriedades de grande importância são as forças que incluem: índice de tração, índice TEA, índice de estouro e índice de rasgo, e permeabilidade ao ar. As duas propriedades cruciais para a resistência do *Sack-Kraft* são a resistência à tração e índice TEA, que influenciam diretamente na durabilidade do papel durante o enchimento e processo de manipulação (SHALLORN; GURNAGUL, 2010; LAN et al., 2011).

## REFERÊNCIAS

AMIDON, T.E. Effect of the wood properties of hardwoods on Kraft paper properties. **Tappi Journal**, v.64, n.3, p.123-126, Mar. 1981.

ANDRADE, A.S. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: Influência Da Idade E Classe De Produtividade**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS- ABRAF. **Anuário estatístico**, 2011, ano base 2010.

BARRICHELO, L. E. G.; KAGEYAMA, P. Y.; SPELTZ, R. M.; BONISH, H. S.; BRITO, J. O.; FERREIRA, M. Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando aproveitamento industrial. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 1-14, 1977.

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

BILLA, E.; PASTOU, A.; MONTIES, B.; ROMERO, J.; KOUKIOS, E.G. Multivariate chemometric analysis of the fluorescence spectra of *Eucalyptus* wood. **Industrial, Crops and Products**, Amsterdam, v. 11, p. 187-196, 2000.

BIERMANN, C. J., Handbook of Pulping and Papermaking. **Academic Press**. ed.2, San Diego, 754p. 1996.

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. O setor brasileiro de celulose e papel. Associação Brasileira de Celulose e Papel.** São Paulo. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br>. Capturado em janeiro de 2014.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. Anatomia da madeira. São Paulo. **Livraria Nobel S.A.** 154p. 1991.

CARDOSO, G.S. **Fabricação de celulose**, vol.1, Senai, 349p. Curitiba, 2006.

CASEY, J. P. Pulp and paper chemistry and chemical technology. **New York: Wiley-Interscience**, 1981.

CASEY, J. P. Pulpa y papel, química e tecnología química. **Editorial Limusa S.A. México.** ed.1, v.3, 659p. 1991.

D'ALMEIDA, M. H. O. (Coord.). **Celulose e papel.** 2º ed. São Paulo: IPT, 1988. v. 1.

D'ALMEIDA, M. L. O. Celulose e papel: tecnologia de fabricação de pasta celulósica. **IPT-SENAI** 2. ed. São Paulo v. 1, 1981.

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.

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

FAE BUSINESS. O mercado de papel e celulose. **Revista FAE BUSINESS**, Curitiba, n.1, p.44-45, 2001

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood. **Chemistry: Ultrastructure: Reactions**. Berlin. Walter de Gruyter. 1989.

FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, nov./dez. 2011.

FERREIRA, P.J.T. **Estudos de pastas Kraft de *Eucalyptus globulus*: características estruturais e aptidão papaleira**, Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Química) Universidade De Coimbra Faculdade de Ciências e Tecnologia Departamento e Engenharia Química, Coimbra, 2000.

FERREIRA, C.A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus spp*, em função da idade e qualidade do local. **Boletim informativo IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. b1-b19, 1978.

FOELKEL, C.E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: **Congresso Florestal brasileiro**, Campos do Jordão, 1990.

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

FRIDANI, E.M.D.; DALTOÉ, R. Comparação das propriedades físico-mecânicas de polpas celulósicas Kappa 45 e Kappa 100 destinada à fabricação de papéis para embalagens rígidas. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, v. 3, n. 1, p. 65-74, jan./jun. 2012.

GOMES, I.M.B.; PEREIRA, A.M.; YODOVAL, P. Mix de madeira: a busca do melhor desempenho global. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 31, 1998, São Paulo. Anais, São Paulo: **ABTCP**, 1998.

GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C. J. Chemical pulping. In: GULLICHSEN J., PAULAPURO, H. **Papermaking science and technology**. Helsinki: Fapet Oy, 2000.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. Papermaking science and technology. pulp and paper testing. **OyHelsinki: Fapet Oy**, 2000.

HANLON, J.F.; KELSEY, R.J.; FORCINIO, H.E. Handbook of package engineering. **CRC Press**. ed.3, 680p. 1998.

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

HIGGINS, H. G., de Yong, J., BALODIS, V., PHILLIPS, F. H., COLLEY, J. The density and structure of hardwoods in relation to paper surface characteristics and other properties, Process Engineering Handbook, Appendix, **Tappi Press**, Atlanta, 77-81, 1991.

IPT. **Celulose e Papel**. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. v.1, ed.2, 1988.

KEREKES, R. J., SCHELL, C. Effects of fibre length and *Coarseness* on pulp flocculation, *Tappi Journal*, 78 (2): 133-139, 1995.

KLINE, J. E. **Paper and paperboard, manufacturing and converting fundamentals**. San Francisco. ed.2, 245p. 1991.

KLINE, J. E. Paper and paperboard: manufacturing and converting fundamentals, 5th ed., **Miller Freeman**, San Francisco, 1990.

KLOCK, U. **Qualidade da Madeira Juvenil de *Pinus maximinoi*** H.E. MOORE tese apresentada para a obtenção do título de doutor em Ciências Florestais. Curitiba, 2000.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira. 3ª Edição revisada**. Curitiba, 2005.

KOCUREK, M. J. Mill control and control systems: quality and testing, environmental corrosion, electrical. **Atlanta. TAPPI**. ed.3, vol.9, 430p. 1992.

KOLLMAN, F. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Madrid: **Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicios de la Madera**, . p.359-394, 1959.

LAN, J.; MA, L.; LI, Z.; WANG, F.; LIU, B. The Study on Refining of Masson's Pine Kraft Pulps for Sack Paper. **Advanced Materials Research**, vols 236-238, p.1297-1300 2011.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK III, A.; ISEBRANDS, J. G. Formation and properties of juvenile wood



in southern pines. **USDA – Forest Products Laboratory**. General Technical report FPL-GTR-129. 42p. 2001.

MARK, R.E.; HABEGER, C.C.; BORCH, J. **Handbook of physical testing of paper**. Marcel Dekker. v.1, ed.2, 1040p. 2001.

MEDRADO, M.J.S., Cultivo do *Pinus* (Apresentação), [S.l.], **Embrapa**., novembro de 2005, disponível em: . Acesso em: 10/10/2014.

MIMMS, A. Kraft pulping, a compilation of notes. Atlanta. **TAPPI PRESS**. ed.2, 181p. 1993.

MOCELIN, E.Z **Antraquinona e surfactante para otimização do processo Kraft com *Pinus spp.*** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

MORAES, P.H.D, **Efeito da Idade da Madeira de Eucalipto na sua Química e Polpabilidade, e Branqueabilidade e Propriedades Físicas da Polpa**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

NEUBERGER, R. **Boas Práticas de Operação para Redução de Odores na Produção de Celulose Kraft: Uma Abordagem Qualitativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade de Mauá, São Caetano do Sul, 2008.

NIGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005. 160p.

PAAVILAINEN, L. Importance of *Coarseness* and fiber length in papermaking, Process Engineering Handbook, Appendix, **Tappi Press**, Atlanta, 98-108, 1999.

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.

PAINE, F.A.; PAINE, H.Y. **A handbook of food packaging**. Springer. ed.2, 516p. 1993.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York. Mc Graw Hill. ed.4, 722p. 1980.

PEREIRA, A. **Congresso Internacional do Pinus Joinville-SC**. Agosto de 2004 Disponível em:  
<<http://www.porthuseventos.com.br/eventos2004/imprensa%202506.htm>> Acesso em: 22 de dezembro de 2013.

POTULSKI, D.C. **Efeito Da Incorporação De Microfibrilas De Celulose Sobre As Propriedades Do Papel**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

PUNCHES, J. Tree growth, forest management, and their implications for wood quality. Oregon State University. 8p. 2004.

RECH, C. Estudo sugere uso de serragem como insumo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 66, 2002.

REEVES, R.H. (1991) – Fibrous raw materials for papermaking, Kocurek, M. J. (Ed.), *Pulp and paper manufacture*, Vol. 7, 3rd ed., **The Joint Textbook Comitee of the Paper**, 1991.

ROBERTSON, A. G., OLSON, J. A., ALLEN, P., CHAN, B., SETH, R. – Measurement of pulp fibres, *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 1999.

RYDHOLM, SA. **Pulping processes**. London: Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Inc., 1965. 1269 p

SAMISTRARO, G. **Propriedades químicas e físicas da polpa e papel Kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SANJUAN, D. R. Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 1997.

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 (Tecnologia de Produtos Florestais.)** Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SCOTT, G. Polymer and the Environment. The Royal Society of Chemistry. **Letchworth, UK**, cap.5, p.93. 1995.

SHALLORN, P.; GURNAGUL, N. A Semi-empirical Model of Tensile Energy Absorption of *Sack- Kraft* Paper. **BioResources** p.455-476, 2010.

SHIMIZU, J. Y. *Pinus* na silvicultura brasileira. **Revista da madeira**, Curitiba, p. 22-28, out. 2004.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus***. ESALQ. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.

SILVA, M.G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. ESALQ. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011.

SOUSA, R. C.; GIOVANINI, E. P.; LIMA, I. L.; FLORSHEIM, S. M. B.; GARCIA, J. N. Influência da idade e da posição radial na densidade básica da madeira e dimensões dos traqueídeos em *Pinus taeda* L. **IF Série Registro**, São Paulo, n. 31, p.27-32, 2007.

SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

SJÖSTRÖM, E. Wood Chemistry fundamentals and applications. New York. **Academic Press**. 223p. 1981.

SMOOK, G.A. Handbook for pulp and paper technologists. Atlanta. **TAPPI**. 419p. 1989.

TOMASELLI, I.; TUOTO, M. Oferta do *Pinus* no Brasil. In.: **PINUS UMA ALTERNATIVA DE MERCADO**, **Revista Madeira**, Curitiba. Edição especial, p. 6-8, dezembro de 2002.

TREPANIER, R. J. (1998) – Automatic fiber length and shape measurement by image analysis, **Tappi Journal**, 81 (6): 152-154.

TRUGILHO, P.F., LIMA, J.T., MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas das

madeiras de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

VALENTE, C. A.; MENDES DE SOUSA, A. P.; FURTADO, F. P.; CARVALHO, A. P. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: Technological component. **Appita Journal**, v.45, n.6, p.403-407, 1992.

WENGER, K.F. Forestry handbook. **Wiley-IEEE**. ed.2, 1984.

WENZIL, HFJ. The Chemical Tecgnology of Wood. New york: **Academic Press**. 1970.

WHER, T. R. ; BARRICHELO , L.E.G. Cozimentos Kraft com madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos . **O Papel**. V.54, n 5. 1993.

ZAKIS, G. F. Functional analysis of lignin and their derivatives. **Tappi Press**, Atlanta, USA. 94p. 1994..33-41, 1993.

## **CAPÍTULO 2: QUALIDADE DA MADEIRA DE *Pinus taeda* EM DIFERENTES IDADES PARA A PRODUÇÃO DE POLPA E PAPEL**

### **RESUMO**

A qualidade da madeira é um parâmetro de grande importância na produção de celulose e papel, principalmente por suas propriedades afetarem diretamente o produto final. Devido ao esgotamento e limitação de matéria prima pelas empresas papeleiras, o período de corte da madeira se torna um grande entrave já que a idade exerce grande influência em suas propriedades. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi analisar a qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes idades. As árvores amostradas neste estudo foram provenientes de áreas de reflorestamento pertencentes à empresa Klabin S.A., localizada no Município de Otacílio Costa, Estado de Santa Catarina. A amostragem foi realizada em plantios comerciais, com 14, 16 e 19 anos de idade. As características analisadas foram: física (densidade), químicas (holocelulose, extrativos, cinzas, lignina e solubilidade em hidróxido de sódio) e anatômicas (comprimento, largura, diâmetro do lume, espessura da parede, índice de enfiamento, coeficiente de flexibilidade, fração parede e índice de Runkel). Os valores observados foram submetidos à análise de variância. Os resultados demonstram que a madeira de *Pinus taeda* apresenta diferenças significativas na densidade em relação a idade (366 kg/m<sup>3</sup>, 383 kg/m<sup>3</sup> e 402 kg/m<sup>3</sup> para 14, 16 e 19 anos respectivamente), e entre as diferentes posições do fuste. Já para as características químicas os valores médios para extrativos totais apresentaram diferenças estatísticas significativas das idades de 14 e 16 para a idade de 19 anos com 5,62%, para o teor de cinzas a idade de 14 anos foi encontrada diferença significativa sobre as demais, com 0,55%, as demais características químicas analisadas como: lignina,

holocelulose e solubilidade em hidróxido de sódio não apresentaram diferenças significativas entre as idades. Para todas as variáveis analisadas na caracterização dos traqueóides foram encontradas diferenças significativas nas idades em estudo. As idades de 16 e 19 anos apresentam melhor qualidade da madeira para a produção de celulose e papel em relação à idade de 14 anos.

**Palavras-chave:** Propriedades da madeira, idade, celulose Kraft.

## ABSTRACT

The quality of the wood is a parameter of great importance in the production of pulp and paper, mainly because its properties affect directly the final product. Due to exhaustion and restraint of the raw material for paper companies, the wood cutting period becomes a big obstacle since the age exerts a considerable influence on the properties of wood. Thus, the objective of this study was to analyze the quality of *Pinus taeda* at different ages. The sampled trees in this study were from reforestation areas located at the city of Otacílio Costa belonging to the company Klabin S.A., state of Santa Catarina. The sampled trees were 14, 16 and 19 years old. The characteristics analysed were: physical (density), chemical (holocellulose, extractives, ash content, lignin and solubility in sodium hydroxide) and anatomical (length, width, lumen diameter, wall thickness, felting index, flexibility coefficient, wall fraction and Runkel index). The values were submitted to the variance analysis. The results show that the wood of *Pinus taeda* has significant differences in density in relation to age (366 kg/m<sup>3</sup>, 383 kg/m<sup>3</sup> and 402 kg/m<sup>3</sup> to 14, 16 and 19 years respectively), and between the different positions of the stem. For the chemical characteristics the average values for total extractives showed statistically significant differences in the

ages of 14 and 16 for the age of 19 years old with 5,62%, for the ash content the age of 14 showed significant difference over the other ages, with 0,55%, other chemical characteristics analyzed as lignin, holocellulose and solubility in sodium hydroxide showed no significant differences between ages. For all the analyzed variables in the characterization of tracheids significant differences were found in the ages studied. The 16 and 19 ages show a better quality of the wood for the pulp and paper production in relation to the age of 14 years.

Keywords: wood properties, age, Kraft cellulose.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa uma importante posição mundial entre os produtores de celulose, segundo dados da Bracelpa em 2013 o setor alcançou o posto de quarto produtor mundial de celulose, já para a produção de papel ocupou a posição de nono lugar. Em 2011, o país produziu 13.952.000 toneladas de polpa celulósica, em que 1.513.000 toneladas foram de fibra longa, representando 10,8% deste total. Dentre a produção de fibra longa, 5,5% corresponde a celulose branqueada e 94,5% a celulose não branqueada.

Devido à competitividade da produção de polpa e papel com a utilização de *Pinus taeda* para papéis de alta resistência, empresas do mercado buscam melhores matérias primas e aprimoramento do processo produtivo. Assim, são necessários pesquisas e estudos que envolvam todos estes processos e principalmente a matéria prima necessária para a produção de papel, a madeira.

Demuner (2011) destaca que a matéria prima é a principal dentre diversas variáveis do processo de produção devido a sua representatividade nos custos totais sendo de 50 a 60%. Para a redução destes custos, investimentos tecnológicos estão sendo direcionados para diminuir o consumo específico da madeira.



A madeira por se tratar de um material heterogêneo e higroscópico apresenta variações em suas características físicas, químicas e anatômicas, sendo estas influenciadas por idade, sentido base topo, sentido medula casca, dentre outros.

Para Vivian et al. (2015), conhecer as características da madeira, sendo estas a densidade básica, composição química e morfologia dos traqueóides, bem como sua relação com os resultados de polpação, é de grande importância para determinação da qualidade da madeira, visando sua adequada aplicação para determinados fins.

Sendo assim, todas as características da madeira e suas variações devem ser estudadas, permitindo o tratamento e uso correto da madeira com menores custos. Para a produção de celulose e papel é essencial que todas as características sejam conhecidas, deste modo facilita todo o condicionamento das variáveis do processo e consegue-se obter melhores resultados em termos de rendimento, menores desperdícios durante o processamento, redução do consumo de reagentes e maiores resistências do papel.

Dentre as características físicas da madeira, a densidade básica afeta no rendimento e no custo dos processos de produção de polpa celulósica, pois para espécies que possuem alta densidade, há uma menor dificuldade de manuseio por haver menor volume de toras e cavacos para uma mesma quantidade de massa (SANSÍGOLO; BARREIROS, 2004; SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1991).

Além disso, essa propriedade está diretamente relacionada à propriedade que confere resistências físico-mecânicas da polpa e resistência ao rasgo do papel, assim esta característica é sempre avaliada em empresas papeleiras antes do processamento da madeira nos digestores.

Mimms (1993) destaca que a densidade influencia além da qualidade da polpa celulósica e do papel produzido como também no rendimento volumétrico do processo, penetração do licor de cozimento e tempo de cozimento.

Assim, durante o cozimento, madeiras de altas densidades requerem condições alcalinas mais fortes e temperaturas mais elevadas comprometendo o rendimento de polpa. Porém a alta densidade resulta em uma relação custo/benefício também mais alta no processamento para fabricação de celulose (MOKFIESKI et al., 2008).

Já entre os componentes químicos da madeira para produção de produtos papeleiros, Andrade (2006) descreve que a celulose pode ter diversas denominações, sendo elas polpa celulósica, polpa, pasta e massa. O termo celulose também pode ter duplo significado, onde o significado químico corresponde à celulose que é formada por uma cadeia linear de unidades de anidroglicose, como termo técnico a celulose é o produto do desfibramento ou da deslignificação total ou parcial de materiais fibrosos.

Quando mencionadas as hemiceluloses, Klock et al. (2005) afirma que suas influências nas propriedades da massa celulósica ocorrem devido sua ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e configuração irregular e ramificada, o que ocasiona o aumento da flexibilidade das fibras e da área específica de ligação e também a redução do tempo e da energia requeridos no refino das pastas celulósicas.

Na produção de celulose, a determinação da fração de lignina presente na madeira é de suma importância. A sua remoção é um dos principais processos de obtenção de polpa celulósica, proporcionando informações para avaliação e aplicação em processos. Aspectos como rendimento, branqueabilidade e alvura são propriedades da polpa celulósica associadas com o conteúdo da lignina (FENGEL; WEGENER, 1989; MIMMS, 1993; DUEÑAS, 1997).

A presença de altos teores de extrativos exercem influências negativas no processo de fabricação de pastas celulósicas como: redução do rendimento, aumento no consumo de reagentes, inibição da reação de deslignificação, corrosão de equipamentos, redução da qualidade da pasta

celulósica, geração de subprodutos, incrustações em equipamentos, geração de espuma e dificulta a recuperação do licor de cozimento.

Devido a essas influências dos extrativos durante o processo de polpação e no produto final os autores, Almeida; Silva (1997) recomendam o estudo do teor de extrativos da madeira como um critério de seleção de madeiras para produção de polpas Kraft.

Já os compostos inorgânicos ou cinzas são constituídos, principalmente, de Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Cloro (Cl), Fósforo (P), Alumínio (Al), Ferro (Fe) e Zinco (Zn), além de outros componentes em pequena quantidade (FENGEL; WEGENER, 1989). O conteúdo de cinzas exercem grande influência na utilização da madeira, pois quando os compostos inorgânicos entram em contato com os metais das ferramentas de corte podem causar deterioração da mesma. E também influencia no pH da madeira, interferindo nos processos de polpação e produção de papel (FENGEL; WEGENER, 1989).

As características anatômicas apresentam grande importância sobre as características da polpa celulósica e características do papel formado (IPT, 1988; MIMMS, 1993). Assim quanto à anatomia da madeira, a densidade da fibra (espessura da parede celular), comprimento da fibra e resistência da fibra são fatores fundamentais na conferência da resistência do papel (DINWOODIE, 1965).

Diante da importância das características da madeira durante a produção de polpa e papel, o objetivo deste capítulo foi verificar a qualidade da madeira de *Pinus taeda* nas idades de 14, 16 e 19 anos, de acordo com as características físicas, químicas e anatômicas.

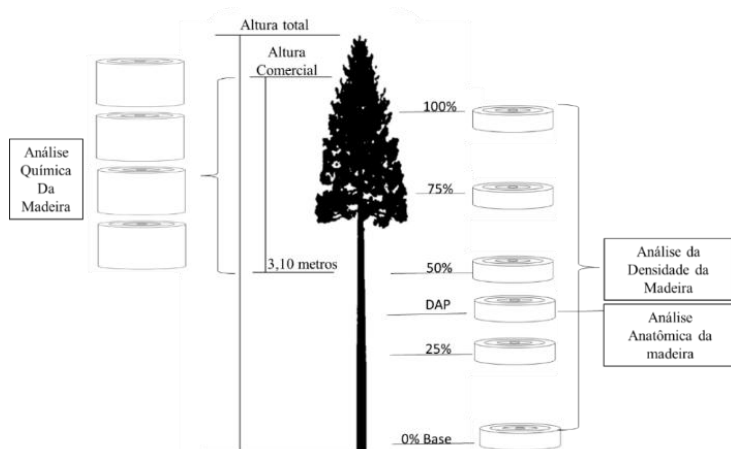
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As árvores de *Pinus taeda* deste estudo foram provenientes de áreas de plantios da empresa Klabin S.A. localizadas no Município de Otacílio Costa, Santa Catarina nas coordenadas 27° 28' 27" S, 50° 07' 19" O, a altitude de 884 metros.

Foram amostradas 9 árvores nas idades de 14, 16 e 19 anos, totalizando 27 árvores respeitando a proporcionalidade da distribuição diamétrica, baseado no inventário dos povoamentos.

Ao longo do tronco foram coletados discos até altura comercial (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), utilizados para as análises físicas da madeira. Também foram coletados discos a 1,30 m (diâmetro a altura do peito) para análise morfológica dos traqueóides. Para análise química foram utilizados cavacos de madeira obtidos acima de 3,10 m, já que abaixo a madeira é comercializada como madeira sólida e não entra no processo de obtenção de celulose para papel como ilustra a Figura 2.

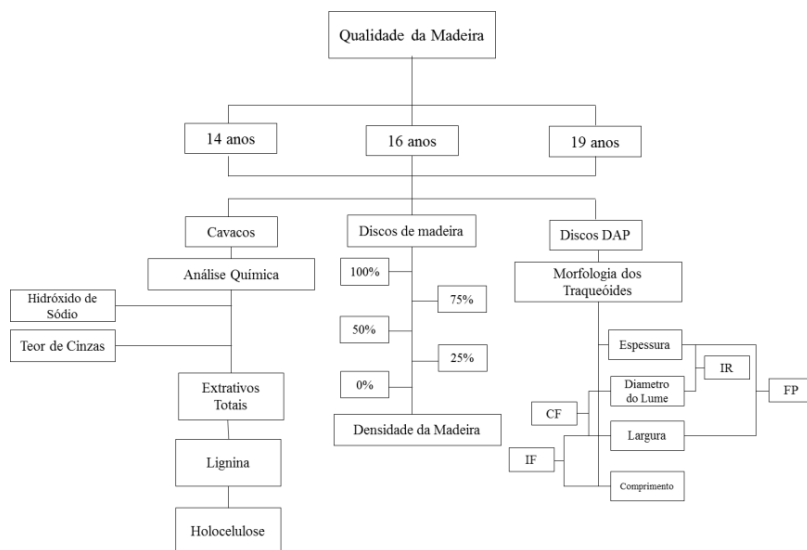
Figura 2- Esquema ilustrativo do procedimento de coleta



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

A Figura 3 demonstra a amostragem da madeira de *Pinus taeda* para o estudo de suas propriedades.

Figura 3- Esquema da análise da qualidade da madeira de *Pinus taeda*



Fonte: Produção do próprio autor, 2015

\*CF= coeficiente de flexibilidade, IR= índice de Runkel, FP= fração parede, IF= índice de flexibilidade.

## 2.1 Determinação da densidade básica

Para determinação da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* foram seguidas as normas de acordo com a NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

## 2.2 Análises químicas

Para as análises químicas, a madeira foi reduzida a cavacos e posteriormente fragmentada em moinho do tipo martelo para a obtenção da serragem. As amostras foram classificadas em granulometria 40-60 mesh para realizações das análises em triplicata para cada tratamento (idades) seguindo recomendações das normas da Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1994). Os procedimentos para cada análise química estão descritos pelas normas indicadas na Tabela 3.

Tabela 3- Procedimentos para análise química da madeira de acordo com as normas.

| Procedimentos                        | Normas                     |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Preparação de material para análise  | T264 – om 88               |
| Teor de Holocelulose                 | T249 – om 75               |
| Teor de Lignina                      | T222 – om 88 (TAPPI, 1993) |
| Teor de Extrativos Totais            | NBR 14660 (ABNT, 2004)     |
| Teor de Material Inorgânico (Cinzas) | T413 – om 06               |
| Solubilidade em Hidróxido de Sódio   | NBR7990 (ABNT, 2010)       |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

\*Procedimentos da Technical Association of Pulp and Paper Industry e Normas Brasileiras

## 2.3 Morfologia dos traqueóides

A morfologia dos traqueóides foi analisada por meio de lâminas histológicas de material dissociado. Os discos do DAP das 9 árvores por idade foram reduzidos em pequenos filetes para serem dissociados, homogeneizados e a metodologia adotada foi seguida de acordo com Franklin (1945).

As características quantitativas dos traqueóides (comumente chamados de fibras) foram analisadas em software

Win-cell-pro e descritas conforme as recomendações do IAWA Committee (1989). As amostras de material dissociado foram mensuradas por meio das variáveis; comprimento total (L), diâmetro total (D) e diâmetro de lume (d) onde foram realizadas 40 mensurações, utilizando microscópio de luz Olympus BX 51, conectado à câmera digital Evolution LC. Nos parâmetros qualitativos determinou-se o valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão.

De acordo com as variáveis obtidas foram determinados aos parâmetros anatômicos importantes na produção de celulose e papel, como:

- a) Coeficiente de Flexibilidade (CF): É a razão do diâmetro do lume (d) e largura da fibra (L), expresso em porcentagem:

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

- b) Fração Parede (FP): É a relação entre o dobro da espessura da parede celular (e) e a largura da fibra (L), expressa em porcentagem:

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

- c) Índice de Enfeltramento (IE): É a relação entre o comprimento (I) e a largura da fibra (L):

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

- d) Índice de Runkel (IR): É a relação entre duas vezes à espessura da parede celular (e) e o diâmetro do lume (d):

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

## 2.4 Análise Estatística

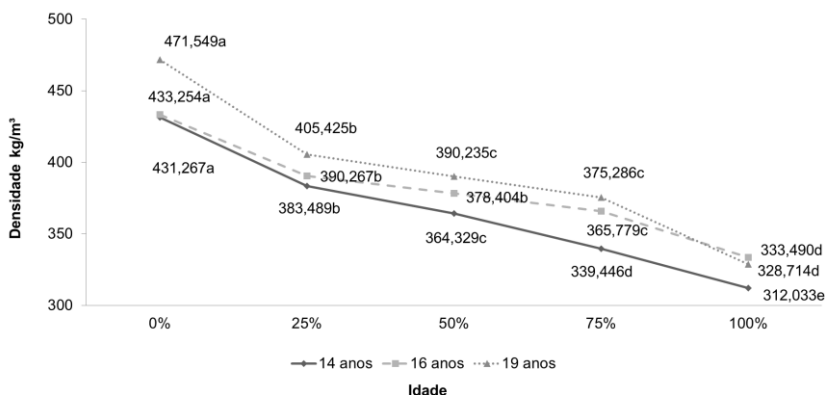
Todos os dados obtidos foram submetidos a testes estatísticos de normalidade por Kolmogorov-Smirnov e após a comparação de médias por Análise de Variância e teste de Scott-Knott, com significância de 5% de probabilidade, por meio do programa SISVAR® (FERREIRA, 2011).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Densidade básica da madeira

Os valores para densidade básica da madeira de *Pinus taeda* nas diferentes posições ao longo do fuste (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e nas diferentes idades realizadas no estudo são apresentados na Figura 4.

Figura 4- Comportamento da densidade básica ( $\text{kg/m}^3$ ) ao longo do fuste em diferentes idades



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 95% de confiança.

Pode-se observar na Figura 4, que em todas as idades para as diferentes posições ao longo do fuste houve diferença



estatística nas densidades, sendo que a menor densidade foi para a posição mais alta do fuste (100%). Assim, a altura exerce efeito diferencial na densidade básica.

Desse modo, para todas as idades avaliadas os valores médios da densidade da madeira apresentaram comportamento semelhante, diminuindo à medida que aumenta a altura na árvore. O mesmo comportamento foi encontrado pelos autores Tsoumis, 1991; Klock, 2001; Hassegawa, 2003.

Para idade de 16 anos, apenas as posições de 25% e 50% que não apresentaram diferenças com 390 e 378 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. O mesmo ocorreu para as posições de 50% e 75% da idade de 19 anos, onde os valores encontrados para estas posições foram de 390 e 375 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Nas posições mais altas ao longo do fuste, ou seja, a partir da posição 50% até 100%, observam-se densidades mais baixas em todas as idades, podendo ser explicado pela composição da madeira, que apresenta maior quantidade de madeira juvenil, com menor densidade, menor quantidade de lenho tardio, e composta provavelmente por traqueóides curtos e paredes celulares delgadas.

Para as posições mais próximas da base da árvore, as idades estudadas apresentaram altas densidades, comparado às outras posições chegando a valores de 471 kg/m<sup>3</sup>. A madeira mais próxima da base apresenta maior quantidade de anéis de crescimento, consequentemente maior quantidade de lenho tardio, madeira adulta, traqueóides provavelmente mais longos e com paredes celulares espessas, resultando dessa forma em maiores densidades.

Os valores médios das densidades, de acordo com análise estatística entre as idades, são apresentados na Tabela 4.

Os valores médios encontrados para a densidade foram semelhantes aos valores encontrados por outros autores em estudos com o *Pinus taeda* (BITTENCOURT, 2004; NIGOSKI, 2005; BARRICHELO; BRITO, 1979).

Tabela 4 - Valores médios de densidade básica para as diferentes idades da madeira de *Pinus taeda*

| Idade | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |        |
|-------|--------------------------------|--------|
|       | Média                          | CV(%)* |
| 14    | 366,236 <sup>c</sup>           | 11,76  |
| 16    | 383,349 <sup>b</sup>           | 10,57  |
| 19    | 402,928 <sup>a</sup>           | 11,04  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras na mesma coluna não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 95% de confiança. \*CV(%) = Coeficiente de Variação

Nota-se na Tabela que ocorreu acréscimo da densidade básica com o aumento das idades avaliadas, desse modo a idade exerceu influência significativa sobre a densidade básica da madeira, onde cada tratamento diferenciou estatisticamente entre si. O mesmo foi observado por Bittencourt (2004) e Nigoski (2005) para *Pinus taeda*, ainda Andrade (2006) afirma que esse aumento ocorre devido ao efeito exercido pela proporção dos lenhos juvenil e adultos nas idades avaliadas, já que estes lenhos apresentam densidades que diferem entre si.

Os valores médios encontrados para a idade de 14 anos de 366 kg/m<sup>3</sup> foram próximos dos encontrados para a idade de 12 anos por Rigatto et al. (2004), com densidades variando de 373 a 394 kg/m<sup>3</sup>. Para 19 anos, os valores encontrados de 403 kg/m<sup>3</sup> foram próximos aos observados por Vivian et al. (2015), apresentando densidade de 435 kg/m<sup>3</sup>/ 21 anos.

Bittencourt (2004) analisou a densidade de madeiras de *Pinus taeda* com 14, 16 e 20 anos (366, 382 e 384 kg/m<sup>3</sup> respectivamente), observando valores muito próximos dos observados nesse estudo.

Shimoyama (1990), ressalta que a capacidade da unidade de cozimento é aumentada em massa com densidades básica mais altas, elevando o potencial de produção da indústria. Porém, o aumento do valor de densidade básica é

acompanhado por uma maior dificuldade no processo de conversão das toras em cavacos, maior consumo de reagentes, dificuldade de impregnação e deslignificação, podendo levar a altas quantidades de rejeitos.

Para a produção de papel, as densidades estudadas foram baixas, onde Wher; Barrichelo (1993) descrevem que a faixa de densidade ideal para a produção de papel é de 450 a 550 kg/m<sup>3</sup>. Gomide et al. (2005) relata que madeira de baixa densidade poderá resultar em consumo específico de madeira mais elevado, o que é desvantagem, principalmente quando a empresa possui alguma limitação no fornecimento de matéria-prima.

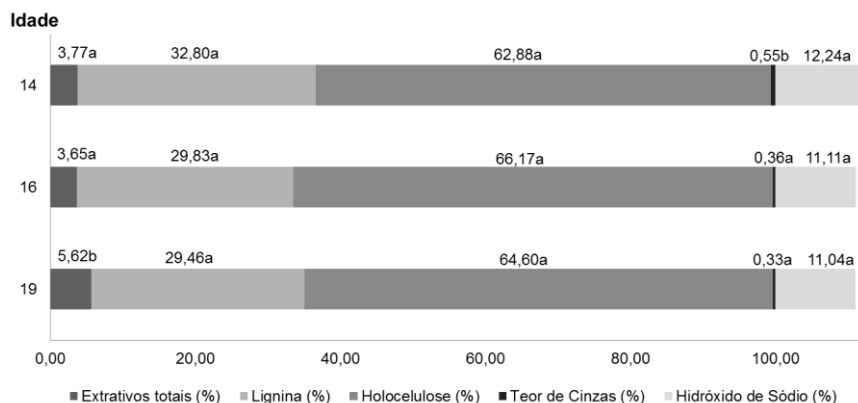
Dias; Claudio (1991), em alguns estudos com *Pinus spp.* demonstraram a importância da densidade nos rendimentos de polpação, sendo que estes são superiores quando a madeira apresenta densidade variando de 470 a 490 kg/m<sup>3</sup>.

Madeiras com maior densidade geralmente apresentam maior comprimento de fibra, maior espessura de parede celular e menor diâmetro de lume, produzindo papéis com maior resistência ao rasgo, menor lisura, maior opacidade e menor resistência à tração e ao arrebentamento, em razão do menor potencial para colapsamento da parede celular, que é alcançado durante o processo de refinação e formação do papel (BARRICHELO et al., 1977).

### 3.2 Análise química da madeira

A análise química da madeira é de extrema importância já que seus compostos exercem influência sobre os processos refletindo no produto final (ANDRADE, 2006). Os valores médios das análises químicas estão apresentados na Figura 5.

Figura 5- Análise química quantitativa da madeira em diferentes idades



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras na mesma coluna não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 95% de confiança.

Cabe ressaltar, que para todas as variáveis em estudo foi realizada e confirmada à normalidade dos dados, o que permitiu a avaliação dos dados através de estatística paramétrica.

De acordo com a Figura 5, observa-se que foi encontrada variação na composição química nas diferentes idades apenas para extrativos totais para idade de 19 anos e teor de cinzas para 14 anos.

Os teores de extrativos totais variaram de 3,77% a 5,62%, Andrade (2006), para a mesma espécie encontrou valores de 2,15%/ 8anos, 2,37%/14 anos e 2,40%/20 anos. O valor do teor de extrativos para 14 anos (3,77%) foi próximo ao valor encontrado por Klock (2000) onde em seu estudo para *Pinus taeda* com 11 anos encontrou 3,03%, e Rigatto et al. (2004) encontrou teores de 3,00% para extrativos com a mesma espécie de 12 anos.

Os resultados observados para extrativos totais em todas as idades estão dentro do confirmado por Klock et al.

(2005) que citam que para madeiras de coníferas esse teor geralmente varia de 5,00 a 8,00%.

Para o processo de celulose, Barbosa et al. (2005), afirma que altos teores de extrativos são indesejáveis pois geram incrustações (“pitch”), que podem se depositar na polpa nos equipamentos industriais, em feltros e em telas, resultando em perda de produção, devido a maior quantidade de paradas e manutenção dos equipamentos, sem mencionar em manchas nos papeis produzidos.

O teor de lignina insolúvel para idade de 14 anos (32,80%) foi semelhante ao encontrado por Bassa (2006) que obteve 31% /14 anos. No entanto Andrade (2006) observou 27%/14 anos, Rigatto et al. (2004) 29,%/12 anos. O mesmo ocorreu na idade de 19 que foi superior à encontrada por Andrade (2006) 26,55% /20 anos, e Vivian et al. (2015), com 26,18%/ 21 anos.

Para holocelulose os valores encontrados foram de 62,88%, 66,17% e 64,60% para 14,16 e 19 anos respectivamente. O valor médio obtido para 14 anos (62,88%) foi inferior ao encontrado por Rigatto et al. (2004) com 67,21%/12 anos, Klock (2000), com 68%/11 anos e Andrade (2006), com 71,81%/14 anos.

Ainda para holocelulose, o valor observado para 19 anos foi inferior ao apresentado por Andrade (2006) com 72,73%/20 anos, Vivian et al. (2015) com 70,65%/21 anos.

Os valores de lignina e holocelulose foram inversamente proporcionais ao aumento da idade das árvores, onde, segundo Moore; Effland (1974) há trabalhos que demonstram essas variações, onde o teor de holocelulose aumenta e o teor de lignina diminui ao longo do tempo isto pode ser devido ao aumento da idade das árvores seus traqueóides passam a ser compostos por uma maior quantidade de holocelulose e menor quantidade de lignina.

Desta maneira, para a produção de celulose e papel é desejável madeiras com menores teores de lignina e maior teor

de holocelulose, já que nos processos de polpação se almeja a redução da lignina.

Para o teor de cinzas na idade de 14 anos foi encontrada diferença significativa sobre as demais, com 0,55% de cinzas. As idades de 16 e 19 anos não apresentaram diferença estatística entre si. O valor médio de cinzas para 19 anos (0,33%) foi semelhante ao obtido por Andrade (2006) para a mesma idade com (0,27%).

Andrade (2005) relatou que a variação da quantidade do teor de cinzas em seu estudo pode estar associada com a atividade fisiológica das árvores, visto que as árvores que apresentam idade menor, pelo intenso desenvolvimento podem apresentar maior quantidade de substâncias minerais consideradas essenciais para o desenvolvimento fisiológico da árvore (carbonatos, fosfatos, silicatos e sulfatos de potássio, cálcio e magnésio), quando comparadas às árvores com idades superiores que se encontram num ritmo de desenvolvimento menor e estável.

Os valores obtidos ao ataque de hidróxido de sódio variaram de 12, 24%, 11,11% e 11,04% para as idades de 14, 16 e 19 respectivamente, estes valores não apresentaram uma diferença significativa. Estes valores são próximos ao valor médio encontrado por Brand; Muniz (2012) em biomassa de *Pinus taeda* que obtiveram valores médios de 14,24%. Os valores foram baixos, permitindo afirmar que a madeira de *Pinus taeda* para todas as idades apresenta uma baixa susceptibilidade à remoção de carboidratos de baixa massa molecular (hemicelulose e celulose degradada) para produção de celulose.

De modo geral, não foram observadas diferenças significativas entre as idades estudadas (exceto para extrativos totais em 19 anos e teor de cinzas na idade de 14 anos), ou seja, de acordo com as análises químicas realizadas, as madeiras de *Pinus taeda* não diferem entre si, não havendo influência dos

compostos químicos no processo de polpação, permitindo o uso de madeiras nestas idades.

### 3.3 Morfologia dos traqueóides

As análises das características anatômicas dos traqueóides são de extrema importância já que influenciam diretamente na qualidade da polpa e as características do papel (ANDRADE, 2006).

Os valores médios das análises das características anatômicas realizadas no estudo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Morfologia dos traqueóides das madeiras de *Pinus taeda* em diferentes idades.

| Parâmetros                            | 14 anos            | 16 anos            | 19 anos             |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Largura ( $\mu\text{m}$ )             | 46,25 <sup>a</sup> | 41,35 <sup>b</sup> | 39,12 <sup>c</sup>  |
| Comprimento (mm)                      | 3,40 <sup>c</sup>  | 3,71 <sup>b</sup>  | 3,99 <sup>a</sup>   |
| Diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ )    | 31,41 <sup>a</sup> | 29,19 <sup>b</sup> | 26,03 <sup>c</sup>  |
| Espessura da parede ( $\mu\text{m}$ ) | 7,42 <sup>a</sup>  | 6,54 <sup>b</sup>  | 6,08 <sup>c</sup>   |
| Índice de Runkel (IR)                 | 0,52 <sup>b</sup>  | 0,47 <sup>b</sup>  | 0,63 <sup>a</sup>   |
| Fração da parede (FP)                 | 32,73 <sup>b</sup> | 29,98 <sup>a</sup> | 35,12 <sup>b</sup>  |
| Coeficiente de flexibilidade (CF)     | 67,27 <sup>b</sup> | 70,02 <sup>a</sup> | 64,88 <sup>b</sup>  |
| Índice de enfieltramento (IE)         | 75,70 <sup>c</sup> | 93,44 <sup>b</sup> | 108,97 <sup>a</sup> |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras na mesma linha não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 95% de confiança

Nota-se que a idade exerceu influência em todas as variáveis analisadas, onde para largura entre as três idades houve diferença significativa, sendo que os valores médios encontrados foram de 46,25, 41,35 e 39,12  $\mu\text{m}$  para 14, 16 e 19 respectivamente (Tabela 5).

Os valores observados para largura foram superiores aos encontrados por Andrade (2006) para a mesma espécie, onde constatou 38,61  $\mu\text{m}$ /8 anos e 36,60  $\mu\text{m}$ / 20 anos. O

mesmo autor obteve a tendência de diminuição da largura ao longo da idade, como o ocorrido nas idades em estudo. Para idade de 19 anos o valor encontrado de 39,12  $\mu\text{m}$  foi semelhante ao observado por Vivian et al. (2015) para a mesma espécie 40,55  $\mu\text{m}$ /21 anos.

Para o comprimento dos traqueóides as três idades apresentaram diferença significativas entre si, onde a madeira de 19 anos apresentou valor superior às demais idades com 3,99mm. Esse valor foi superior ao encontrado por Vivian et al. (2015) com 3,50mm/21 anos, assim como o obtido por Castelo et al. (2008) com 3,03 mm/18 anos.

O aumento do comprimento médio dos traqueóides em função do aumento da idade e a tendência inversa da largura média dos traqueóides em relação ao comprimento também foram constatados por Andrade (2006).

A dimensão dos traqueóides segundo Shimoyama; Barrichelo (1991) é de extrema importância na polpa celulósica, já que de maneira geral, quanto maior o comprimento do traqueóide maior será a resistência do papel.

Esse comportamento do aumento do comprimento em função da idade foi verificado também por Panshin; Zeeuw (1980) onde os comprimentos dos traqueóides possuíam tendência de aumento em função do aumento da idade das árvores.

O aumento do comprimento dos traqueóides em relação à idade é explicado pela existência de uma maior proporção de lenho tardio à medida que ocorre o desenvolvimento das árvores onde o lenho tardio apresenta traqueóides de maiores comprimentos e menores diâmetros quando comparados ao lenho inicial (HASSEGAWA, 2003).

Pode-se também observar a diferença significativa dos diâmetros do lume, onde a idade de 14 anos obteve maiores diâmetros (31,41 $\mu\text{m}$ ) quando comparado com as idades de 16 e 19 anos (29,19 e 26,03  $\mu\text{m}$  respectivamente). Estes valores foram inferiores ao encontrado por Castelo et al. (2008) com



35,11  $\mu\text{m}$ /18 anos, já o valor observado por Vivian et al. (2015) foi próximo do encontrado, com 27,73/21 anos.

Para espessura da parede, assim como as outras variáveis também apresentou diferença entre as idades, com 7,42; 6,54 e 6,08  $\mu\text{m}$ , para 14, 16 e 19 anos respectivamente. O valor para a idade de 19 anos foi semelhante ao valor obtido por Vivian et al. (2015) com 6,41  $\mu\text{m}$ /21 anos. Porém os valores encontrados por Castelo et al. (2008) foram inferiores (9,33  $\mu\text{m}$ ).

Para o índice de Runkel, os obtidos valores diferenciaram estatisticamente entre si nas idades estudadas. O maior valor observado foi para idade de 19 anos, com 0,63; este valor foi superior ao obtido por Vivian et al. (2015) com 0,46%. Já os valores médios encontrados por Klock (2000) para o lenho inicial (0,329) e lenho tardio (0,769) de *Pinus taeda* aos 11 anos de idade, considerando a média dos lenhos, mostram-se superiores aos desta pesquisa.

Hassegawa (2003) observou variação inferior à encontrada no estudo para o Índice de Runkel, com 0,26 a 0,32 no lenho inicial e 1,37 a 1,64 no lenho tardio, de *Pinus taeda* com 25.

Para o processo de produção de papel, o Índice de Runkel avalia o grau de colapso dos traqueóides; quanto mais baixo for o índice de Runkel, maior será o grau de colapso dos traqueóides, proporcionando maior superfície de contato, com isso, estabelece um maior número de ligações entre eles, o que resulta em um papel com maior resistência à tração e ao estouro (VASCONCELOS, 2005).

Os valores obtidos para este índice foram abaixo de 2, onde para Rocha; Potiguara (2007) a qualidade da fibra com índice até 0,25 é considerada como excelente para papel; de 0,25 a 0,50 é muito boa; de 0,50 a 1,00 é boa; de 1,00 a 2,00 regular, e acima de 2,0 não deve ser usada para papel. Ainda Menegazzo (2012), relata que inúmeras pesquisas mostraram que este índice possui o mesmo tipo de relação com a

qualidade da polpa que a espessura da parede celular e a fração parede.

A variável fração de parede é a relação que deve ser avaliada de forma inversa ao coeficiente de flexibilidade. Sendo esperados valores inferiores a 40%, para que as fibras não sejam extremamente rígidas (NIGOSKI et al., 2011).

Os valores obtidos para a fração de parede foram abaixo do esperado (40%), e entre as idades estudadas apresentaram diferenças significativas, com valores próximos ao encontrado em *P. taeda* 33,29%/18 anos (Castelo et al., 2008), 32%/21 anos (Vivian et al., 2015). De acordo com Watson; Dadswell (1961) quanto menor for a Fração Parede, maior será o esticamento, a resistência ao estouro e à tração do papel, uma vez que as fibras são mais flexíveis e se interligam com facilidade.

Shimoyama; Wiecheteck (1993) descrevem que os traqueóides com alta fração parede tendem a ser mais rígidos, apresentando menor grau de colapso no processo de formação do papel, podendo prejudicar as ligações interfibras, ocasionando, assim, a diminuição das resistências à tração e estouro, aumentando a resistência ao rasgo e os valores de volume específico aparente.

O coeficiente de flexibilidade (CF) relaciona o diâmetro do lume e a largura da fibra, quanto maior seu valor, mais flexível será a fibra, ocorrendo maiores possibilidades de ligações entre as mesmas, o que aumentaria as resistências à tração e ao estouro (SHIMOYAMA; WIECHETECK, 1993). Assim obteve-se valores com diferença significativa entre as idades em estudo, porém os valores médios para esta variável foram superiores para idade 16 (70,02%), e as idades 14 e 19 anos não apresentaram diferença entre si. Estes valores estão próximos aos observados por Castelo et al. (2008) com 66,71%/18 anos, Vivian et al. (2015) com 68%/21 anos e Shimoyama ; Wiecheteck (1993), encontraram valores médios de 64%.

Os valores obtidos para o Índice de enfeitramento apresentaram diferenças significativas e foram de 75,70; 93,44 e 108,97 para 14, 16 e 19 anos respectivamente. Vivian et al. (2015) apresentaram valor inferior para este índice com 86/21 anos, Hassegawa (2003) em árvores com 25 anos observou variação de 71,3 a 76,2 no lenho inicial e 91,4 a 92,9 no lenho tardio.

Segundo os autores Mogollón; Aguilera (2002), quanto maior o índice de enfeitramento, maior será a resistência ao rasgo do papel. Assim a idade de 19 anos apresentou melhor valor quando comparado com as demais idades.

Dueñas (1997) afirma que as coníferas apresentam geralmente valores próximos ou superiores a 100 neste índice, resultado do maior comprimento das fibras, 2 a 5 mm, o que denota sua qualidade para a produção de papel.

Nigoski et al. (2011) relatam que para a produção de papeis de boa qualidade é necessário valor de índice de enfeitramento superiores à 50, o que foi encontrado para todas as idades estudadas.

#### 4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a idade exerce influência sobre a qualidade da madeira onde:

A densidade decresceu em relação a posição do tronco (base-topo) para todas as idades estudadas.

A idade de 19 anos apresentou a densidade média de 402,9Kg/m<sup>3</sup>, sendo a mais próxima da desejada para produção de celulose e papel.

A composição química não variou entre as idades estudadas.

Para as características anatômicas comprimento e índice de enfeitramento, a idade 19 anos apresentou melhores valores, importantes para propriedade rasgo do papel, e a idade de 16 anos apresentou melhores valores para fração parede e

coeficiente de flexibilidade importantes para as propriedades de tração e estouro .

De forma geral, as idades de 16 e 19 anos apresentam melhor qualidade da madeira para a produção de celulose e papel.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: **Madeira: Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p

ALMEIDA, J. M.; SILVA. D. J. Inclusão de um novo e importante parâmetro potencial de seleção de eucalipto para produção de polpa Kraft. **IUFRO**, v. 3, p. 69, 1997.

ANDRADE, A.S. **Qualidade Da Madeira, Celulose e Papel em *Pinus taeda* L.: Influência da Idade e Classe de Produtividade**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14577: pasta celulósica e madeira – determinação do material solúvel em água**. Rio de Janeiro: ABNT; 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853: Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano**. Rio de Janeiro, 2002.

BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; CRUZ, M. P. Composição química de extrativos lipofílicos e polares de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Ciência & Engenharia**. Viçosa, v. 15, n. 2, p. 13-20, 2005.

BARRICHELO, L. E. G.; KAGEYAMA, P. Y.; SPELTZ, R. M.; BONISH, H. S.; BRITO, J. O.; FERREIRA, M. Estudos de procedências de *Pinus taeda* visando aproveitamento industrial. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 1-14, 1977.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. A utilização da madeira na produção de celulose. **Circular Técnica IPEF**. Piracicaba. n.86. 12p. 1979.

BASSA, A. G. M. C. **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BITTENCOURT, E. **Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel**. Dissertação em Engenharia Florestal do Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Dados do Setor. Disponível em: [http://www.bracelpa.org.br/prog\\_investimento/Prog0312.pdf](http://www.bracelpa.org.br/prog_investimento/Prog0312.pdf)> . Acesso em: 06 abril. 2014.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita e da estocagem na composição química da biomassa florestal. **Floresta e Ambiente** [online]. v.19, p.66-78, 2012.

CASTELO, P. A. R.; MATOS, J. L. M.; DEDECEK, R. A.; LAVORANT, O. J.; Influência de diferentes sítios de crescimento sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda*. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 38, n. 3, jul./set. 2008.

DEMUNER, W. P. **Predição do impacto da madeira em fábrica Kraft de eucalipto**. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. 2011.

DIAS, R. L.V.; CLÁUDIO, JR. E. Pulp and paper properties as influence by wood density - same species and age of *Eucalyptus*. In: **INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE**, Kailua Kona, Hawaii, 1991.

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.

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

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry: Ultrastructure: Reactions**. Berlin. Walter de Gruyter. 1989.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: **45a Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria**. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000.

GOMIDE, L.J.; COLODETTE, J.L; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.129-137, 2005.

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

IAWA - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY. List of microscopic features for wood identification. **IAWA Bulletin**, Oakland, v. 10, n. 3, p. 226-332, 1989.

IPT. **Celulose e papel**. São Paulo: IPT, tecnologia de fabricação de papel. 402. 1982. v. 2

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

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

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da Madeira**. 3ª Edição revisada. Curitiba, 2005.

MENEGAZZO, M.L. **Características morfológicas de celuloses branqueadas de *Pinus* e *Eucalyptus* em analisador óptico automático de fibras**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP. Botucatu 2012.

MIMMS, A. **Kraft pulping, a compilation of notes**. Atlanta. TAPPI PRESS. ed.2,181p. 1993.

MOGOLLÓN, G.; AGUILERA, A. **Guía teórica y práctica de morfología de la fibra**. Mérida: Universidad de Los Andes, 2002.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L. **A importância relativa da densidade da madeira e do teor de Carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto** Relative

importance of wood density and carbohydrate content on pulping Yield and product quality *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413, jul.-set., 2008.

MOORE, W.E.; EFFLAND, M. Chemical composition of fast-growth juvenile wood and slow-growth mature sycamore and cottonwood. **TAPPI**. Atlanta. 57(8), p.96-8.1974.

NIGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda*** L. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York. Mc Graw Hill. ed.4, 722p. 1980.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.267-273, 2004.

ROCHA, C. B. R.; POTIGUARA R. C. V. Morfometria das fibras das folhas de *Astrocaryum murumuru* var. *murumuru* Mart. (ARECACEAE). **Acta Amaz.**, 2007.

SANSÍGOLO, C. A.; BARREIROS, R. M. Estudo comparativo das madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus oocarpa* para produção de celulose Kraft. **In: III Congresso Iberoamericano en Celulosa y Papel**, Cordoba-Espanha, 2004.

SHIMOYAMA, V.R.S **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus*** Piracicaba, ESAL. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade de São Paulo, 1990.



SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Influências de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica de madeira de *Eucalyptus*. IN: Congresso anual de celulose e papel, 24., 1991. SÃO PAULO. **Anais**. São paulo: ABTCP, 1991.

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

TAPPI. T 222 om-02. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. 2002.

TAPPI. T 413 om-93. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 900°C. 1993, 4 p.  
TSOUMIS, G. **Science and technology of wood structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991.

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

WHER, T. R. ; BARRICHELO , L.E.G. Cozimentos Kraft com madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos . **O Papel**. V.54, n 5, 1993.

VASCONCELOS, F. S. R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de *Pinus taeda***. 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

VIVIAN, M.A.; SEGURA, T.E.S; JUNIOR, E.A.B; SARTO, C.; SCHIMIDT, F.; JUNIOR, F.G.S; GABOV, K; FARDIM,

P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica Kraft. **Scientia Forestalis**, volume 43, n. março de 2015.

### **CAPÍTULO 3: QUALIDADE DA POLPA E DO PAPEL EM *Pinus taeda*: INFLUÊNCIA DA IDADE E NÚMERO KAPPA**

#### **RESUMO**

O aumento da demanda da produção de papel e a procura pela melhoria do processo de polpação, leva à necessidade de estudos dos fatores que influenciam toda a produção. Desse modo essa pesquisa objetivou fornecer parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel com base na idade, e diferentes números Kappa para a produção de papel para sacos industriais. Para isso foram realizados cozimentos utilizando madeiras de *Pinus taeda* com diferentes idades (14,16 e 19 anos) e também diferentes receitas, alterando o fator Kappa com 40, 50 e 60. Foram avaliadas propriedades do cozimento (rendimentos, rejeito, número Kappa, viscosidade), as características anatômicas das fibras (comprimento, *Coarseness*, largura, Curl e Kink) e as propriedades do papel (gramatura, espessura, densidade, índice de tração, índice de arrebentamento, alongamento, TEA, índice de rasgo e resistência ao ar). Com base nos resultados obtidos, para os rendimentos não houve diferenças significativa entre as idades da madeira de *P. taeda*, estes valores diferenciaram estatisticamente para os Kappa aplicados no cozimento, já a viscosidade variou de 24,72 a 33,11 mPas e o teor de rejeitos de 0,07% a 0,57%, ambos apresentaram diferenças entre as idades e número Kappa. Para morfologia da fibra todas as propriedades estudadas apresentaram diferenças significativas para as variáveis aplicadas, para as características físicas e de resistência do papel houve influência da idade da madeira e do tipo de cozimento aplicado. Desta maneira, pode-se concluir que a idade e os Kappa aplicados condicionaram e exerceram grande influência sobre a qualidade da polpa e as propriedades da celulose e do papel.

**Palavras-chave:** *Pinus taeda*, polpação Kraft, fibra, propriedades do papel.

## ABSTRACT

The increased demand of paper production and the seeking for the improvement of the pulping process, leads to the need for studies of the factors that influence the entire production. Thus this research aimed to provide optimisation parameters in the pulp and paper manufacturing process based on age, and different Kappa numbers. Thereunto cookings were performed using *Pinus taeda* wood of different ages (14, 16 and 19) and also different recipes by changing the Kappa factor with 40, 50 and 60. Cooking properties were evaluated (yields, waste, Kappa number, viscosity), the anatomical characteristics of the fibers (length, *Coarseness*, width, Curl and Kink) and the paper properties (weight, thickness, density, tensile index, burst index, stretching, TEA, tear index, air resistance). Based on the results obtained, there was no significant differences between the ages of *P. taeda* wood, these values differed statistically for Kappa applied in the cooking process, since the viscosity varied from 24,72 to 33,11mPas and the waste content from 0,07% to 0,57%, both showed differences between ages and Kappa number. For the fiber morphology all the properties studied showed significant differences for the variables applied, there was influence of the wood age and the type of the cooking applied for the physical characteristics and the paper strength. Thus, the age and the Kappa numbers applied conditioned and exerted a wide influence on the quality of the pulp and the properties of the pulp and paper.

**Keywords:** *Pinus taeda*, Kraft pulping, fiber, paper properties

## 1 INTRODUÇÃO

Devido a constante expansão do setor papelero verifica-se o aumento da produção de pastas de alto rendimento e celulose Kraft de fibras longas. Portanto, é essencial o estudo de novas matérias-primas para o fornecimento de fibras longas de qualidade e o suprimento da necessidade industrial a um ritmo cada vez mais imponente (KLOCK et al., 2004).

O processo Kraft é o mais difundido mundialmente, pelas características da boa qualidade das fibras obtidas, por sua versatilidade em termos de matéria-prima e principalmente pela possibilidade de recuperação dos reagentes utilizados. Porém, sua principal desvantagem é o baixo rendimento obtido durante o processo, resultado da solubilização de grande parte da lignina, das hemiceluloses e parte da celulose (FRINHANI; DALTOÉ, 2012).

Muitos estudos tem sido desenvolvidos para aumentar o rendimento do processo Kraft, por exemplo, a manutenção de maiores teores de lignina residual, ou seja, obtenção de celulose com um número Kappa mais elevado (MOCELIN, 2005; FRINHANI; DALTOÉ, 2012).

Portanto, o número Kappa é uma variável que já é pré-estabelecida na polpação, a qual exerce influência sobre rendimento do processo e propriedades da polpa celulósica. No entanto, as características da matéria-prima madeira como teor de lignina, teor de extrativos, densidade básica e a espessura dos cavacos, influenciam diretamente o parâmetro Kappa da polpa (ALMEIDA, 2003).

Desse modo, a variável idade da madeira, e número Kappa podem influenciar diretamente não só em termos de rendimento, mas também na morfologia da polpa produzida e consequentemente do produto final. Assim, dependendo da idade da madeira e do número Kappa utilizado pode agredir mais ou menos a fibra resultando em papéis de baixa qualidade.

Além disso, o estudo das variáveis morfológicas da fibra da celulose é essencial, podendo ser realizados por métodos manuais ou 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. Atualmente, o comprimento da fibra é facilmente determinado em curto espaço de tempo utilizando modernos analisadores de imagens (YALIN; HANNU MAKKONEN, 2007).

Dentre essas variáveis morfológicas que são analisadas nas indústrias após o processo de polpação, estão comprimento da fibra, largura e espessura da parede, *Coarseness*, curvatura das fibras (Curl), quebra das fibras (Kink), teor de finos dentre outros.

No processo Kraft o comprimento da fibra após polpação pode ou não ser preservado. Pode-se ainda observar diferentes valores das fibras quando medidos nas pastas e na madeira, provavelmente porque após esta operação as fibras são mais flexíveis (PAAVILAINEN, 1993; TREPANIER, 1998).

Uma variável para medir a qualidade da fibra após polpação e formação do papel é a *Coarseness*, que altera várias propriedades de estrutura como resistência e óptica do papel (MENEGAZZO, 2012).

Kerekes; Schell (1995) descrevem que esta variável exerce sua influência na uniformidade da folha através do número de contatos por fibras e mobilidade das fibras durante a formação.

Assim, todas as características da fibra interferem na formação do papel, e também em suas propriedades como resistência, porosidade, opacidade, aspereza, dentre outros (D'ALMEIDA, 1988).

Para saber a qualidade do produto final e da polpa, um indicativo é obtido através da caracterização das propriedades

do papel com diversos testes (SMOOK, 1989).

Assim, as empresas realizam testes nos papéis produzidos frequentemente para controle de qualidade, onde pode-se através deles condicionar o processo de polpação alterando suas variáveis.

Os testes do papel podem ser de natureza física (gramatura, densidade e umidade), mecânica (resistência à tração, ao arrebentamento, ao rasgo, rigidez, absorção de energia de tensão (TEA), óptica (alvura, opacidade, brilho e cor), química (pH), elétrica (rigidez dielétrica, condutividade), propriedades superficiais (lisura), permeabilidade a fluidos (resistência à passagem do ar), dentre outros (SMOOK, 1989; SANJUAN, 1997).

Dentre os tipos de papeis produzidos o *Sack-Kraft* é um dos principais materiais para utilização em embalagens em todo mundo. Com o desenvolvimento e concorrência de outros materiais para embalagens, tais como sacos plásticos, os produtores de papel para sacaria estão continuamente sob pressão para melhorar a qualidade do produto (LAN et al., 2011).

O *Sack-Kraft* é um papel que necessita de altas resistências já que é usado para finalidade de sacaria, ou seja, necessita resistir esforços internos (pressão interna dos produtos) e externos (umidade, pressão atmosférica, resistências mecânicas, dentre outros).

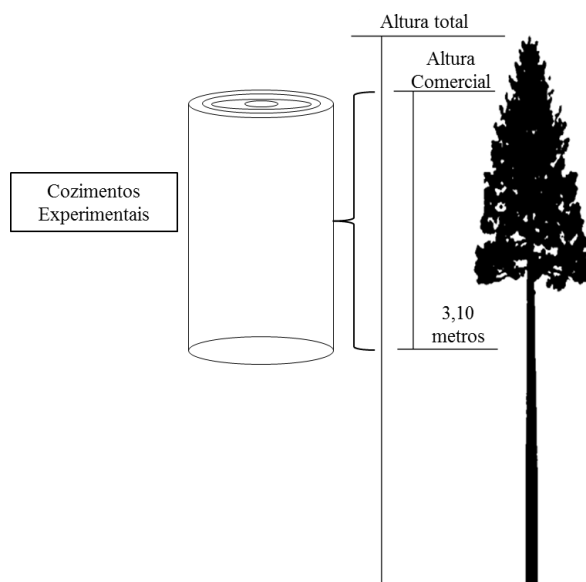
Diante da importância da influência da idade da madeira e das condições de cozimento que exercem sobre a qualidade da polpa e do papel para sacaria, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da polpa Kraft e do papel produzido com diferentes idades e números Kappa no processo de polpação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção e caracterização da polpa celulósica

Foram coletadas árvores provenientes de plantios da empresa Klabin S.A. localizadas no Município de Otacílio Costa, Santa Catarina, com idade de 14, 16 e 19 anos. Para cada idade estudada foram coletadas 9 árvores, totalizando vinte e sete árvores amostradas. A madeira para o cozimento foi obtida a partir de 3,10 metros do fuste (Figura 6), convencionalmente adotado pela empresa.

Figura 6- Esquema ilustrativo do procedimento de coleta para cozimento

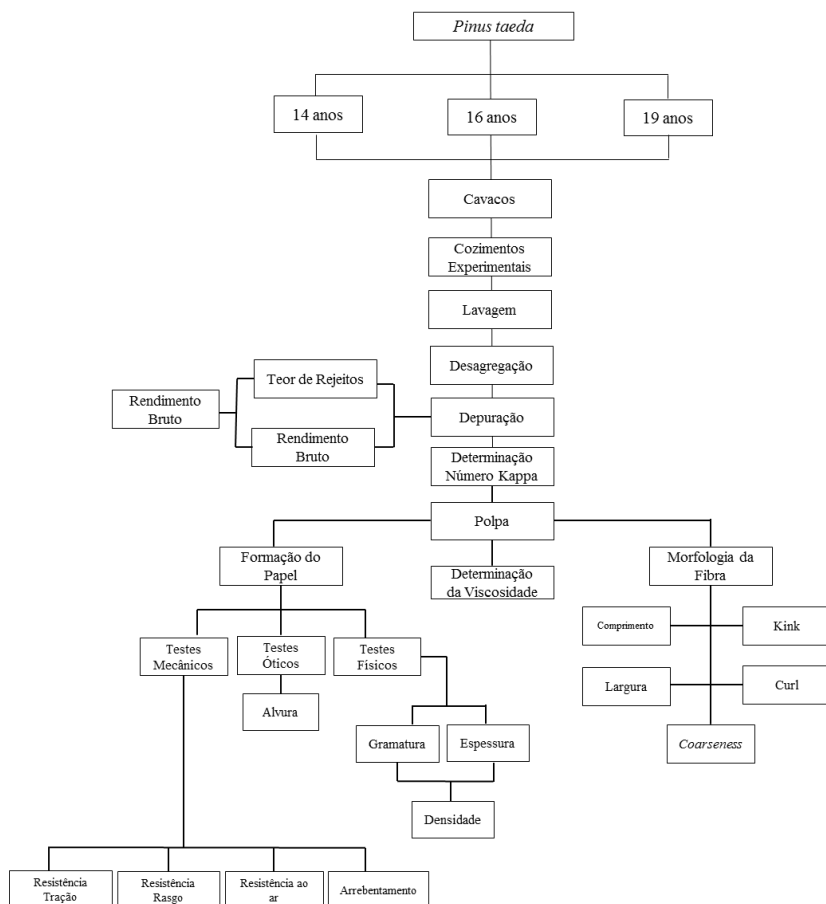


Fonte: Produção do próprio autor, 2015.



Todos os procedimentos foram realizados no laboratório da empresa Klabin na unidade de Correia Pinto. A Figura 7 demonstra o organograma das análises realizadas.

Figura 7- Esquema dos procedimentos, análises e testes



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Para os cozimentos experimentais utilizou-se um digestor rotativo de aço inoxidável, aquecido eletricamente e

dotado de controle de tempo e temperatura automática.

As condições gerais de cozimento foram estabelecidas mediante as condições próximas das utilizadas industrialmente pela empresa, mas com a finalidade de alterar significativamente a qualidade da polpa. Foram realizados 3 tipos de cozimentos para cada idade, alterando as relações de número Kappa com valores de 40, 50 e 60 em triplicata. As condições experimentais dos cozimentos (Processo Kraft) para o estudo são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6- Parâmetros de controle nos cozimentos Experimentais

| Parâmetros de controle                  |         | Condição |         |  |
|---|---------|----------|---------|--|
| Idade da Madeira*                       |         | 14/16/19 |         |  |
| Número Kappa (objetivo)                 | 40      | 50       | 60      |  |
| Quantidade de cavacos – (base seca (g)) | 500     | 500      | 500     |  |
| Álcali Ativo                            | 23,0 %  | 21,7%    | 20,3%   |  |
| Relação licor-madeira                   | 4/1     | 4 /1     | 4 /1    |  |
| Temperatura máxima                      | 170°C   | 170°C    | 170°C   |  |
| Tempo de impregnação                    | 50 min  | 50 min   | 50 min  |  |
| Tempo de cozimento                      | 79 min  | 79 min   | 79 min  |  |
| Tempo total do cozimento                | 129 min | 129 min  | 129 min |  |
| Fator H                                 | 1380    | 1380     | 1380    |  |
| Repetições                              | 3       | 3        | 3       |  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

\* Os cozimentos foram realizados para todas as idades estudadas (14, 16 e 19 anos)

Após cada cozimento, a polpa celulósica obtida foi desagregada em refinador e lavada em baixa consistência até remoção completa do licor negro residual. A polpa celulósica foi depurada, visando a separação por meio físico, do rejeito, sendo em seguida centrifugada e condicionada em sacos plásticos para avaliação posterior. A Figura 8 ilustra a vista

parcial dos equipamentos utilizados para obtenção da polpa celulósica.

Figura 8-Vista parcial do digestor (A), depurador (B) e refinador (C) utilizados para obtenção da polpa celulósica



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

### 2.1.1 Rendimento bruto, rendimento depurado e teor de rejeitos

Após a depuração foi determinada a quantidade de celulose absolutamente seca produzida. A relação percentual entre a massa da celulose absolutamente seca produzida e a massa da madeira absolutamente seca fornece o rendimento bruto. O rejeito é separado no processo de depuração. O

rendimento depurado foi obtido pela diferença entre o rendimento bruto e o teor de rejeitos

### 2.1.2 Número Kappa

O método utilizado para avaliar o número Kappa foi o da Norma TAPPI T 236 om-85. O procedimento de determinação do Kappa corresponde ao processo de oxidação da lignina residual contida na polpa celulósica com permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) em solução acidificada ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

### 2.1.3 Viscosidade

A viscosidade da polpa foi determinada conforme a norma TAPPI T 230 om-94.

A determinação da viscosidade foi realizada através de viscosímetro capilar. Essa análise permitiu avaliar o grau médio de polimerização das cadeias de celulose; desta forma a propriedade que está relacionada com o tamanho e a configuração das moléculas permitiram de maneira sensível, detectar a degradação da celulose resultante dos processos de polpação.

## 2.2 Morfologia da Fibra

As morfologias de fibras das amostras de celulose foram efetuadas em equipamento Metso Fiber Image Analyzer FS5. Neste equipamento foram determinados comprimento da fibra, largura da fibra, índice de curvatura da fibra (Curl), índice de torção da fibra (Kink) e *Coarseness* das fibras. A Figura 9 mostra um analisador óptico automático Metso Fiber Image Analyzer FS5, e a imagem da fibra mensurada.

Figura 9 - Analisador óptico automático Metso Fiber Image Analyzer FS5 (A), e a imagem da fibra (B)



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

### 2.3 Produção e caracterização do papel

Foi utilizado um formador tipo Rapid-Köethen (Norma ISO 5269/2) para a confecção das folhas de papel. Para cada tratamento foram formadas 10 folhas, conforme as condições descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação dos parâmetros de controle utilizados na confecção das folhas de papel.

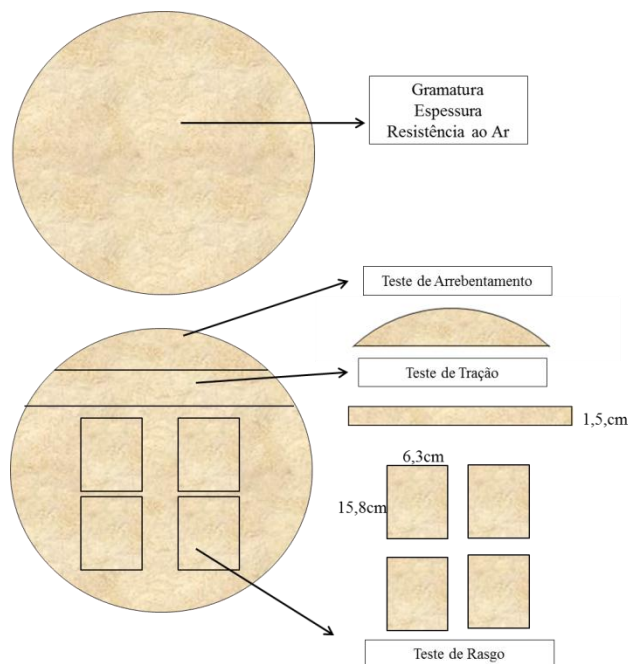
| Parâmetros de controle                 | Condição |
|--|----------|
| Gramatura objetiva (g/m <sup>3</sup> ) | 80       |
| Temperatura de secagem (°C)            | 90       |
| Pressão Aplicada (mmHg)                | 650      |
| Umidade Final (%)                      | 7,0      |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

As folhas de papel confeccionadas foram depositadas em ambiente climatizado, a uma temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\% \pm 2\%$  de umidade relativa (Norma T402 – om 94). Após

entrarem em equilíbrio com o ambiente, as folhas foram destinadas à realização de testes físicos e mecânicos. Os corpos de prova foram confeccionados seguindo o esquema da Figura 10.

Figura 10- Esquema dos corpos de prova para ensaios do papel



Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Os procedimentos realizados para a avaliação das características físicas, de resistência e óticas do papel estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8- Relação dos procedimentos utilizados na avaliação das características físicas, de resistência e óticas do papel e equipamentos utilizados.

| <b>Procedimentos</b>               | <b>Norma</b> | <b>Equipamento</b>        |
|------------------------------------|--------------|---------------------------|
| Gramatura (g/m <sup>2</sup> ).     | T410 – om 88 | Balança analítica         |
| Espessura (µm)                     | T411 – om 88 | Micrometer L&W            |
| Densidade (kg/cm <sup>3</sup> )    | T220 – om 88 | Balança analítica         |
| Resistência a Tração (kN/m)        | T494 – om 94 | Tensile Tester L&W        |
| Resistência a Arrebentamento (kPa) | T807 – om 94 | Bursting Strength Tester  |
| Resistência ao Rasgo (mN)          | T414 – om 88 | Pêndulo Elmendorf L&W     |
| Resistência ao Ar                  | ABTCP        | L&W Air Permanence Tester |
| Alvura                             | ISO          | Elrepho L&W               |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

\* Procedimentos da Technical Association of Pulp and Paper Industry

## 2.4 Análise Estatística

Após ser comprovada a existência de normalidade das variâncias por meio do teste de Kolmogorov- Smirnov, os valores observados neste estudo foram submetidos à análise de variância fatorial (ANOVA).

Sendo caracterizada ou não a influência da idade ou Kappa, efetuou-se o teste de comparação de médias por Scott-Knott a 95% de confiabilidade, por meio do programa SISVAR® (FERREIRA, 2011).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Propriedades da polpa celulósica

Os valores médios de rendimento bruto e depurado das polpas celulósicas avaliadas, no estudo, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Resultados de rendimento bruto e depurado do processo de polpação Kraft da madeira de *Pinus taeda*

| Idade               | Kappa   |       |          |       |         |       |
|---------------------|---------|-------|----------|-------|---------|-------|
|                     | 40      |       | 50       |       | 60      |       |
|                     | Média   | CV(%) | Média    | CV(%) | Média   | CV(%) |
| Rendimento Bruto    |         |       |          |       |         |       |
| 14                  | 46,62Ab | 2,50  | 48,70 Aa | 1,47  | 48,59Aa | 5,60  |
| 16                  | 46,55Ab | 0,65  | 47,48 Ab | 0,63  | 49,52Aa | 0,91  |
| 19                  | 46,78Ab | 0,77  | 48,74 Aa | 0,22  | 49,49Aa | 0,68  |
| Rendimento Depurado |         |       |          |       |         |       |
| 14                  | 46,48Aa | 2,44  | 48,30Aa  | 1,32  | 48,02Aa | 5,73  |
| 16                  | 46,50Ab | 0,68  | 47,31Ab  | 0,73  | 49,02Aa | 0,85  |
| 19                  | 46,70Ab | 0,78  | 48,56Aa  | 0,23  | 49,13Aa | 0,70  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação

Os valores médios para rendimento bruto variaram de 46,55 a 49,52%, não apresentando diferença significativa entre idades (coluna).

Com relação ao fator Kappa (linha), houve diferenças significativas para rendimento bruto em todas as idades. Para 14 e 19 anos, quando aplicado os Kappa (K) 50 e 60 obteve-se superior ao K 40. Para 16 anos o valor do rendimento no Kappa 60 foi superior aos demais com 49,52%.

Os valores para rendimento depurado variaram de 46,48 a 49,13%, quando analisado a idade, não houve influência e o fator Kappa influenciou de forma significativa, exceto para a idade de 14 anos.

Para 16 anos o K 60 obteve rendimento depurado superior aos demais com 49,02%, e na idade de 19 os valores dos Kappa 50 e 60 foram superiores ao 40.



Os resultados encontrados para rendimento bruto e depurado nesse trabalho foram similares aos encontrado por diversos autores, estudando *Pinus taeda*, de acordo com tabela 10.

Tabela 10- Resultados encontrados para rendimento bruto e depurado para *Pinus taeda* para diversos autores

| Autor                | Idade | Rendimento |           |              |
|----------------------|-------|------------|-----------|--------------|
|                      |       | Kappa      | Bruto (%) | Depurado (%) |
| Vivian et al. (2015) | 21    | 38,1       | 51,60     | 51,5         |
|                      |       | 58,6       | -         | 52,2         |
| Rigatto et al (2004) | 12    | 30,85      | 50,97     | -            |
|                      |       | -          | -         | 50,59        |
| Klock et al. (2004)  | 11    | 32,56      | 45,76     | -            |
| Bittencourt (2004)   | 14    | 49         | 49,80     | -            |
| Nigoski (2005)       | 16    | -          | 55,99     | -            |
| Miranda (2001)       | -     | 40         | -         | 50           |

Os valores encontrados para rendimento ficaram dentro do confirmado por Smook (1994) onde na produção de celulose Kraft para coníferas, dependendo das condições, variam entre 40 e 50%.

A diferença significativa dos valores de rendimentos entre números Kappa deve-se ao grau de agressão das fibras na polpa celulósica, ou seja, é aplicado um álcali ativo mais alto para que se obtenha polpa com menor quantidade de lignina residual, resultando em menores rendimentos.

Na Tabela 11, são apresentados os valores médios para teor de rejeito de acordo com os números Kappa e idades.

Os valores, de maneira geral, para teor de rejeitos variaram entre as idades e número K de 0,05% a 0,57%. As médias do teor de rejeito diferem significativamente entre idades, exceto para o K 40.

Tabela 11- Resultados do teor de rejeitos do processo de polpação Kraft da madeira de *Pinus taeda*

| Teor de Rejeitos (%) |        |       |        |       |        |       |
|----------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Idade                | Kappa  |       |        |       |        |       |
|                      | 40     |       | 50     |       | 60     |       |
|                      | Média  | CV(%) | Média  | CV(%) | Média  | CV(%) |
| 14                   | 0,13Aa | 38,49 | 0,40Bb | 26,29 | 0,57Bc | 7,01  |
| 16                   | 0,05Aa | 40,00 | 0,16Ab | 32,48 | 0,50Bc | 11,13 |
| 19                   | 0,07Aa | 7,53  | 0,18Ab | 41,30 | 0,35Ac | 11,33 |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação

No K 50, o valor do teor de rejeitos da idade 14 foi superior às demais idades com 0,40%. No K 60, a idade de 19 anos obteve a média inferior às demais idades com 0,35% de rejeitos.

Desse modo, para os K 50 e 60 o teor de rejeitos reduziu em relação ao aumento das idades estudadas, diferentemente do encontrado por Bittencourt (2004), Andrade (2005) e Mocelin (2005), porém as condições de cozimentos aplicados nos estudos dos autores foram diferentes.

Quando analisado o fator Kappa, houve diferença significativa do teor de rejeitos em todas as idades e ocorreu aumento do teor de rejeitos em relação ao aumento do número K.

O K 40 apresentou para as idades 14,16 e 19, valores inferiores (0,13, 0,05 e 0,07% respectivamente) aos demais. Bittencourt (2004) encontrou teor de rejeito de 2,1% (K=45,40/10 anos) e Mocelin (2005) com 0,73% (K=40,25).

Foi possível verificar a redução do número Kappa sendo esta acompanhada pela redução do teor de rejeitos. Bonfanti Junior, (2014) explica que no processo de polpação Kraft, o número Kappa está relacionado diretamente com a

intensidade de deslignificação, com a carga alcalina aplicada, com o rendimento do processo e com a geração de rejeitos.

Considerando-se exclusivamente o rendimento, o aumento do número Kappa é desejável por determinados fatores (Bonfanti Junior, 2014), no entanto, Hart (2011), descreve que a geração de rejeitos é um fator limitante para a elevação do número Kappa, ou seja, com altos valores de número Kappa, a fibra é menos agredida gerando maiores quantidades de rejeito.

Porém quando há a redução do número Kappa ocorre a quebra de boa parte da fibra, sendo perdida durante os processos de lavagem e depuração. A fibra perdida durante esses processos chega até a estação de tratamento de efluentes sendo um problema de muitas empresas, já que prejudica em termos de rendimento e também dificulta o tratamento dos efluentes gerados.

Para a viscosidade da polpa, são apresentados os valores médios na Tabela 12.

Tabela 12- Resultados da viscosidade da polpa no processo de polpação Kraft da madeira de *Pinus taeda*

| Idade | Viscosidade (mPas) |       |         |       |         |       |
|-------|--------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
|       | Kappa              |       |         |       |         |       |
|       | 40                 |       | 50      |       | 60      |       |
|       | Média              | CV(%) | Média   | CV(%) | Média   | CV(%) |
| 14    | 24,72Bb            | 24,96 | 31,93Aa | 3,51  | 29,41Aa | 3,83  |
| 16    | 28,29Ab            | 14,74 | 33,11Aa | 10,63 | 31,34Aa | 9,86  |
| 19    | 28,33Aa            | 8,30  | 32,44Aa | 4,37  | 31,00Aa | 8,95  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação

As médias da viscosidade da polpa de *Pinus taeda* para as idades e número Kappa variaram de 24,72 a 33,11 mPas.

A influência da idade sobre a viscosidade foi observada

apenas para o K 40, onde o valor foi inferior na idade de 14 anos, com 24,72 mPas. Andrade (2005), observou média de 35,87 mPas (K= 90/14 anos) de viscosidade para *Pinus taeda*.

Nota-se na Tabela 12 que o Kappa influenciou na viscosidade. Nas idades de 14 e 16 anos, a viscosidade da polpa no K 40 apresentou menor valor médio. Para 19 anos não foram encontradas diferenças significativas.

Para a obtenção do número Kappa desejado, deve-se alterar a quantidade de reagentes do cozimento, desse modo Mocelin (2005) afirma que o sulfeto de sódio é adicionado no processo Kraft com finalidades de proteger os carboidratos, com isso o aumento da sulfidez faz com que se incremente a viscosidade da polpa, por proteger melhor as fibras, assim maiores resultados de viscosidade são importantes, pois está diretamente ligada nas propriedades de resistência do papel.

### 3.2 Morfologia da fibra

A morfologia das fibras nas polpas nas diferentes idades e números Kappa, foi analisada quanto ao comprimento, largura, *Coarseness*, índice de curvatura (Curl) e índice de torção (Kink).

A Tabela 13 apresenta a morfologia da fibra da polpa de *Pinus taeda*, para as idades analisadas e os números Kappa aplicados no cozimento.

A análise de variância mostrou efeito significativo, para todas as variáveis analisadas. Os valores de comprimento variaram de 1,72 a 2,55 mm.

Analisando os resultados do K 40 observa-se que entre todas as idades do estudo houve variação significativa, com maior comprimento para 16 anos (2,38mm). O comprimento para a idade 16 também obteve maior média para os K 50 e 60 com 2,55 e 2,36mm respectivamente, as idades 16 e 19 anos foram superiores a 14 anos no K 60. Bassa (2006) obteve

resultado de comprimento de *Pinus taeda* de 1,975mm (8 anos).

Tabela 13- Morfologia da fibra da fibra de *Pinus taeda* em três diferentes idades e nos três números Kappa

| Idade                          | Kappa     |       |            |       |           |       |
|--------------------------------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
|                                | 40        |       | 50         |       | 60        |       |
|                                | Média     | CV(%) | Média      | CV(%) | Média     | CV(%) |
| Comprimento (mm)               |           |       |            |       |           |       |
| 14                             | 1,72Cb    | 6,74  | 1,78Cb     | 4,96  | 1,99Ba    | 3,88  |
| 16                             | 2,38Ab    | 3,2   | 2,55Aa     | 10,13 | 2,36Ab    | 9,57  |
| 19                             | 2,06Bb    | 1,68  | 1,94Bb     | 3,7   | 2,30Aa    | 3,93  |
| Largura (µm)                   |           |       |            |       |           |       |
| 14                             | 24,18Aa   | 0,98  | 24,97Aa    | 2,58  | 26,34Aa   | 1,14  |
| 16                             | 25,42Aa   | 3,92  | 26,58Aa    | 1,14  | 26,91Aa   | 2,06  |
| 19                             | 25,75 Aa  | 1,03  | 25,92Aa    | 1,6   | 23,79Aa   | 1,99  |
| Coarseness (mg/100m)           |           |       |            |       |           |       |
| 14                             | 1,85Bc    | 2,28  | 1,99Cb     | 6,9   | 2,22Ba    | 2,66  |
| 16                             | 2,16Ab    | 2,17  | 2,28Aa     | 2,32  | 2,32Aa    | 4,48  |
| 19                             | 2,14Ab    | 1,83  | 2,12Bb     | 3,54  | 2,30Aa    | 4,06  |
| Índice de Curvatura Curl (%)   |           |       |            |       |           |       |
| 14                             | 17,97Ac   | 13,92 | 12,36Ab    | 8,04  | 9,67Aa    | 14,61 |
| 16                             | 26,49Bc   | 11,86 | 23,25Cb    | 15,74 | 14,47Ba   | 11,08 |
| 19                             | 24,81Bb   | 4,97  | 16,40Ba    | 14,27 | 17,71Ca   | 11,17 |
| Índice de Torções (Kink) (1/m) |           |       |            |       |           |       |
| 14                             | 1407,11Ac | 9,64  | 1037,28Ab  | 5,31  | 829,20Aa  | 4,79  |
| 16                             | 1330,25Ac | 12    | 1228,36 Bb | 7,64  | 874,40Aa  | 16,83 |
| 19                             | 1503,86Bc | 2,36  | 1224,57 Bb | 8,31  | 1107,04Ba | 5,67  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação.

Para comprimento as médias obtidas quando analisado o fator Kappa, dentro da idade foram diferentes, sendo que a maior média para 14 anos foi para o K 60 com 1,99mm, os demais não apresentaram diferença.

Na idade 16, o K 50 (2,55mm) apresentou maior média para comprimento, já a idade 19 o K e 60 obteve maior média.

Segundo Braaten; Molteberg (2004) e Levlin; Söderhjem (1999) as dimensões das fibras são diferentes quando determinadas na madeira e nas fibras da polpa, os autores afirmam que o menor comprimento da fibra na polpa é devido a uma série de fatores como o processo da redução da madeira a cavacos.

Também Trepanier (1998) relata que o comprimento e a forma da fibra se alteram durante a polpação e Robertson et al. (1999) afirma que também esse comprimento é alterado já que na madeira, as fibras são retas e a medição só é efetuada nas fibras inteiras.

Os resultados obtidos para a largura da polpa de *Pinus taeda*, onde a análise de variância mostrou que não ocorreu efeito significativo para idade e número Kappa sobre a largura da fibra. A variação dos valores para largura foi de 23,79 a 26,91  $\mu\text{m}$ . O valor para largura encontrado por Bassa (2006) foi de 32,00  $\mu\text{m}$  para a mesma espécie com 8 anos, foi próximo dos encontrados no estudo.

Para a *Coarseness* ocorreu efeito significativo entre as idades estudadas e entre os números Kappa, de forma geral os valores variaram de 1,85 a 2,32 mg/100m para a fibra de *Pinus taeda*.

Para o K 40, o menor valor de *Coarseness* foi para a idade 14 com 1,85mg/100m, sendo que as demais não apresentaram diferenças entre si. Os valores médios para o K 50 foram diferentes, sendo que a idade de 16 anos obteve maior valor com 2,28 mg/100m. Já para o K 60 o valor não diferiu entre as idades 16 e 19 com 2,32 e 2,30 mg/100m respectivamente.

Os diferentes Kappa aplicados no cozimento também influenciaram no *Coarseness*, para as idades 14 e 19 o maior valor foi para o K 60 com 2,22 e com 2,30 mg/100m respectivamente.

Para a idade 16 o maior valor de *Coarseness* também foi referente ao K 60 com 2,32 mg/100m, não diferindo do 50 (2,28mg/100m).

Observa-se que os maiores valores de comprimento encontrados para as idades, tem maior valor de *Coarseness*, isto deve-se ao fato que esta propriedade depende da densidade da madeira, já observada em trabalho realizado por Mokfienski et al. (2008).

Ainda, Santos; Sansigolo (2007) descrevem que madeiras de baixas densidades apresentam fibras com menor espessura, geram polpas com menores massas por comprimento de fibras (*Coarseness* baixo).

Carpim et al. (1987), descrevem que a *Coarseness* das fibras além de depender da densidade da madeira, também depende do teor de carboidratos das polpas celulósicas. Foelkel (2009), afirma que valores altos de *Coarseness* (fibras pesadas) causa valor alto de rasgo, baixa opacidade, alta rapidez para absorver água e ligação interfibras prejudicada. Entretanto, o baixo valor de *Coarseness* (fibras leves) implica em alta colapsabilidade, alta retenção de água e drenagem lenta.

Os valores médios para Curl variaram de 9,67 a 26,49%. A análise de variância mostrou que houve influência da idade e do número Kappa em relação a esta propriedade.

Quando analisado a influência da idade observa-se que para os K 40, 50 e 60 o menor valor de Curl foi para 14 anos, com 17,97, 12,36 e 9,67% respectivamente.

Menegazzo (2012) encontrou para polpas branqueadas de *Pinus* Curl de 11,70%

Levlin; Söderhjelm (1999) e Trepanier, (1988) afirmam que o Curl tem influência no comprimento da fibra e na qualidade e desempenho do produto final. O que pode ser

verificado no estudo, onde as madeiras com maiores comprimentos obtiveram maiores índices de curvatura.

Durante o processamento das toras a cavacos pode ocorrer o corte das fibras se não for efetuada de forma correta como também podem apresentar Curl e Kink.

Para a influência do número Kappa, na idade 14 a média que obteve menor valor foi para 60 com 9,67%, Houve aumento do Curl à medida que foi reduzindo o número Kappa.

Esse aumento foi observado também nas demais idades, onde para 16 anos ocorreu diferença significativa entre os três Kappa, sendo a menor média para o 60, com 14,47%. Na idade 19 os Kappa 60 e 50 não apresentaram diferença entre si, com menores médias.

O fator idade influenciou de forma crescente em função do Curl enquanto o Kappa influenciou de forma decrescente.

Os valores para Kink variaram de 829 1/m a 1503,86 1/m. Entre as idades houve diferença significativa para todos os Kappa aplicados, pode-se observar no K 40 que o maior índice de torção foi para a idade 19 com 1503,86 1/m, assim como para o K 60 onde 19 anos apresentou um índice de 1107,041/m. Para o K 50 as piores médias para o índice foi 16 anos (1228,36 1/m) e 19 anos (1224,57 1/m), que não diferenciaram estatisticamente.

Quando analisado o fator Kappa o menor índice para todas as idades foi o K 60. Ocorreu redução dos valores de Kink à medida que aumentou os números Kappa.

### 3.3 Propriedades do papel

#### 3.3.1 Propriedades físicas do papel

As propriedades físicas das folhas de papel confeccionadas apresentaram comportamentos descritos na Tabela 14.



Tabela 14- Propriedades físicas do papel em diferentes idades e número Kappa

| Idade                          | Kappa    |       |          |       |          |       |
|--------------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
|                                | 40       |       | 50       |       | 60       |       |
|                                | Média    | CV(%) | Média    | CV(%) | Média    | CV(%) |
| Gramatura (g/m <sup>2</sup> )  |          |       |          |       |          |       |
| 14                             | 82,84Aa  | 2,83  | 81,14Aa  | 3,27  | 82,20Aa  | 1,83  |
| 16                             | 81,50Aa  | 1,84  | 82,33Aa  | 2,14  | 81,51Aa  | 1,71  |
| 19                             | 82,62Aa  | 2,21  | 83,90Aa  | 2,01  | 80,62Aa  | 3,16  |
| Espessura (µm)                 |          |       |          |       |          |       |
| 14                             | 181,87Ba | 5,28  | 181,67Ca | 4,9   | 174,13Cb | 4,85  |
| 16                             | 193,33Ab | 4,16  | 196,07Bb | 2,96  | 206,47Aa | 3,35  |
| 19                             | 187,27Ab | 4,56  | 204,53Aa | 7,91  | 192,53Bb | 5,19  |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |          |       |          |       |          |       |
| 14                             | 0,45Ab   | 5,26  | 0,44Ab   | 4,77  | 0,47Aa   | 3,07  |
| 16                             | 0,42Ba   | 3,84  | 0,42Ba   | 2,84  | 0,39Cb   | 4,12  |
| 19                             | 0,44Aa   | 7,00  | 0,41Bb   | 6,33  | 0,42Bb   | 6,33  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação

A gramatura objetivada no estudo era de 80 g/cm<sup>2</sup>, contudo observa-se na Tabela 14 que a gramatura variou de maneira geral de 80,62 a 83,90 g/cm<sup>2</sup>, não apresentando diferenças significativas entre idades e Kappa.

Bittencourt (2004) afirma que a gramatura é passível de comparação na forma de índices, como arrebetamento, tração e rasgo. Devido a esse fato, tais propriedades são as mais utilizadas para caracterizar materiais testados laboratorialmente.

A espessura variou de modo geral de 174,13 a 206,47µm. Houve influência significativa da idade e do Kappa sobre essa propriedade.

Para o K 40 as idades que obtiveram maiores espessuras foram 16 e 19 anos com 193,33 e 187,27 $\mu$ m respectivamente. Para o K 50 as idades apresentaram diferença entre si, onde a maior espessura foi na idade 19 com 204,53 $\mu$ m, a maior média para o K 60, foi 16 anos com 206,74  $\mu$ m.

Nigoski (2005) obteve espessura de 113, 47 $\mu$ m (11 anos) e 180,77 $\mu$ m (16 anos) ambos para fibras refinadas. Andrade (2005) encontrou 280,89 $\mu$ m (14 anos) e 307,83 $\mu$ m (20 anos).

Houve de maneira geral o aumento da espessura em função do aumento da idade, mesmo que a gramatura foi estabelecida. Andrade (2005) observou esse comportamento em seu estudo e afirmou que ocorre em função das diferenças existentes entre as dimensões dos traqueóides que formaram as folhas de papel, quando considerado as mesmas condições de formação.

Hassegawa (2003) também observou este comportamento, as folhas de mesma gramatura formadas por polpas celulósicas provenientes de tratamentos compostos por maior proporção de lenho inicial, se apresentavam mais finas quando comparadas com as folhas mais espessas formadas por tratamentos que continham maior proporção de lenho tardio.

A influência da espessura em função do Kappa apresentou diferença nas idades, não ocorrendo aumento da espessura em função do Kappa aplicado. Para idade 14 a menor espessura foi para o K 60 com 174,13 $\mu$ m, na idade 16 a menor média de espessura foi para os K 40 e 50 com 193,33 $\mu$ m e 196,07 $\mu$ m respectivamente, e 19 anos, os Kappa 60 e 40 apresentaram menores resultados.

Houve influência da idade e do número Kappa sobre a densidade das folhas formadas com madeira de *Pinus taeda*. A densidade variou de 0,39 g/cm<sup>3</sup> a 0,47 g/cm<sup>3</sup>.

A idade 16 para o K 40 apresentou o menor valor da densidade com 0,42g/cm<sup>3</sup>. A idade 14 apresentou maior média para os K 50 e 60.

Nigoski (2005) encontrou valores próximos aos observados no estudo de 0,46 g/cm<sup>3</sup> (14 anos) e 0,44 g/cm<sup>3</sup> (16 anos), ambas em polpa refinada. Andrade, (2006) obteve 0,719g/cm<sup>3</sup> (K=90/14 anos) e 0,65g/cm<sup>3</sup> (K=90/ 20 anos), Klock et al. (2004), observou uma média de 0,39 g/cm<sup>3</sup> (11 anos), para polpa sem refinação.

### 3.3.2 Propriedades de resistência do papel

Os dados obtidos para resistência do papel nas diferentes idades e números Kappa aplicados estão descritos na Tabela 15.

As idades 14 e 19 no K 40 apresentaram maiores valores no índice de tração, no K 50 a maior média foi obtida para a idade 14 com 32,77 N.m/g e no K 60 o mesmo ocorreu com 38,64 N.m/g.

Os valores encontrados para o índice de tração foram inferiores aos observados por Bittencourt (2004) que obteve valores variando entre 47,1 e 46,3 N.m/g para *Pinus taeda* com idade entre 10 e 20 anos, Nigoski (2005) com médias entre 57,49 e 95,04 N.m/g com idades de 10 a 17 anos, Bassa (2006) para *Pinus taeda* com 8 anos obteve índice de tração de 53,1 N.m/g, todos para polpas refinadas.

Já os resultados foram acima do encontrado por Bugajer; Kuan (1980) em papeis produzidos com *Pinus taeda* sem refinação, com valor médio de 18,7 N.m/g.

Os baixos valores do índice de tração quando comparados aos valores obtidos por outros autores pode ser explicado por Bittencourt (2004), que afirma que os índices de tração podem ser alterados devido ao processo de refinação, onde o emprego de maiores energias de refinação leva a um aumento de resistência, pois aumenta o número de ligações entre as fibras.

Tabela 15- Propriedades de resistência do papel em diferentes idades e número Kappa

| Idade   | Kappa    |       |          |       |         |       |
|---|----------|-------|----------|-------|---------|-------|
|   | 40       |       | 50       |       | 60      |       |
|   | Média    | CV(%) | Média    | CV(%) | Média   | CV(%) |
| Índice de Tração (N.m/g)                        |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 28,07Ac  | 10,56 | 32,77Ab  | 7,98  | 38,64Aa | 8,63  |
| 16  | 23,97Bb  | 15,30 | 25,60Bb  | 22,79 | 30,30Ca | 9,07  |
| 19  | 27,04Ab  | 4,12  | 27,21Bb  | 11,34 | 35,33Ba | 9,24  |
| Alongamento (%)                                 |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 1,20Ac   | 17,98 | 1,40Ab   | 16,99 | 1,57Aa  | 11,01 |
| 16  | 1,20Aa   | 27,59 | 1,26Aa   | 31,90 | 1,19Ba  | 9,53  |
| 19  | 1,31Aa   | 16,85 | 1,11Ba   | 12,92 | 1,26Ba  | 13,05 |
| T.E.A (J/m <sup>2</sup> )                       |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 19,18Ac  | 30,13 | 26,54Ab  | 21,49 | 34,92Aa | 18,74 |
| 16  | 15,53Bb  | 25,70 | 19,53Ba  | 19,78 | 19,15Ca | 14,84 |
| 19  | 21,61Aa  | 21,09 | 17,03Bb  | 26,47 | 13,80Bb | 17,88 |
| Índice de Arrebetamento (kPa.m <sup>2</sup> /g) |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 1,37Ac   | 10,97 | 1,94Ab   | 5,86  | 2,30Aa  | 5,31  |
| 16  | 1,46Aa   | 17,23 | 1,40Aa   | 14,38 | 1,48Ca  | 15,26 |
| 19  | 1,51Ab   | 19,58 | 1,39Bb   | 8,166 | 1,85Ba  | 6,37  |
| Índice de Rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g).         |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 13,10 Bb | 18,61 | 15,25 Aa | 14,46 | 16,38Aa | 11,52 |
| 16  | 17,41Aa  | 13,64 | 16,06Aa  | 16,00 | 17,55Aa | 13,21 |
| 19  | 16,60Aa  | 8,37  | 16,97Aa  | 16,17 | 17,91Aa | 12,09 |
| Resistência ao Ar (s/100ml)                     |          |       |          |       |         |       |
| 14  | 1,52Ab   | 7,13  | 1,61Aa   | 5,41  | 1,54Ab  | 8,10  |
| 16  | 1,36Ba   | 0,00  | 1,36Ba   | 0,00  | 1,36Ba  | 0,00  |
| 19  | 1,38Aa   | 2,89  | 1,36Ba   | 0,00  | 1,36Ba  | 4,29  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%) = Coeficiente de Variação

De uma maneira geral o índice de tração foi influenciado de forma negativa com o aumento da idade, variando de maneira um pouco irregular entre as idades, essa

redução do índice de tração foi observada por Bittencourt (2004) e Andrade (2005).

Dueñas (1996) afirma que isso ocorre, pois, os traqueóides do lenho tardio apresentam paredes mais grossas e mais rígidas, assim consequentemente resistem ao colapso e acarretam numa menor área de contato entre os traqueóides, desta forma, tendem a formar folhas com baixos índices de tração e arrebentamento e maiores índices de rasgo.

Entre os números Kappa houve diferença significativa para todas as idades, onde o K 60 apresentou maior índice de tração para todas as idades analisadas.

As médias para a propriedade de alongamento do papel variaram de 1,11% a 1,57%. Houve variação significativa dessa propriedade.

A influência da idade para alongamento foi significativa para os K 50 e 60. As idades que apresentaram maiores médias foram 14 e 16 anos para o K 50, para K 60 a idade 14 também obteve maior média para alongamento do papel com 1,57 diferindo das demais idades.

Bittencourt (2004) observou este comportamento para a mesma espécie, e explicou que a quantidade maior de madeira adulta confere ao papel uma característica mais elástica, deformando mais quando o papel está sujeito a uma carga semelhante.

Para a influência do Kappa apenas a idade 14 apresentou diferença significativa, sendo que o K 60 obteve maior resultado de alongamento com 1,57%

As médias para TEA variaram de modo geral de 13,80 a 34,92 J/m<sup>2</sup>, essa propriedade sofreu influência significativa para idade e número Kappa.

Para o K 40, os valores de TEA para 14 e 19 anos não se diferenciaram estatisticamente (19,18 e 21,61 J/m<sup>2</sup> respectivamente) e foram as maiores médias. Para o K 50 a maior média foi para idade 14 com 26m54 J/m<sup>2</sup>. As médias obtidas para o K 60 diferenciaram entre as idades, sendo a

média de 34,92 J/m<sup>2</sup> maior para 14 anos.

Para a influência do Kappa na idade 14, todos os valores apresentaram diferenças significativo sendo o valor de TEA maior para o K 60 com 34,92 J/m<sup>2</sup>. Na idade 16 as maiores médias foram para os Kappa 50 e 60, com 19,53 e 19,15 J/m<sup>2</sup> respectivamente. Para 19 anos o K40 apresentou maior média com 21,61 J/m<sup>2</sup>.

Shallorn; Gurnagul (2010) descrevem que para o papel *Sack-Kraft* as propriedades de grande importância são as forças que incluem: índice de tração, índice TEA, índice de estouro, índice de rasgo e permeabilidade ao ar. Desse modo ainda as duas propriedades cruciais para a resistência do *Sack-Kraft* são a resistência à tração e índice TEA, que influenciam diretamente na durabilidade do papel durante o enchimento e processo de manipulação.

Os valores para índice de arrebentamento variaram de 1,37 a 2,30 kPa.m<sup>2</sup>/g.

Para o K 40, não houve influência da idade, já para os demais observa-se diferenças significativas no índice de arrebentamento. As médias da idade 14 e 16 foram as mais altas para o K 50, com 1,94 e 1,40 kPa.m<sup>2</sup>/g respectivamente, para 60, todas as idades estudadas diferenciaram entre si, sendo o índice superior para a idade 14 (2,30 kPa.m<sup>2</sup>/g).

Os valores foram inferiores aos encontrados por Bittencourt (2004) com 3,6 kPa.m<sup>2</sup>/g (14 anos), 3,2 kPa.m<sup>2</sup>/g (16 anos), Andrade (2005) com 6,56 kPa.m<sup>2</sup>/g (14 anos) e 5,90 kPa.m<sup>2</sup>/g (20 anos) e Nigoski com 4,77 kPa.m<sup>2</sup>/g (14 anos), 4,72 kPa.m<sup>2</sup>/g (16 anos), todos para polpa refinada.

Os resultados do índice de arrebentamento foram próximos ao encontrado por Klock et al. (2004) para polpa não refinada com 2,14 kPa.m<sup>2</sup>/g (11 anos) e Bugajer; Kuan (1980) também para *Pinus taeda* com 1,02 kPa.m<sup>2</sup>/g.

Para os Kappa aplicados, na idade 14 houve diferença, sendo que o K 60 apresentou maior valor para o índice de arrebentamento com 2,30 kPa.m<sup>2</sup>/g. A idade 16 não apresentou

diferença entre os Kappa, para a idade 19 o K 60 apresentou maior valor com 1,85 kPa.m<sup>2</sup>/g.

Os valores para índice de rasgo variaram de 13,10 a 17,91 mN.m<sup>2</sup>/g, houve influência para idade somente para o K 40, onde a menor média para o índice de rasgo foi para a idade 14 com 13,10 mN.m<sup>2</sup>/g.

Os valores foram próximos aos encontrados por Andrade (2005) que variou de 15,27 mN.m<sup>2</sup>/g a 20,71 mN.m<sup>2</sup>/g para 8 e 20 anos, Bassa (2006) em *Pinus taeda* com 13,9 mN.m<sup>2</sup>/g (8 anos), Bugajer; Kuan, (1980) com 14,771 mN.m<sup>2</sup>/g e foram inferiores aos encontrados por Klock et al. (2004) que encontrou 23,9671 mN.m<sup>2</sup>/g (11 anos) para a mesma espécie.

Para influência do Kappa, apenas a idade 14 apresentou diferença significativa entre as variáveis aplicadas no cozimento, as maiores médias obtidas foram para os K 60 com 16,38 mN.m<sup>2</sup>/g e 50 com 15,25 mN.m<sup>2</sup>/g de índice de rasgo.

Os valores de resistência ao ar variaram de 1,36 a 1,61 s/100ml. Houve diferença significativa entre idades e entre números Kappa.

Para a influência da idade, no K 40 as idades 14 e 19 apresentaram maior valor de resistência ao ar com 1,52 e 1,38 s/100 ml respectivamente, para o K 50 a idade 14 apresentou maior média com 1,61 s/100 ml, o mesmo ocorreu para 60, com 1,54 s/100 ml. Os valores foram abaixo do encontrado por Bugajer; Kuan (1980) com 2,00 s/100 ml.

De modo, houve uma redução da resistência do ar em função do aumento da idade. Bittencourt (2004) afirmou que essa redução é devido a maior facilidade de colapso das fibras de madeira juvenil, tornando a constituição da folha de papel mais coesa, e havendo assim menores espaços abertos entre as fibras componentes da folha.

Em relação à influência do Kappa, na idade 14 o Kappa 50 apresentou maior resistência ao ar com 1,61 s/100 ml. Nas idades 16 e 19 não houve influência do Kappa, sendo que ambas as idades apresentavam 1,36 s/100 ml para 40,50 e 60.

### 3.3.3 Propriedade ótica do papel

Os resultados para a propriedade ótica alvura estão descritos na Tabela 16 a seguir:

Tabela 16- Alvura em papel de diferentes idades e número Kappa

| Idade | Alvura (%) |       |         |       |         |       |
|-------|------------|-------|---------|-------|---------|-------|
|       | Kappa      |       |         |       |         |       |
|       | 40         |       | 50      |       | 60      |       |
|       | Média      | CV(%) | Média   | CV(%) | Média   | CV(%) |
| 14    | 25,30Ca    | 2,21  | 23,36Cb | 1,75  | 22,43Cc | 1,46  |
| 16    | 26,64Ba    | 1,81  | 25,40Bb | 2,13  | 23,57Bc | 2,58  |
| 19    | 27,26Aa    | 2,15  | 25,87Ab | 1,97  | 24,08Ac | 3,09  |

Fonte: Produção do próprio autor, 2015.

Nota: As médias na vertical seguidas por uma mesma letra maiúscula e na horizontal, por uma mesma letra minúscula, não diferem estatisticamente (Scott-Knott  $p > 0,05$ ). CV (%)= Coeficiente de Variação

Os resultados para alvura variaram de 22,43 a 26,64%. Houve influência das variáveis idades e Kappa para essa propriedade.

Para influência da idade, no K 40 a idade que obteve maior resultado de alvura foi a 19 com 27,26% o mesmo ocorreu no K 50 e 60 com 27,85 e 24,08% respectivamente.

Para a influência do número Kappa, o K 40 para todas as idades apresentou maior alvura.

Houve uma redução da alvura com o aumento do número Kappa, esse comportamento é esperado, e também foi confirmado por Sanjuan (1997), pois polpas com coloração mais escura são resultantes de maiores Kappa.



## 4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a idade e os Kappa exercem influência sobre a qualidade da polpa e do papel onde:

A idade da madeira de *Pinus taeda* influenciou na viscosidade da polpa, no teor de rejeitos, nas características morfológicas da fibra celulósica (exceto largura) e nas propriedades do papel (exceto gramatura), porém essa variável não afetou os rendimentos dos cozimentos.

Os números Kappa influenciaram de modo geral em todas as propriedades estudadas, exceto largura e gramatura.

Para o rendimento bruto e depurado o Kappa 60 obteve melhor resultado para todas as idades.

O Kappa 60 e a idade 14 apresentaram melhores resultados para as características morfológicas Curl e Kink, e para os testes de resistência do papel: índice de tração, alongamento e TEA.

Desta forma, as informações geradas no estudo poderão servir de base para um melhor planejamento futuro em empresas produtoras de polpa celulósica e papel.

## REFERÊNCIAS

**ALMEIDA, F. S. Influência da carga alcalina no processo de polpação lo-solids para madeiras de eucalipto.**

Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003.

**BASSA, A.G.M.C. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus***

*taeda para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®* Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba 2006.

BITTENCOURT, E. **Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2004.

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.

BUGAJER, S.; KUAN, G.S.S. Comportamento de misturas de pastas celulósicas de eucalipto e pinho na fabricação de papel. In: Congresso anual da associação brasileira de celulose e papel, 1980, São Paulo. **Anais** .São Paulo: ABCP, 1980.

CARPIM, M; BARRICHELLO, L. E. E.; CLAUDIODA-SILVA JUNIO, E.; DIAS, R. L. V. As influências do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel. In: **Congresso anual da ABTCP**, 20, 1987, São Paulo, Anais... São Paulo: ABCTP. 1987.

D’ALMEIDA, M. L. O. Celulose e papel: tecnologia de fabricação de pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: **IPT-SENAI**, 1988.

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

FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, nov./dez. 2011.

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

FRINHANI, E. M. D., DALTOÉ, R. Comparação das propriedades físico-mecânicas de polpas celulósicas Kappa 45 e Kappa 100 destinada à fabricação de papéis para embalagens rígidas. *Unesc & Ciência*, Chapecó – **ACET**, v. 3, n. 1, p. 65-74, 2012.

HART, P. Production of high yield bleached hardwood kraft pulp: Breaking the kraft pulp yield barrier. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 10, n. 9, p. 37 - 41, 2011.

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

BONFANTTI JUNIOR, E.A.B. **Deslignificação com oxigênio para polpa kraft com alto número Kappa**. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Piracicaba, 2014.

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., DE ANDRADE, A. S., BITTENCOURT, E., MOCELIN, E. Z., & CREPALDI, C Propriedades do papel

Kraft a partir da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H.E. Moore e *Pinus taeda* L. **Revista Floresta** 34 (1), p. 33-44, Curitiba –Pr Jan/Abr 2004 .

LAN, J.; MA, L.; LI, Z.; WANG, F.; LIU, B. The Study on Refining of Masson's Pine Kraft Pulps for Sack Paper. **Advanced Materials Research**, vols 236-238, p.1297-1300 2011.

LEVLIN, J.E.; SÖDERHJELM, L. Pulp and paper testing. Papermarking science and technology series. V.17 Atlanta : **Tappi Press** 1999.

MENEGAZZO, M.L. **Características morfológicas de celulosas branqueadas de *Pinus* e *Eucalyptus* em analisador óptico automático de fibras**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para a obtenção do título de mestre em Ciências Florestais. Botucatu, 2012.

MIRANDA, C. R. et al. Estratégia para aumento de rendimento na produção de polpa Kraft de *Pinus* sp. – polpação e deslignificação com oxigênio. **34º Congresso anual de Celulose e Papel**, out. 2001.

MOCELIN, E.Z. **Antraquinona e Surfactante para Otimização do Processo Kraft com *Pinus spp.*** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

MOKFIENSKI, A., COLODETTE, J. L., GOMIDE, J. L., & CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da

densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, 18(3), 401-413. 2008.

NIGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

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.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft R. **Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.2, p.267-273, 2004.

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.

SANJUAN, D. R. **Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel.** Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 1997.

SANTOS, S.R.; SANSÍGOLO, C.A. A influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, p 53-63, 2007.

SHALLORN, P.; GURNAGUL, N. A Semi-empirical Model of Tensile Energy Absorption of Sack Kraft Paper.

**BioResources** p.455-476, 2010.

SHIMOYAMA, V.R.S; BARRICHELO, L.E.G. Influência das características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* . **Congresso anual ABTCP**, 24.

Anais São Paulo, ABTCP, 1991.

SMOOK, G. A. Handbook for pulp and paper technologists.

Atlanta. **TAPPI**, 1989. 419 p.

TAPPI. Test methods 1994 – 1995. TAPPI PRESS. 1994.

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

VIVIAN, M.A.; SEGURA, T.E.S; JUNIOR, E.A.B; SARTO, C.; SCHIMIDT, F.; JUNIOR, F.G.S; GABOV, K; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica Kraft. **Scientia Forestalis**, volume 43, 2015.

YALIN PR E HANNU MAKKONEN,. Precision and Accuracy Studies with Kajaani Fiber Length Analyzers.

**Journal of Applied Sciences**, 7: 1043-1047. 2007.