

EDUARDO BITTENCOURT

**PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO NO PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal do Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Umberto Klock

CURITIBA

2004

A todas as pessoas que, como eu, objetivam
melhorar a qualidade de vida do mundo,

ofereço e dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha família pelo apoio incondicional.

À Universidade Federal do Paraná pela possibilidade de realização do presente trabalho.

Ao Professor Umberto Klock pela orientação desse trabalho e ajuda nos momentos necessários.

À Empresa Klabin S.A. por ceder o material e os demais dados necessários à realização dessa pesquisa, e em especial às pessoas Carlos Mendes, Romullo L. Simão, Antonio Maurício Moreira, Hamilton Romanowski, Darlon O. de Souza, Marcelo Temps, Rudine Antes, Márcia Luzia de Souza e Reinoldo Oliveira pela flexibilidade e disponibilidade de colaboração.

A Cristiane Crepaldi e Clodoaldo Rodrigues pela preciosa ajuda de campo, assim como a prestimosa ajuda da empresa Boa Vista Serviços Rurais.

À servidora técnico-administrativa Dionéia Calixto de Souza pela mão-amiga.

Aos amigos e colegas de todos os momentos Ezequiel Z. Mocelin, Alan Sulato de Andrade, Eduardo Rodrigues, Rafael di Simone e Fernanda Zanginski.

Um agradecimento especial a Mariana Hassegawa pelo companheirismo nas diversas fases desse trabalho.

À CAPES pela viabilização do apoio financeiro, através da bolsa de mestrado, indispensável para minha sobrevivência durante essa fase.

Aos professores Roberto Tuyoshi Hosokawa, Graciela Inês Bolzon de Muniz, Julio Eduardo Arce, Márcio Pereira da Rocha, Ricardo Klitzke, Carlos Velozo Roderjan, pelas contribuições que imprimiram nesse trabalho um cunho multidisciplinar – visão tão necessária para o conhecimento integral.

E a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a conclusão dessa dissertação, meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

Eduardo Bittencourt, filho de Maria Aparecida Martins Bittencourt e Isaac Bittencourt nasceu em agosto de 1976 em Curitiba.

Concluiu seu primeiro grau no Colégio Estadual do Paraná em 1989, tendo passado pela Escola Municipal Paranaguá e Colégio Estadual 19 de Dezembro.

Fez curso técnico em Prótese Odontológica como segundo grau técnico, formado em 1993.

Iniciou sua vida florestal com o ingresso no curso de Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná no ano de 1996, concluindo o mesmo em 2001.

Iniciou o curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal pela mesma Universidade no ano de 2002.

Atualmente é professor do curso de Engenharia Industrial Madeireira na Universidade do Planalto Catarinense, em Lages, Santa Catarina, e pesquisador na mesma Universidade.

SUMÁRIO

<i>AGRADECIMENTOS</i>	<i>iii</i>
<i>BIOGRAFIA</i>	<i>iv</i>
<i>SUMÁRIO</i>	<i>v</i>
<i>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</i>	<i>vii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>viii</i>
<i>RESUMO</i>	<i>ix</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>x</i>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Parâmetros para a produção de celulose e papel	3
2.2 Massa específica como indicador da qualidade da madeira	4
2.3 Produção de celulose	7
2.4 Produção de papel	14
2.5 Consumo específico	21
2.6 Planejamento florestal	22
2.7 Crescimento de árvores	23
2.8 Custos de um povoamento florestal	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Material	25
3.2 Determinação da massa específica básica da madeira	27
3.3 Obtenção da celulose <i>kraft</i>	28
3.4 Confeção do papel e testes	29
3.5 Consumo específico	31
3.6 Crescimento das árvores	32
3.7 Evolução dos custos florestais	33

3.8 Análise estatística _____	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO _____	35
4.1 Características dendrométricas das árvores _____	35
4.2 Massa específica básica da madeira _____	38
4.3 Variáveis relacionadas à polpação _____	41
4.4 Propriedades do papel _____	43
4.5 Consumo específico _____	47
4.6 Crescimento das árvores _____	48
4.7 Evolução dos custos florestais _____	49
5 CONCLUSÕES _____	51
6 REFERÊNCIAS _____	53
<i>ANEXO 1 - Análises de variância e testes de tukey</i> _____	56

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>FIGURA 1 – Lenho de compressão em coníferas</i>	6
<i>FIGURA 2 – Curvas de temperatura e velocidade relativa da reação em função do tempo de cozimento</i>	10
<i>FIGURA 3 – Alkali efetivo e fator H requeridos para chegar a um determinado número kappa</i>	12
<i>FIGURA 4 – Representação qualitativa das propriedades do papel em função do tempo de refino</i>	15
<i>FIGURA 5 – Representação de uma folha de papel formada</i>	16
<i>FIGURA 6 – Mapa da região de coleta do material de estudo</i>	25
<i>FIGURA 7 – Esquema ilustrativo do procedimento de coleta</i>	26
<i>Gráfico 1 – Distribuição dos diâmetros médios na idade 10 anos</i>	37
<i>Gráfico 2 – Distribuição dos diâmetros médios na idade 14 anos</i>	37
<i>Gráfico 3 – Distribuição dos diâmetros médios na idade 16 anos</i>	37
<i>Gráfico 4 – Distribuição dos diâmetros médios na idade 20 anos</i>	37
<i>Gráfico 5 – Comportamento da massa específica básica ao longo do fuste em diferentes idades</i>	39
<i>Gráfico 6 – Comportamento da massa específica básica ponderada em diferentes idades (valores em kg.m^{-3})</i>	40

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Condições de cozimento</i>	28
<i>Tabela 2 – Valores médios das características das árvores em relação às idades</i>	35
<i>Tabela 3 – Comportamento médio dos diâmetros com e sem casca ao longo do fuste nas diferentes idades</i>	36
<i>Tabela 4 – Comportamento médio da massa específica básica ao longo do fuste (valores em kg.m^{-3})</i>	38
<i>Tabela 5 – Variáveis relacionadas à polpação</i>	41
<i>Tabela 7 – Drenabilidade da celulose kraft (em °SR) nas diferentes idades de estudo</i>	43
<i>Tabela 8 – Propriedades de resistência do papel nas diferentes idades de estudo</i>	44
<i>Tabela 6 – Consumo específico para as diferentes idades de estudo</i>	47
<i>Tabela 9 – Variáveis de crescimento dos povoamentos florestais nas diferentes idades de estudo</i>	48
<i>Tabela 10 – Custos relativos de um povoamento florestal</i>	49

RESUMO

A procura por otimizações em processos produtivos leva à necessidade de um conhecimento mais aprofundado dos fatores ligados à atividade produtiva. A produção de papel segue a mesma regra. Dessa forma, essa pesquisa objetivou fornecer parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel baseado na idade, através da caracterização dendrométrica das árvores; da determinação da massa específica básica em diferentes idades; da determinação do ponto de otimização da produção de celulose e papel; do ponto de otimização da produção de madeira e da elaboração de curvas de custos para produção de madeira. Como resultados dessa pesquisa obteve-se uma tendência de decréscimo dos valores médios da massa específica básica com a altura e com o aumento com a idade. Houve uma maior dificuldade de polpação da madeira com o aumento da idade e da massa específica. Das propriedades de resistência do papel, apenas o índice de rasgo apresentou tendência de acréscimo com a idade, sendo que as demais tiveram um comportamento decrescente em relação à idade. As curvas de crescimento das árvores demonstraram que o ponto de máxima produtividade volumétrica, para o material pesquisado, é atingido entre as idades de 17 e 18 anos. Se a análise for baseada na quantidade de celulose produzida, o ponto de máxima produtividade de celulose ocorre entre as idades de 18 e 19 anos. O custo total de produção da madeira apresentou diferença inferior a 4% entre as idades de 14 e 20 anos. Se o cálculo da otimização do custo da produção de celulose, em termos monetários, for baseado no custo médio, o ponto de mínimo custo encontra-se próximo aos 22 anos de idade. Dessa maneira, o administrador florestal pode definir a idade ótima de colheita do plantio florestal para produção de celulose e papel de muitas maneiras. Pode maximizar o volume de madeira, ou o volume de celulose produzida, ou ainda escolher o menor custo médio da tonelada de celulose. Porém, para um desempenho adequado do papel produzido, a evolução das características de resistência do papel devem receber grande atenção.

Palavras-chave: *Pinus taeda*, polpação *kraft*, propriedades do papel, manejo florestal.

ABSTRACT

The search for manufacturing processes optimization leads to the necessity of deeper knowledge of the factors related to those processes. Paper manufacturing technology follows the same rules. Therefore, the main objectives of this research was to find parameters of optimization on pulp and paper manufacture process based on age, thru dendrometric mensuration of the trees; the determination of basic specific gravity in different ages; determination of pulp and paper production optimization point; wood production optimization point; and definition of costs curves for the wood production. As results of this research it was observed that the basic specific gravity values decreased with the height of the tree and increased with age. The tearing strength was the only property that increased with age. The other properties showed the opposite tendency. Based on the tree growth curves, the maximum volumetric productivity point was reached between the 17 and 18 years old. When taking in consideration the quantity of pulp produced, the maximum pulp productivity point occurred between the 18 and 19 years old. The total wood production cost showed a difference below 4%, between the 14 and 20 years old. If the pulp production cost optimization is based on the average cost, the minimum cost point will be located near the 22 years old. Thus, a combination of all properties has to be analyzed by the forest manager before any decision of the best age to cut the trees is made. He may want to maximize the volume of wood, the volume of pulp produced or based his choice on the best average cost of pulp per ton. But for a good performance of the paper produced, the evaluation of strength tensile characteristics have to be considered.

Keywords: *Pinus taeda*, kraft pulping, hand sheet properties, forestry management.

1 INTRODUÇÃO

A evolução da condição humana gerou uma demanda crescente de material de origem vegetal para múltiplos usos. Isso levou ao crescimento do consumo das florestas e o conseqüente início dos plantios florestais.

No Brasil sua maior expressividade ocorreu entre os anos 1967 e 1988, com a adoção de políticas de incentivo fiscal pelo governo federal. O intuito inicial era a criação de uma base florestal que suprisse o setor de celulose e papel. Porém, devido ao intenso ritmo de crescimento dessa madeira, ela foi utilizada também para o abastecimento da indústria de serrados.

A adaptação das indústrias a essa nova matéria-prima produzida é gradativa, sendo a fase de substituição da madeira nativa pela exótica, já bem adaptada. Atualmente os esforços estão concentrados na melhoria dos processos industriais, especialmente quando esses são de grandes proporções.

O setor de celulose e papel é um dos setores de base florestal mais expressivos, pelo grande investimento e geração de renda, que teve R\$ 16,8 bilhões de faturamento em 2003 – cifra que abrange as atividades integradas de produtos florestais e de conversão de papel. O investimento realizado nos últimos dez anos foi de US\$ 12 bilhões, possibilitando a produção de 9 milhões de toneladas de celulose por ano. Desse montante, 3,7 milhões de toneladas são exportadas, gerando US\$ 1,2 bilhão em divisas (BRACELPA, 2004).

Como a otimização do potencial produtivo é o requisito para a manutenção da competitividade, torna-se necessária a caracterização das diversas fases que compõem o processo de fabricação de celulose e de papel, para que assim possam ser tomadas decisões a longo prazo com embasamento científico.

Dessa forma, o estabelecimento da relação entre as características da madeira, as variáveis de polpação, as propriedades do papel, o crescimento das árvores e a evolução dos custos nas diferentes idades pode fornecer subsídios para a sistematização da colheita florestal, baseada na idade das árvores.

Visando esses aspectos, essa pesquisa tem como objetivo fornecer parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose papel baseado na idade dos plantios de *Pinus taeda* L.;

Tem ainda como objetivos específicos:

- Caracterizar as variáveis dendrométricas das árvores de *Pinus taeda* L.;
- Determinar a massa específica básica nas diferentes idades;
- Determinar o ponto de otimização da produção de celulose e papel;
- Determinar o ponto de otimização da produção de madeira;
- Elaborar curvas de custos para a produção de madeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Parâmetros para a produção de celulose e papel

Apesar da possibilidade de utilizar quase qualquer material fibroso na produção de celulose e papel, alguns requisitos devem ser atendidos:

- Deve haver disponibilidade constante de matéria-prima para garantir o funcionamento constante da fábrica;
- A matéria-prima não deve deteriorar-se rapidamente com o armazenamento;
- Os custos de colheita e transporte não devem ser muito elevados;
- O custo de conversão da matéria-prima deve ser relativamente baixo; o rendimento deve ser alto e a qualidade, boa;
- Deve haver uma demanda suficiente de produto a um preço que assegure uma operação lucrativa.

Por cumprir com todos os requisitos, a madeira é a melhor matéria-prima para a fabricação de papel (SANJUAN, 1997, p.36).

Devido à sua origem natural, a madeira apresenta propriedades físicas com um elevado grau de variabilidade. Essa variação é em parte resultante das condições de crescimento como clima, solo, suprimento de água e de nutrientes. Além disso, todas as propriedades da madeira são, pelo menos em parte, hereditárias (BODIG, 1993, p.3).

A ampla gama de variações inerentes à madeira produz numerosas dificuldades de processamento e utilização da madeira. No passado, muitas dessas dificuldades foram superadas devido à utilização de espécies de madeira com grandes dimensões e elevadas idades, levando a uma certa uniformidade. Atualmente, essa possibilidade está se tornando mais remota. Cada vez mais as árvores são caracterizadas por pequenas dimensões e grande variabilidade (BODIG, 1993, p.3).

Para a indústria atual, a madeira juvenil é a realidade da matéria-prima. Adaptações de processo para esse material são cada vez mais freqüentes.

A espécie de madeira empregada no cozimento, mais do que qualquer outra variável do processo, é responsável por grandes diferenças na qualidade e nas propriedades da polpa ou pasta celulósica.

O comprimento das fibras diferencia as folhosas e as coníferas, pois as primeiras apresentam fibras curtas medindo entre 1 e 1,5 mm, enquanto as últimas medem entre 3 e 5 mm. Esse é um fator importante para as propriedades físicas do papel (IPT, 1998, p. 193).

Apesar do maior tempo necessário para o processo de polpação, a celulose de coníferas geralmente confere ao papel excelentes propriedades de resistência mecânica, enquanto a celulose de folhosas apresenta propriedades mais baixas. Isso impede o emprego das folhosas como matéria-prima para fabricação de papéis de resistência muito elevada, mas permite o uso em outros tipos de papéis, como de impressão e de escrever (IPT, 1998, p. 194).

2.2 Massa específica como indicador da qualidade da madeira

A massa específica representa um importante papel na determinação das propriedades físicas, mecânicas e de utilidade de cada tipo de madeira, pois influencia as propriedades básicas da madeira permitindo diferenciar peças para uma finalidade específica, mesmo quando essas são oriundas da mesma árvore (BROWN, PANSWIN, FORSAITH, 1952, p. 1).

Para BROWN, PANSWIN e FORSAITH, (1952, p. 1), KOLLMANN e CÔTÉ (1968, p.160) e TSOUKIS (1991, p. 123), a massa específica está diretamente relacionada com outras propriedades e, por isso, é um importante indicador da qualidade da madeira, permitindo, até certo ponto, indicar a trabalhabilidade e características de acabamento.

A massa específica também controla a amplitude das mudanças dimensionais ocorridas com diferentes teores de umidade, quando essas estão abaixo do ponto de saturação das fibras. Afeta ainda as propriedades higroscópicas, mecânicas, térmicas, acústicas, elétricas e outras propriedades básicas da madeira, assim como as propriedades relacionadas ao seu processamento industrial (processamento mecânico,

secagem, etc.), mesmo sendo um índice de qualidade referente à madeira isenta de defeitos (BROWN, PANSHIN, FORSAITH, 1952, p. 1; TSOUMIS, 1991, p. 123).

Por ser um indicativo de produtividade, a massa específica (que é uma medida do conteúdo de massa em um certo volume de madeira) é de grande interesse para indústrias que produzam polpa, papel e chapas de fibras assim como para a produção de madeira em florestas (TSOUMIS, 1991, p. 123).

Além de tratar-se de um índice de relativa simplicidade de obtenção (são necessários apenas os valores da massa do corpo e seu volume equivalente de água) e alto poder de extrapolação, a massa específica é uma característica que tem alta herdabilidade, fator essencial para a continuidade de programas de melhoramento genético (REMADE, 2004).

Apesar da facilidade de obtenção dos valores da massa específica, deve-se atentar para a grande variabilidade dessa propriedade. Essas variações são decorrentes do crescimento das árvores e podem ser originadas por vários fatores como efeitos do sítio, localização geográfica, idade e procedência (BROWN, PANSHIN, FORSAITH, 1952, p. 13).

Essa diversidade de fatores gera variações na massa específica da madeira dentro da mesma árvore e entre árvores da mesma espécie.

Para as coníferas, dentro da mesma árvore existe uma variação vertical (da base para o topo da árvore) e uma variação horizontal (da medula para a casca) (BROWN, PANSHIN, FORSAITH, 1952, p. 16; KOLLMANN, CÔTÉ 1968, p.169; TSOUMIS, 1991, p. 118).

Na direção vertical há uma tendência de redução da massa específica com a altura da árvore. Essa redução é atribuída a fatores mecânicos e biológicos. Sob o ponto de vista mecânico, o tronco é considerado como a viga de sustentação, que deve suportar os diversos esforços que atingem a copa da árvore. Isso resulta na formação de uma região de maior massa específica. Sob o ponto de vista biológico, elevadas massas específicas estão relacionadas com a formação do cerne, através da deposição de extrativos próximos à medula, que contribuirão para o aumento da massa específica (TSOUMIS, 1991, p. 118).

A quantidade de madeira juvenil também influencia na variação vertical, pois sua elevada quantidade na parte alta do tronco faz com que os valores dessa propriedade sejam menores que na base da árvore (TSOUMIS, 1991, p. 118).

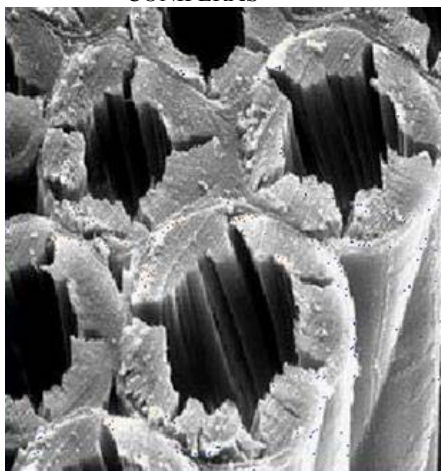
Na variação horizontal o princípio é o mesmo: a massa específica é menor em madeira juvenil, aumentando com a idade devido à formação de madeira adulta. Isso ocorre devido ao aumento da espessura da parede celular e da proporção de lenho tardio (BROWN, PANSIN, FORSAITH, 1952, p. 17; KOLLMANN, CÔTÉ, 1968, p. 171; TSOUMIS, 1991, p. 119).

Dentre árvores da mesma espécie, a variação da massa específica é causada pela combinação dos fatores ambientais (solo, clima, espaçamento e tratos silviculturais), expressa pela qualidade do sítio, e hereditariedade BROWN, PANSIN e FORSAITH (1952, p. 14), TSOUMIS (1991, p. 119) e KOLLMANN e CÔTÉ (1968, p. 171).

Quando esses fatores induzem ao rápido crescimento das árvores, aumenta-se a quantidade de madeira juvenil e de anéis largos, o que diminuirá a massa específica (TSOUMIS, 1991, p. 120).

Condições adversas de crescimento podem influenciar a massa específica quando madeira de reação é produzida, como demonstrado na FIGURA 1. O lenho de compressão apresenta massa específica 15 a 40% maior que a madeira normal (BROWN, PANSIN, FORSAITH, 1952, p. 19; KOLLMANN, CÔTÉ, 1968, p. 171; TSOUMIS, 1991, p. 120).

FIGURA 1 – LENHO DE COMPRESSÃO EM CONÍFERAS



FONTE: SANJUAN (1997, p. 49)

Segundo IPT (1998, p. 197), a massa específica é uma variável de grande importância para a indústria de celulose, exercendo influência no processo de várias maneiras:

- Constituindo um fator de conversão entre o volume de madeira que entra no processo e a quantidade efetiva de material seco para o controle das operações;
- Influenciando diretamente o rendimento da operação de conversão de matéria-prima madeira para pasta celulósica;
- Permitindo uma certa uniformização do produto final;
- Delimitando o ritmo de deslignificação do material.

Madeiras mais densas proporcionam maior carga por um volume de digestor, tornando a atividade economicamente mais vantajosa (IPT, 1998, p. 197).

2.3 Produção de celulose

O processo de produção de celulose é designado genericamente de polpação, cujo termo é utilizado para descrever os vários processos de redução da madeira para componentes fibrosos (WALKER, 1993, p. 481; SMOOK, 1990, p. 36).

Pode ainda ser definido como o processo de separação das fibras da madeira mediante a utilização de energia mecânica, térmica ou química, ou ainda a combinação das três. Cada processo resultará em um material com características diferenciadas (SMOOK, 1990, p. 36; WALKER, 1993, p. 483; SANJUAN, 1997, p. 87; IPT, 1998, p. 165).

O objetivo da polpação química é degradar e dissolver a lignina, deixando a maior parte da celulose e das hemiceluloses intacta nas fibras (SMOOK, 1990, p. 37; SANJUAN, 1997, p. 89; IPT, 1998, p. 183).

Para isso mistura-se o material fibroso com uma solução aquosa de substâncias inorgânicas, denominada licor de cozimento, cuja composição varia de acordo com o processo utilizado e do uso que se dará à polpa. Essa mistura é colocada em um digestor, onde se aplica calor para efetuar o cozimento da massa, solubilizando o material lignino-celulósico e individualizando as fibras. Tal processo se realiza sob

condições controladas de pressão, temperatura e tempo (SANJUAN, 1997, p. 105, IPT, 1998, p. 166).

Segundo WALKER (1993, p. 483), a polpação química pode ser dividida em duas classes, conforme a faixa de pH em que operam: são denominados processos ácidos e processos alcalinos. Dentre os alcalinos, o processo *kraft* é o de maior importância, representando no ano 2000 99,6% da polpa química fabricada no Brasil e 94,7% no mundo. Há a previsão de aumento dessa produção para 2005 de 31,4% no Brasil contra 3,6% mundialmente (FAO, 2001).

Segundo IPT (1998, p. 168), a grande difusão e rápida expansão do processo *kraft*, conhecido também como processo sulfato, deu-se pela combinação de vários fatores, sendo os mais importantes:

- Possibilidade de adaptação, praticamente, a todas as espécies de madeira;
- Desenvolvimento de um sistema eficiente de recuperação dos regentes do licor negro;
- Introdução de um processo de branqueamento satisfatório.

Soma-se ainda a esses fatores os tempos de cozimento relativamente curtos, à ausência de problemas com resina e a produção de pastas de alta resistência (SANJUAN, 1997, p. 143; IPT, 1998, p. 167).

A polpa *kraft* dá origem a papéis resistentes (*kraft* – palavra alemã que significa resistente), porém, com coloração escura (SMOOK, 1990, p. 39; SANJUAN, 1997, p. 143).

O processo *kraft* de obtenção de celulose tem como característica básica o aquecimento dos cavacos de madeira em um vaso de pressão, o digestor, com licor de cozimento constituído, principalmente, de uma solução aquosa de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. A razão entre a quantidade de madeira e licor, bem como a concentração de licor, a umidade dos cavacos e outras variáveis, são cuidadosamente controladas (SMOOK, 1990, p. 69; WALKER, 1993, p. 502; SANJUAN, 1997, p. 143; IPT, 1998, p. 168).

Esse aquecimento é feito de acordo com um programa pré-determinado, no qual a temperatura é elevada gradualmente, durante 50 a 90 minutos, até atingir a

temperatura de 170°C, permitindo a impregnação do licor de cozimento nos cavacos de madeira. Mantêm-se essa temperatura entre uma e duas horas para completar as reações de cozimento (SMOOK, 1990, p. 70; SANJUAN, 1997, p. 150; IPT, 1998, p. 168).

O ataque alcalino causa a ruptura das moléculas de lignina em fragmentos menores, cujos sais de sódio são solúveis no licor de cozimento. Em decorrência desse ataque químico, são dissolvidos, aproximadamente, 80% da lignina, 50% das hemiceluloses e 10% da celulose. Essa é a razão de serem obtidos baixos rendimentos nesse processo - cerca de 45 a 50% (SMOOK, 1990, p. 39; WALKER, 1993, p. 483).

A presença de sulfetos no álcali acelera a deslignificação e melhora a qualidade da pasta, produzindo uma pasta com menor teor de lignina para um determinado rendimento (IPT, 1998, p. 188).

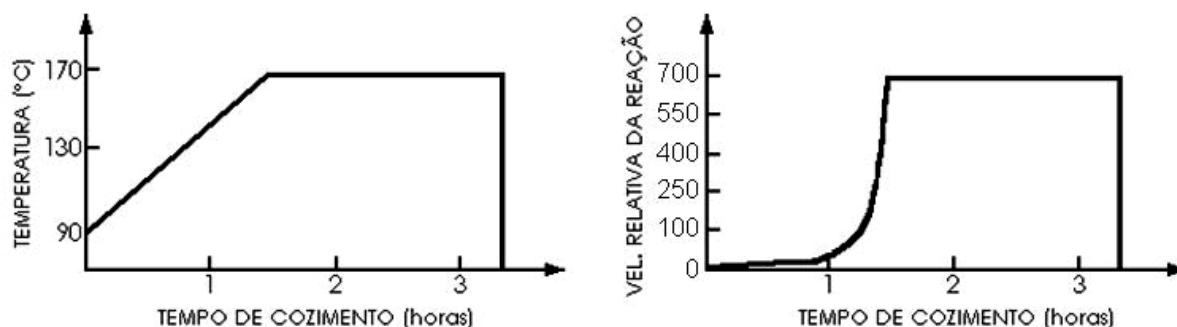
Nesse processo, as duas variáveis que mais influenciam são a concentração do álcali (medida pelo álcali ativo ou álcali efetivo) e a temperatura (SMOOK, 1990, p. 74; SANJUAN, 1997, p. 157).

Por isso, em 1956 foi desenvolvido um método para expressar o tempo de cozimento e a temperatura como uma só variável, tomando arbitrariamente uma constante de velocidade de reação relativa (constante cinética) de 1 para 100°C. Quando a constante de velocidade relativa é colocada frente ao tempo de cozimento em horas, a área abaixo da curva é caracterizada como *fator H* (SMOOK, 1990, p. 74; SANJUAN, 1997, p. 168).

O conceito de *fator H* pode ser aplicado no controle do cozimento, especialmente quando a temperatura varia durante o período de cozimento (SMOOK, 1990, p. 74; WALKER, 1993, p. 508; IPT, 1998, p. 215).

O efeito da temperatura sobre a constante de velocidade de reação relativa pode ser observado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – CURVAS DE TEMPERATURA E VELOCIDADE RELATIVA DA REAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE COZIMENTO



FONTE: SANJUAN (1997, p. 168)

Após esse período de cozimento, uma válvula no fundo do digestor é aberta e a pressão empurra os cavacos cozidos para um tanque onde, sob a força de alívio na descarga, os cavacos desdobram-se em fibras individualizadas, formando a pasta ou polpa (SMOOK, 1990, p. 70; SANJUAN, 1997, p. 148; IPT, 1998, p. 168).

A mistura diluída passa pelos separadores de nós, que removem fragmentos grandes, como cavacos não cozidos, e em seguida passa pelos filtros de lavagem de massa, onde a pasta é lavada para retirada do licor aderente (SMOOK, 1990, p. 71; IPT, 1998, p. 169).

A pasta resultante passa por um sistema de depuração e segue para a produção de papéis não branqueados (SMOOK, 1990, p. 70; IPT, 1998, p. 169).

Dentre os gases produzidos durante o cozimento encontram-se os compostos orgânicos malcheirosos, tais como as mercaptanas, os sulfetos, a terebintina e o metanol. Os gases de alívio são condensados e a terebintina recuperada (IPT, 1998, p. 169).

2.3.1 Variáveis básicas que afetam o processo kraft

Para SMOOK (1990, p. 75) e SANJUAN (1997, p. 155), as variáveis básicas que afetam o processo *kraft* podem ser divididas em quatro grupos:

- **cavacos de madeira** - espécies utilizadas, qualidade dos cavacos (distribuição de tamanhos, ausência de contaminantes, etc.), umidade e densidade;
- **licor de cozimento** – concentração e quantidade de álcali ativo, porcentagem de sulfidez e álcali total;
- **controle do cozimento** – carga de reativos (álcali ativo ou efetivo sobre a madeira seca), relação licor:madeira, ciclo de temperatura e curva tempo/temperatura (*fator H*);
- **outros parâmetros de controle** – grau de deslignificação, controle (indicado pelo número *kappa*) e álcali residual.

a) cavacos de madeira

A espécie de madeira empregada no cozimento é a responsável por grandes diferenças na qualidade e propriedades das fibras. Devido ao maior comprimento dos elementos celulares, a polpa obtida com madeira de coníferas possibilita a confecção de papéis com melhores características de resistência (IPT, 1998, p. 193).

A dimensão dos cavacos de madeira exerce um efeito muito expressivo na pasta obtida, pois a redução da espessura dos cavacos aumenta a velocidade de cozimento e reduz a quantidade de rejeitos, porém os custos energéticos e operacionais são bem maiores (SMOOK, 1990, p. 75).

Para a fase de impregnação do licor nos cavacos, a espessura dos cavacos é a dimensão mais importante, pois na presença do hidróxido de sódio, a penetração do licor no sentido longitudinal é seis vezes maior que no sentido transversal (SMOOK, 1990, p. 75).

A umidade dos cavacos influencia muito o processo de polpação, pois uma elevada umidade nos cavacos leva a uma diminuição da concentração dos produtos químicos reagentes. Isso aumenta a quantidade de rejeitos, de lignina residual e a perda de reativos que ficam aderidos aos rejeitos (SANJUAN, 1997, p. 157).

b) licor de cozimento

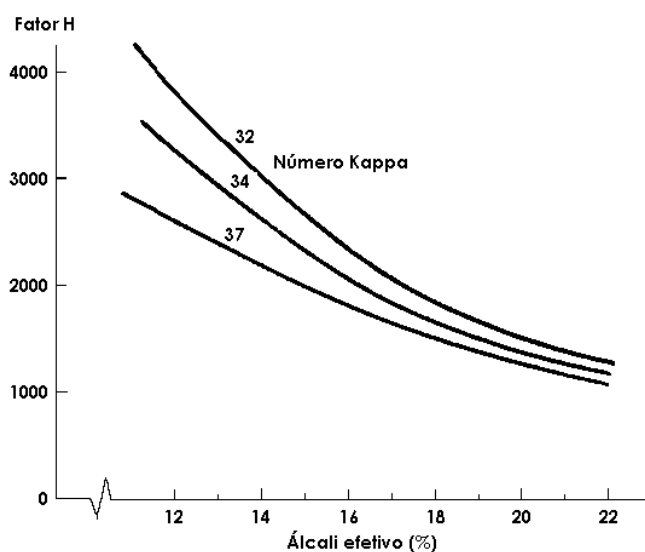
A sulfidez no licor de cozimento proporciona uma aceleração na deslignificação e um aumento no rendimento e resistência das polpas. Simultaneamente tem-se uma diminuição no tempo de polpação e na ação degradante sobre a celulose. Os efeitos do sulfeto de sódio (Na_2S) são muito significativos em níveis de sulfidez próximos a 20%. Valores muito elevados de sulfidez limitam a reação de deslignificação e geram problemas ambientais muito grandes (SMOOK, 1990, p. 75; SANJUAN, 1997, p. 157; IPT, 1998, p. 212).

c) controle do cozimento

Segundo SMOOK (1990, p. 77), a quantidade de álcali normalmente requerida para polpação de madeira de coníferas é de 12 a 14% de álcali efetivo sobre a madeira absolutamente seca. Porém, para IPT (1998, p. 207) esse valor é de 18%. Na prática se utiliza um pequeno excesso de reagentes para manter um nível mínimo de concentração, necessário para manter em solução a lignina dissolvida e prevenir sua deposição sobre as fibras.

SMOOK (1990, p. 75) e SANJUAN (1997, p. 157) afirmam que a carga de álcali pode ser utilizada para afetar a velocidade de reação, como demonstrado na FIGURA 3.

FIGURA 3 – ÁLCALI EFTIVO E *FATOR H* REQUERIDOS PARA CHEGAR A UM DETERMINADO NÚMERO *KAPPA*



FONTE: SMOOK (1990, p. 75)

Porém, um acréscimo de álcali reduzirá ligeiramente a quantidade de hemiceluloses retidas em um *kappa* determinado (SMOOK, 1990, p. 77).

Industrialmente utiliza-se uma carga de álcali relativamente alta por proporcionar à polpa uma maior brancura e menores quantidades de rejeitos, mantendo o processo a um *kappa* mais alto e com melhores rendimentos (SMOOK, 1990, p. 77).

A temperatura máxima do cozimento, quando mantida acima de 190°C, influencia substancialmente a perda de rendimento. Se mantida entre 180 e 190°C, nota-se uma pequena redução no rendimento. Assim, elege-se a temperatura máxima de 180°C para que não afete o resultado do cozimento (SMOOK, 1990, p. 77).

O efeito exercido pela proporção de líquido no cozimento (relação licor:madeira) está diretamente relacionado com a penetração do licor nos cavacos. Para isso é recomendada uma relação entre 3:1 e 5:1 - proporção entre a parte líquida do cozimento e o material absolutamente seco. Isso levará a produção de uma polpa com características desejadas de rendimento, resistência e uniformidade (SMOOK, 1990, p. 78; SANJUAN, 1997, p. 158; IPT, 1998, p. 208).

d) outros parâmetros

O objetivo do processo *kraft* é chegar a um número *kappa* estabelecido. Devido a diferenças na madeira haverá sempre algumas variações no resultado do cozimento (SMOOK, 1990, p. 78; SANJUAN, 1997, p. 244).

O número *kappa* é obtido através da oxidação de certa quantidade de polpa em uma solução de permanganato de potássio, indicando o grau de deslignificação de um cozimento e a quantidade de produtos químicos necessários ao branqueamento (SMOOK, 1990, p. 319; SANJUAN, 1997, p. 245).

Vários fatores podem determinar o número *kappa* de uma polpa, incluindo o tempo de cozimento, a concentração do álcali ativo, a sulfidez e a temperatura (IPT, 1998, p. 213).

2.4 Produção de papel

A fabricação do papel necessita de uma matéria-prima preparada e de qualidade. Com esse objetivo a polpa celulósica passa por algumas fases antes de ser utilizada para a confecção das folhas de papel. São elas:

- **Desintegração:** é a ação mecânica de transformação das fibras da polpa em suspensão (SMOOK, 1990, p. 186);
- **Refinação:** as fibras são submetidas a uma ação mecânica para potencializar suas propriedades papelarias em relação ao produto a ser fabricado, onde cada tipo de matéria-prima requer uma quantidade diferente de energia de refinação. Tem como efeitos principais a eliminação da parede primária, formação de finos (partículas de fibras), penetração da água na parede celular, ruptura de algumas ligações de pontes de hidrogênio entre fibras, aumento da flexibilidade das fibras, formação de fraturas na parede celular, alargamento e/ou compressão das fibras e solubilização parcial das hemiceluloses na superfície em forma de géis (SMOOK, 1990, p. 186).

Tais modificações nas características das fibras levam a uma melhora na distribuição e homogeneização das fibras, evitam a formação de aglomerados de fibras e aumentam a flexibilidade das fibras (IPT, 1982, p. 30).

Para SANJUAN (1997, p. 256), o aumento do grau refinação leva a um acréscimo na resistência à drenagem, reduzindo a porosidade e a alvura.

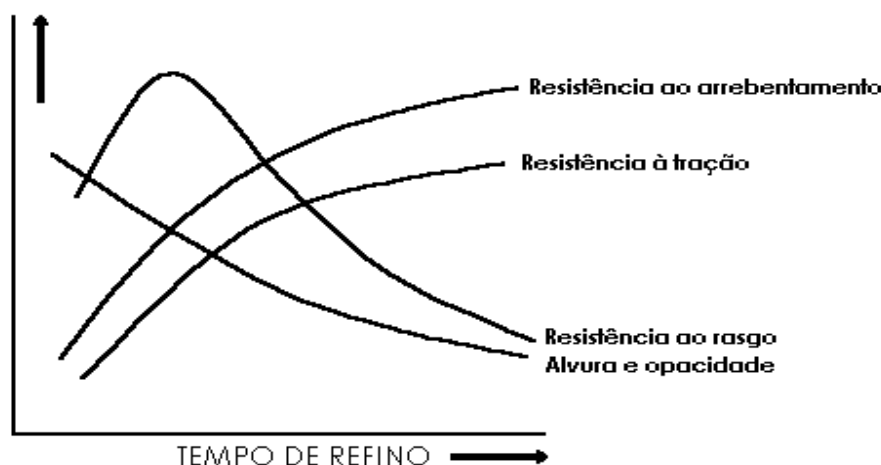
SMOOK (1990, p. 196), WALKER (1993, p. 484) e SANJUAN (1997, p. 256) afirmam que os efeitos nas folhas de papel decorrentes da refinação são:

- Decréscimo da resistência ao rasgo e aumento da resistência ao arrebentamento e à tração com o aumento da refinação, devido ao aumento da área de contato entre as fibras;
- Incremento inicial na resistência ao rasgo com um leve refinação na polpa de coníferas; porém com uma maior refinação das fibras observa-se um declínio constante nessa propriedade, decorrente do aumento do número de cortes nas fibras;

- Decréscimo das propriedades de alvura, opacidade e porosidade do papel com a refinação, pois as folhas se tornam mais densas.

O comportamento das propriedades do papel, com o aumento do tempo de refinação é representado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO QUALITATIVA DAS PROPRIEDADES DO PAPEL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE REFINAÇÃO



FONTE: SANJUAN (1997, p. 256)

Como forma de controle dos efeitos dos tratamentos efetuados nas polpas, faz-se, normalmente, um teste denominado drenabilidade.

A drenabilidade é a medida de resistência das fibras a um fluxo de água. O método clássico de determinação dessa propriedade é realizado com um aparelho chamado Canadian Standart Freeness (CSF) e conhecido como Schopper-Riegler. O CSF é definido como o número de mililitros de água que sai por um orifício lateral normalizado quando a polpa é drenada por uma placa perfurada a uma consistência de 0,30% (SMOOK, 1990, p. 319).

As medidas de capacidade de esgotamento das polpas são usadas como indicativo do grau de refino para polpas químicas, permitindo comparações entre polpas do mesmo tipo (SMOOK, 1990, p. 319).

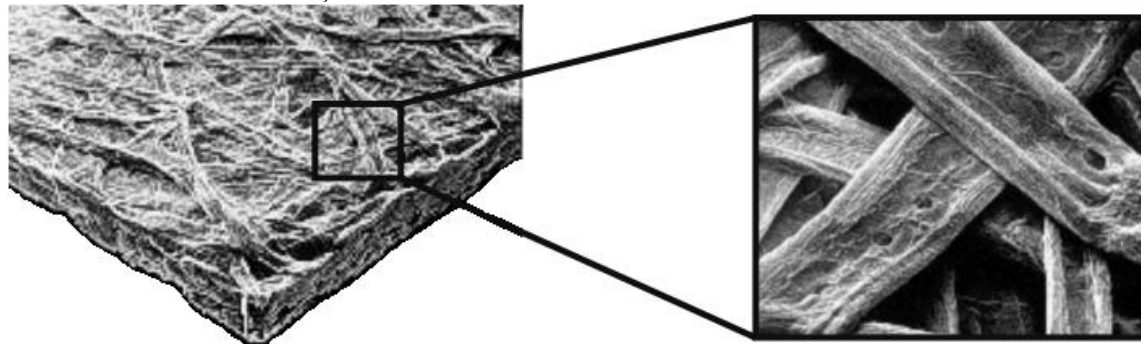
Após a preparação da massa, ocorre a formação das folhas, englobando duas fases: a formação propriamente dita e a secagem.

Quando a suspensão de fibras é desaguada sobre a tela formadora, a folha de papel está praticamente formada, restando apenas secá-las. A secagem das folhas tem

como objetivo evaporar a umidade residual da folha (IPT, 1982, p. 276; SMOOK, 1990, p. 252).

Com as folhas formadas (FIGURA 5), inicia-se a caracterização das propriedades do papel através dos diversos testes existentes.

FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DE UMA FOLHA DE PAPEL FORMADA



FONTE: SANJUAN (1997, p. 229)

Por serem muito dependentes do conteúdo de umidade, as propriedades dos papéis devem ser determinadas em um ambiente padronizado. A padronização norte-americana sugere a temperatura de 23°C e 50% de umidade relativa, que levará a uma umidade de equilíbrio do papel de aproximadamente 9% (SMOOK, 1990, p. 321; ABTCP-P4, 1998).

2.4.1 Variações nas características do papel

Algumas variáveis de fabricação influenciam nas propriedades do papel. Tais variáveis incluem o tipo de fibra, o processo de cozimento e o grau de ligação entre fibras. O ajuste de tais variáveis permite obter papéis com características específicas (IPT, 1982, p. 274).

Segundo SANJUAN (1997, p. 248), por estarem inter-relacionadas, quando se melhora uma propriedade, geralmente se afeta outra.

As características das fibras da madeira definem a qualidade do papel produzido. Dentre as variáveis de maior influência pode-se citar o comprimento das fibras, a espessura da parede das fibras, danos físicos durante o processo de refinação da massa de fibras, danos químicos nas cadeias de celulose durante o processo de

polpação, natureza e distribuição da lignina residual e hemiceluloses (SANJUAN, 1997, p. 91).

Por apresentar traqueóides com paredes mais espessas, o lenho tardio apresenta uma maior massa específica e, conseqüentemente, menores propriedades de ligação entre fibras devido à constituição espessa das paredes dos traqueóides. Em compensação, no lenho inicial as paredes são finas e facilmente rompíveis, aumentando assim a área de contato entre as fibras (IPT, 1998, p. 197).

A madeira de compressão apresenta rendimentos, propriedades físicas e pureza química menores (IPT, 1998, p. 198).

2.4.2 Propriedades de avaliação do papel

Normalmente os produtos de polpa e papel são comercializados baseando-se em uma nomenclatura e procedimentos de ensaio padronizados. O objetivo é assegurar que se tenha uma linguagem comum para cada tipo de produto. A melhoria da eficiência do processo é outro objetivo dos ensaios na polpa e papel (SMOOK, 1990, p. 315; WALKER, 1993, p. 484).

Segundo SMOOK (1990, p. 316), os objetivos principais dos ensaios nos papéis são:

- Controle do processo: controle da matéria-prima, manutenção das variáveis de controle dentro dos limites especificados e controle das cargas adicionadas;
- Controle de qualidade: adequar as normas de qualidade com o limite econômico;
- Programação do processo: evolução do rendimento, comparação com outras fábricas e identificação de áreas problemáticas;
- Controle econômico: estabelecer custos unitários e localizar áreas de alto custo.

O desempenho de um papel para um fim determinado não pode ser avaliado por uma única propriedade. A reunião de condições necessárias para sua utilização deve ser definida por pelo menos dois ensaios diferentes (IPT, 1982, p. 282).

As principais propriedades avaliadas em papéis são efetuadas através dos ensaios físicos. Segundo SMOOK (1990, p. 325) e; SANJUAN (1997, p. 248), esses ensaios podem ser englobados em 4 categorias:

- **propriedades mecânicas e de resistência:** gramatura, resistência à tração, alongamento, absorção de energia de tensão (TEA), resistência ao arrebentamento, resistência ao rasgo;
- **propriedades superficiais:** lisura;
- **propriedades ópticas:** alvura, opacidade, brilho e cor;
- **permeabilidade a fluidos:** resistência à passagem do ar.

a) Gramatura

É a principal variável de compra e venda de papel. Afeta muitas propriedades do papel, incluído as mecânicas, ópticas e elétricas. Por isso costuma-se referir algumas propriedades em relação à gramatura confeccionada (IPT, 1982, p. 277; SANJUAN, 1997, p. 249).

É expressa em gramas por metro quadrado.

b) Resistência à tração

A resistência à tração é controlada por fatores como a resistência individual das fibras, o comprimento médio das fibras, a formação e estrutura da folha. Fibras longas aumentam a resistência do papel até um certo limite. Quando demasiadamente longas, as fibras interferem na formação, produzindo papéis menos uniformes (IPT, 1982, p. 284).

WALKER (1993, p. 532) explica que o acréscimo nos valores dessa propriedade com o aumento da refinação ocorre pelas fibras se tornarem mais flexíveis, aumentando assim sua área de contato. Porém, segundo IPT (1982, p. 284), dependendo do tratamento dado às fibras, pode-se enfraquecer os papéis produzidos.

O teste é realizado com corpos-de-prova de largura e comprimento especificados, submetidos a um esforço de tração uniforme e crescente até sua ruptura. O aparelho usado é o dinamômetro, e os valores obtidos são reportados em kN/m (resultado da divisão da carga de ruptura pela largura do corpo de prova). Pode ainda ser expresso pelo comprimento de auto-ruptura (CAR), que é o comprimento de uma

tira de papel que, quando suspensa, se rompe sobre seu próprio peso (IPT, 1982, p. 282; SANJUAN, 1997, p. 253).

A resistência à tração está relacionada com a durabilidade e utilidade de um papel para embalagem, e outros usos também sujeitos a forças de tensão direta. A resistência aos diferentes tipos de força do processo de produção e de impressão pode ser obtida através dessa propriedade (IPT, 1982, p. 283).

c) Alongamento

É determinado simultaneamente com a medição da resistência à tração, através de um acessório do dinamômetro. É expresso em porcentagem e indica quanto o papel deforma antes de sua ruptura (IPT, 1982, p. 284).

d) Absorção de Energia de Tensão (TEA)

É o trabalho realizado sobre a folha de papel quando submetido a um esforço até sua ruptura, medido desde o esforço zero até o esforço máximo. O valor do TEA pode ser expresso como a energia absorvida por unidade de superfície de uma amostra de papel, cuja unidade é o J/m^2 (SANJUAN, 1997, p. 254).

É utilizado nos casos onde deseja-se conhecer as propriedades elásticas e expansivas do papel (SANJUAN, 1997, p. 254).

e) Resistência ao arrebentamento

É uma medida composta por certas propriedades da estrutura da folha de papel, como resistência a tração e alongamento (SANJUAN, 1997, p. 250).

Pode ser definida como a pressão hidrostática requerida para produzir uma ruptura estrutural no material transmitida por um diafragma elástico de área circular (IPT, 1982, p. 284; WALKER, 1993, p. 533; SANJUAN, 1997, p. 251).

Em geral, é determinada em um aparelho do tipo *Muellen* e influenciada por fatores como grau de refino (aumentando com um maior refino), gramatura e espessura (IPT, 1982, p. 284).

Tem relação com a resistência do papel na forma de sacos e papéis de embrulho (IPT, 1982, p. 284).

Essa propriedade fornece uma medida quantitativa da adesão entre as fibras, estando linearmente relacionada com a resistência à tração (WALKER, 1993, p. 533).

f) Resistência ao rasgo

É o trabalho total necessário para o rasgamento completo do papel, a uma distância fixada, depois do rasgo ter sido iniciado. É medida em um aparelho do tipo pêndulo, *Elmendorf*, e expressa em milinewton ou grama-força (IPT, 1982, p. 286; SANJUAN, 1997, p. 252).

É afetado pelo comprimento das fibras e ligação entre elas. Fibras longas com paredes espessas aumentam a resistência ao rasgo, pois tendem a diminuir o esforço sofrido entre um maior número de ligações entre as fibras (IPT, 1982, p. 286; WALKER, 1993, p. 532; SANJUAN, 1997, p. 251).

O ensaio é utilizado na avaliação de sacos de papel, etiquetas, papéis para fins higiênicos e papéis que na sua utilização são submetidos à força de rasgamento. Quando em conjunto com a resistência ao estouro e à tração, configura um importante critério de qualidade para os papéis (IPT, 1982, p. 286; SANJUAN, 1997, p. 251).

g) Alvura

É o fator de reflectância intrínseco determinado a um comprimento de onda efetivo de 457 nm. É conhecida também como fator de reflectância no azul (IPT, 1982, p. 289; SANJUAN, 1997, p. 168).

É uma propriedade muito utilizada para averiguar o grau do branqueamento efetuado em polpas (WALKER, 1993, p. 532).

h) Permeância ao ar (porosidade Gurley)

É a dificuldade com que um determinado volume de gás passa por uma folha sob uma diferença de pressão. Ela depende do número, tamanho, forma e distribuição dos poros no material (IPT, 1982, p. 280; SANJUAN, 1997, p. 250).

Sua determinação é feita através do porosímetro Gurley e a unidade de medição é o segundo (IPT, 1982, p. 280).

Estima indiretamente as características de formação da folha, resistência do papel, filtros de papel e a penetração de tintas de impressão no papel. É importante para certos usos do papel como para embalagens, sacos e bolsas (IPT, 1982, p. 281; SANJUAN, 1997, p. 250).

2.5 Consumo específico

A empresa florestal necessita de um levantamento constante de seus estoques de matéria-prima para possibilitar um planejamento da produção. Isso é fornecido pelos inventários florestais.

No caso da indústria de celulose e papel, a quantidade de madeira em campo define o nível produtivo da fábrica. Excessos de consumo implicam na necessidade de compra de material de terceiros, enquanto o consumo menor que o potencial produtivo do sítio pode diminuir a geração de receita para um mesmo potencial instalado.

Porém, esses inventários fornecem a quantidade de matéria-prima em volume por unidade de área – metros cúbicos de madeira por hectare de terra.

Para serem convertidos em material que efetivamente é transformado em produto final, são necessárias transformações.

Com o objetivo de facilitar essa série de transformações, as indústrias estão buscando uma forma de simplificar e agilizar a obtenção de valores finais através de uma nova variável denominada *consumo específico*.

Essa variável relaciona o volume de matéria-prima madeira inventariada, medida em metros cúbicos por hectare, ou a massa de madeira, obtida na entrada das fábricas através da pesagem da carga dos caminhões, necessária para se obter uma tonelada de celulose seca pronta para uso.

Além disso, é uma função direta do rendimento de polpação.

2.6 Planejamento florestal

Por ter como foco o futuro, o planejamento trabalha sobre incertezas. Predições são necessárias no âmbito do desenvolvimento de produtos e condições de mercado. Isso faz com que os projetos de investimento florestal sejam caracterizados por uma expectativa muito grande de retorno do investimento inicial. Esse desejo leva a busca incessante da idade econômica ótima de corte da floresta (THOROE, 1997, p. 66; LIMA JR, 1999, p. 393).

Dessa forma, o planejamento florestal tem como objetivo maior a maximização do lucro. Isso envolve muitas variáveis, mas consegue resumir a fórmula para o sucesso empresarial (THOROE, 1997, p. 65).

Cabe aos gestores do planejamento florestal manter o equilíbrio entre as refinadas técnicas disponíveis para predição e o conhecimento básico de grande eficácia (JOHNSTON, 1977, p. 142).

2.7 Crescimento de árvores

O plantio de florestas requer um planejamento para se determinar o período de produção para o corte, tanto em termos volumétricos quanto em termos financeiros, para evitar que as árvores sejam cortadas sem terem atingido a plenitude de seu potencial de crescimento (HOSOKAWA, 1998, p. 29).

Segundo LIMA JR. (1999, p. 397) quando se utiliza o tempo como fator de produção florestal, as variáveis econômicas denominadas produto físico médio e produto físico marginal passam a ser denominadas incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA).

O ponto de cruzamento dessas curvas é um ponto de referência para o manejo de florestas, assim como para realização de desbastes. Esse é o ponto que representa a máxima produção em volume, além de definir a rotação silvicultural (SCOLFORO, 1990, p.13).

Porém, se a tônica do manejo for a obtenção de vários produtos diferentes e em quantidades apropriadas, esse ponto pode se tornar irrelevante (SCOLFORO, 1990, p.13).

2.8 Custos de um povoamento florestal

Em um ambiente competitivo, os empreendimentos precisam de grandes esforços para manter os mercados e reduzir os custos. Caso contrário estarão fadados a desaparecer do mercado (THOROE, 1997, p. 65).

O custo é o resultado da somatória dos diversos fatores de produção, alocados no tempo. A existência desses custos e a tentativa de minimizá-los explica a existência da economia.

SPEIDEL (1966, p. 13) define o princípio econômico como sendo o alcance de um resultado máximo por um custo determinado, ou o alcance de um resultado determinado por um custo mínimo.

Segundo HOSOKAWA (1998, p. 51), os custos florestais são os valores utilizados no processo de produção, e podem ser agrupados nos seguintes centros de custos:

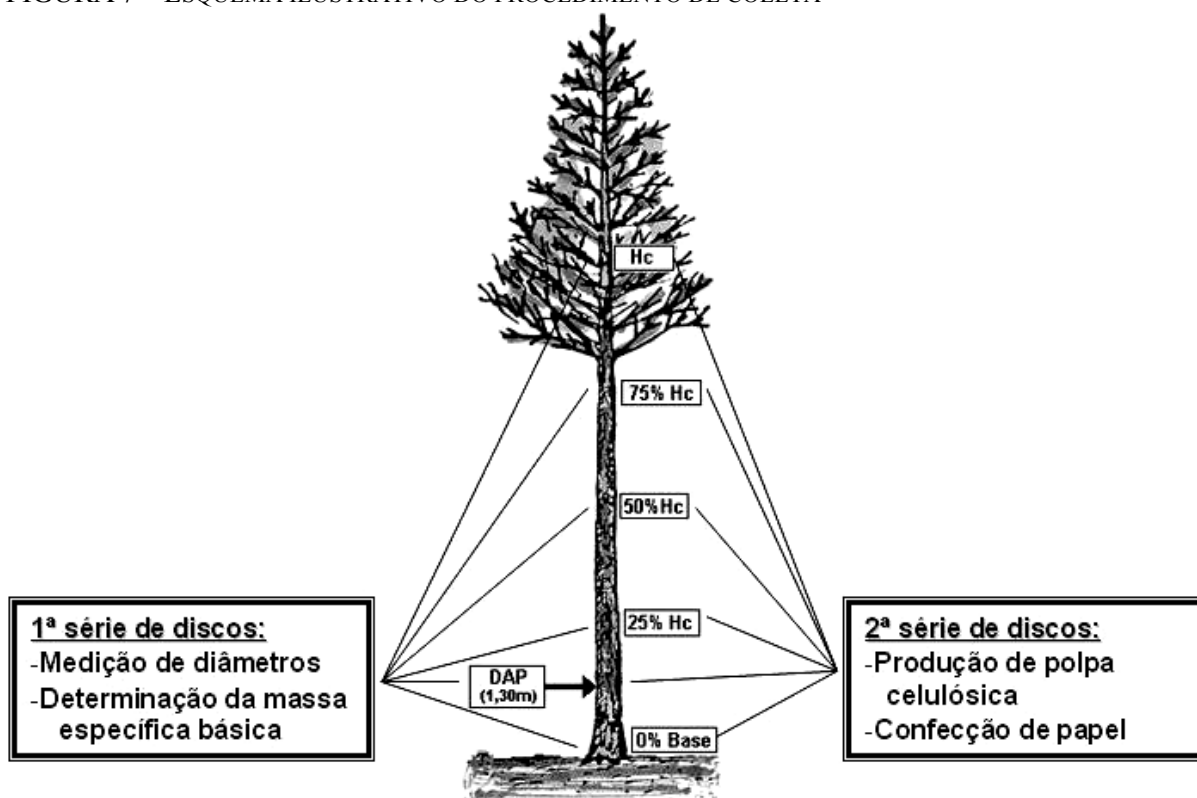
- 1) de plantio: preparo de terreno, mudas, plantio, replantio, tratos culturais e silviculturais, proteção, material, infra-estrutura e empreiteiros;
- 2) de administração: administração, manutenção e depreciação;
- 3) de corte: derrubada das árvores, desgalhamento, descascamento, arraste e empilhamento.

De forma geral, a floresta deve satisfazer o lado econômico e promover o abastecimento sustentado de madeira. Isso engloba três variáveis fundamentais, que são a produtividade, o rendimento e a rentabilidade (FAO, 1968, p. 45).

diamétrica. Essa distribuição foi considerada para simular a condição real de um processo industrial.

Foram coletadas duas séries de discos do tronco das árvores, em alturas relativas à altura comercial (0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial), além do DAP (diâmetro à altura do peito – 1,30 m). Uma das séries foi utilizada na determinação dos diâmetros (com e sem casca) nas diferentes alturas da árvore e massa específica, enquanto o outro conjunto foi transformado em cavacos para a produção de polpa celulósica e posterior confecção do papel, como ilustra a FIGURA 7.

FIGURA 7 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCEDIMENTO DE COLETA



FONTE: O AUTOR

Foram utilizadas todas as partes selecionadas, independentemente do diâmetro que possuíam os discos. Tal situação foi estabelecida para uma caracterização de uso de toda a madeira para o processo de fabricação de celulose e papel.

O material botânico das árvores em questão foi coletado, depositado e registrado no herbário do Curso de Engenharia Florestal (EFC) da Universidade Federal do Paraná com o número EFC 9970.

3.2 Determinação da massa específica básica da madeira

A massa específica básica, definida como a relação entre a massa absolutamente seca e o volume saturado, foi determinada através da relação demonstrada na EQUAÇÃO N°1:

$$MEb = \left(\frac{Ms}{Vu} \right) \times 100 \quad \text{EQUAÇÃO N°1}$$

Onde: MEb = Massa específica básica (kg/m^3);
 Ms = Massa absolutamente seca (kg);
 Vu = Volume úmido (saturado) (m^3).

O volume saturado foi obtido através do método de imersão, usando o Princípio de Arquimedes. Esse método consiste nos seguintes passos:

1. imersão das peças em água por alguns dias até saturação completa;
2. imersão das peças de madeira em um recipiente com água colocado sobre uma balança;
3. leitura do valor obtido na balança através do empuxo da peça.

Como a densidade da água é de 1 kg/m^3 (a 4°C), a leitura de peso na balança pode ser considerada idêntica ao volume da peça medida.

Após a determinação do volume, as peças foram colocadas em estufa a 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até peso constante.

Os valores de massa específica foram obtidos nas diferentes alturas da árvore. Com esses valores foi feita a ponderação, em relação ao volume de cada secção, para uma maior representatividade da massa específica média. O procedimento adotado é descrito na EQUAÇÃO N°2.

$$MEB_{pond} = \sum \left(\frac{ME1 + ME2}{2} * \frac{V_{secção}}{V_{total}} \right) \text{ EQUAÇÃO N}^{\circ}2$$

Onde: MEB_{pond} = Massa Específica Básica ponderada;

$ME1$ = Massa Específica da extremidade de maior diâmetro da secção;

$ME2$ = Massa Específica da extremidade de menor diâmetro da secção;

$V_{secção}$ = Volume da secção analisada;

V_{total} = Volume total do tronco.

Dessa forma foram obtidos os valores da massa específica média ponderada para cada idade.

3.3 Obtenção da celulose *kraft*

Com os discos de madeira coletados das árvores nas alturas especificadas, foram preparados os cavacos para o processo de polpação.

Em um digestor rotativo de aço inoxidável, foram adicionados os cavacos de madeira e os produtos químicos. Estes eram compostos por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) em concentrações previamente determinadas, caracterizando assim o processo de polpação denominado *kraft*.

Sob condições específicas de condução, foram feitos os cozimentos das idades 10, 14, 16 e 20 anos com 5 repetições. As condições pré-estabelecidas de cozimento estão descritas na TABELA 1, simulando assim uma condição industrial.

<i>Kappa</i> objetivo	50
Fator <i>H</i>	850
Temperatura máxima	170°C
Álcali ativo	17%
Sulfidez	25%
Relação licor : madeira	4 : 1

As condições descritas foram padronizadas simulando uma condição industrial para que os resultados possam ser utilizados por planejadores florestais nas fábricas de celulose e papel.

Com os cozimentos efetuados, a celulose obtida foi lavada, desfibrada, depurada (retirada de aglomerados de fibras não deslignificados totalmente) e posteriormente refinada. O tempo de refinação utilizado foi de 20 minutos em moinho do tipo *Jokro*, para confecção das folhas de papel. Esse tempo foi determinado para simular a energia de refinação aplicada em processos industriais de fabricação de papéis para embalagens.

Como medida de controle da deslignificação no processo de polpação, foi determinado o número *kappa*. Este foi obtido através da oxidação da lignina residual com permanganato de potássio (KMnO_4) em solução acidificada, seguindo as normas estabelecidas pela TAPPI T236 cm-85.

3.4 Confecção do papel e testes

Com a celulose refinada foi feita uma suspensão de fibras, com 0,26% de consistência, para a formação das folhas de papel e determinação da resistência à drenagem através do aparelho *Shopper-Riegler*, seguindo a norma ABNT 14031, após um tempo de refinação de 20 minutos em moinho *Jokro* a 150 rpm.

As folhas foram formadas em um formador do tipo *koethen rapid* com gramatura objetivo de 80 g/m².

O material obtido foi acondicionado em câmara climatizada a uma temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e $50 \pm 2\%$ de umidade relativa.

Após a climatização das folhas de papel, foram realizados os testes físicos e mecânicos. As propriedades avaliadas foram:

- Gramatura

Foi obtida dividindo-se o peso da folha, medido em balança de precisão, pela área da mesma. Foram utilizadas várias folhas para obtenção do valor médio. O valor é expresso em gramas por metro quadrado.

- Resistência à tração e alongamento

São medidas correlatas, realizadas simultaneamente em um mesmo aparelho, o dinamômetro. As tiras de papel foram tracionadas e forneceram os valores das duas primeiras propriedades em quilograma-força e milímetros, respectivamente.

A transformação da resistência à tração de quilograma-força para quilonewtons por metro foi feita multiplicando-se o valor por 9,807.

- Absorção de energia de tensão (TEA)

Foi determinada em um aparelho que utiliza o mesmo princípio do dinamômetro, levando em consideração a energia absorvida pela tira de papel desde a carga zero até sua carga de ruptura.

É expressa em Joule por metro quadrado.

- Resistência ao arrebentamento

Foi utilizado um aparelho *Müllen* e os valores foram obtidos em quilopascal. Posteriormente foram transformados no fator de arrebentamento através da relação demonstrada na EQUAÇÃO N°3:

$$Fa = \frac{(C / 98,1) \times 1000}{G} \quad \text{EQUAÇÃO N°3}$$

Onde: Fa = Fator de arrebentamento;

C = Carga de ruptura (kPa);

G = Gramatura (g.m^{-2}).

- Resistência ao rasgo

Para a determinação da resistência ao rasgo foi utilizado um aparelho *Elmendorf*, cujos resultados foram obtidos em grama-força e posteriormente transformados no fator de rasgo através da relação demonstrada na EQUAÇÃO N°4:

$$Fr = \frac{(Cx100)}{G} \quad \text{EQUAÇÃO N}^\circ 4$$

Onde: Fr = Fator de rasgo;

C = Carga de ruptura (g);

G = Gramatura (g.m^{-2}).

- Alvura

Foi determinada em um aparelho para medição de alvura ISO e os valores reportados em %.

- Permeância ao ar

Foi determinada em um porosímetro *Gurley* e os valores são referentes ao tempo em que uma coluna de ar de 200 cm^3 leva para atravessar a folha de papel.

Esse tempo é medido em segundos.

Todas os testes foram realizados com equipamentos específicos para cada finalidade, seguindo as normas descritas pela ABTCP.

3.5 Consumo específico

A quantidade de madeira necessária para se produzir uma tonelada de celulose seca foi determinada utilizando os valores de massa específica e rendimento.

Para se determinar o peso, em quilogramas de madeira seca, necessário para a produção de uma tonelada de celulose *kraft*, dividiu-se 1000 quilogramas pelo rendimento em cada idade. Dessa forma, obtêm-se a quantidade requerida para a produção de uma tonelada de celulose.

O cálculo do volume (em metros cúbicos) de madeira verde, necessário para a produção de uma tonelada de celulose *kraft*, foi feito dividindo-se a quantidade de madeira seca pela massa específica.

A obtenção da quantidade de madeira verde (em quilogramas) foi feita dividindo-se a quantidade de madeira seca por um fator de conversão de peso úmido para peso seco. Esse fator é facilmente obtido através da divisão do peso seco pelo peso úmido da mesma amostra de madeira.

Essa última variável é de grande importância para procedimentos industriais, pois o controle da quantidade de madeira que chega às indústrias é feito pelo método de pesagem da carga contida nos caminhões.

O conhecimento dessa variável permite até o dimensionamento de pátios de estocagem em função da produção diária e da quantidade de estoque desejada.

3.6 Crescimento das árvores

O perfil do comportamento de crescimento das árvores foi obtido através de medições de parcelas permanentes ao longo dos anos. Os valores obtidos representam os valores médios de plantios da região de coleta do material de pesquisa.

As variáveis utilizadas para essa caracterização foram o volume comercial com casca, em metros cúbicos por hectare, o incremento corrente anual (ICA) e o incremento médio anual (IMA), ambos em metros cúbicos por hectare por ano. Todos os valores foram obtidos nas diferentes idades de estudo.

A obtenção dos valores do volume comercial médio com casca foi feita através do inventário de florestas, onde os valores de volume, provenientes de diferentes bitolas comerciais, foram somados para constituição do volume comercial médio com casca por hectare.

O incremento corrente anual (ICA) é a variável que expressa o acréscimo no volume de lenho do povoamento a cada ano. É expresso em metros cúbicos por hectare por ano.

Já o incremento médio anual (IMA) permite a verificação da quantidade média de madeira, em volume, que cresce no povoamento por ano. É uma média dos anos anteriores de crescimento, sendo expressa em metros cúbicos por hectare por ano.

Com base nesses dados, foi calculada a produção média de celulose, em toneladas por ano, para a região de estudo. Foi utilizado para isso o volume comercial sem casca e o consumo específico.

Além dessa variável, também foi calculado o incremento médio anual de celulose e o incremento corrente anual de celulose, ambos em toneladas por ano.

Como as curvas do ICA e IMA de madeira fornecem parâmetros para a determinação do ponto de máxima produtividade de madeira, as mesmas variáveis, quando feitas para a produção de celulose, fornecem a obtenção do ponto de máxima produção de celulose.

3.7 Evolução dos custos florestais

Para a determinação do recurso monetário alocado para o plantio e condução de uma floresta plantada foram consideradas as seguintes informações:

- preparo do solo;
- plantio e replantio;
- combate a formiga;
- construção de cercas;
- manutenção;
- custos de torre e vigilância;
- controle da vespa-da-madeira;
- custos indiretos;
- custos administrativos.

Os valores foram obtidos através da planilha de custos da empresa Klabin S.A. e utilizados para a construção de um gráfico ao longo dos anos.

Como os gastos ocorrem em diferentes anos, foi calculado o valor presente para os diferentes anos. Para isso foi utilizada uma taxa de 12% de juro ao ano.

Os dados são apresentados na forma relativa – ou seja, o custo final corresponde a 100% do valor. Os demais valores são proporcionais ao valor máximo.

Essa mesma metodologia de apresentação dos resultados foi utilizada para calcular o custo médio de uma tonelada de celulose, onde se dividiu o custo total da atividade, na idade determinada, pela produtividade de celulose.

3.8 Análise estatística

Todas as análises comparativas entre os valores médios obtidos, nas diversas propriedades estudadas, foram feitas utilizando-se o Delineamento Inteiramente Casualizado.

Na massa específica básica ao longo do fuste as diferentes alturas foram consideradas como tratamentos. Em todas as demais variáveis, as idades foram consideradas como tratamentos.

O número de repetições variou em cada propriedade, uma vez que para algumas propriedades específicas, como teor de rejeitos ou consumo específico, foi utilizado o valor médio das variáveis envolvidas, caracterizando como apenas uma repetição, enquanto para outras, como a resistência do papel ao esforço de tração, foram feitas 15 repetições.

Tais valores foram interpretados estatisticamente por análise de variância, e a comparação entre os tratamentos foi feita pelo teste F a 95% de probabilidade, pelo programa *STATISTICA*[®].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características dendrométricas das árvores

As árvores coletadas apresentaram os valores médios de altura total, altura comercial e DAP (diâmetro à altura do peito) dispostos na TABELA 2:

TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DAS CARACTERÍSTICAS DAS ÁRVORES EM RELAÇÃO ÀS IDADES

Idades	10 anos	14 anos	16 anos	20 anos
DAP (cm)	20,0	23,7	24,2	26,5
Altura comercial (m)	9,8	15,8	18,2	19,7
Altura total (m)	14,1	21,0	23,3	24,1

As três variáveis citadas apresentam valores crescentes em relação às idades, apresentando uma progressão uniforme dos valores. Isso denota que o crescimento das árvores acontece com certa uniformidade em relação aos anos, diminuindo o incremento com o aumento da idade. Essa diminuição do incremento reflete a baixa do ritmo de crescimento com idade de 20 anos.

Não há diferença estatisticamente significativa entre os valores de DAP (Anexo 1 – A1.01). Para a altura comercial existe diferença estatisticamente significativa entre a idade 10 e todas as demais, assim como entre 14 e 20 anos. As demais não apresentam essa diferença (Anexo 1 – A1.02). Já a altura total apresenta diferença entre quase todas as idades, exceto entre 16 e 20 anos (Anexo 1 - A1.03). Todas as diferenças mencionadas são baseadas no Teste de Tukey com 95% de probabilidade.

Os valores de altura total estão em conformidade com os obtidos por KLOCK (2000, p. 154) para *Pinus taeda L.* plantado na região de Ventania, norte do Estado do Paraná em árvores de 11 anos. Os valores de DAP e altura comercial estão abaixo das médias descritas para tal região, que são de 28,01 cm e 14,96 metros respectivamente. Essa diferença pode ser associada ao ritmo de crescimento imposto pelo clima, onde climas mais amenos propiciam um melhor desenvolvimento das árvores.

Quando analisados os diâmetros ao longo do fuste, nas diferentes idades, têm-se os valores médios da TABELA 3.

TABELA 3 – COMPORTAMENTO MÉDIO DOS DIÂMETROS COM E SEM CASCA AO LONGO DO FUSTE NAS DIFERENTES IDADES

	10 anos		14 anos		16 anos		20 anos	
	c/ casca	s/ casca	c/ casca	s/ casca	c/ casca	s/ casca	c/ casca	s/ casca
0% Hc*	26,0	22,8	29,1	25,9	29,3	26,5	32,9	29,3
1,30 m	20,0	18,0	23,7	21,6	24,2	22,2	26,5	24,3
25% Hc*	18,5	17,0	20,6	19,3	21,0	20,0	22,6	21,3
50 % Hc*	15,4	14,5	17,2	16,3	18,4	17,6	19,3	18,5
75% Hc*	12,3	11,6	13,3	12,6	14,4	13,8	14,9	14,2
Hc*	7,9	7,4	8,3	7,8	8,2	7,7	8,1	7,6
Rc% **	84,13		86,61		88,43		87,35	

* Hc = altura comercial (altura do fuste onde o diâmetro atinge 8 cm)

** Rendimento médio, em volume, decorrente da retirada das cascas (%)

A distribuição dos valores de diâmetro com e sem casca apresenta um comportamento similar entre as diferentes idades, diminuindo a proporção de casca à medida que aumenta a altura. Todos esses valores não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si, tanto nos diâmetros com casca como nos diâmetros sem casca (ANEXO 1 - A1.04 A A1.15).

A diminuição da quantidade de casca com o aumento da altura é uma característica esperada para espécies arbóreas. Porém, sua quantificação fornece subsídios para o cálculo da quantidade de madeira que será destinada ao processo de polpação, pois esse processo requer a retirada da casca das toras para o processo de polpação de qualidade.

O rendimento médio, em volume, decorrente da retirada das cascas, apresentou leve decréscimo na idade 20 anos. Isso demonstra que nessa fase o acréscimo volumétrico médio de casca é maior que o acréscimo volumétrico médio de madeira. A diferença entre tais valores é estatisticamente significativa apenas entre as idades 10 e 16, e 10 e 20 anos de idade (ANEXO 1, - A1.16).

Diferenças ambientais ou locais podem levar a essa diferenciação no comportamento de crescimento das cascas das árvores, isso porque a casca é um tecido de proteção da árvore. Na situação descrita, para *Pinus taeda L.* plantado na região de estudo, o incremento máximo em volume foi atingido aos 18 anos, diminuindo a partir de então. Já o incremento da quantidade de casca não diminuiu na mesma proporção que o incremento da madeira.

A ilustração desses valores encontra-se nos GRÁFICOS 1 a 4.

GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS MÉDIOS NA IDADE 10 ANOS

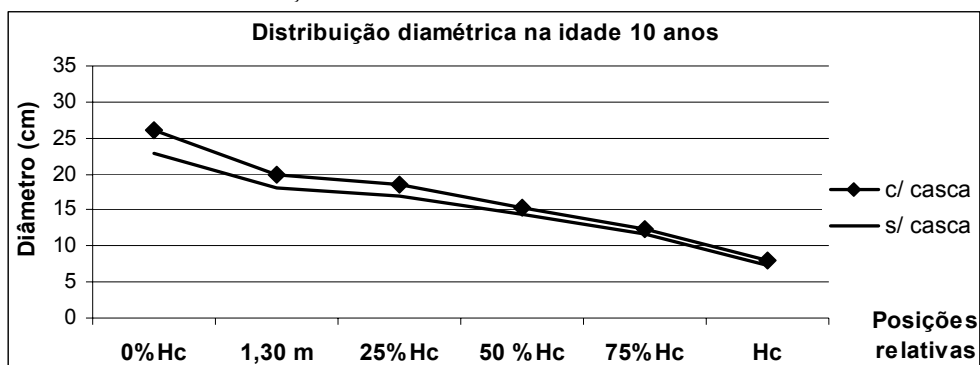


GRÁFICO 2 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS MÉDIOS NA IDADE 14 ANOS

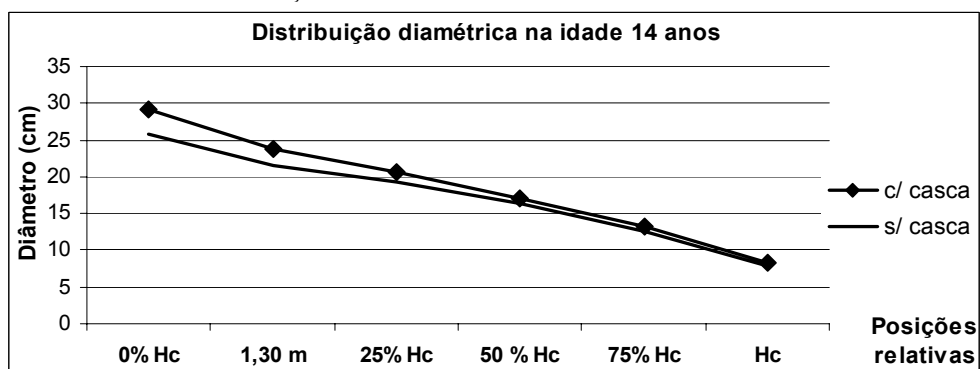


GRÁFICO 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS MÉDIOS NA IDADE 16 ANOS

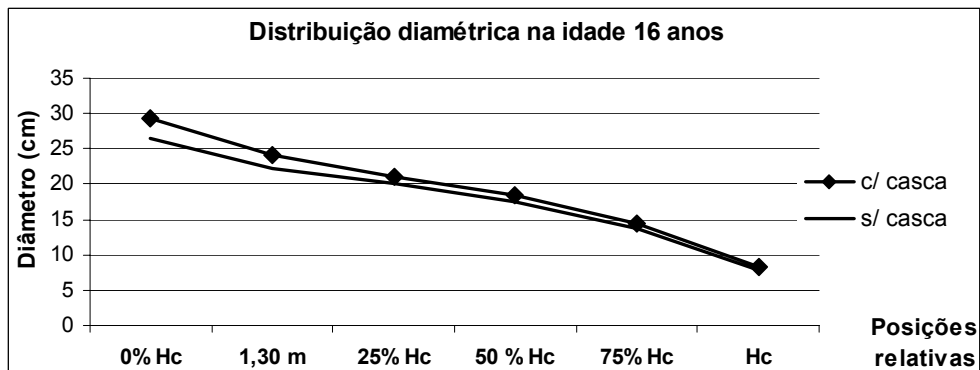
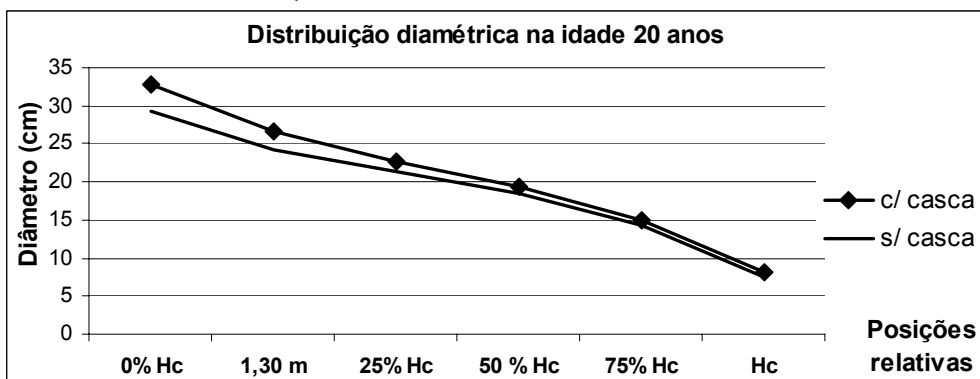


GRÁFICO 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS MÉDIOS NA IDADE 20 ANOS



4.2 Massa específica básica da madeira

O comportamento médio da massa específica básica ao longo do fuste, nas quatro idades estudadas, seguiu a tendência apresentada na TABELA 4.

TABELA 4 – COMPORTAMENTO MÉDIO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA AO LONGO DO FUSTE (VALORES EM KG.M³)

Posição	Idades			
	10 anos	14 anos	16 anos	20 anos
Base (0% Hc*)	369	397	416	406
1,30 metros	373	396	414	407
25% Hc*	352	359	379	379
50% Hc*	330	350	368	381
75% Hc*	322	349	361	372
Hc*	326	348	353	356

* Hc = altura comercial (altura do fuste onde o diâmetro atinge 8 cm)

Para as quatro idades os valores médios da massa específica básica apresentaram comportamento semelhante, diminuindo à medida que aumenta a altura na árvore, como afirmam os autores TSOUMIS (1991, p. 118), KLOCK (2000, p. 197) e HASSEGAWA (2003, p. 67).

Em geral, a massa específica aumentou com a idade, exceto no primeiro terço das árvores com 20 anos, onde os valores assumiram um comportamento anômalo.

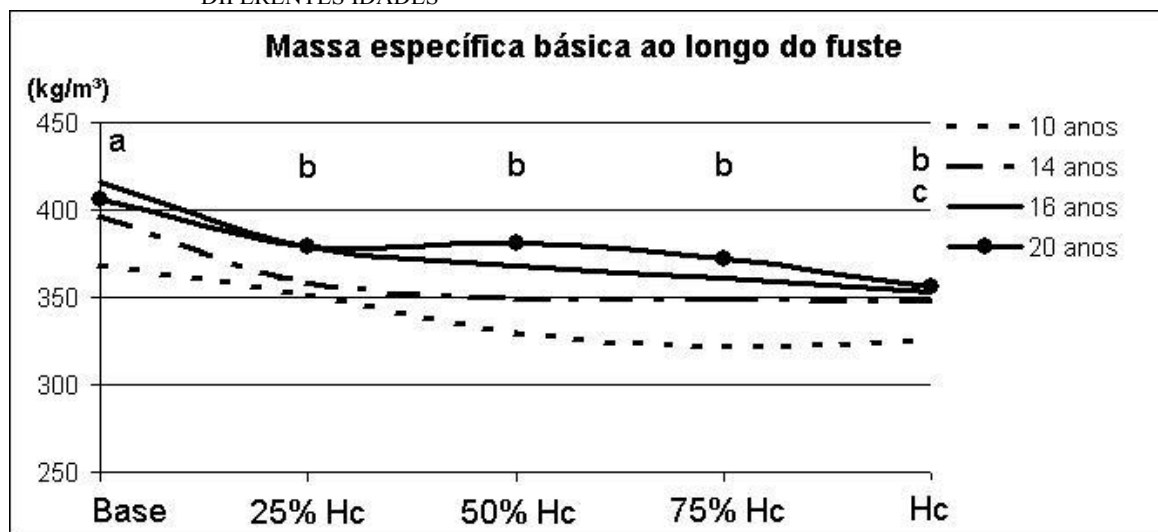
Em relação à idade, os valores de massa específica básica apresentaram diferença estatística significativa entre quase todas as idades, exceto entre 16 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.18).

A altura também exerceu efeito diferencial na massa específica básica. As diferenças estatisticamente significativas (ANEXO 1 - A1.19) são ilustradas no GRÁFICO 5, através de letras diferentes alocadas junto às curvas da massa específica.

A interação entre a idade e as diferentes alturas, para a massa específica básica, não foi significativa (ANEXO 1 - A1.17).

O comportamento dessas variáveis, em relação aos aspectos acima citados, pode ser observado no GRÁFICO 5.

GRÁFICO 5 – COMPORTAMENTO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA AO LONGO DO FUSTE EM DIFERENTES IDADES



NOTA 1: AS LETRAS IGUAIS REPRESENTAM VALORES SEM DIFERENÇA ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVA (95% DE PROBABILIDADE), ENQUANTO AS LETRAS DIFERENTES ILUSTRAM OS VALORES QUE DIFEREM ESTATISTICAMENTE.

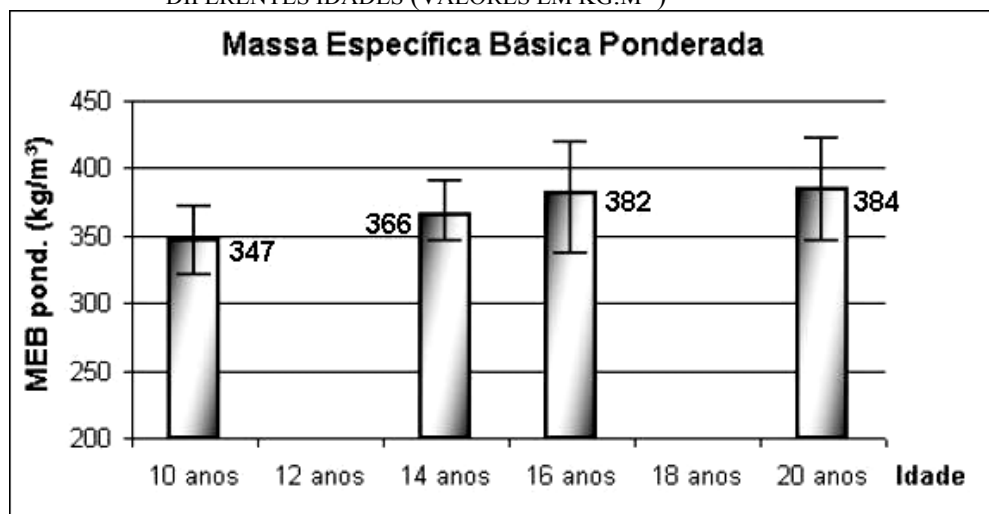
NOTA 2: HC = ALTURA COMERCIAL (ALTURA ONDE O DIÂMETRO É IGUAL A 8 CENTÍMETROS)

O comportamento diferenciado na base das árvores pode ser atribuído à eventual presença de lenho de compressão, ou ainda pela influência do sítio, como afirmam os autores BROWN, PANSIN e FORSAITH (1952, p. 19), KOLLMANN e CÔTÉ (1968, p. 171) e TSOUMIS (1991, p. 120).

Os valores de massa específica básica apresentados por KLOCK (2000, p. 159), para *Pinus taeda* L. e *P. maximinoi* plantados na região de Ventania - Paraná, foram superiores aos determinados nessa pesquisa. Esse trabalho foi desenvolvido com material proveniente de regiões diferentes, alterando o clima e características inerentes à espécie e procedência das sementes.

Ao ponderar a massa específica básica nas idades de estudo, pode-se verificar uma diferença nos valores que segue uma tendência uniforme e esperada, como citam os autores BROWN, PANSIN e FORSAITH (1952, p. 17), KOLLMANN e CÔTÉ (1968, p. 171) e TSOUMIS (1991, p. 118), devido a fatores como cernificação, aumento da quantidade de lenho tardio, proporção de madeira adulta, diferenças inerentes à idade e variação na espessura da parede celular. Tais valores são apresentados no GRÁFICO 6.

GRÁFICO 6 – COMPORTAMENTO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA PONDERADA EM DIFERENTES IDADES (VALORES EM KG.M^{-3})



A diferença estatística, a 95% de probabilidade, entre os valores ponderados ocorre entre as idades 10 e 16, e 10 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.20).

A apresentação dos valores na forma ponderada, em relação ao volume, além de aproximar à realidade de processos industriais contínuos, onde a matéria-prima não é separada para manter a viabilidade operacional, possibilita a comparação com diversos estudos relacionados ao processo de polpação. Isso ocorre porque muitos autores aperfeiçoam ou desenvolvem novas metodologias de produção de polpa celulósica com material disponível nos pátios das indústrias. Como tal material não possui caracterização prévia, a massa específica é realizada com a mistura de materiais provenientes de várias fontes. Além disso, essa variável é de fácil obtenção e permite a predição de características da polpação e do papel feito com esse material.

Tais valores ponderados vão de encontro com o apresentado por KLOCK et al (2001, p. 38 e 2002, p. 5) para *Pinus taeda* L. plantado na região do Planalto Catarinense, com 21 e 25 anos de idade. Tais árvores apresentaram a massa específica básica média de 394 e 413 kg.m^{-3} , respectivamente. Assim também foi o comportamento dos resultados obtidos por HASSEGAWA (2003, p. 67) para *Pinus taeda* L. plantado na região do Planalto Catarinense. Seus estudos determinaram uma massa específica básica média de 393 kg.m^{-3} para a idade de 25 anos.

FOEKEL (1976, p. 57) obteve resultados similares aos obtidos nesse estudo, em árvores de *P. taeda* plantadas na região de Lages.

MENDONÇA (1982, p. 45) ao estudar a madeira de *Pinus elliottii*, plantada no sudoeste do estado de São Paulo encontrou valores cerca de 20% maiores.

WRIGHT et al (1993, P. 39), pesquisando *Pinus maximinoi* plantados em diferentes sítios na África do Sul, obteve valores médios de massa específica de 495 kg.m⁻³. Essa diferença pode ser atribuída às condições geográficas, climáticas e inerentes à espécie.

Os valores médios, obtidos por autores que utilizaram material de mesma espécie e plantados na mesma região, seguem a tendência apresentada no GRÁFICO 6, denotando uma conformidade para uma mesma região, enquanto árvores que crescem em outras regiões apresentam comportamento diferenciado – geralmente maior por crescerem em climas mais amenos.

4.3 Variáveis relacionadas à polpação

As variáveis de rendimento, teor de rejeitos e número *kappa* foram determinadas para as diferentes idades, e seus valores são apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 – VARIÁVEIS RELACIONADAS À POLPAÇÃO

Idade	Rendimento (%)	Teor de rejeitos (%)	Nº <i>kappa</i>
10 anos	47,1	2,1	43,5
14 anos	49,8	6,5	49,8
16 anos	51,4	7,3	50,5
20 anos	53,2	11,5	52,9

As três variáveis apresentadas na TABELA 5 estão diretamente interligadas, pois representam as características do material obtido na polpação.

O rendimento apresentou tendência crescente com o aumento da idade, recebendo maior influência da porcentagem de lenho tardio e, conseqüentemente, da densidade, como afirma IPT (1998, p. 197). Tal diferença não é estatisticamente significativa apenas entre as idades 14 e 16 anos (ANEXO 1 - A1.21). Uma provável explicação para esse fato é a proximidade das duas idades.

Esses valores de rendimento estão em conformidade com o esperado para celulose de *Pinus* sp. obtida pelo processo *kraft*, apresentando médias compatíveis

com os trabalhos de FOEKEL (1976, p. 59), MENDONÇA (1982, p. 80), WRIGHT et al (1993, p. 39), KLOCK (2000, p. 248) e HASSEGAWA (2003, p. 67) em condições semelhantes de cozimento.

Ao testar cavacos de *Pinus* sp., sem idade definida, na produção de celulose *kraft*, para um número *kappa* objetivo de 40, MIRANDA (2001, p. 3) obteve um rendimento médio de 50%.

Segundo MIRANDA et al. (2001, p. 1) o rendimento é um dos principais parâmetros de avaliação da eficiência do processo, por estar diretamente relacionado aos custos de produção de celulose. Isso se justifica basicamente pelo fato de que a madeira é o principal componente do custo.

O teor de rejeitos aumentou em relação à idade, mostrando que a dificuldade de deslignificação é maior em madeiras de maior massa específica, como afirma IPT (1998, p. 197).

KLOCK (2000, p. 248) obteve valores inferiores do teor de rejeito para *P. taeda* em um *fator H* de 1150. A diminuição do teor de rejeito é o reflexo direto do aumento do poder de deslignificação, expresso pelo *fator H*.

Ao testar *P. elliottii*, MENDONÇA (1982, p. 80) obteve valores maiores para o teor de rejeitos. Esse comportamento pode ser associado à espécie empregada.

A elevação do teor de rejeitos pode provocar uma sobrecarga no sistema de depuração, criando um gargalo no processo de produção de celulose (MIRANDA, 2001, p. 4).

Os valores de número *kappa* também apresentaram uma tendência de crescimento em relação à idade. Isso confirma o comportamento das outras variáveis relacionadas à polpação, pois representa a lignina residual na polpa celulósica.

Alguns autores como MENDONÇA (1982, p. 80), KLOCK (2000, p. 248), WRIGHT et al (1992, p. 40; 1993, p. 39) obtiveram valores de número *kappa* menores, porém com cozimentos conduzidos sob condições mais drásticas de deslignificação.

A análise das variáveis rendimento, teor de rejeitos e número *kappa* deve ser feita sempre de forma integrada, pois alterações nas condições de cozimento alteram

as três variáveis. Essa afirmativa é confirmada por WRIGHT et al (1996, p. 188), onde quatro espécies de *Pinus* com oito anos de idade foram testadas, sob diferentes concentrações de álcali ativo, originando diversos rendimentos e números *kappa*. Os valores encontrados pelo mesmo são proporcionais aos obtidos nesse estudo.

As características do processo de polpação, como álcali ativo, sulfidez e *fator H* exercem influência dominante sobre o processo, quando comparadas com as características da matéria-prima empregada. Portanto, direcionamentos podem ser feitos tanto no processo quanto na matéria-prima empregada, dependendo do material que se deseja obter.

4.4 Propriedades do papel

A medida de controle da drenabilidade da polpa produzida seguiu o comportamento expresso na TABELA 7.

TABELA 7 – DRENABILIDADE DA CELULOSE *KRAFT* (EM °SR) NAS DIFERENTES IDADES DE ESTUDO

	Idades			
	10 anos	14 anos	16 anos	20 anos
°SR	17,0	15,0	15,5	15,0

Os valores representados demonstram que a drenabilidade, para a polpa celulósica produzida com madeira proveniente de árvores de diferentes idades, é similar entre as idades, sendo menor apenas aos 10 anos. Esse comportamento foi influenciado principalmente pela maior quantidade de fibras de paredes finas, encontradas na madeira juvenil.

Ao utilizar cavacos industriais de *Pinus*, sem idade definida, para obtenção de celulose *kraft* a um número *kappa* médio de 50, MIRANDA et al. (2001, p. 6) constataram valores de drenabilidade de 15°SR para um tempo de refinação de 20 minutos.

A distribuição dos valores de drenabilidade, encontrados nesse estudo, demonstram uma similaridade do desenvolvimento da refinação com polpas obtidas em outros estudos.

As principais propriedades de resistência do papel, determinadas nos testes físicos e mecânicos das folhas confeccionadas à mão, apresentaram o comportamento descrito na TABELA 8.

TABELA 8 – PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA DO PAPEL NAS DIFERENTES IDADES DE ESTUDO

Propriedade	Idade			
	10 anos	14 anos	16 anos	20 anos
Gramatura (g.cm ²)	80	79	81	79
Índice de tração (N.m.g ⁻¹)	47,0	47,1	46,9	46,3
Alogamento (%)	3,7	3,1	2,8	2,4
TEA (J.m ²)	118	99	90	72
Índice de arrebatamento (kPa.m ² .g ⁻¹)	4,0	3,6	3,2	3,2
Índice de rasgo (Nm ² .kg ⁻¹)	20	23	24	30
Alvura (%)	22,2	21,6	20,9	20,4
Permeância ao ar - 200 cm ³ (s)	3,3	1,4	0,9	0,7

A gramatura das folhas confeccionadas (situada próximo aos 80 g.cm⁻²) foi semelhante para as idades estudadas, demonstrando que não há perda diferenciada de fibras ou finos em nenhuma das idades. Essa uniformidade facilita a comparação entre as propriedades do papel nas diferentes idades.

Algumas propriedades são passíveis de comparação com outros estudos, mesmo sob outras gramaturas, na forma de índices, como arrebatamento, tração e rasgo. Devido a esse fato, tais propriedades são as mais utilizadas para caracterizar materiais testados laboratorialmente.

A resistência dos papéis produzidos ao esforço de tração foi influenciada de forma negativa com o aumento da idade. O material proveniente de madeira mais velha (com maior quantidade de madeira adulta) apresentou menores valores de resistência. Isso ocorre, segundo IPT (1998, p. 180), devido à maior deslignificação da madeira juvenil, levando a um maior grau de ligação entre fibras.

Apesar da tendência de decréscimo da propriedade citada com o aumento da idade, os valores não apresentam diferença estatística significativa (ANEXO 1 - A1.22).

Os valores do índice de tração ainda podem ser modificados com a refinação, onde o emprego de maiores energias de refinação leva a um aumento de resistência, pois aumenta o número de ligações entre as fibras.

MIRANDA et al. (2001, p. 7), em seu estudo com cavacos de *Pinus* sp. sem idade definida, encontraram valores similares aos desse estudo, diferenciando de

KLOCK (2000, p. 298) que obteve valores superiores com polpas para um mesmo grau de refinação.

O comportamento do alongamento do papel demonstrou uma tendência de decréscimo dos valores com o aumento da idade. Essa diferença não é estatisticamente significativa apenas entre as idades 14 e 16 anos (ANEXO 1 - A1.23).

WRIGHT (1993, p. 39) obteve valores de alongamento similares aos descritos, porém utilizando *Pinus maximinoi* na África do Sul.

Esse comportamento indica que uma quantidade maior de madeira adulta confere ao papel uma característica mais elástica, deformando mais quando o papel está sujeito a uma carga semelhante.

A propriedade de absorção de energia de tensão (TEA) apresentou valores decrescentes com o aumento da idade, mostrando uma absorção maior de energia, antes do rompimento, quando se tem uma maior quantidade de madeira juvenil. Essa diferença é estatisticamente significativa apenas entre as idades 10 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.24).

Esse comportamento ocorre devido ao maior entrelaçamento das fibras de madeira de menor idade, onde as paredes são mais delgadas e mais flexíveis.

O índice de arrebentamento apresentou um decréscimo com o aumento da idade, mostrando a influência positiva do aumento da quantidade de madeira juvenil. Isso proporciona um maior número de ligações interfibras e, conseqüentemente, uma maior resistência a essa propriedade.

Os valores apresentados estão em conformidade com os obtidos por MIRANDA et al.(2001, p. 7) para *Pinus* sp. plantado no Brasil. WRIGHT (1992, p. 41; 1993, p. 39) também apresenta valores próximos aos apresentados nesse trabalho, para papéis obtidos a partir de outras espécies de *Pinus* plantadas na África do Sul.

Os valores do índice de arrebentamento apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as idades 10 e 16, 10 e 20, 14 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.25).

Além disso, os valores desse índice sofrem influência direta do grau de refinação, aumentando com o acréscimo da energia de refinação.

O índice de rasgo apresentou resultados crescentes em relação à idade. Isso ocorreu pela influência da quantidade de fibras de paredes espessas na composição dos papéis. Assim, papéis constituídos com alta porcentagem de fibras provenientes de lenho tardio apresentam maior resistência ao corte. Tais valores ainda podem ser alterados com a mudança do tempo de refinação. Um aumento do mesmo levaria a um decréscimo dos valores obtidos, como afirmam e SANJUAN (1997, p. 256) e KLOCK (2000, p. 298).

MIRANDA et al. (2001, p. 8) em seu estudo obteve valores, para o índice de rasgo, próximos aos deste trabalho, diferentemente de WRIGHT (1992, p. 41; 1993, p. 39) que demonstrou valores menores para outras espécies de *Pinus*.

Os valores, quando analisados estatisticamente, apresentam diferença entre as idades 10 e 16, 10 e 20, 14 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.26).

A alvura das folhas produzidas apresentou leve decréscimo com o aumento da idade da madeira, sendo estatisticamente diferentes entre todas as idades (ANEXO 1 - A1.27). Essa tendência é esperada, pois o aumento do número *kappa* imprime coloração mais escura às polpas. Tais valores podem ainda diminuir com o aumento do tempo de refinação, como afirma SANJUAN (1997, p. 256).

A permeância ao ar nas folhas diminuiu com o aumento da idade. Isso ocorre devido a maior facilidade de colapso das fibras oriundas de madeira juvenil. Isso torna a constituição da folha de papel mais coesa, deixando uma quantidade menor de espaços abertos entre as fibras componentes da folha. A recíproca é verdadeira, onde uma porcentagem maior de madeira de maior idade torna a folha de papel mais permeável à passagem de fluidos.

Os valores obtidos demonstraram uma diferença estatisticamente significativa entre quase todas as idades, exceto entre 16 e 20 anos (ANEXO 1 - A1.27).

O aumento da energia de refinação também leva um aumento da resistência à passagem de fluidos, pois aumenta o número de microfibrilas com extremidades soltas, aptas a estabelecerem novas ligações eletrostáticas entre as fibras.

4.5 Consumo específico

A conversão de quantidade de madeira em celulose *kraft* pronta para uso pode ser observada na TABELA 6.

TABELA 6 – CONSUMO ESPECÍFICO PARA AS DIFERENTES IDADES DE ESTUDO

Consumo específico (para uma tonelada de celulose seca)			
Idade (anos)	m ³ de madeira verde	kg de madeira seca	kg de madeira verde
10	6,114	2.124	4.140
14	5,494	2.008	3.915
16	5,094	1.946	3.793
20	4,898	1.881	3.666

O comportamento observado no consumo específico segue a tendência esperada, onde é necessário maior quantidade de material jovem, em relação à quantidade de material de maior idade, para obtenção de uma tonelada de celulose.

Isso ocorre devido ao menor rendimento obtido quando se utilizam madeiras de menor idade e a maior massa específica das árvores de maiores idades, conforme afirma IPT (1998, p. 197).

Essa variável pode auxiliar na tomada de decisões quanto à logística de colheita florestal associada ao tipo de material necessário para fabricação de um produto com características pré-definidas. Permite ainda a definição do estoque (em toneladas ou metros cúbicos) necessário para a autonomia da fábrica por um período de tempo determinado.

Assim como o rendimento é uma função direta das características de polpação, o consumo específico pode ser alterado com modificações no processo de cozimento. Com condições mais severas de deslignificação, a demanda de madeira aumenta para todas as idades das árvores.

4.6 Crescimento das árvores

As principais variáveis de crescimento dos povoamentos florestais, nas idades estudadas, são apresentadas na TABELA 9.

TABELA 9 – VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO DOS POVOAMENTOS FLORESTAIS NAS DIFERENTES IDADES DE ESTUDO

	Idade (anos)							
	11	12	13	15	17	18	19	20
Volume comercial (m ³ cc/ha)	292,0	398,0	473,0	591,0	680,1	717,3	749,7	777,8
IMA (m ³ /ha/ano)	26,5	33,2	36,4	39,4	40,0	39,8	39,5	38,9
ICA (m ³ /ha/ano)		106,0	75,0	59,0	44,6	37,1	32,5	28,0
Produtividade celulose (t/ha)	41,5	58,4	71,8	97,6	118,6	126,3	133,1	138,8
IMA celulose (t/ha)	3,77	4,87	5,53	6,50	6,98	7,02	7,00	6,94
ICA celulose (t/ha)		17,0	13,4	12,9	10,5	7,7	6,7	5,7

Nota: o volume comercial está expresso em metros cúbicos com casca por hectare.

A tendência apresentada pelos valores do volume comercial denota um crescimento contínuo ao longo dos anos, porém, em um ritmo decrescente.

Esse comportamento é esperado com o passar dos anos, uma vez que os povoamentos florestais tendem a atingir um valor assintótico de volume quando estiverem em idade avançada.

O incremento médio anual da madeira apresentou seu máximo valor na idade 17 anos, definindo a auge da produção volumétrica nessa idade. Esse ponto define a rotação silvicultural. Esse tipo de rotação é denominado rotação de máximo incremento médio anual, rotação física ou ainda rotação técnica (SCOLFORO, 1997, P. 349).

Essa variável define o ponto mínimo de ociosidade do sítio, demonstrando que uma rotação com menos de 17 anos deixa de utilizar o máximo potencial produtivo do sítio em questão.

O incremento corrente anual, a partir da idade de 12 anos, apresenta um comportamento sempre decrescente. Isso reporta a diminuição do ritmo produtivo com o passar dos anos.

O ponto de cruzamento dessas duas curvas também fornece o ponto de máximo potencial produtivo do sítio. Quando se utiliza essa variável, a idade ótima de corte situa-se entre 17 e 18 anos. Dessa forma, a análise do ponto ótimo de corte, segundo o

potencial produtivo do sítio, pode ser feita utilizando apenas a curva de IMA ou as duas juntas.

A produtividade anual em celulose, por ser crescente com o aumento da idade, demonstra a potencialidade de produção de celulose em cada idade.

O incremento médio anual de celulose e o incremento corrente anual de celulose são novas ferramentas para a definição da idade ótima de corte – agora sob o ponto de vista da produção de celulose.

Segundo essas variáveis, o ponto ótimo de corte (ponto que maximiza a produção de celulose) ocorre entre as idades 18 e 19 anos.

4.7 Evolução dos custos florestais

Os custos envolvidos na atividade florestal, referentes ao plantio e manutenção do povoamento estão dispostos na TABELA 10.

TABELA 10 – CUSTOS RELATIVOS DE UM POVOAMENTO FLORESTAL

	Idade (anos)										
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Custo total	0,892	0,909	0,924	0,938	0,950	0,961	0,971	0,979	0,987	0,994	1,000
Custo médio	1,0	0,84	0,60	0,49	0,43	0,37	0,34	0,31	0,29	0,28	0,27

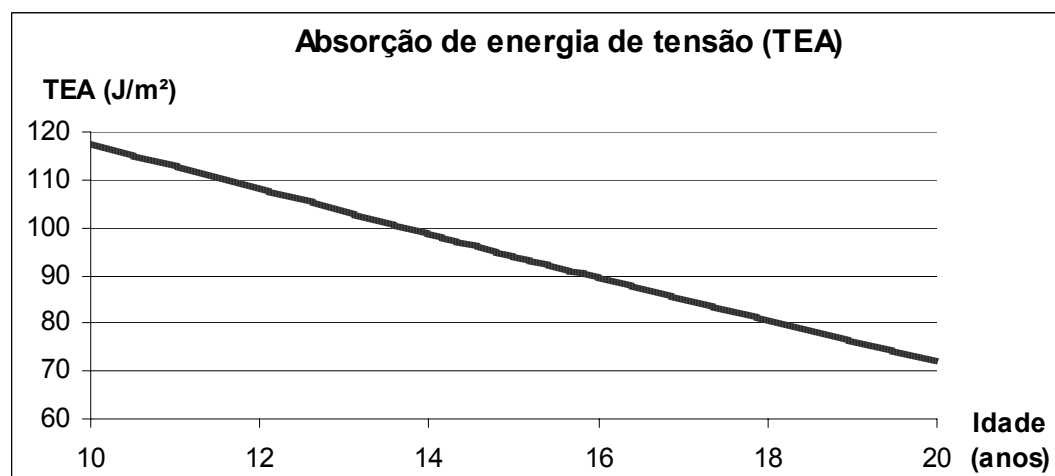
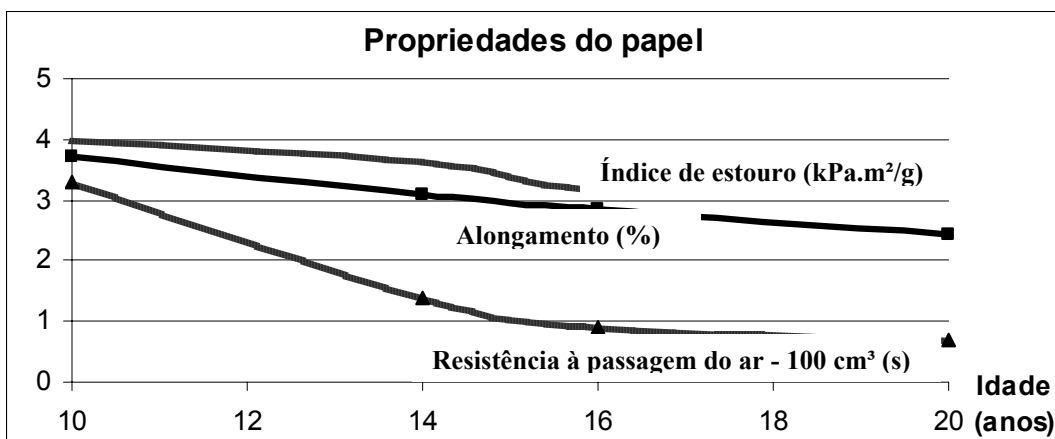
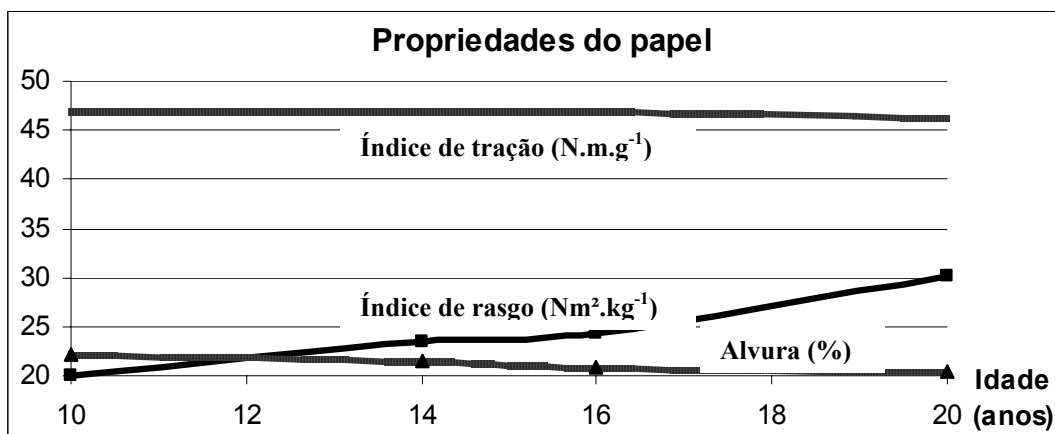
Nota: custo total = custo acumulado em valor presente a uma taxa de 12 % ao ano;
custo médio = custo médio para produção de uma tonelada de celulose.

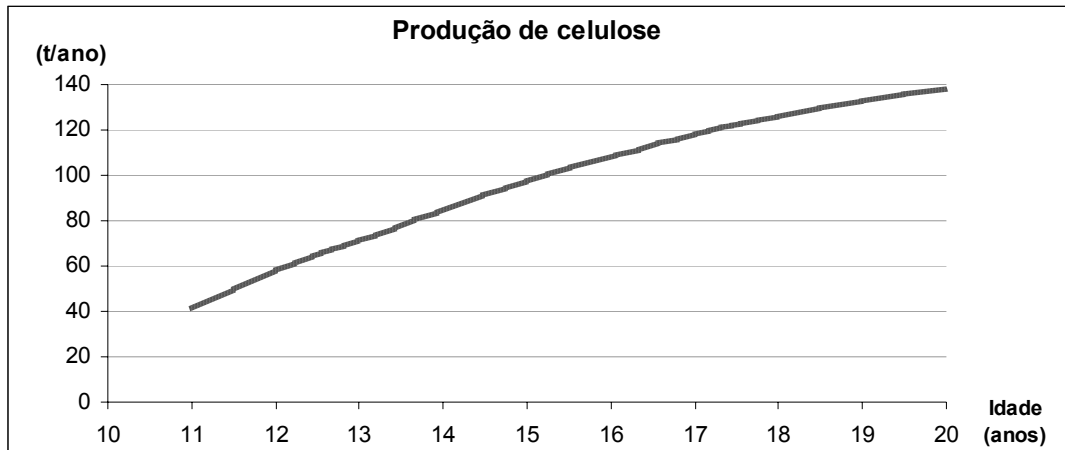
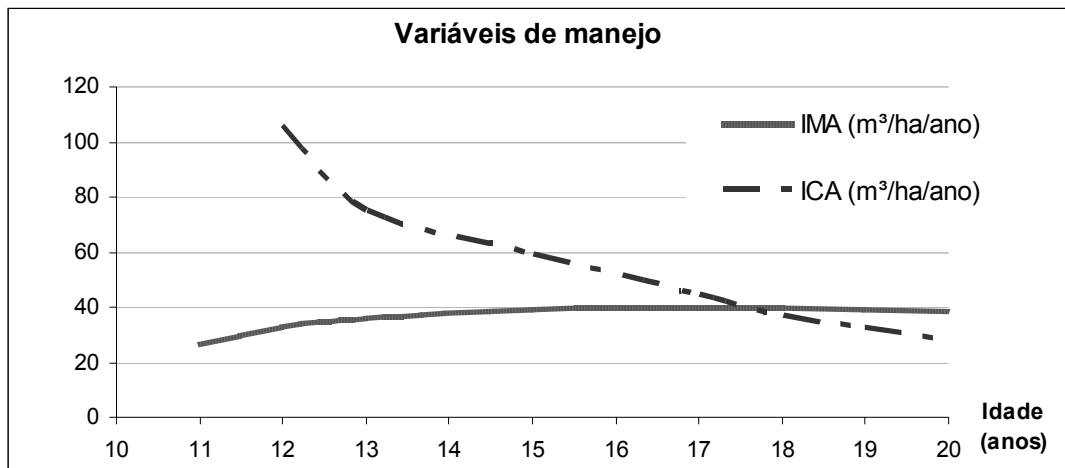
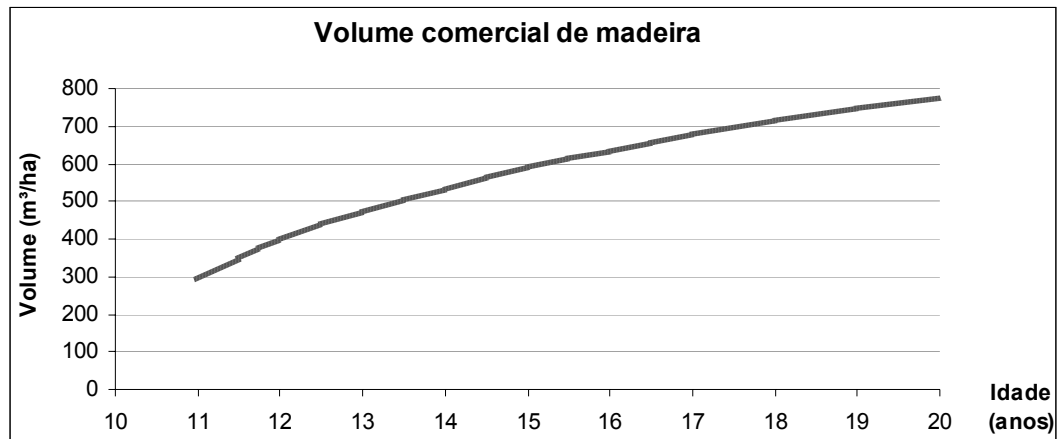
O custo total para a atividade de plantio e condução de um povoamento florestal apresentou pequena ascensão com o aumento da idade, quando em idade superior aos 10 anos. Esse comportamento permite afirmar que pequenas diferenças na idade de corte não aumentam o custo de forma tão expressiva. Como exemplo pode-se tomar a diferença do custo entre as idades de 14 e 20 anos, que é de 5%.

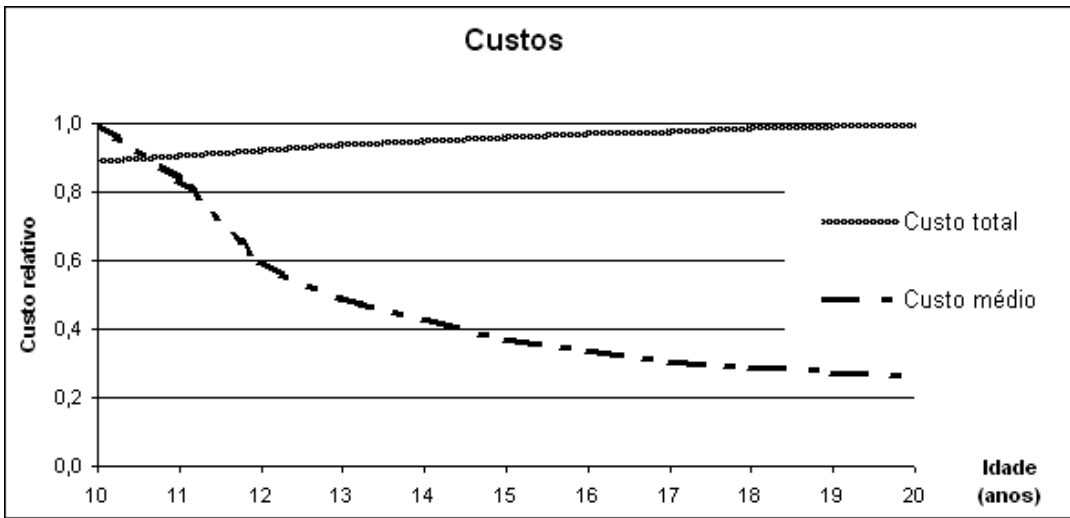
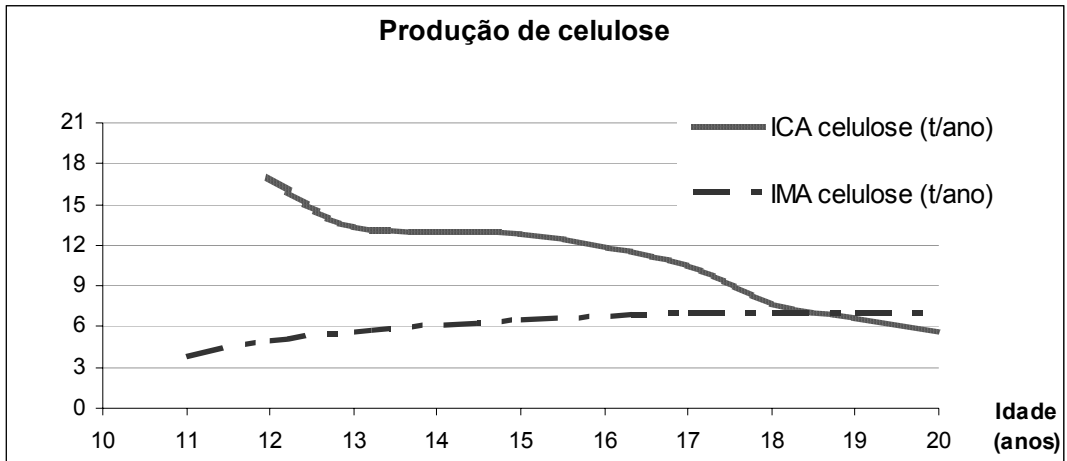
A afirmativa é confirmada pelo comportamento do custo médio, que não obteve seu ponto mínimo dentro do intervalo de idades estudado. Isso demonstra que o custo mínimo da madeira para a produção de uma tonelada de celulose é obtido quando se faz a colheita da madeira com uma idade de cerca de 22 anos.

O valor obtido de menor custo médio está em conformidade com o determinado por OLIVEIRA et al. (1998, p. 109) onde obteve um valor presente líquido máximo na idade de 22 anos, para uma taxa de juros de 12% ao ano.

Para uma comparação entre a evolução de cada uma das propriedades estudadas, estão aqui dispostos os gráficos comparativos:







5 CONCLUSÕES

1. O diâmetro das árvores apresentou um incremento em relação à idade. Esse incremento diminuiu com o passar do tempo, demonstrando o decréscimo do ritmo de crescimento aos 20 anos de idade. Isso é decorrente da chegada no ponto de máximo incremento em volume, atingido na idade de 18 anos.
2. O rendimento médio decorrente da retirada da casca aumentou nas árvores de maior idade, demonstrando que em árvores mais velhas têm-se uma maior quantidade de madeira.
3. Os valores médios da massa específica básica ao longo do fuste apresentaram uma tendência de decréscimo com a altura das árvores e de aumento em relação à idade. Porém, a interação entre as duas variáveis não foi estatisticamente significativa, mostrando a independência de expressividade das duas variáveis.
4. O rendimento de polpação, o teor de rejeitos e o número *kappa* aumentaram nas polpas produzidas com madeira de maior idade, demonstrando a maior dificuldade de deslignificação desse material.
5. Das propriedades estudadas de resistência do papel, apenas o rasgo apresentou tendência de acréscimo com a idade.
6. Os índices de arrebatamento, de tração, a permeância ao ar, a alvura, o esticamento e a absorção de energia tensora apresentaram um comportamento decrescente em relação à idade.
7. Associando as características do material empregado, com condições adequadas de deslignificação, potencializa-se o rendimento e obtém-se produtos com características definidas.
8. As curvas de crescimento das árvores demonstraram que, para o *Pinus taeda L.* plantado em sítios de média produtividade na região de Lages, com densidade inicial de plantio de 1333 mudas por hectare e sem desbastes, o ponto de máxima produtividade volumétrica é atingido entre as idades 17 e 18 anos.
9. Se a análise for baseada na quantidade de celulose produzida, com as mesmas características de deslignificação do presente estudo, o ponto de máxima produtividade de celulose ocorre entre as idades 18 e 19 anos.

10. Para o custo total de produção da madeira, observou-se que há pequena diferença entre as idades de 14 e 20 anos, crescendo 5% no custo total entre as duas idades.
11. Se o cálculo da otimização do custo da produção de celulose, em termos monetários, for baseado no custo médio por tonelada produzida, o ponto de mínimo custo encontra-se próximo aos 22 anos de idade.

Dessa maneira, o administrador florestal pode definir a idade ótima de colheita do plantio florestal para produção de celulose e papel de muitas maneiras. Pode-se maximizar o volume de madeira, ou o volume de celulose produzida, ou escolher o menor custo médio da tonelada de celulose. Porém, para um desempenho adequado do papel produzido, a evolução das características de resistência do papel devem receber grande atenção.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Pasta celulósica e papel**. São Paulo, 1998.

BODIG, J. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 712p.

BRACELPA. **Evolução histórica da produção de celulose**. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/Estatisticas/pasta/historico_celulose.htm> Acesso em: 10 jun. 2004.

BROWN, H. P.; PANSIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1952. v. 2. 652 p.

FOEKEL, C. E. B. Celulose kraft de Pinus spp. **O papel**. ABTCP: São Paulo, p. 49-67, jan. 1976.

Food and Agriculture Organization (FAO). **Ordenamento florestal**. Curitiba: UFPR, 1968. 114 p.

_____. **Pulp and paper capacities - 2001**. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/FOP/FOPW/paper/public-e.stm>> Acesso em: 26 ago. 2002.

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

HOSOKAWA, R. T. **Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 1998. 162 p.

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

_____. **Celulose e papel**. 2 ed. São Paulo: IPT, 1998. v. 2: tecnologia de fabricação da pasta celulósica.

JOHNSTON, D. R. et al. **Planeamento florestal**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbembkian, 1977. 798 p.

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

_____.; et al. **Massa específica básica e porcentagem de lenho tardio ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. estratos FL 088 Negrinha, FL 084 Rio Antinha e FL 068 Fazenda Cupim.** Curitiba: FUPEF, 2001. 74 p. Relatório técnico.

_____.; et al. Densidade básica da madeira ao longo do fuste e entre classes diamétricas de *Pinus taeda* L. **In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 8, 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2002. v.1. p. X - XX

KOLLMANN, F. P. K.; CÔTÉ Jr., W. A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1: solid wood. 592 p.

LIMA JR, V. B. et al. Os estágios de produção e a idade ótima de corte: diferença entre a teoria instantânea e a preferência temporal na produção florestal. **Revista Árvore.** Viçosa, MG. V. 23, n. 4, p. 393-401, 1999.

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

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. 9p.

OLIVEIRA, E. B. O. et al. Sistemas para simulação do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. e avaliação econômica de regimes de manejo. **Revista Árvore**, Viçosa, MG. V. 22, n. 1, p. 99-111, 1998.

REMADE. **A madeira de eucalipto na indústria moveleira.** Disponível em: <<http://www.remade.com.br/revista/70/ed70eucalipto.php>> Acesso em: 01 mai. 2004.

SANJUAN, D. R. **Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel.** Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 1997. 293 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, como otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.** Curitiba, 1990, 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

_____. **Manejo florestal.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 438 p.

SMOOK, G. A. **Manual para técnicos de pulpa y papel**. Vancouver: A. Wilde, 1990. 397 p.

SPEIDEL, G. **Economia florestal**. Curitiba, Paraná. UFPR, 1966. 167 p.

STATSOFT INCOME. **Statistica for Windows**. Tulsa, OK, 1995. 1 disquete (1,38 Mb); 3 ½ pol.

TAPPI. **TAPPI tests methods**. Atlanta, 1994.

THOROE, C. **Making money by planning**. 3^a IUFRO International Conference. Planning and Decision-Making for Forest Management in the Market Economy. Russia, Pushkino/Göttingen, 1997. 213 p.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood structure, properties, utilization**. New York: Chapman & Hall, 1991. 494 p.

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing: Principles and practice**. London: Chapman & Hall, 1993. 595 p.

WRIGHT, J. A. et al. Laboratory scale pulping of *Pinus pseudostrobus*, *P. maximinoi*, and *P. patula*. **IPEF International**, Piracicaba, n. 2, p. 39 – 44, 1992.

_____. Volume, pulp and paper-making traits of *Pinus maximinoi* provenances planted at two sites in South Africa. **Suid-Afrikaanse Bosboutydskrift**, n.165, p. 37 – 40, jun 1993.

_____. Laboratory kraft pulping of juvenile tropical pines: *Pinus patula*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi*, and *P. chiapensis*. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 79, n. 4, p. 187 – 191, 1996.

ANEXO 1 - Análises de variância e testes de tukey

A1.01 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de DAP nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	69,31847	34	25,2528	2,74498	0,058091

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	19,96111	23,67500	24,15000	26,53500
10 ANOS		0,387608	0,305881	0,035727
14 ANOS	0,387608		0,996925	0,586268
16 ANOS	0,305881	0,996925		0,731589
20 ANOS	0,035728	0,586268	0,73159	

A1.02 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de altura comercial nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	175,5661	34	4,174428	42,05753	1,5332 E-11

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	9,766666	15,78000	18,17778	19,66000
10 ANOS		0,000162	0,000161	0,000161
14 ANOS	0,000162		0,069408	0,000999
16 ANOS	0,000161	0,069408		0,403862
20 ANOS	0,000161	0,000999	0,403862	

A1.03 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de altura total nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	190,8964	34	1,9623954	97,27721	9,3068E-17

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	14,07778	20,97000	23,28889	24,12000
10 ANOS		0,000161	0,000161	0,000161
14 ANOS	0,000161		0,005348	0,000242
16 ANOS	0,000161	0,005348		0,574745
20 ANOS	0,000161	0,000242	0,574745	

A1.04 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca da base da árvore (0% da altura comercial) nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	74,8241653	34	37,3289108	2,004456	0,131843

A1.05 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca do DAP da árvore (1,30 metros) nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	69,3184662	34	25,2528057	2,744981	0,058091

A1.06 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca em 25% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	27,035368	34	20,0334053	1,349514	0,274703

A1.07 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca em 50% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	26,6554298	34	17,375721	1,534062	0,223408

A1.08 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca em 75% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	13,1124907	34	6,85700178	1,912278	0,14617

A1.09 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro com casca na altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	0,27436501	34	0,15272631	1,796449	0,166432

A1.10 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca da base da árvore (0% da altura comercial) nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	67,3089066	34	32,9450645	2,043065	0,126275

A1.11 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca do DAP da árvore (1,30 metros) nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	63,5849152	34	23,0499382	2,758572	0,057235

A1.12 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca em 25% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	30,5965252	34	18,7562656	1,631269	0,200323

A1.13 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca em 50% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	27,3109512	34	16,1452656	1,691576	0,187213

A1.14 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca em 75% da altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	13,4443855	34	6,54970598	2,05267	0,124927

A1.15 – Análise de variância para os valores médios de diâmetro sem casca na altura comercial da árvore nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	0,26896977	34	0,14248447	1,887713	0,150247

A1.16 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de rendimento decorrente da retirada de cascas nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	30,2556114	34	5,68240833	5,324435	0,004072

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	84,12956	86,61411	88,43437	87,35176
10 ANOS		0,12579685	0,0029316	0,02850854
14 ANOS	0,125797		0,3591014	0,89953858
16 ANOS	0,002932	0,35910141		0,75700343
20 ANOS	0,028509	0,89953858	0,7570034	

A1.17 – Análise de variância para os valores médios de massa específica básica ao longo do fuste nas diferentes idades de estudo e a interação entre ambas

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	17343,86	204	652,8359	26,56695	1,51E-14
5	19415,8	204	652,8359	29,7407	1,23E-22
15	342,779	204	652,8359	0,525062	0,924921

A1.18 – Teste de Tukey para os valores médios de massa específica básica nas diferentes idades de estudo

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	345,4861	366,5397	382,0547	383,5618
10 ANOS		7,19E-05	7,69E-06	7,69E-06
14 ANOS	7,19E-05		0,006631	0,001516
16 ANOS	7,69E-06	0,006631		0,989241
20 ANOS	7,69E-06	0,001516	0,989241	

A1.19 – Teste de Tukey para os valores médios de massa específica básica ao longo do fuste nas diferentes idades de estudo

	BASE	DAP	25% HC	50% HC	75% HC	HC
MÉDIAS	397,0659	397,2422	367,3403	357,5739	351,2232	346,0178
BASE		1	2,53E-05	2,01E-05	2,01E-05	2,01E-05
DAP	1		2,46E-05	2,01E-05	2,01E-05	2,01E-05
25% HC	2,53E-05	2,46E-05		0,55436	0,065902	0,003746
50% HC	2,01E-05	2,01E-05	0,55436		0,888188	0,358821
75% HC	2,01E-05	2,01E-05	0,065902	0,888188		0,949504
HC	2,01E-05	2,01E-05	0,003746	0,358821	0,949504	

A1.20 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de massa específica básica ponderada nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	2795,759	34	512,0737	5,459681	0,003574

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	347,4091	365,6281	381,9438	385,2431
10 ANOS		0,313574	0,013749	0,004864
14 ANOS	0,313574		0,409259	0,231651
16 ANOS	0,013749	0,409259		0,988814
20 ANOS	0,004864	0,231651	0,988814	

A1.21 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de rendimento do processo de polpação nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	33,39801	16	0,8959675	37,27591	1,8962E-07

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	47,08000	49,79600	51,39800	53,16800
10 ANOS		0,001847	0,000191	0,0001852
14 ANOS	0,001847		0,071078	0,0003674
16 ANOS	0,000191	0,071078		0,0416769
20 ANOS	0,000185	0,000367	0,041677	

A1.22 – Análise de variância para os valores médios do índice de tração do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	0,017333332	16	0,0825	0,210101008	0,88791829

A1.23 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de alongamento do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	1,215333343	14	0,08242857	14,74407864	0,00012961

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	3,700000	3,050000	2,840000	2,440000
10 ANOS		0,029002309	0,002779	0,00024664
14 ANOS	0,0290023		0,700945	0,03093427
16 ANOS	0,0027794	0,700945139		0,17035019
20 ANOS	0,0002466	0,030934274	0,17035	

A1.24 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de absorção de energia de tensão (TEA) do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	1450,395874	12	203,6875	7,120691299	0,00527916

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	118,0000	98,75000	89,75000	72,25000
10 ANOS		0,275628209	0,066966	0,0034439
14 ANOS	0,2756282		0,809294	0,08976287
16 ANOS	0,066966	0,809293926		0,34942085
20 ANOS	0,0034439	0,089762866	0,349421	

A1.25 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios do índice de arrebatamento do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	6155,1167	16	429,0750	14,345083	8,4663E-05

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	3,9960	3,6478	3,2057	3,1617
10 ANOS		0,094852924	0,000663	0,00029302
14 ANOS	0,0948529		0,078008	0,0188815
16 ANOS	0,000663	0,078008473		0,88258547
20 ANOS	0,000293	0,0188815	0,882585	

A1.26 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios do índice de rasgo do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	677279,625	16	42235,875	16,03564835	4,4335E-05

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	19,9888	23,4564	24,2993	30,1649
10 ANOS		0,14218998	0,02858	0,00019896
14 ANOS	0,14219		0,825029	0,00189686
16 ANOS	0,0285801	0,825028896		0,01025748
20 ANOS	0,000199	0,001896858	0,010257	

A1.27 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de alvura do papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	2,05038023	9	0,03637407	56,36927795	3,7121E-06

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	22,20000	21,61667	20,92000	20,42500
10 ANOS		0,019789994	0,000281	0,00020993
14 ANOS	0,01979		0,007034	0,00028408
16 ANOS	0,0002814	0,007034123		0,0331077
20 ANOS	0,0002099	0,000284076	0,033108	

A1.28 – Análise de variância e teste de Tukey para os valores médios de resistência à passagem do ar no papel nas diferentes idades de estudo

Efeito do grau de liberdade	Efeito do quadrado médio	Grau de liberdade do erro	Quadrado médio do erro	F	p
3	7,10466671	16	0,03275	216,9363861	3,6292E-13

	10 ANOS	14 ANOS	16 ANOS	20 ANOS
MÉDIAS	3,32000	1,42000	0,92000	0,70000
10 ANOS		0,000185192	0,000185	0,00018519
14 ANOS	0,0001852		0,002542	0,00022757
16 ANOS	0,0001852	0,002542078		0,25815314
20 ANOS	0,0001852	0,000227571	0,258153	