

HUBEMAR GUILHERME DE CARVALHO

**EFEITO DA IDADE DE CORTE DA MADEIRA E DE VARIÁVEIS DE  
REFINO NAS PROPRIEDADES DA CELULOSE KRAFT  
BRANQUEADA DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL

OUTUBRO - 1997  
HUBEMAR GUILHERME DE CARVALHO

**EFEITO DA IDADE DE CORTE DA MADEIRA E DE VARIÁVEIS DE  
REFINO NAS PROPRIEDADES DA CELULOSE KRAFT  
BRANQUEADA DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

APROVADA: 28 de julho de 1997.

---

Prof. José Lívio Gomide  
(Conselheiro)

---

Prof. Jorge Luiz Colodette  
(Conselheiro)

---

Prof. Marcio Lopes da Silva

---

Eng. Aloisio Xavier

---

Prof. Rubens Chaves de Oliveira  
(Orientador)

*A Deus.*

*À minha família, em especial aos meus pais.*

*Aos amigos.*

## AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia florestal, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de uma bolsa de estudos.

Ao professor Rubens Chaves de Oliveira, pelos ensinamentos ministrados durante todo o curso, pela orientação técnica e científica durante a realização deste trabalho e, principalmente, pela amizade.

Aos professores José Lívio Gomide e Jorge Luiz Colodette, pelos valiosos ensinamentos, pelos aconselhamentos e pela amizade.

À Chamflora Agrícola Ltda., pelo material cedido.

À Sr<sup>a</sup> Dóris Magna Avelar de Oliveira, Diretora da Biblioteca Central da UFV, pela colaboração e atenção dispensada.

Aos meus pais e irmãos, pela compreensão, pela amizade, pelo apoio e pelo incentivo.

Aos colegas Nilton, Carlos Cesar, Fernando, Tarcísio, Serginho, Carlos Roberto, Humberto, Paulo Gaia, Ciro, Cláudio, Dora, Carlinhos, Jesus, Luciano, D. Conceição, Deusa, Elenice, Marcelão, Marcelinho, Antônio, J. Mauro e Gustavo e a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, pelo apoio, pelo incentivo e pela amizade, principalmente nos momentos difíceis.

## **BIOGRAFIA**

HUBEMAR GUILHERME DE CARVALHO, filho de Humberto Baptista de Carvalho e Docemar de Carvalho, nasceu em 22 de dezembro de 1965, no Município de Bananal-SP.

Em dezembro de 1984, concluiu o curso de segundo grau no Colégio Novo, na cidade de Volta Redonda-RJ.

Em 1988, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, no curso de Engenharia Florestal, formando-se em abril de 1992.

Em agosto de 1993, ingressou no curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, na área de Tecnologia de Celulose e Papel, defendendo tese em 28 de julho de 1997.

## CONTEÚDO

	Página
EXTRATO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1. Relações da qualidade da madeira com a qualidade da polpa e do papel .....	5
2.2. Refino .....	9
2.2.1. Efeito da consistência da polpa .....	14
2.2.2. Efeito do pH da polpa .....	17
2.2.3. Efeito da temperatura da polpa .....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3.1. Material .....	21
3.2. Métodos .....	22
3.2.1. Determinação da densidade básica da madeira .....	22
3.2.2. Análise química da madeira .....	22
3.2.3. Determinação das dimensões das fibras das madeiras .....	23
3.2.4. Polpação kraft da madeira .....	24
3.2.4.1. Lavagem, depuração e análises das polpas .....	24
3.2.5. Branqueamento das polpas .....	25

	Página
3.2.5.1. Pré-deslignificação com oxigênio (O <sub>2</sub> ) .....	25
3.2.5.2. Estágio de dioxidação (D <sub>0</sub> ) .....	25
3.2.5.3. Estágio de extração com peróxido de hidrogênio (Ep) ..	26
3.2.5.4. Estágio de dioxidação final (D) .....	26
3.2.6. Refino das polpas branqueadas .....	26
3.2.7. Formação de folhas para os testes físico-mecânicos .....	27
3.2.8. Testes físico-mecânicos .....	27
3.2.9. Análise dos resultados .....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
4.1. Dimensões das fibras das madeiras .....	29
4.2. Composição química e densidade das madeiras de diferentes idades .....	30
4.3. Polpação kraft das madeiras de diferentes idades .....	33
4.4. Branqueamento das polpas .....	34
4.5. Propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas não-refinadas .....	37
4.6. Propriedades físico-mecânicas das polpas refinadas .....	41
4.6.1. Resistência à tração .....	42
4.6.2. Módulo de elasticidade específico .....	48
4.6.3. Resistência ao arrebentamento .....	53
4.6.4 Resistência ao rasgo .....	59
4.6.5. Energia de deformação (TEA) .....	65
4.6.6. Resistência à passagem de ar (RPA) .....	71
4.6.7. Consumo de energia no refino .....	76
5. RESUMO E CONCLUSÕES .....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
APÊNDICES .....	94
APÊNDICE A .....	95
APÊNDICE B .....	99

## EXTRATO

CARVALHO, Hubemar Guilherme de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 1997. **Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Conselheiros: José Lívio Gomide e Jorge Luiz Colodette.

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento das polpas obtidas de madeiras de três diferentes idades de corte (4, 7 e 9 anos) no processo de refinação, variando as condições de pH (5 e 9), consistência (8 e 12%) e temperatura das polpas no início da refinação (10 e 30°C) e as implicações em suas propriedades físicas, mecânicas e óticas. As madeiras foram submetidas ao cozimento kraft convencional, obtendo-se polpas com número kappa  $18 \pm 0,5$ . As polpas foram branqueadas por uma seqüência de branqueamento ECF a  $90 \pm 0,5\%$  ISO. Os refinamentos foram realizados em moinho PFI, em quatro níveis de refinação. A composição química e morfológica das madeiras mostrou-se bastante diferenciada com o aumento da idade, com diferenças significativas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Isso proporcionou comportamentos diferenciados dessas madeiras no processo de cozimento, exigindo diferentes cargas de álcali para atingirem o mesmo grau de deslignificação. No



branqueamento, as polpas apresentaram comportamentos diferenciados na pré-deslignificação com oxigênio, embora a branqueabilidade das polpas tenha sido considerada a mesma. De maneira geral, o refino das polpas em pH alcalino favoreceu o desenvolvimento das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades. A alteração da consistência de refino de 8 para 12%, para a polpa da madeira de 7 anos, prejudicou o desenvolvimento dessas propriedades, enquanto para as polpas das madeiras de 4 e 9 anos, para a maioria dos tratamentos, obteve-se melhoria das propriedades. O efeito da temperatura de refino mostrou-se significativo, porém sem tendência definida. Aumentos de pH e consistência no refino das polpas obtidas das madeiras mais novas tornaram a operação de refino mais fácil, exigindo menor consumo de energia de refino para se alcançar o mesmo grau Schopper Riegler. As madeiras mais novas foram mais fáceis de se refinar. As polpas obtidas de madeiras mais novas tratadas a pH ácido apresentaram características favoráveis para a produção de papéis “tissue”, enquanto as polpas obtidas de madeiras mais velhas tratadas a pH alcalino apresentaram características favoráveis para produção de papéis de imprimir e escrever.

## ABSTRACT

CARVALHO, Hubemar Guilherme de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, October 1997. **Effect of wood cutting age and refining variables on eucalyptus bleached kraft pulp.** Adviser: Rubens Chaves de Oliveira. Committee Members: José Lívio Gomide and Jorge Luiz Colodette.

The objective of this study was to analyze the behavior of pulps obtained from woods of 3 different cutting ages (4, 7 and 9 years), during the refining process, under varying conditions of pH (5 and 9), consistency (8 and 12%) and temperature at the start of refining (10 and 30%) as well as the implications on their physical, mechanical and optical properties. The woods were submitted to conventional kraft cooking, resulting in pulps with kappa numbers  $18 \pm 0.5$ , which were subsequently bleached by an ECF sequence at  $90 \pm 0.5\%$  ISO. Refining was carried out in a PFI mill under 4 levels. The chemical and morphological compositions of the woods showed more variation as age increased, with significant differences by the Tukey test at 5% probability. This allowed for a differentiated wood behavior during cooking, demanding different alkali charges in order to reach the same level of delignification. During bleaching, the pulps showed different behavior at the pre delignification with oxygen, although pulp bleaching was considered to be the same. Overall, pulp refining in alkaline pH

avored the development of the physical, mechanical and optical properties of pulps obtained from woods of different ages. Change in consistency from 8 to 12% for 7-year-old wood pulp was not beneficial to the development of these properties, while for 4 and 9 year old pulps there was an improvement of these properties, for most treatments. The refining temperature effect was found to be significant, with no defined trend. Increased pH and consistency in the refining of pulps obtained from younger wood made refining easier, de demanding less energy consumption in order to reach the same Schopper Riegler level. Younger woods were easier to refine. Pulps obtained from younger acid pH treated woods showed characteristics favorable to the production of tissue paper, while pulps obtained from older alkaline pH treated woods showed characteristics favorable to the production of printing and writing paper.

## 1. INTRODUÇÃO

Até a década passada, o principal objetivo de uma empresa florestal na implantação de uma floresta de eucalipto era atingir a máxima produção volumétrica das florestas. Por sua vez, nas fábricas, a qualidade da matéria-prima não era considerada a principal preocupação, e sim a quantidade, pois os preços praticados naquela época cobriam satisfatoriamente os custos de produção.

No início da década de 90, um excesso de celulose no mercado internacional fez com que os preços da celulose fossem reduzidos expressivamente. Esse fato, aliado a uma mudança de comportamento do mercado consumidor de papel, que passou a exigir maior qualidade e melhores preços, fez com que as empresas do setor de celulose e papel reformulassem seus conceitos de gerenciamento. Uma nova conscientização em busca de qualidade obrigou as indústrias a se modernizarem, melhorarem a qualidade de seus produtos, concorrerem com preços e aprimorarem seus processos industriais, com o objetivo de alcançar cada vez mais a satisfação de seus clientes. Nesse sentido, hoje há uma crescente preocupação com a qualidade da madeira para a produção de celulose e papel.

No Brasil, a maior preocupação é com as espécies do gênero *Eucalyptus*, pois este se constitui na principal fonte de matéria-prima fibrosa para a indústria de celulose e papel, já que suas fibras possuem características bastante favoráveis

para a produção de determinados tipos de papel, principalmente papéis de imprimir/escrever e “tissue”.

A diversidade e facilidade de hibridação das espécies desse gênero contribuem para a desuniformidade da qualidade de suas madeiras. Por esse motivo, uma série de estudos (SILVA, 1996; FONSECA et al. 1995; SHIMOYAMA e BARRICHELO, 1991) tem sido realizada, no sentido de determinar os parâmetros de qualidade dessas madeiras, assim como suas relações com a qualidade do produto final.

Vários parâmetros são utilizados para a determinação da qualidade das madeiras de eucalipto, visando a produção de celulose e papel. Esses parâmetros são normalmente classificados como físicos, químicos e anatômicos.

No que se refere aos parâmetros físicos, a densidade básica tem sido a mais destacada e considerada como principal parâmetro, pois é uma característica bastante complexa, resultante da combinação de diversos fatores, incluindo a constituição química e morfológica da madeira. A densidade básica é influenciada pelas condições de crescimento das árvores, como clima, solo, espaçamento e idade de corte.

Com relação aos parâmetros químicos, os teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos têm sido considerados os mais relevantes e normalmente são relacionados com os aspectos quantitativos de rendimento e consumo de produtos químicos durante os processos de cozimento.

Já nos parâmetros anatômicos, percentagem e dimensão de fibras, vasos e parênquima, além de número de fibras por grama e “coarseness” (DEMUNER et al., 1991; CLARK, 1985), são os mais utilizados na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose e papel. Estão relacionados com a qualidade da polpa celulósica e associados às propriedades físico-mecânicas e características superficiais e ópticas do papel produzido.

O conhecimento das correlações entre esses parâmetros, assim como das variáveis que os afetam, é de grande importância para uma correta interpretação das variações que ocorrem na madeira, visando facilitar o desenvolvimento de

técnicas adequadas para obtenção de uma matéria-prima mais homogênea e com características desejáveis para um determinado produto final.

Dentro desse enfoque, já é bem conhecido que a madeira é um material heterogêneo, possuindo grandes variações na sua composição química e anatômica entre espécies, embora dentro da mesma espécie também ocorram, em função principalmente da idade, fatores genéticos e ambientais. A extensão dessa variação deve-se, principalmente, à presença de madeira juvenil e à sua proporção no tronco.

Vários pesquisadores (TURGILHO et al., 1996; MAEGLIN, 1987), estudando características de madeira juvenil, concordam ao relatar que as variações que ocorrem durante o período juvenil estão relacionados com as dimensões celulares, a organização da parede celular e as características físico-químicas da madeira.

Segundo Jankowski, 1979, citado por TURGILHO et al. (1996), o período de juvenilidade é variável, podendo ser superior a 10 anos em alguns eucaliptos plantados na Austrália. Em áreas de crescimento rápido, a madeira juvenil é de grande importância, pois ela pode constituir a maior proporção do tronco.

Com base nessas informações, observa-se que a idade das madeiras influencia o seu potencial para produção de celulose e papel, já que as suas propriedades são fortemente influenciadas pelas características físicas e químicas das madeiras, assim como pela morfologia de suas fibras.

Além dos fatos apresentados anteriormente, também é reconhecido que as variáveis dos processos de fabricação de celulose e papel podem influenciar a qualidade do produto final. CAMPINHOS JUNIOR e CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR (1990) citam a operação de refino, a formação da folha e a adição de produtos químicos, como cargas, pigmentos e colas, entre outros, na preparação da massa como as variáveis de processo que mais podem influenciar a qualidade do produto final.

A operação de refino é de grande relevância dentro do processo, pois é a etapa em que se pode alterar a qualidade das fibras, melhorando, mantendo ou, ainda, até mesmo prejudicando propriedades físico-mecânicas da polpa e do papel, significativamente.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da idade das madeiras no seu potencial tecnológico para produção de celulose e papel e a interação das características de suas polpas com variáveis de refino (pH, consistência e temperatura), bem como os reflexos dessas interações na qualidade das polpas.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Relações da qualidade da madeira com a qualidade da polpa e do papel**

No processo de obtenção de celulose, a qualidade é altamente dependente das características anatômicas, físicas e químicas da matéria-prima. Dentre os principais parâmetros da madeira, em geral, destacam-se densidade básica, características dimensionais das fibras, teor de vasos, parênquimas, teor de lignina, pentosanas e extrativos. Os teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos, em geral, são mais freqüentemente relacionados ao aspecto quantitativo de rendimento e consumo de produtos químicos no cozimento. Segundo BARRICHELO et al. (1983), os aspectos físicos (densidade básica) e anatômicos da madeira estão relacionados com a quantidade de celulose, que, em geral, é a principal responsável pelas resistências mecânicas e pelas características superficiais e ópticas do papel.

No meio florestal existe grande número de espécies de eucaliptos, híbridos e ecotipos de cada espécie, havendo, assim, variabilidade nas características e, conseqüentemente, na qualidade da madeira. Dessa forma, a qualidade da polpa produzida pode apresentar grande variação devido ao grande número de parâmetros existentes e que devem ser controlados para se obter uma qualidade satisfatória.



Uma das maneiras de se fazer esse controle é através dos programas de melhoramento florestal. Qualquer programa de melhoramento florestal visando a produção de celulose e papel deve dedicar atenção especial às propriedades que caracterizam a qualidade do produto final. Estas, por sua vez, são condicionadas à demanda do usuário final e dependem do tipo de papel a ser produzido.

Cada espécie de eucalipto possui um potencial tecnológico para produção de celulose com uma determinada qualidade, considerando suas características químicas, físicas e morfológicas de fibras. Essa qualidade pode ser alterada ao longo de todo o processo de fabricação de celulose e papel, seja no cozimento, nos processos de branqueamento e, ainda, na preparação de massa e na própria máquina de papel.

PULKKI (1991), estudando fatores que causam variações nas características da madeira, cita como principais a diferença de idade, a qualidade genética da árvore, o nível de melhoramento da árvore, a variação entre procedências, a diferença entre meio ambiente, os tratamentos silviculturais, o “site” e o controle de pragas e doenças. Contudo, esse autor observa que, dentro dos critérios de seleção de árvores superiores, devem-se considerar, além das características da árvore no campo, como volume, forma, densidade, etc., também as características da árvore dentro da fábrica, como rendimento em polpa, qualidade do papel produzido e suas interações com variáveis do processo, pois as variáveis operacionais do processo de fabricação de celulose e papel também influenciam a qualidade do papel; assim, os programas de melhoramento devem ser concentrados nas características da madeira e em suas interações com as variáveis de processo.

Vários autores, como CAMPINHOS JUNIOR e CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR (1990) e BRISTOW e KOLSETH (1986), estudaram as relações entre as características físicas e químicas das madeiras e a qualidade do papel. Com relação aos aspectos químicos, esses autores citam que, de maneira geral, madeiras com altos teores de lignina e extrativos são descartadas dos programas de melhoramento, por apresentarem perdas no rendimento de celulose. A

presença de extrativos na pasta de celulose está relacionada com a ocorrência de depósitos de “pitch”, seja no papel ou em equipamentos, e, ainda, pode alterar as propriedades de absorção de líquidos pelo papel.

WEHR e BARRICHELO (1993) relataram que a composição química da madeira é de grande importância para os resultados de polpação, pois rendimento de celulose, consumo de reagentes e quantidade de sólidos incorporados no licor dependem dessa característica.

Com relação aos aspectos de morfologia de fibras, vários pesquisadores (PAAVILAINEN, 1994; WRIGHT e CREMER-SLUIS, 1992; DEMUNER et al., 1991; GURNAGUL et al., 1990; CAMPINHOS JUNIOR e CLAUDIO-DASILVA JUNIOR, 1990; SETH e PAGE, 1988; MACHADO et al., 1987; HORN, 1978) investigaram as relações existentes entre as características morfológicas e a estrutura do papel. As relações entre as dimensões fundamentais das fibras, como índice de enfiamento, fração parede e índice de Runkel, têm sido de grande importância para explicações relativas às propriedades físico-mecânicas das polpas. Os efeitos da espessura de parede celular, do comprimento e da resistência das fibras sobre as características do papel produzido são significativos.

A espessura de parede celular possui relação direta com a flexibilidade da fibra, sua conformabilidade e consolidação na estrutura do papel. Fibras mais rígidas são geralmente obtidas de madeiras com maiores densidades, devido ao elevado momento de inércia da seção transversal das fibras, e são mais resistentes à ação de forças de consolidação durante a formação do papel, resultando em papéis com maiores valores de “bulk”, opacidade e rugosidade superficial, em um mesmo nível de refino.

A densidade básica da madeira pode ser um indicativo da espessura da parede celular das fibras, servindo como parâmetro para indicar o seu potencial para a fabricação de papel.

Alguns autores, como ATAIDE e FIGUEIREDO (1992) e CLARK (1991), citam também o comprimento de fibra como uma característica

importante da pasta celulósica. Tomazello, 1987, citado por TURGILHO et al. (1996), menciona que o comprimento de fibra aumenta com o aumento da idade das árvores, pois é resultado do aumento das células que os originam (iniciais fusiformes), e, ainda, que a estabilização do comprimento das fibras, para inúmeras espécies de *Eucalyptus*, somente irá ocorrer quando as células do câmbio atingirem comprimento máximo, iniciando a formação de madeira adulta. DEMUNER et al. (1991) relatam que o número de fibras por grama e o teor de pentosanas contribuem para uma visão mais completa das relações entre as características das fibras e as do papel.

Uma vez que as características morfológicas das fibras podem ser controladas geneticamente ou modificadas através de um manejo adequado, como por exemplo alteração da idade de corte, torna-se cada vez maior a sua importância nos programas de seleção de árvores com qualidade superior para a produção de celulose e papel.

Com relação aos aspectos físicos da madeira, a densidade básica aparente tem sido considerada a característica mais importante. Contudo, é uma característica bastante complexa, que depende não só das dimensões e da frequência dos elementos anatômicos da madeira, mas também de sua composição química.

Segundo SHIMOYAMA e BARRICHELO (1991), dentre os parâmetros que determinam a qualidade da madeira, a densidade básica é indicada como um dos mais importantes, pela facilidade de sua determinação e por estar diretamente relacionada com as características do produto final.

BARRICHELO et al. (1983) evidenciam a importância da densidade básica associada à qualidade da madeira, que se mostra altamente correlacionada com o comprimento, o diâmetro do lúmen e a espessura de parede celular das fibras. Da mesma forma, essas dimensões são correlacionadas entre si: o comprimento diretamente correlacionado com a espessura de parede e inversamente correlacionado com o diâmetro de lúmen. Por outro lado, a fibra com maior diâmetro de lúmen é menos espessa.

VITAL et al. (1984) relatam que, normalmente, a densidade tende a aumentar com aumento da idade das árvores, como consequência do aumento da espessura de parede celular e redução da largura das células. Já o teor de lignina tende a diminuir com o aumento da idade das árvores, pois as espécies mais novas tendem a possuir maior proporção de madeira juvenil, que é mais rica em lignina que a madeira adulta.

FERREIRA (1972) e SOUZA et al. (1979) citam que, no gênero *Eucalyptus*, a densidade pode variar com a idade, com o vigor, com o local e com a taxa de crescimento.

De maneira geral, os estudos relacionando densidade básica com as dimensões de fibras e propriedades do papel (BARRICHELO et al., 1983; TOMAZELLO FILHO, 19\_\_ ; SCURFIELD, 1976) mostram que madeiras com maior densidade apresentam maior comprimento de fibra, maior espessura de parede celular e menor diâmetro de lúmen, produzindo papéis com maior resistência ao rasgo, menor lisura, maior opacidade e menor resistência à tração e ao arrebentamento, em razão do menor potencial para colapsamento da parede celular alcançado durante o processo de refinação e formação do papel.

## **2.2. Refino**

A operação de refino é uma das etapas mais importantes na fabricação de papel. Nessa fase são desenvolvidas as propriedades desejadas para o papel, objetivando a melhoria da sua qualidade.

As propriedades são desenvolvidas a partir da ação mecânica dos elementos refinadores sobre a polpa. Esta ação leva a modificações irreversíveis na estrutura da fibra e é dependente de vários outros fatores que fazem parte do processo de refinação, como consistência, pH e temperatura da polpa, de fatores relacionados ao tipo de equipamento, bem como de fatores de natureza intrínseca da própria fibra a ser refinada.

As primeiras teorias sobre refino referiam-se a uma ação meramente mecânica, através da qual, por meio de moagem, as fibrilas que compõem a parede celular das fibras se libertavam e se entrelaçavam. A isso se atribuía o desenvolvimento de resistência do papel.

Posteriormente, após o abandono da teoria da ação meramente mecânica, surgiu, em 1920, a teoria desenvolvida por Cross & Bevan (PIRES et al., 1988), que acreditavam haver a possibilidade de formação de um colóide constituído de hemiceluloses envolvendo a fibra, que, por efeito da ação do refino, se transformaria num gel, o qual, na formação do papel, teria o efeito de um adesivo sobre as fibras. A geração desse gel foi associada ao termo “hidratação”, que até hoje é muito difundido.

A teoria mais aceita atualmente é a de que a resistência do papel é o resultado de ligações de pontes de hidrogênio entre as fibras. A frequência dessas ligações pode ser intensificada se for ampliada a área de contato entre fibras, tornando-as mais flexíveis, pelo aumento da superfície da fibra, devido ao maior potencial de colapso, ou por meio de seu desfibrilamento.

Quando se estuda refino, existem alguns aspectos importantes a serem considerados. A técnica de refino envolve um conjunto de variáveis que influencia na operação, com reflexos diretos no resultado final.

Variáveis como tipo de celulose, consistência, viscosidade e pH, assim como potência aplicada, área refinadora relativa aos elementos refinadores e velocidade de refinação, são, geralmente, associadas à economia de energia na operação de refino, ou seja, à facilidade da ação dos elementos refinadores sobre as fibras, que, associados aos processos de hidratação, inchamento, formação de flocos, desfibrilamento e corte das fibras, promovem o desenvolvimento de propriedades do papel.

Com relação aos efeitos da moagem sobre as fibras, diversos autores (CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, 1983; GIERTZ, 1989; REINER, 1994) afirmaram haver quatro efeitos principais que conduzem ao mesmo resultado, ou

seja, ao aumento da superfície de contato para intensificar as ligações interfibras: hidratação, inchamento, desfibrilamento e corte das fibras.

A hidratação é a máxima absorção de água pela fibra e está relacionada com o teor de hidroxilas no meio, principalmente de hemiceluloses. Nessa fase há grande influência da composição química da polpa, que é dependente da natureza das fibras e do tipo e das condições de cozimento a que foi submetida a madeira.

O processo de hidratação e inchamento das fibras durante a operação de refino é de grande importância, pois está sempre associado à economia de energia durante o processo e ao desenvolvimento de resistências.

Segundo CASEY (1979), o inchamento da fibra pode ser intercrystalino ou intracrystalino. No inchamento intercrystalino o solvente penetra somente nas regiões amorfas das microfibrilas, enquanto no inchamento intracrystalino o solvente penetra na região cristalina das microfibrilas. Esse autor cita, ainda, que o inchamento intercrystalino típico é aquele que ocorre na presença de água e o intracrystalino é o que ocorre na presença de hidróxido de sódio. Para o autor, o inchamento da celulose ocorre por causa da sua alta polaridade, isto é, da grande ocorrência de grupos  $\text{OH}$ .

KATZ e SCALLAN (1983) e KATZ et al. (1981), trabalhando com pasta mecânica, em estudos sobre o desenvolvimento de resistências de papéis, utilizaram álcali para intensificar o inchamento das fibras.

SCALLAN e TIGERSTRÖNG (1992), estudando os mecanismos de inchamento de fibras, relatam que esse processo depende de uma pressão osmótica gerada pela diferença de íons  $\text{OH}$  dentro e fora da parede celular e da elasticidade da própria fibra.

O desfibrilamento é facilitado com a hidratação e o inchamento, mesmo nas camadas mais internas da parede celular, sendo influenciado pelo tipo de fibra e pelo ângulo de orientação de suas microfibrilas.

Diversos autores (REINER, 1994; GIERTZ, 1989; ESPY, 1990; CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, 1983) estudaram os efeitos da moagem ou do refino nas propriedades do papel e foram unânimes em afirmar que o tratamento

mecânico dados às fibras envolve complexas forças de tração, cisalhamento, torção, dobramento e atrito, com grandes alterações estruturais nas fibras, que podem ser resumidas da seguinte forma: separação das camadas internas das paredes das fibras ou fibrilação interna; delaminação seqüencial das camadas externas e sua separação da parede das fibras (fibrilação externa e formação de finos); deslocamento da parede externa das fibras, provocando uma compressão longitudinal; e dissolução dos constituintes das fibras, principalmente de hemiceluloses, com conseqüente formação de uma suspensão coloidal em interação com as camadas separadas da parede das fibras e com os finos, chamada de fibrilação molecular e corte das fibras, respectivamente.

Alguns autores, como PIRES et al. (1988) e HIGGINS e DE YONG (1986), classificam os efeitos do refino como “primários” e “secundários”. Consideram desfibrilamento interno, desfibrilamento externo, produção de finos e corte das fibras como sendo os efeitos primários e, como efeitos secundários, as mudanças ocorridas nas propriedades das fibras e nas propriedades de fluxo de suas suspensões em água, assim como as que estão relacionadas com as propriedades do papel, como conseqüência direta dos efeitos primários.

Hoje é aceito que o processo de refino envolve, principalmente, o tratamento de agregados (flocos) e não de fibras isoladas como partículas independentes, pois é difícil imaginar como as fibras poderiam suportar individualmente as altas pressões existentes entre as lâminas de um refinador sem serem completamente esmagadas. Ao contrário, se o espaço estiver cheio de flocos, constituídos por muitas fibras, as tensões podem ser distribuídas, evitando o esmagamento dos agregados fibrosos, os quais controlam indiretamente a ação entre as superfícies de moagem.

O tamanho e a resistência dos flocos à deformação dependem das propriedades das fibras, como comprimento, relação comprimento/diâmetro e flexibilidade.

O refino é uma operação realizada para proporcionar, basicamente, modificações na estrutura da fibra, de forma a favorecer o desenvolvimento de

propriedades superficiais de resistência e ópticas do papel, de acordo com o uso final do mesmo.

Diversos estudos (RETULAINEN e EBELING, 1993; GIERTZ, 1989; PAGE e SETH, 1988; ESPY, 1990) foram realizados no sentido de contribuir para o entendimento dos mecanismos de desenvolvimento de propriedades do papel devido ao refino.

Dentro da teoria do esforço das ligações no desenvolvimento da resistência do papel, um dos principais pontos é o aumento da rigidez de tensão do papel, como resultado da moagem e, conseqüentemente, da exigência de maior carga para causar a ruptura do papel.

Isso mostra que a rigidez das partes da estrutura fibrilar do papel, que contribuem para o desenvolvimento desta carga, aumenta à medida que a folha é submetida a forças de tensão. O fenômeno acontece pelo fato de os segmentos das partes das fibras, livres de ligações interfibrilares, serem alinhados na direção da carga aplicada, tornando-se, portanto, com melhores condições para suportar maior parte da carga. As partes das fibras em contato íntimo e, portanto, entrelaçadas (regiões das ligações interfibras) sofrem esforços de certa forma irreversíveis, com grande absorção de energia, causando o alongamento, em primeira instância, nas áreas de contato interfibras e, em menor proporção, nos segmentos livres das fibras.

Os fatos descritos mostram que um dos aspectos mais importantes na fabricação do papel é o preparo do material fibroso, de maneira que o contato íntimo entre as fibras e fibrilas em escala molecular ocorra nas maiores quantidade e intensidade possíveis. Isto pode ser obtido pelo controle e pela otimização das variáveis de refino, as quais dependem da natureza e das características morfológicas das fibras.

O corpo de uma fibra celulósica é uma estrutura fibrilar orientada espiralmente, que é gradualmente despreendida à medida que a ação mecânica atrita a camada da superfície. Com o prosseguimento do refino, a fibra de celulose incha consideravelmente e a superfície específica da fibra aumenta significativamente, tornando-se mais flexível e apresentando praticamente um comportamento plástico.



Todos esses fatores geram uma área potencialmente maior que a original e possibilitam uma aproximação íntima, causando união entre as fibrilas de fibras adjacentes, quando a folha é posteriormente formada, prensada e secada. Esta união ou ligação, por meio de pontes de hidrogênio, aumenta em número e em intensidade, pela ação da secagem, e é a principal responsável pela resistência do papel.

### **2.2.1. Efeito da consistência da polpa**

Quando se estuda o processo de refinação, alguns aspectos importantes devem ser considerados, pois essa técnica envolve um conjunto de variáveis que influencia a operação, com reflexos diretos na qualidade do produto final.

A consistência da polpa no refino é uma das mais importantes variáveis envolvidas do processo de refinação, pois está diretamente relacionada com a ação dos elementos refinadores sobre as fibras e, conseqüentemente, associada à qualidade do produto final e ao consumo de energia para a realização dessa operação.

Vários autores (RATNIEKS, 1993; DEMUNER et al., 1990, 1993; CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, 1983; FUENTES et al., 1981) concordam de que a unidade básica que recebe os impactos durante o refino são os flocos de fibras.

Para DEMUNER et al. (1990, 1993) e RATNIEKS (1993), as características morfológicas da polpa, as características físico-químicas de superfície e a característica química da suspensão fibrosa em água (pH), além da consistência de operação, possuem grande influência na tendência de floculação das fibras e, conseqüentemente, na resposta ao refino.

DEMUNER et al. (1993) verificaram que o número de fibras por grama tem maior contribuição para o desenvolvimento de propriedades do papel, pois possui maior influência no volume dos flocos que o comprimento das fibras. Esses autores citam ainda que, quando o volume dos flocos apresenta volumes inferiores à largura das lâminas e dos canais dos discos, maior quantidade de

fibras por flocos atravessa os canais sem receber tratamento; porém, o aumento do volume dos flocos deve significar aumento da manta de polpa entre as superfícies de refino e, conseqüentemente, maior quantidade de fibras por floco que recebem tratamento durante o refino.

Clark, citado por FUENTES et al. (1981), discutindo os efeitos da consistência no processo de refinação, concluiu que o aumento da consistência minimiza o encurtamento de fibras e favorece a compressão das fibras. Além disso, há formação de aglomerados de fibras devido à compressão exercida pelas barras do refinador, ou seja, a utilização de maiores consistências favorece a formação dos flocos de fibras.

Para MANFREDI et al. (1986), a utilização de maiores consistências provavelmente aumenta a intensidade de fibrilação externa e fibrilação interna, auxiliadas pela hidratação das fibras, que tendem a aumentar.

DEMUNER (1990) e RATNIEKS (1993) relatam que o aumento da consistência favorece a ação da fibrilação, em detrimento do corte das fibras. Tal comportamento é atribuído a dois fatores que atuam simultaneamente: a) aumento da espessura da camada de fibras entre os elementos refinadores; e b) aumento do tempo de retenção da polpa no refinador, para se obter um mesmo nível de energia útil aplicada.

A maior espessura da manta de polpa entre as superfícies metálicas de refino permite um tratamento mais homogêneo dos flocos em suspensão, minimizando a intensidade dos impactos recebidos pelos flocos. Esse efeito é denominado “dispersão da energia transmitida”. Com o aumento do tempo de retenção, acentua-se a probabilidade de flocos maiores receberem o impacto. Esse efeito é denominado “acumulação de energia transmitida”.

Esses dois efeitos são antagônicos e provavelmente dependem das características estruturais dos flocos, em especial da forma como a energia é absorvida e transmitida entre as fibras.

Durante o refino, esses efeitos interagem entre si, em função das características operacionais de refino e das características de floculação da polpa.

HARTLER (1995), DEFOE (1993) e GIERTZ (1989) acreditam que, quando a polpa é refinada a alta consistência, ocorrem efeito de compressão e torções nas fibras. O efeito de microcompressão e torções são induzidos na polpa durante o processo de refinação a alta consistência, ou em outros tratamentos correspondentes, como nos processos de secagem de polpas químicas.

Essas microcompressões fazem com que as fibras se tornem mais flexíveis, ao mesmo tempo em que a camada mais externa da parede secundária é danificada e a parede da fibra incha e é desfibrilada, melhorando, assim, o potencial de ligação das fibras durante a consolidação na estrutura do papel.

O efeito das forças de microcompressão, juntamente com as forças de tensão geradas pelas torções das fibras, melhora as propriedades do papel, devido principalmente à melhoria de alongamento. Na parte da parede microcomprimida, as microfibrilas parecem estar encolhidas dentro de um pequeno volume, promovendo quebras simultâneas das pontes de hidrogênio, resultando, assim, em alta acessibilidade da celulose a subseqüentes reações químicas, ao mesmo tempo em que a resistência das ligações aumenta. Esses fenômenos possuem influência decisiva na produção de polpa e, principalmente, nas propriedades da polpa final.

Com relação ao efeito da baixa consistência da polpa durante a refinação, RATNIEKS (1993) relata que a utilização de baixas consistências de refino reduz a espessura do filme de fibras entre os elementos refinadores, causando menor ação de atrito de fibra a fibra e maior ação fibra-metal. CLARK (1985) afirma que as polpas refinadas a baixa consistência, principalmente abaixo de 3%, geram fibras com menor grau de flexibilidade. Além disso, aumentam-se as perdas de energia por fricção e diminui o desfibrilamento das fibras, reduzindo o desenvolvimento de propriedades. Este autor cita ainda que, em consistência em torno de 8%, dependendo do tipo de fibra, a demanda de fibras alocadas dentro das ranhuras é maior, formando “nips” entre as barras; dessa forma, o “colchão” espesso de massa é preparado. Isso gera redução de corte e favorecimento do colapso das fibras. Como já discutido por outros autores (HARTLER, 1995; DEFOE, 1993; MILANES et al., 1983), as compressões axiais e as torções das

fibras individuais são gradualmente intensificadas, e a produção de finos, reduzida.

FUENTES et al. (1981), trabalhando com polpa kraft não-branqueada, relatam que altos valores de alongamento, resistência à tração e ao rasgo e pequena produção de finos, quando exigidos pelos clientes, podem ser obtidos através de uma combinação de alta e baixa consistência de polpa durante o refino. Neste caso, a energia requerida para o refino das polpas é consideravelmente alta, quando refinadas em alta consistência. Contudo, essa desvantagem deve ser avaliada cuidadosamente em oposição aos benefícios que a alta consistência de refino traz à resistência do papel. O teor de hemiceluloses e a espessura de parede celular, segundo esses autores, são os principais fatores responsáveis pelo desenvolvimento do refino, quando as polpas são refinadas a alta consistência.

Como o processo industrial de refinação envolve substancial consumo de energia, sempre que se estuda refinação o consumo de energia deve ser considerado. Por esse motivo, quando se trata de melhor aproveitamento de energia, vários autores (DEFOE, 1993; RATNIEKS, 1993; RATNIEKS e DEMLER 1993; MANFREDI et al., 1986; SILVA e CARRETA, 1971) são unânimes em afirmar que o refino a alta consistência gera melhor aproveitamento da energia, apesar de ser maior a quantidade de energia líquida aplicada.

O desenvolvimento de resistência é favorecido quando se usa alta consistência da massa durante o refino, produzindo papéis com melhor qualidade, além de resguardar as áreas das barras refinadoras, devido ao maior colchão de massa nestas áreas, gerando maior durabilidade das mesmas.

DEMUNER et al. (1990), estudando o efeito da consistência em polpas procedentes de quatro espécies de eucaliptos, observaram que o aumento da consistência de 2 para 4% permitiu melhor aproveitamento da energia de refino no desenvolvimento das propriedades da polpa e do papel.

### 2.2.2. Efeito do pH da polpa

Outra variável importante envolvida no processo de refinação, além da consistência, é o pH da polpa. A refinação da polpa celulósica, como já mencionado anteriormente, é uma operação que demanda substancial quantidade de energia.

Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de reduzir o consumo de energia, porém sem alterar as propriedades do papel. Alguns autores (PIRES et al., 1988; MANFREDI et al., 1986; BUGAJER et al., 1984; MILANES et al., 1983) afirmam que o controle do pH da massa contribui nesse sentido.

A importância e os efeitos do pH na operação de refino ainda não estão bem definidos, mas parecem estar relacionados aos mecanismos responsáveis pelo inchamento das fibras, com efeitos diretos na qualidade do produto final, uma vez que o pH da polpa é de grande importância nas etapas posteriores ao preparo de massa e na formação de papéis, como por exemplo os processos de colagens e drenagem e, até mesmo, os revestimentos realizados no papel.

São poucos os estudos relacionando pH e operação de refino, por isso ainda existem muitas dúvidas quanto ao efeito dessa variável na operação de refino e à melhor faixa de pH a ser utilizada para refinar diferentes tipos de polpa.

BUGAJER et al. (1984), trabalhando com polpas de eucalipto e pinus, notaram comportamentos diferenciados das polpas em função da variação de pH. Esses autores relataram que, para polpas de eucalipto, o tempo de refinação é reduzido com o aumento do pH; conseqüentemente, reduz-se a energia consumida na refinação, principalmente em níveis de refino mais elevados. Para as polpas de pinus, esse comportamento foi encontrado em menores níveis de refino. Os autores concluíram que o meio ácido favorece a fragmentação das fibras, além de promover maior degradação de hemiceluloses, e que o meio alcalino promove redução no consumo de energia.

Em relação às propriedades físicas da polpa, BRISTOW e KOLSETH (1986) concluíram que há efeito do pH mesmo em baixos níveis de refino e, geralmente, as propriedades são reduzidas com o aumento do pH. RATNIEKS e

DEMLER (1993), analisando a resistência à tração de polpas de eucaliptos em pH ácido (pH 5), neutro (pH 7) e alcalino (pH 9), encontraram ganhos de aproximadamente 6% a cada incremento de pH e cerca de 15% menos energia, para se atingir o mesmo nível de índice de tração. Esses autores relataram que, para a polpa de eucalipto, a situação ótima de refino deve acontecer em pH mais alto possível, com consistência entre 4 e 5%. Contudo, alertam que para diferentes tipos de papéis, essas condições podem ser alteradas. CLARK (1985) comentou que a adição de alúmen para alterar o pH da massa para ácido invariavelmente reduz a resistência do papel, provavelmente devido ao colapsamento de fibrilas de volta à fibra, antes de se ligarem às fibras adjacentes. A adição de soda para aumentar o pH da massa para alcalino gera redução das ligações no interior das fibras e redução na fibrilação externa.

MILANES et al. (1983), estudando a qualidade da água como parâmetro de refino, observaram que muitas fábricas que trabalham com o pH da polpa mais elevado recebem como resposta maior facilidade de refino e, conseqüentemente, menor consumo de energia. Esses autores relataram, ainda, que o inchamento das fibras é dependente do equilíbrio de trocas iônicas, do meio químico, das extensões das ligações transversais intrafibras e da temperatura do meio. A capacidade de troca iônica da celulose é, geralmente, atribuída aos grupos carboxílicos introduzidos na cadeia por oxidações e à presença de hemiceluloses que contêm os grupos ácidos.

BRISTOW e KOLSETH (1986) verificaram que o pH, durante a formação da folha, não afeta as propriedades de tração de polpas kraft branqueadas, justamente devido ao baixo teor de grupos ácidos presentes nesse tipo de polpa.

### **2.2.3. Efeito da temperatura da polpa**

A refinação é um processo mecânico. Como em todo processo que envolve energia mecânica há transformação de parte desta energia em energia

térmica, alguns estudos, embora poucos, mostram que a temperatura de refino pode influenciar as propriedades das polpas.

SILVA e CARRETA (1971) relataram que a temperatura da massa durante a refinação aumenta gradativamente, podendo em alguns casos atingir até 60 a 70°C. Esse aumento da temperatura da massa produz efeitos desfavoráveis para a refinação, como a redução da velocidade de hidratação e o aumento do corte das fibras. Isto acontece porque o inchamento das fibras reduz com o aumento da temperatura da massa. Esses autores observaram ainda que, quando a temperatura da massa ultrapassa 40°C, há prejuízo do custo e da qualidade do papel, principalmente em relação às resistências a tração e a dobras.

RATNIEKS (1993) promoveu, anteriormente ao refino, um pré-tratamento térmico alcalino, objetivando a remoção de dobras, torções e microcompressões nas fibras, e observou a ocorrência de hidratação química e inchamento maior da polpa, melhorando a eficiência do uso de energia durante o refino. HARTLER (1995) também citou a prática de pré-tratamento, porém em alta temperatura e baixa consistência, para redução de torções de fibras.

CLARK (1985) relatou que o aumento da temperatura da polpa durante o refino reduz a viscosidade da água rapidamente, afetando o efeito de “amortecimento” ou proteção das fibras contra os choques. Segundo esse autor, os efeitos ocorridos durante o refino, como inchamento, hidratação e outros, podem ser acentuados em temperaturas menores.

A alta temperatura da água poderá, ainda, possibilitar redução da fibrilação, por não permitir uma separação das microfibrilas, devido ao aumento de flexibilidade da fibra, e não permitir que as superfícies adjacentes de microfibrilas desprendidas tenham possibilidade de promover ligações intra e interfibras.

Seis anos depois, o mesmo autor (CLARK, 1991) citou que algumas informações a respeito do efeito da temperatura de refino são conflitantes. Quando uma polpa é refinada até um determinado “freeness”, a temperatura da

polpa aumenta, tendo como resultado fibras macias e mornas, ocasionando menos quebras, porém aumentando a tendência de formação de finos e agregados.

Embora pequeno número de literatura disponível sobre o efeito da temperatura na técnica de refinação tenha sido encontrado, há razões suficientes para entender sua importância e considerá-la em estudos de variáveis de refino.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material

Foram utilizadas neste estudo madeiras de um único clone híbrido de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, com idades de 4, 7 e 9 anos, provenientes de povoamentos experimentais da Chamflora Agrícola Ltda., situados nos municípios de Mogi Guaçu e Brotas, no Estado de São Paulo, cujas características edafoclimáticas e cujos tratamentos silviculturais encontram-se sumarizados no Quadro 1.

Quadro 1 - Características edafoclimáticas e produtividade das árvores coletadas

Característica	Madeira de 4 anos	Madeira de 7 anos	Madeira de 9 anos
Solo	LVA	Areia Quartzosa	LVA
Déficit hídrico anual	12 mm	40 mm	12 mm
Precipitação média anual	1100 - 1300 mm	1100 - 1300 mm	1100 - 1300 mm
Espaçamento	3,0 x 2,0 metros	3,0 x 2,0 metros	3,0 x 2,0 metros
Produtividade	60 st/ha/ano	50 st/ha/ano	60 st/ha/ano

LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo.

As árvores foram abatidas e seccionadas em toretes de 1,5 metro de comprimento, retirados da base da árvore, e a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Os toretes foram descascados manualmente e enviados ao laboratório da Universidade Federal de Viçosa, onde foram transformados em cavacos, em um picador laboratorial. Os cavacos foram classificados em peneiras de 32 x 32 mm e 16 x 16 mm, e, manualmente, procurou-se eliminar cascas e nós. Após a classificação, os cavacos foram secos ao ar e armazenados em sacos de polietileno, para uniformização e conservação do teor de umidade.

### **3.2. Métodos**

Utilizando-se procedimento inteiramente casualizado na amostragem das árvores, procurou-se abater, para cada amostragem, uma árvore que melhor representasse o talhão.

#### **3.2.1. Determinação da densidade básica da madeira**

A densidade básica da madeira foi determinada em duplicata, utilizando-se cavacos e o método da balança hidrostática, de acordo com o procedimento descrito pela norma TAPPI 258 om-85 (Basic density and moisture content of pulp wood).

#### **3.2.2. Análise química da madeira**

Os cavacos foram transformados em serragem utilizando-se moinho laboratorial Wiley, conforme o método TAPPI 257 om-85. As análises químicas foram realizadas na fração da serragem que passou por peneira de malha 40 mesh e ficou retida em peneira de 60 mesh (ASTM). A serragem foi condicionada em ambiente climatizado e, em seguida, armazenada em frascos hermeticamente vedados. A determinação do teor absolutamente seco das amostras foi realizada de acordo com o método TAPPI 264 om-82 (Preparation of wood for chemical analysis). As análises químicas realizadas para caracterização das madeiras e as respectivas normas adotadas encontram-se no Quadro 2.

## Quadro 2 - Análises químicas utilizadas para caracterização das madeiras

Análises	Normas
Extrativos totais	TAPPI T 624 om-82*
Lignina insolúvel	GOMIDE & DEMUNER**
Lignina solúvel	GOLDSHIMID, 1971
Holocelulose	***

\* A extração com etanol-benzeno 1:2 foi substituída por etanol-tolueno 1:2 devido à alta toxicidade do benzeno. A análise foi realizada de forma quantitativa.

\*\* Procedimento derivado do método TAPPI T 222 om-83.

\*\*\* Determinado matematicamente, com base na madeira absolutamente seca, pela subtração dos valores percentuais de extrativos totais, lignina solúvel e insolúvel, respectivamente.

### 3.2.3. Determinação das dimensões das fibras das madeiras

Pela técnica de quarteamento, foram preparadas amostras de cavacos provenientes de cada uma das madeiras. Destas amostras foram retirados pequenos fragmentos (palitos) dos cavacos, que foram transferidos para tubos de ensaio, sendo adicionada solução nitro-acética 5:1 (uma parte de ácido nítrico concentrado para cinco partes de ácido acético concentrado), em quantidade suficiente para cobrir a amostra. A mistura foi aquecida em banho-maria a 80°C, por cinco horas, até que os “palitos” adquirissem coloração branca. Após a maceração, a mistura foi filtrada em cadinho de vidro sinterizado, com porosidade média, e o macerado foi lavado com excesso de água à temperatura ambiente. Em seguida, as fibras foram transferidas para um frasco contendo cerca de 70 ml de água destilada e, com auxílio de um agitador magnético, individualizadas.

A partir dessa suspensão de fibras, foram montadas lâminas, as quais foram analisadas num microscópio ótico acoplado a um projetor que projetava imagem das fibras numa tela. Foram mensurados o comprimento de fibra (aumento de 250x), com auxílio de um planímetro, e a largura de fibra e o diâmetro de lúmen (aumento de 4.000x), com auxílio de uma régua milimétrica.

Utilizando fatores de conversão, calcularam-se as dimensões de 100 fibras para cada madeira. Foram calculadas as médias de comprimento de fibra, da largura de fibra, do diâmetro de lúmen e da espessura de parede celular, esta última determinada pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro de seu lúmen.

### **3.2.4. Polpação kraft das madeiras**

Os cozimentos foram realizados em autoclave rotativa com capacidade de 20 litros, aquecida eletricamente, provida de termômetro, válvulas de segurança e de descarga e dotada de quatro reatores individuais de aço inox, com capacidade de 2 litros cada um, possibilitando o processamento de quatro amostras de 250 gramas absolutamente secos de cavacos, simultânea e independentemente. O álcali ativo aplicado, expresso como  $\text{Na}_2\text{O}$ , foi variável, com a finalidade de se obter uma polpa com número kappa  $18 \pm 0,5$ . As demais condições de cozimento foram mantidas constantes: temperatura máxima de  $174^\circ\text{C}$ ; tempo até a temperatura máxima de 90 minutos; tempo à temperatura de 34 minutos; sulfidez de 24%; e relação licor /madeira de 4:1.

#### **3.2.4.1. Lavagem, depuração e análises das polpas**

Após os cozimentos, os cavacos foram descarregados em caixas providas com tela de malha de 150 mesh e lavados com água em excesso à temperatura ambiente, sendo em seguida desfibrados em “hydrapulper” laboratorial de 25 litros, numa consistência de  $1 \pm 0,25\%$ . A depuração da polpa foi realizada em depurador laboratorial Voith dotado de placa com fendas de 0,2 mm de largura, sendo posteriormente desaguada em centrífuga até uma consistência de  $33 \pm 2\%$ . Foram determinados os rendimentos total e depurado, bem como o teor de rejeitos. As análises de determinação de número kappa das polpas foram realizadas pelo método de microkappa TAPPI UM 245, utilizando-se 50 ml de

KMnO<sub>4</sub>. As viscosidades expressas em cP foram determinadas segundo o método TAPPI T 230 om-89 (Viscosity of pulp).

### **3.2.5. Branqueamento das polpas**

As polpas foram branqueadas utilizando-se uma seqüência do tipo ECF (livre de elementos de cloro molecular) em quatro estágios de branqueamento (OD<sub>0</sub>EpD), objetivando alcançar uma alvura de 90 ± 0,5% ISO.

#### **3.2.5.1. Pré-deslignificação com oxigênio (O<sub>2</sub>)**

O estágio de pré-deslignificação com oxigênio foi realizado em autoclave rotativa com capacidade de 20 litros, aquecida eletricamente, equipada com termômetro, manômetro, válvula de segurança e de descarga e dotada de quatro reatores com capacidade de 2□litros cada um, o que possibilitou, independentemente, o processamento de quatro amostras de 165 gramas absolutamente seca de polpa, simultânea e independentemente. Utilizaram-se consistência de 10%, temperatura de 100°C, tempo de 60 minutos e pressão de 6,0 atm de O<sub>2</sub>, correspondente a 1,55% de oxigênio e 1,8% de NaOH. Ao final deste estágio foram determinados o número kappa, a viscosidade da polpa, a alvura alcançada e o rendimento.

#### **3.2.5.2. Estágio de dioxidação (D<sub>0</sub>)**

O estágio de dioxidação(D<sub>0</sub>) foi realizado em sacos de polietileno com capacidade para 100 gramas absolutamente secos. Este estágio foi realizado em banho-maria a uma consistência de 10% e temperatura de 70°C por 30 minutos, com um fator kappa de 0,28.

### **3.2.5.3. Estágio de extração com peróxido de hidrogênio (Ep)**

O estágio (Ep) ou extração com peróxido foi realizado também em sacos de polietileno com capacidade para 100 gramas de polpa absolutamente seca. Este estágio foi realizado em banho-maria a uma consistência de 10% e temperatura de 90°C por 120 minutos, utilizando-se 0,5% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e 1,3% de NaOH base polpa absolutamente seca. Ao final deste estágio foram calculados o número kappa, a viscosidade e a alvura das polpas.

### **3.2.5.4. Estágio de dioxidação final (D)**

O estágio (D) ou dioxidação final também foi realizado em sacos de polietileno com capacidade para 100 gramas de polpa absolutamente seca. Este estágio foi realizado a uma consistência de 10% e temperatura de 70°C, em banho-maria, por 180 minutos, utilizando-se uma carga de ClO<sub>2</sub> variável para se alcançar a alvura final desejada. Ao final deste estágio foram determinados a viscosidade, segundo a norma TAPPI T 230 om 82, a alvura a.d. (antes do envelhecimento) e a alvura o.d. (após envelhecimento), ambas descritas conforme norma TAPPI T 525 om 86, e o teor de pentosanas das polpas, conforme descrito na norma ABCP C8/70.

### **3.2.6. Refino das polpas branqueadas**

As polpas foram refinadas em moinho PFI, conforme o método TAPPI T 248 om-85, com algumas modificações, objetivando adequar as condições de funcionamento do moinho aos objetivos do trabalho. O número de revoluções foi variável, com a finalidade de obter quatro níveis de refino expressos como graus Schopper Riegler que permitissem o desenvolvimento de curvas de refinação. Foi utilizado o equivalente a 30 gramas de polpa absolutamente seca, para cada nível de refino. Os refinamentos foram realizados em dois níveis de pH (5 e 9), duas consistências (8 e 12%) e duas temperaturas iniciais de refino (10 e 30°C). Para

ajuste de pH, utilizaram-se ácido sulfúrico 4N e hidróxido de sódio 1N. Para o ajuste da temperatura inicial de refino, a câmara de refinação do moinho era previamente acondicionada, com água destilada, nas respectivas temperaturas iniciais de refino. Foram realizados testes preliminares, objetivando estabelecer uma distância mínima entre o rotor e a câmara do refinador, para se trabalhar a consistências abaixo de 10%, sem danificar o equipamento.

### **3.2.7. Formação de folhas para os testes físico-mecânicos**

As folhas foram formadas em formador tipo Tappi, com aproximadamente  $60 \text{ g/m}^2$ , de acordo com a norma TAPPI 205 om-81, e acondicionadas em ambiente climatizado com temperatura de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $50 \pm 2\%$ , para realização dos testes físico-mecânicos e ópticos.

### **3.2.8. Testes físico-mecânicos**

Para avaliação das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas, foram utilizados os testes descritos no Quadro 3. As propriedades das polpas foram avaliadas com o desenvolvimento do refino, porém com maior ênfase para um mesmo nível de peso específico aparente ( $600 \text{ kg/m}^2$ ) das folhas formadas.

### **3.2.9. Análise dos resultados**

As análises dos resultados foram realizadas por meio de comparação das características físicas (densidade básica, comprimento de fibra, largura de fibra, diâmetro de lúmen e espessura de parede celular) e químicas (teores de lignina, holocelulose, extrativos totais e cinzas) das madeiras de diferentes idades, assim como o comportamento dessas madeiras nas etapas de cozimento, de branqueamento de suas polpas e de testes físico-mecânicos e ópticos, sem

refinação e após refinação das polpas, variando-se pH, consistência e temperatura de refino.

Quadro 3 - Testes físico-mecânicos e ópticos realizados nas polpas

Testes	Normas
Gramatura	TAPPI T 410 om-83
Espessura	TAPPI T 411 om-84
Índice de Rasgo	TAPPI T 414 om-87
Índice de Arrebentamento	TAPPI T 403 om-85
Índice de Tração*, Módulo de Elasticidade Específico, Alongamento e Energia de Deformação	TAPPI T 494 om-81
Alvura **	TAPPI T 452 om-87
Opacidade e Coeficiente de Dispersão de Luz	TAPPI T 519 om-91
Resistência a Passagem de Ar	TAPPI T 536 om-85
Maciez Gurley	ABCP p 35/76
Lisura Gurley	ABCP p 35/76
Peso Específico Aparente	TAPPI T 220 om-88
Volume Específico Aparente	TAPPI T 220 om-88
Número de fibras/grama***	TAPPI T 271 pm 91

\* Realizado no aparelho Instron modelo 4204 com sistema computadorizado de aquisição, análise e saída de dados, com distância entre garras de 100 mm, velocidade de teste de 25 mm/minuto e capacidade da célula de carga de 1.000 N. Simultaneamente, este teste fornece as seguintes informações: força, tensão e deformação ao limite de proporcionalidade, energia de deformação (TEA) e módulo de elasticidade específico.

\*\* Teste realizado no aparelho Datacolor E2000 .

\*\*\* O número de fibras por grama de polpa foi determinado no aparelho Kajaani FS - 200.

Na etapa de cozimento os parâmetros avaliados foram: o número kappa, % de álcali ativo aplicado, rendimento depurado e viscosidade da polpa. Na etapa de branqueamento foram considerados o número kappa, a viscosidade, o teor de pentosanas e a alvura das polpas (A.D. e O.D.).

As polpas refinadas foram avaliadas com base no peso específico aparente a  $600 \text{ kg/m}^3$ , considerando a evolução das propriedades físico-mecânicas e ópticas em função desta propriedade. Com auxílio do software SAEG (Programa de análises estatísticas), foram testadas equações matemáticas, e, através de técnicas de regressão, foram selecionados os modelos que melhor se ajustaram aos dados observados, com base no *F calculado*, no coeficiente de



determinação ajustado ( $R^2$ ), num total de dez repetições para cada propriedade e análise de resíduo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Dimensões das fibras das madeiras

No Quadro 4 são apresentados os resultados das dimensões de fibras das madeiras em estudo. Os dados representam a média de 100 fibras mensuradas de cada madeira, e, utilizando o teste Tukey, avaliaram-se as diferenças entre elas.

Os resultados obtidos demonstram que a idade das árvores afeta significativamente as dimensões das fibras. Os valores encontrados estão de acordo com os observados na literatura para madeiras de eucalipto (D'ALMEIDA, 1988; SMOOK, 1987; KOKUREK e STEVENS, 1983).

Quadro 4 - Dimensões de fibras das madeiras de diferentes idades

Madeiras (idade, anos)	Comprimento (mm)	Largura ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro de Lúmen ( $\mu\text{m}$ )	Espessura de Parede ( $\mu\text{m}$ )
M (4)	1,09 a	18,07 a b	10,06 a	4,00 a
M (7)	1,17 b	17,42 b	8,77 b	4,33 b
M (9)	1,23 c	18,87 a	7,95 c	5,46 c

Médias seguidas da mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Os resultados mostram uma correlação direta entre comprimento e espessura de parede celular e uma correlação inversa entre comprimento e diâmetro de lúmen, de acordo com literatura (BARRICHELO et al., 1983). As variações encontradas entre as dimensões das fibras apresentam importância prática na fabricação de polpa e papel, pois afetam a qualidade do produto final. Esses efeitos serão discutidos com detalhes nos itens subsequentes deste estudo.

#### 4.2. Composição química e densidade básica das madeiras de diferentes idades

No Quadro 5 são mostrados os resultados da média de duas repetições das características químicas e físicas das madeiras, obtidas de cada madeira.

Quadro 5 - Composição química e densidade básica das madeiras

Madeiras (Idade, anos)	Lignina Total (%)	Holocelulose (%)	Extrativos Totais (%)	Cinzas (%)	Densidade Básica (kg/m <sup>3</sup> )
M (4)	29,2 a	67,7 a	2,77 a	0,35 a	451 a
M (7)	30,4 a	65,7 a b	3,62 b	0,27 b	512 b
M (9)	29,9 a	66,9 b	2,94 a	0,25 c	494 c

Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Com base nos resultados mostrados no Quadro 5, verifica-se que o teor de lignina das madeiras não apresentou diferenças estatísticas significativas com a idade, porém os teores de holocelulose e extrativos mostraram, em alguns casos, ser estatisticamente diferentes. Os teores de cinzas e a densidade básica das madeiras apresentaram valores estatisticamente diferentes em função da idade de corte das árvores. Esperava-se que os valores de densidade básica e composição química dessa árvore apresentassem valores intermediários às

árvores de 4 e 9 anos. O maior valor da densidade básica da madeira de 7 anos pode ser explicado pelas condições edafoclimáticas de crescimento desse clone, apresentadas no Quadro 1. Observa-se neste quadro que as condições de solo e déficit hídrico do local de crescimento dessa árvore diferem das árvores de 4 e 9 anos, com influência na sua produtividade, que apresentou menor valor, em torno de 15% menor (50 t/ha/anos), que as madeiras de 4 e 9 anos (60 t/ha/anos).

Isso demonstra que as condições de crescimento desta árvore foram mais desfavoráveis que as demais, afetando sua densidade básica e, conseqüentemente, sua composição química. Com base nesses resultados, pode-se observar que a idade de corte da madeira afeta significativamente algumas de suas características tecnológicas.

Na literatura (MAEGLIN, 1987) é relatado que o teor de madeira juvenil em folhosas pode trazer conseqüências diretas para a qualidade da madeira, pois, além de mostrar menores dimensões de fibras, apresentam, ainda, maiores ângulos fibrilares e maiores teores de holocelulose. De modo geral, essas características de madeira juvenil foram observadas na madeira de eucalipto de 4 anos, que deve apresentar maiores teores de lenho juvenil.

A Figura 1 mostra a tendência geral de evolução, com a idade, dos componentes químicos e da densidade básica das madeiras analisadas, em valores percentuais, tendo como referência o percentual de 100% para o nível mais elevado de cada componente.

Nessa escala de referência, nota-se aumento dos teores de lignina (3,5 e 2%) e decréscimo nos teores de holocelulose (4 e 2,5%) das madeiras de 7 e 9 anos, respectivamente, quando comparadas com a madeira de 4 anos. Nos teores de extrativos, verificam-se valores mais significativos, com aumento da ordem de 23 e 19% para as madeiras de 7 e 9 anos, respectivamente. A densidade básica apresentou tendência similar, com aumentos de 12 e 7%, respectivamente. Os teores de cinzas apresentaram tendência de queda com aumento da idade, com a madeira de 9 anos apresentando valores 7,5 e 40% menores que as madeiras de 7

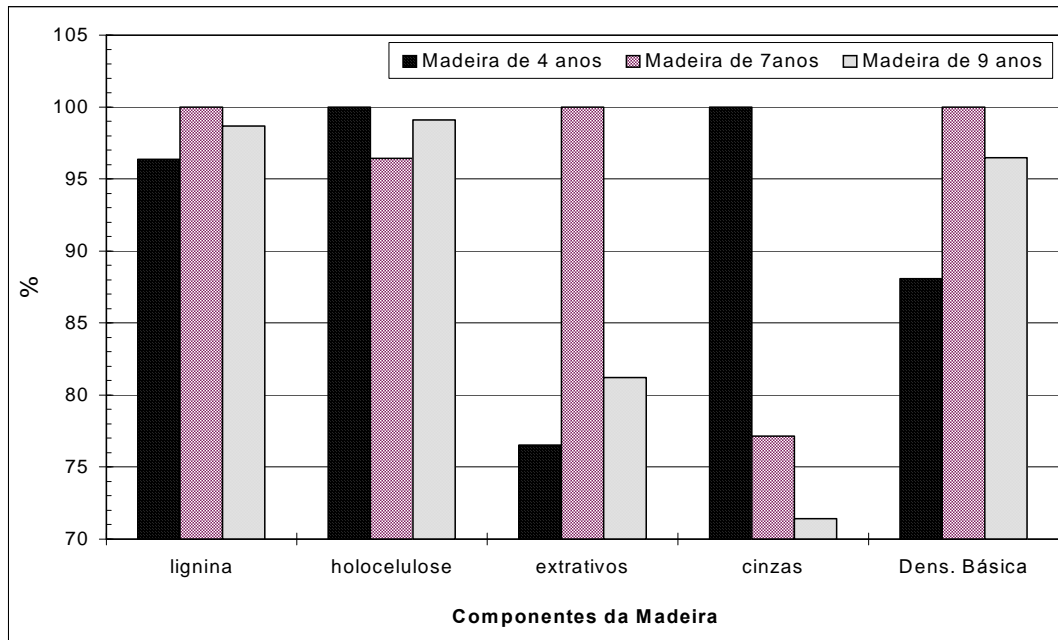


Figura 1 - Relação percentual dos componentes químicos e da densidade básica das madeiras de diferentes idades.

e 4 anos, respectivamente. Esses resultados mostraram haver efeito da idade de corte nas características físicas e químicas da madeira. Essas diferenças podem gerar comportamentos diferenciados das madeiras nas diferentes etapas do processo de fabricação de celulose e papel, com reflexos na qualidade do produto final.

Em geral, maiores teores de lignina presentes na madeira podem exigir maiores cargas de reagentes químicos durante o processo de cozimento, assim como maiores teores de extrativos, que também colaboram para tal, além de possuírem maior potencial para formação de depósitos de “pitch” em equipamentos, principalmente telas e feltros, e, ainda, afetarem o potencial de absorção de líquidos no papel.

Já os maiores teores de cinzas podem estar associados à maior carga de inorgânicos na polpa, que afetarão os processos de queima do licor negro em caldeiras de recuperação, juntamente com os teores de lignina.

A maior densidade básica geralmente está relacionada com a maior dificuldade no processo de picagem da madeira, que leva a uma maior heterogeneidade nas dimensões dos cavacos, com influência nos processos de impregnação e penetração dos licores de cozimento e reflexos no rendimento depurado de polpa.

### 4.3. Polpação kraft das madeiras de diferentes idades

As madeiras foram submetidas à deslignificação pelo processo kraft convencional, com o objetivo de obter polpas com o mesmo grau de deslignificação ( $kappa\ 18 \pm 0,5$ ). Os resultados são sumarizados no Quadro 6.

Quadro 6 - Resultados da polpação kraft convencional das madeiras

Madeira (Idade, anos)	Álcali ativo aplicado (%)	Kappa	Rendimento depurado (%)	Viscosidade da polpa (cP)	Produtividade ADTB/ha/ano
M (4)	14,0	18,3	53,5	59,6	10,2
M (7)	17,5	18,1	52,4	34,0	9,5
M (9)	14,5	18,1	55,5	52,3	10,7

ADTB - “Air Dray Tonnage Bleached”.

Os resultados mostram que diferentes dosagens de álcali foram necessárias para se atingir grau de deslignificação semelhante ( $kappa\ 18 \pm 0,5$ ). As madeiras de 7 e 9 anos, quando comparadas com a de 4 anos, exigiram uma carga alcalina 3,5 e 0,5% (base madeira) maior, respectivamente. Como consequência, ocorreram perdas de 1,1% de rendimento e cerca de 40% de viscosidade para a polpa da madeira de 7 anos, enquanto a polpa da madeira de 9 anos apresentou rendimento aproximadamente 2% maior e viscosidade 12% inferior.

Esses resultados podem ser explicados pelas diferenças encontradas nos resultados das análises químicas e da densidade das madeiras (Quadro 5).

As madeiras com maiores idades tenderam a apresentar maiores teores de extrativos e lignina, esta última sem diferença estatística significativa (Quadro 5), mas que implica maiores cargas de compostos químicos durante os processos de cozimento. Os teores de lignina e extrativos tenderam a aumentar com a densidade básica, e o teor de holocelulose, a diminuir. Madeiras mais densas podem produzir cavacos mais rígidos, que, em geral, apresentam maior variabilidade de suas dimensões durante a picagem e, conseqüentemente, na polpação, impregnação mais heterogênea, o que implica a utilização de maiores cargas de álcali para garantir efetiva deslignificação, porém com prejuízos de rendimentos. A produtividade da polpa da madeira de 9 anos apresenta-se em torno de 12% maior que a polpa da madeira de 4 anos, mas com qualidade de fibra inferior em termos de viscosidade.

O efeito da idade de corte nas características tecnológicas das árvores pode comprometer a avaliação das mesmas dentro de um programa de seleção de clones, já que a idade de corte relacionou-se com o potencial tecnológico da madeira.

#### **4.4. Branqueamento das polpas**

As polpas foram submetidas a uma seqüência de branqueamento do tipo ECF, em que se atingiu uma alvura final de  $91 \pm 0,5\%$  ISO.

A seqüência utilizada consistiu de uma pré-deslignificação com oxigênio (Pré-O<sub>2</sub>), seguida de um estágio de dioxidação (D<sub>0</sub>), logo após, uma extração com peróxido de hidrogênio, não-pressurizado (E<sub>p</sub>), e, finalmente, um último estágio de dioxidação (D<sub>final</sub>). Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 7.

A Figura 2 mostra que a redução do número kappa durante a deslignificação com oxigênio (pré-O<sub>2</sub>) varia para polpas produzidas de madeiras de diferentes idades. A polpa obtida da madeira de 4 anos alcançou eficiência de redução de número kappa na pré-O<sub>2</sub> de 36,1%, enquanto as polpas provenientes

das madeiras de 7 e 9 anos alcançaram, respectivamente, a eficiência de 41,4 e 39,8%.

Quadro 7 - □ Resultados dos estágios de branqueamento das polpas provenientes de madeiras de diferentes idades

Etapas	Kappa			Viscosidade (cP)			Alvura (%ISO)		
	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9
Polpa Marrom	18,3	18,1	18,1	59,6	34,0	52,3	--	--	--
Pré-O <sub>2</sub>	11,7	10,6	10,9	37,5	24,3	31,1	52,5	52,3	52,4
OD <sub>0</sub> E <sub>P</sub>	2,1	2,4	2,5	18,6	14,7	18,5	85,5	85,1	86,4
OD <sub>0</sub> E <sub>P</sub> D	--	--	--	17,0	12,0	15,6	91,5	90,9	90,6

- M 4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M 7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M 9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Já é conhecido que a madeira representa uma grande fonte de variação nos processos de cozimento e branqueamento. COLODETTE et al. (1995) citam que diferentes tipos de madeiras e polpas de eucalipto têm efeito no branqueamento com oxigênio. Trabalhando com polpas de número kappa  $17 \pm 1$ , obtidas de cinco clones de eucalipto, a eficiência da deslignificação na pré-O<sub>2</sub> variou entre 38,4 e 49,7%, dependendo das características tecnológicas dos clones. Os resultados obtidos neste estudo confirmam essa informação. Os mesmos autores concluíram, ainda, que madeiras com maior dificuldade de deslignificação durante o cozimento respondem menos à deslignificação com oxigênio. No entanto, os resultados obtidos neste estudo, apresentados no Quadro 6 e na Figura 2, não permitem confirmar esse comportamento, pois a polpa da madeira de 7 anos, que apresentou maior dificuldade de deslignificação durante o cozimento, foi a polpa que apresentou maior eficiência na pré-deslignificação com oxigênio (41,4%); isto, talvez, possa ser explicado pelo tipo de lignina residual presente na madeira e pelo número de estruturas fenólicas livres presente nesta lignina residual, que são sítios de ataques do oxigênio durante a pré-O<sub>2</sub>. Além disso, as fibras dessas polpas, por terem tido maior potencial de degradação



durante o cozimento, podem estar mais susceptíveis à ação dos reagentes da pré-O<sub>2</sub>, oferecendo maior acessibilidade ao seu interior, principalmente nas regiões

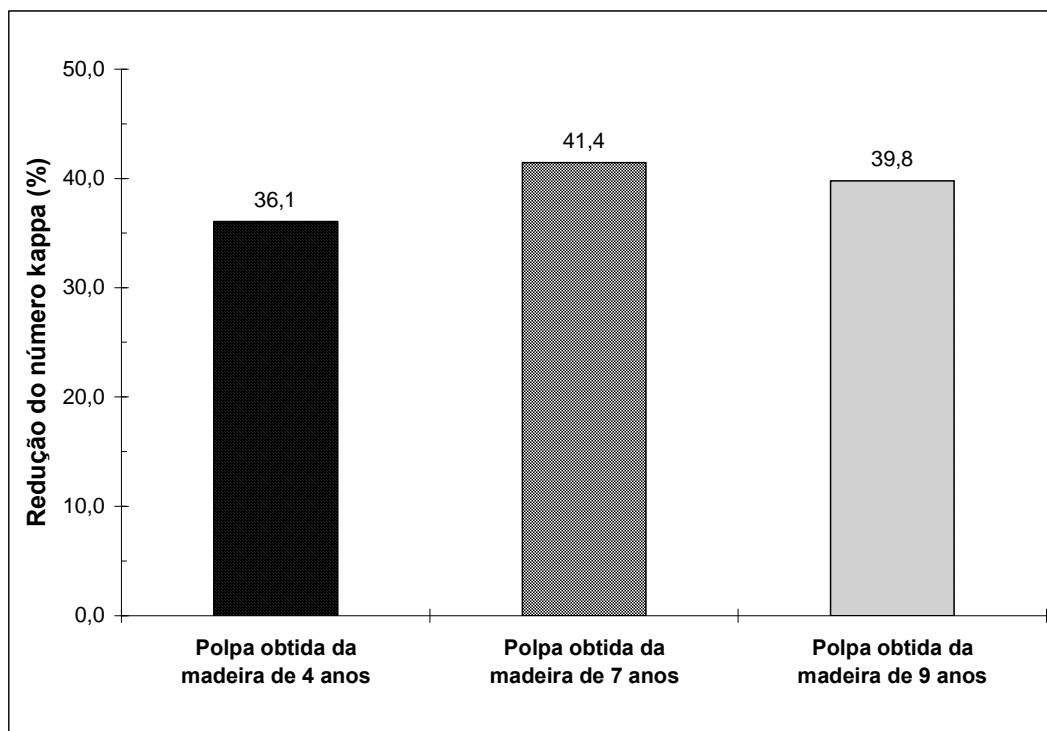


Figura 2 - □Eficiência da deslignificação com oxigênio (pré-O<sub>2</sub>) para polpas obtidas das madeiras de diferentes idades.

amorphas das cadeias de celulose, e aumentando, dessa forma, a eficiência dessa etapa (SILVA, 1996). O teor de pentosanas, que representa a maior parte das hemiceluloses presentes em eucalipto (xilanas), não apresentou grandes variações entre as polpas das madeiras em estudo, já que essas apresentam resistências ao álcali durante o cozimento. Contudo, essas hemiceluloses são retiradas das regiões amorfas durante o cozimento alcalino e se precipitam sobre as cadeias de celulose quando da redução do pH, abrindo espaços nessas regiões. Quanto maior o ataque alcalino, mais hemiceluloses são retiradas dessas regiões e maior o espaço livre para penetração de reagentes da pré-O<sub>2</sub>.

Nessa etapa do trabalho, a principal preocupação foi a de branquear as polpas em um mesmo nível de alvura ( $91 \pm 0.5$  ISO). O Quadro 8 mostra os resultados finais do branqueamento, podendo-se dizer que o potencial de

Quadro 8 - Resultados finais do branqueamento das polpas das madeiras de diferentes idades

Etapas	Alvura % ISO			Alvura (od) % ISO			Viscosidade (cP)			Pentosanas (%)		
	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9
Pré-O <sub>2</sub>	52,5	52,3	52,4	--	--	--	37,5	24,3	31,1	--	--	--
OD <sub>0</sub> EpD	91,5	90,9	90,6	89,4	88,5	88,2	17,0	12,0	15,6	14,3	14,7	13,7
Variação %	39	38,3	38,2	--	--	--	54,6*	50,6*	49,8*	--	--	--

\* Variação em percentual de redução da viscosidade desde a pré-O<sub>2</sub> até a polpa branqueada.

od: alvura da polpa após seu envelhecimento; M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

branqueabilidade das polpas foi similar, pois atingiu ganho de alvura da ordem de  $38,6 \pm 0,4$  ISO, desde a pré-O<sub>2</sub> até o final da seqüência, com uma queda percentual de viscosidade de  $52,2 \pm 2,4\%$ . Os valores de viscosidades finais encontram-se dentro de uma faixa razoavelmente aceitável para polpas ECF ( $12 \pm 2$  cP, Quadro 7), ou seja, acima de 10 cP, que, segundo CARNEIRO et al. (1995), garante o desenvolvimento de propriedades no papel produzido.

Pode-se verificar também que a similaridade de reversão de alvura de 2,1% ISO, para as polpas das madeiras de 4 e 9 anos, e 2,4% ISO, para a polpa da madeira de 7 anos, pode ser considerada dentro de faixas comumente encontradas no mercado.

Com base em informações de literatura (SPINNER, 1991; DANILAS, 1988), os teores de hemiceluloses são os principais componentes associados à reversão de alvura. Os teores de hemiceluloses, determinados pela percentagem de pentosanas nas polpas branqueadas (Quadro 8), revelam valores bem próximos para as três polpas (em torno de  $14,2\% \pm 0,5$ ).

#### 4.5. Propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas não-refinadas

Para avaliação dos efeitos da qualidade das polpas, sem a interferência da ação de refino, importante principalmente para a produção de papel “tissue”, as propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas foram determinadas e os resultados mostrados no Quadro 9.

Conforme os resultados mostrados no Quadro 9, embora para alguns casos não tenham sido detectadas diferenças estatísticas significativas, as polpas processadas em pH 5 apresentaram, com exceção do volume específico aparente, tendências de reduções de propriedades, quando obtidas das madeiras de maiores idades, ou seja, 7 e 9 anos, respectivamente, em comparação com a madeira de 4 anos. O teste de comparação de médias indica que as propriedades de resistência à passagem de ar, peso específico aparente, volume específico aparente e energia de deformação (TEA), das polpas processadas em pH 5, foram estatisticamente diferentes entre si a 5% de probabilidade; e, para as demais propriedades, em que as médias foram comparadas, elas não apresentaram diferenças estatísticas.

Quadro 9 – Média dos resultados das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas não-refinadas, obtidas das madeiras de diferentes idades

Propriedades	pH 5			pH 9		
	M 4	M 7	M 9	M 4	M 7	M 9
°SR	21,00	19,50	18,50	22,00	20,00	18,00
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	66,17	65,67	63,18	65,67	63,18	63,18
Índice de Tração (N.m/g)	31,76 a	29,93 a	27,18 a	31,53 a	34,87 b	33,53 b
Índice de Arrebatamento (Kpa.m <sup>2</sup> /g)	1,51 a	1,51 a	1,25 a	1,49 a	1,62 b	1,77 c
Índice de Rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)	4,48 a	4,22 a	4,39 a	4,37 a	4,27 a	4,17 a
Alongamento (%)	1,08 a	1,05 a	1,02 a	1,04 a	1,23 b	1,17 c
Resistência à Passagem do Ar (s/100m <sup>3</sup> )	0,74 a	0,45 b	0,33 c	0,65 a	0,52 b	0,37 c
Peso Específico Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	502,00 a	45,001 b	409,00 c	484,00 a	465,00 b	439,00 c
Volume Específico Aparente (cm <sup>3</sup> /g)	1,99 a	2,21 b	2,44 c	2,06 a	2,15 b	2,27 c
Energia de Deformação (J/m <sup>2</sup> )	15,73 a	14,23 b	12,25 c	14,63 a	18,87 b	17,46 b
Módulo de Elasticidade (MN.m/kg)	6,26 a	5,58 a	5,78 a	6,12 a	6,28 a	6,31 a
Alvura (% ISO)	91,30 a	90,70 b	90,50 b	91,40 a	90,70 b	90,80 b
Opacidade (%)	93,50 a	93,00 b	92,40 c	93,20 a	90,70 b	91,80 c
Coefficiente de Dispersão de Luz (m <sup>2</sup> /kg)	48,10 a	47,10 b	43,90 c	46,80 a	45,70 b	42,50 c

Lisura (s/50 cm <sup>3</sup> )	13,89 a	10,21 b	6,16 c	13,27 a	11,49 b	9,52 c
Maciez (s/100 cm <sup>3</sup> )	51,63 a	50,79 a	43,74 b	50,19 a	49,36 a	40,65 b

- Médias seguidas de mesma letra, em uma mesma linha, a um mesmo valor de pH, não apresentam diferenças significativa pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

As madeiras com densidades mais altas geram fibras mais rígidas, com maior espessura de parede, menor diâmetro de lúmen e, conseqüentemente, menor capacidade de conformabilidade durante a formação da folha de papel. O Quadro 4, mostrado anteriormente, confirma essas informações e contribui para ajudar a explicar a tendência de redução das propriedades com aumento da idade das madeiras, quando as polpas são processadas em meio ácido.

Pode-se observar, também, que a alteração do pH da polpa, de 5 para 9, gera comportamentos diferenciados das polpas das madeiras de diferentes idades. Quando comparadas a uma mesma idade, a polpa da madeira de 4 anos, mesmo apresentando °SR mais elevado, mostrou tendência de redução da maioria das propriedades, com exceção do volume específico aparente.

Já as polpas das madeiras de 7 e 9 anos apresentam tendência de aumento nos valores da maioria das propriedades mecânicas e tendência de redução nos valores das propriedades ópticas e superficiais, com exceção da lisura.

O meio alcalino favorece o processo de hidratação e inchamento das polpas, devido à maior intensidade de grupos  $\text{OH}^-$  presentes na estrutura das fibras, proporcionando maior fibrilamento interno, com reflexo no aumento do potencial de área de contato entre fibras, durante a formação do papel, gerando, com isto, papéis com maiores propriedades mecânicas (PAAVILAINEN, 1994). Fibras com maiores espessuras de paredes sofrem maior efeito, o que pode explicar a tendência de aumento dos valores das propriedades mecânicas das polpas obtidas das madeiras mais velhas (7 e 9 anos), quando tratadas a pH 9.

Devido à maior flexibilidade das fibras favorecidas pelo meio alcalino, a formação do papel é beneficiada por melhor distribuição, arranjo e maior número de ligações entre fibras na estrutura do papel, o que gera melhores condições de menor coeficiente de espalhamento de luz, com conseqüente redução na opacidade e na propriedade de maciez, porém com maiores valores de

propriedades de lisura; esses fatos foram observados para todas as polpas, à exceção da propriedade de lisura da polpa obtida da madeira de 4 anos de idade, que apresentou pequeno acréscimo. A alvura das folhas não é influenciada pelo pH da polpa.

O Quadro 9 mostra, ainda, o comportamento de algumas propriedades importantes para papéis “tissues”, como maciez e volume específico aparente, quando processadas em pH 5 e 9.

Nota-se uma tendência de aumento do volume específico aparente e redução da maciez do papel, com aumento da idade das madeiras. As polpas de madeiras mais velhas apresentam fibras com paredes mais espessas (Quadro 4) e mais rígidas. Isso desfavorece os mecanismos de colapsamento das fibras durante a formação, gerando uma estrutura mais porosa e de superfície mais irregular. Como conseqüência, tem-se um aumento do volume específico aparente, porém com alguma perda da maciez “gurley” do papel.

Observa-se ainda que, quando tratadas em pH alcalino e comparadas ao tratamento ácido, essas propriedades mostram tendência de redução dos seus valores para todas as polpas, à exceção do volume específico aparente para a polpa obtida da madeira de 4 anos, que apresenta pequeno acréscimo.

Como já discutido anteriormente, o meio alcalino favorece processos de hidratação e inchamento, melhorando a conformabilidade e o potencial de colapsamento das fibras e gerando maior área de contato e melhor arranjo da rede de fibras no processo de formação do papel, porém com redução da maciez e do volume específico aparente do papel.

No Quadro 10 observam-se os resultados das análises de fibras realizadas nas polpas branqueadas, com auxílio do aparelho kajaani. Apesar de não haver diferença estatística significativa na maioria dos valores, observa-se que a polpa da madeira de 4 anos apresentou maior número de fibras por grama (22,22 milhões), comparadas às madeiras de 7 e 9 anos (20,93 e 19,42 milhões, respectivamente), e maior percentual de finos, com 5,14% contra 4,73 e 4,92%, respectivamente.

Esses resultados também ajudam a explicar, em geral, os maiores valores das propriedades da polpa obtida da madeira de 4 anos, quando tratadas em pH ácido. Maior número de fibras por unidade de área, assim como maior porcentagem de finos, proporciona melhor acomodação desse material durante a

Quadro 10 - Comparação dos resultados das análises realizadas no aparelho kajaani das polpas branqueadas obtidas das madeiras de diferentes idades

Polpa	“Coarseness” (mg/100m)	Comprimento do material fibroso (mm)	Número de Fibras/Grama (milhões)	Finos (%)
M 4	7,20 a	0,750 a	22,225 a	5,14 a
M 7	7,35 a	0,770 a	20,930 a b	4,73 a
M 9	7,25 a	0,845 a	19,425 b	4,92 a

a, b, c: médias seguidas da mesma letra, na mesma coluna, não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

formação da folha de papel. A maior área de contato gera maior número de ligações, o que tende a gerar papéis, de maneira geral, com maiores valores de propriedades físico-mecânicas e ópticas.

#### 4.6. Propriedades físico-mecânicas das polpas refinadas

Para avaliação dos comportamentos das polpas com a evolução do refino, foram confeccionados gráficos relacionando as propriedades físico-mecânicas e ópticas, em função do peso específico aparente do papel, como já descrito anteriormente em Material e Métodos.

O peso específico aparente das folhas formadas foi escolhido para se relacionar com as demais propriedades, por ser uma propriedade estrutural associada com a habilidade de consolidação da estrutura do papel.

Além disso, essa propriedade é influenciada pelas características tecnológicas das fibras, envolvendo características dimensionais, número de fibras por grama, “coarseness”, percentual de finos, capacidade de colapsamento, número de ligações interfibras, resistência das ligações e outras possíveis características que dependam da composição física e química das polpas.

Os valores médios das propriedades físico-mecânicas e ópticas, para todos os tratamentos que foram submetidos às polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, encontram-se sumarizados no Apêndice B. Algumas dessas propriedades, que, em geral, são consideradas mais expressivas em controles de qualidade, são apresentadas e discutidas nos próximos itens.

#### **4.6.1. Resistência à tração**

A resistência à tração, neste estudo, é expressa pelo índice de tração calculado pela relação matemática entre a força máxima necessária para causar ruptura do corpo-de-prova e a gramatura da amostra.

As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento do índice de tração com a evolução do peso específico aparente das folhas formadas, em que os modelos do tipo “quadrático” e “cúbico” (Apêndice A), em relação às variáveis de refino envolvidas, se ajustam melhor a essa propriedade.

As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento do índice de tração com a evolução do peso específico aparente para as polpas obtidas das madeiras de diferentes idades e refinadas a consistências de 8 e 12% e temperatura inicial de 10 e 30°C, porém a pH 5 e 9, respectivamente.

De maneira geral, notou-se tendência de as polpas das madeiras de maiores idades apresentarem maiores valores de índice de tração, principalmente para níveis de peso específico aparente menores que 600 kg/m<sup>3</sup>. Para níveis acima de 600 kg/m<sup>3</sup>, observou-se tendência de esses valores, para as polpas das madeiras de 7 e 9 anos, se igualarem, como mostrado na Figura 3-a, b e d e

Figura 4-a, b e c, onde a polpa da madeira de 7 anos alcançou valores de índice de tração semelhantes aos da polpa da madeira de 9 anos.

Já a polpa obtida da madeira de 4 anos apresentou índice de tração sempre inferior ao das demais polpas, ao longo de toda a faixa de peso específico aparente analisada.



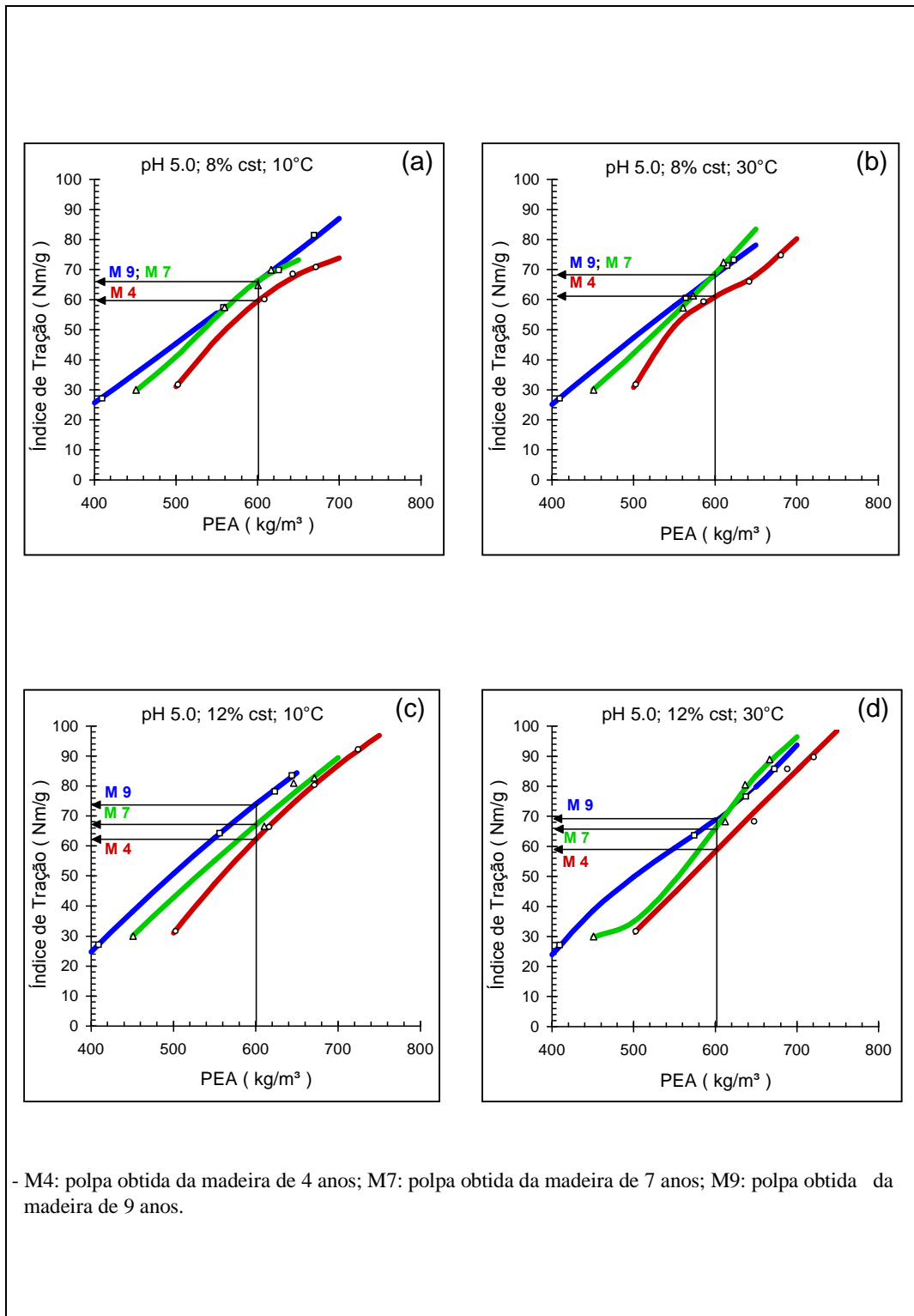


Figura 3 - Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de tração das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 5.

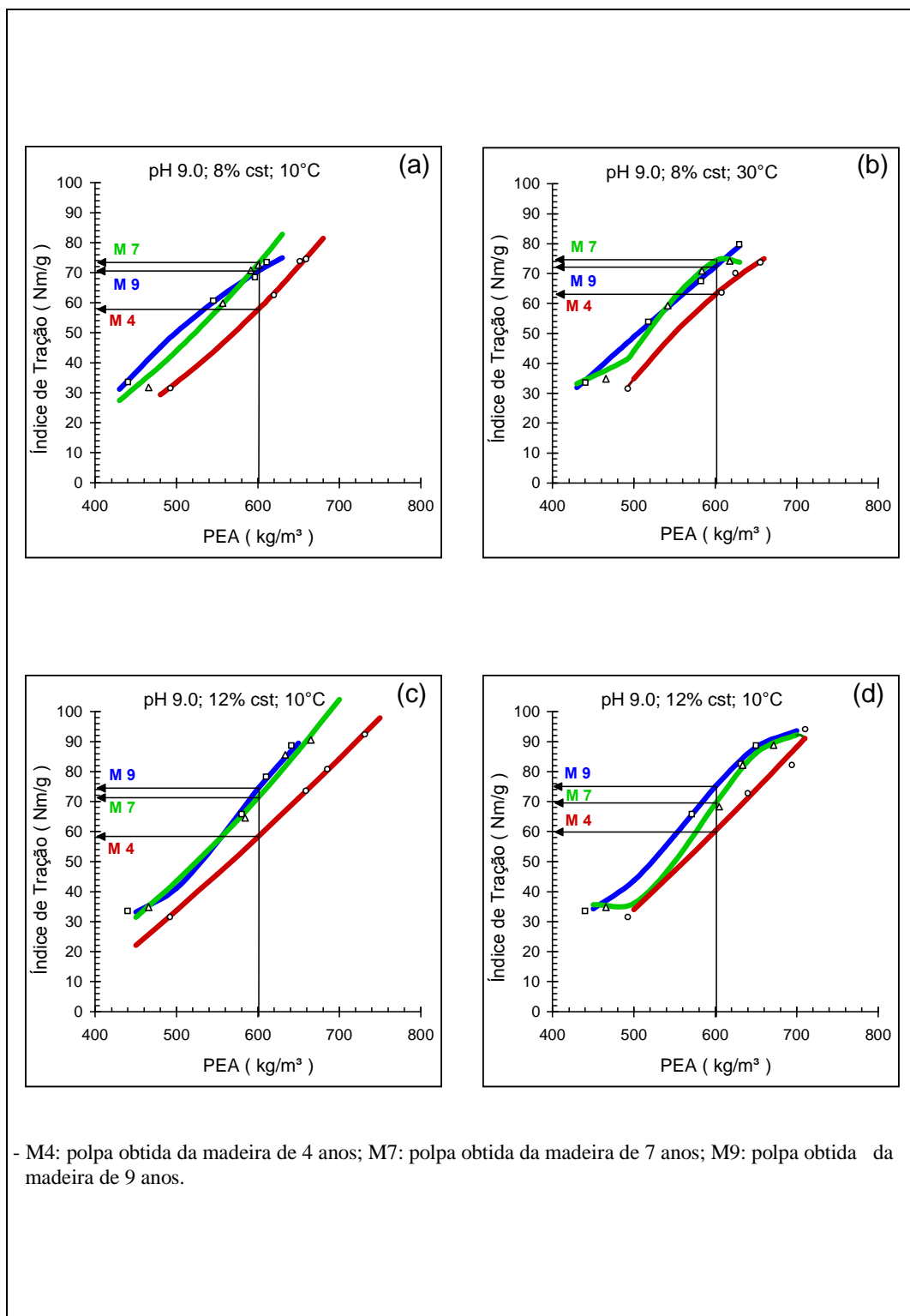


Figura 4 - Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de tração das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9.

Quando se analisaram os valores de índice de tração a  $600 \text{ kg/m}^3$ , a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos foi de aproximadamente 8% (Figura 3-c), e a maior diferença foi de cerca de 26% (Figura 4-a).

Quando comparada com a polpa da madeira de 9 anos, a diferença mínima foi de aproximadamente 10% (Figura 3-b), e a máxima, de aproximadamente 27% (Figura 4-c).

Os resultados apresentados anteriormente, no Quadro 3, podem ajudar a explicar esse comportamento, já que fibras com maiores espessuras de parede podem sofrer maior desfibrilamento durante o refino, o que aumenta o potencial de ligações interfibrilares, aumentando a área de ligação entre as fibras e, conseqüentemente, a resistência à tração do papel formado.

Para melhor visualização dos efeitos das variáveis de refino (pH, consistência e temperatura), no índice de tração da folha formada, o Quadro 11 mostra o ganho percentual em índice de tração para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor da propriedade a  $600 \text{ kg/m}^3$ .

A análise do Quadro 11 foi feita mantendo-se constante duas das variáveis de refino, para melhor visualização do efeito da alteração de uma variável dentro da operação.

Quadro 11 - Ganho percentual do índice de tração em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				$\Sigma$
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	3%	5,6%	7,5%	1,1%	0	9,1%	1,0%	4,3%	31,4%
M 7	0,4%	4,2%	1,4%	0	10,4%	12,4%	8,0%	4,9%	41,7%
M 9	0	2%	10,4%	2,5%	5,3%	8,2%	11,0%	12,1%	51,5%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos;  $\Sigma$ : somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

A alteração do pH de refino de 5 para 9 proporciona aumentos nos ganhos percentuais do índice de tração nas polpas das madeiras de 7 e 9 anos, enquanto para a polpa obtida da madeira de 4 anos, tais fatos são observados apenas para os tratamentos a 30°C, com ganhos da ordem de 9,1 e 4,3%, para as consistências de 8 e 12%, respectivamente.

O meio alcalino gera potenciais de formação de grupos  $\text{OH}^-$  na estrutura das fibras, favorecendo intensamente os processos de hidratação e inchamento.

Esses processos, associados à ação de refino, elevam o potencial de desfibrilamento das fibras, acarretando aumento na área de ligações interfibrilares e, conseqüentemente, na resistência à tração da folha formada.

Fibras com maiores espessuras de parede sofrem maior efeito de hidratação e inchamento, aumentando ainda mais seu volume, gerando maior área para ligações e, assim, proporcionando condições para maiores resistências. As características de dimensões das fibras das madeiras em estudo, já mostradas no Quadro 3, contribuem para explicar esses resultados.

A elevação da consistência de refino de 8 para 12% causa, na polpa obtida da madeira de 9 anos, aumentos nos ganhos percentuais dos índices de tração de maneira mais significativa, e, na polpa da madeira de 4 anos, isto ocorre apenas quando ela é refinada à temperatura inicial de 10°C; já na polpa da madeira de 7 anos observa-se, na maioria dos casos, tendência de redução de ganhos percentuais na propriedade.

Esse comportamento talvez possa ser explicado pelo fato de que o aumento da consistência de refino gera a formação de agregados ou flocos de fibras, que se constituem na unidade básica que recebe os impactos durante o refino.

A presença de flocos de fibras, ou, ainda, o aumento da manta ou do colchão de fibras entre as áreas refinadoras, reduz a ocorrência de corte das fibras e a formação de finos, já que grande número de fibras, ao passarem pelas barras do refinador, encontram-se protegidas por outras fibras, não havendo, dessa forma, contato direto com as barras refinadoras. Essa ação provoca maior efeito

de desfibrilamento e, conseqüentemente, aumento do potencial de desenvolvimento de resistências, sendo mais pronunciado em fibras com paredes celulares mais espessas, como é o caso da madeira de 9 anos.

Para os tratamentos envolvendo as polpas das madeiras de 4 e 7 anos, os maiores ganhos percentuais de índice de tração ocorrem, na maioria dos casos, quando os refinamentos são realizados à consistência de 8%.

Talvez isso possa ser explicado pelo fato de que fibras com menores espessuras de parede celular sejam potencialmente mais frágeis e mais susceptíveis ao colapsamento e a cortes com geração de maiores teores de finos, que possuem maior potencial de ligações interfibrilares, pela possibilidade de maior contato durante a formação do papel.

Já a polpa da madeira de 9 anos, devido às características dimensionais de suas fibras, principalmente a maior espessura de parede celular (Quadro 3, item 4.1), quando comparada às polpas obtidas das madeiras de 4 e 7 anos, pode ter apresentado maior resistência ao corte e à formação de finos, quando refinada a 8% de consistência.

Quando refinada a 12% de consistência, pode ter ocorrido efeito pronunciado de desfibrilamento, o que aumenta seu potencial de ligações interfibrilares e, conseqüentemente, o de formação de papéis com potenciais ainda mais elevados para resistência à tração.

Ainda com base no Quadro 11, a alteração da temperatura inicial de refino de 10 para 30°C, quando as polpas são refinadas a 8% de consistência, gera aumentos no ganho percentual do índice de tração, enquanto a 12% de consistência a maioria dos tratamentos acarreta redução desse ganho.

Para alguns autores, como CLARK (1985), o aumento da temperatura da polpa durante o refino influencia as propriedades do papel, possivelmente por estar associado ao processo de hidratação e inchamento das fibras, o que, em geral, pode acarretar aumento na flexibilidade das fibras, favorecendo a sua consolidação na folha de papel, aumentando o potencial de ligações entre fibras e áreas de ligações e gerando maiores potenciais para resistências à tração.

Como será apresentado no item 4.6.7, relativo ao consumo de energia durante a refinação, os refinamentos a 8% de consistência exigem maior número de revoluções do refinador para alcançar os níveis desejados, o que acarreta temperaturas finais maiores que nos refinamentos a 12% de consistência, aumentando, portanto, os efeitos benéficos da temperatura no processo de hidratação e inchamento, como descrito anteriormente.

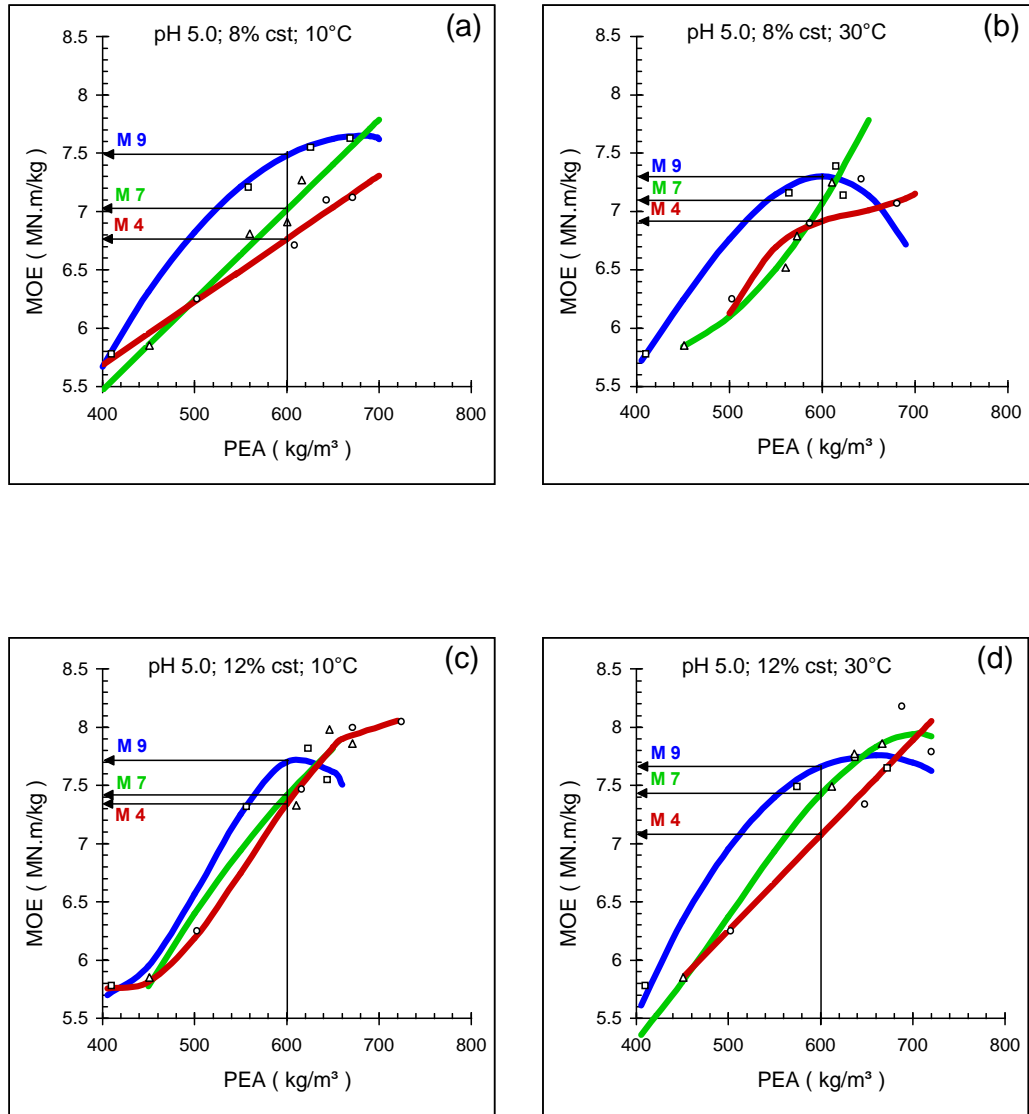
#### **4.6.2. Módulo de elasticidade específico**

Módulo de elasticidade específico expressa a capacidade de um material resistir à deformação, quando submetido a esforço, a cada variação crescente de carga aplicada por unidade de massa específica do material, sendo derivado da inclinação da seção linear elástica da curva de tensão *versus* deformação, que, neste estudo, foi obtida em regime de tração. Em outras palavras, maiores valores de módulo de elasticidade específico indicam a capacidade do material em absorver carga sem, contudo, sofrer deformações substanciais, o que indica o seu potencial de rigidez.

As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento do módulo de elasticidade específico em função do peso específico aparente das folhas formadas das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades e refinadas a consistência de 8 e 12%, temperatura de 30 e 10°C e a pH 5 e 9, respectivamente, em que os modelos matemáticos do tipo “quadrático”, “cúbico”, “raiz cúbica” e “linear” (Apêndice A) se aplicam melhor a essa propriedade.

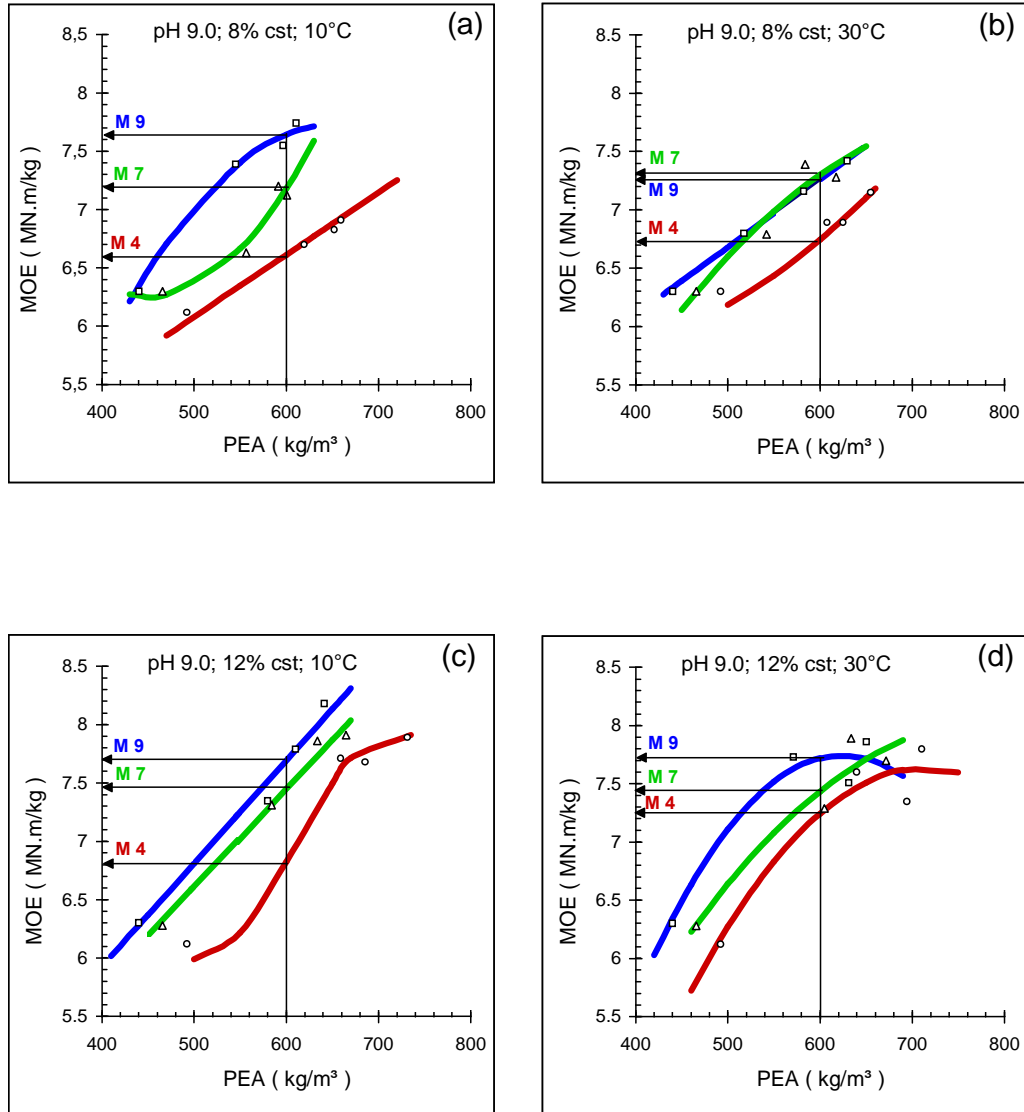
De maneira geral, nota-se uma tendência definida de as polpas de madeiras de maiores idades apresentarem maiores valores de módulo de elasticidade. A polpa da madeira de 4 anos apresentou valores de módulo de elasticidade sempre inferiores aos das demais polpas ao longo de toda a faixa de peso específico aparente analisada.

A polpa da madeira de 7 anos, por sua vez, apresentou valores sempre inferiores aos da polpa da madeira de 9 anos, com exceção do tratamento a pH 9, 12% de consistência e a 30°C, mostrado na Figura 6-b, em que se observou troca de posições.



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 5-5 - Efeito da consistência e temperatura de refino no módulo de elasticidade específico das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 5.



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 6 - Efeito da consistência e temperatura de refino no módulo de elasticidade específico das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9.



Quando se analisaram os valores do módulo de elasticidade a  $600 \text{ kg/m}^3$ , a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos foi de aproximadamente 1% (Figura 5-c), e a maior, em torno de 11% (Figura 6-c). Quando comparada com a polpa de 9 anos, a diferença mínima foi de aproximadamente 5% (Figura 5-c), e a máxima, de aproximadamente 14% (Figura 6-a).

Desde 1961, HIGGINS e DE YONG (1986) relataram que o módulo de elasticidade do papel está relacionado com o número de ligações intrafibras e que a sua eventual redução está associada às quebras das ligações dos grupos hidroxílicos da celulose, principais responsáveis pelas ligações entre as fibras, ou deve-se à presença de substâncias hidrofóbicas potencialmente aptas para reduzir o número ou até mesmo as forças dessas ligações.

Em 1979, PAGE et al. (1979) descreveram que os principais fatores que influenciam o módulo de elasticidade do papel, além do número de ligações entre fibras, é a presença de imperfeições nas paredes das fibras, como dobras, torções e microcompressões, e que fibras mais rígidas causam, no papel formado, maior módulo de elasticidade, se alongam menos e resistem mais às deformações quando sob aplicação de força.

Neste estudo, os resultados mostraram que polpas obtidas das madeiras mais velhas apresentaram maior capacidade de resistirem a deformações quando submetidas a uma força de tração, ou seja, apresentaram módulo de elasticidade mais elevado. Isso provavelmente pode estar relacionado com o fato de essas polpas possuírem fibras com maiores dimensões de comprimento e espessura de parede celular (Quadro 3), o que eleva o potencial de absorção das tensões aplicadas na folha.

Para melhor visualização dos efeitos das variáveis de refino, analogamente à resistência à tração, o Quadro 12 mostra uma relação percentual de ganhos no módulo de elasticidade específico para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor de módulo de elasticidade a  $600 \text{ kg/m}^3$ .

Quadro 12 - □ Ganho percentual do módulo de elasticidade específico em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				Σ
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4 anos	0	3,0%	9,6%	5,5%	0	0,6%	4,6%	8,1%	32,4%
M 7 anos	0	0,9%	5,7%	5,8%	2,4%	4,1%	6,1%	5,8%	30,0%
M 9 anos	3,0%	0,6	6,1%	5,5%	5,2%	0	5,9%	6,3%	32,6%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos; Σ: somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

A forma de análise desses resultados também segue a metodologia da propriedade discutida anteriormente. Assim, observa-se que a alteração de pH 5 para 9 no refino gera uma tendência de pequena redução de ganhos percentuais nessa propriedade para a polpa da madeira de 4 anos, com exceção do tratamento a 12% de consistência e 30°C. Para as polpas obtidas das madeiras de 7 anos esse comportamento se reverte, já para a polpa da madeira de 9 anos o efeito não é bem definido.

O aumento da propriedade era esperado para todas as polpas em estudo, pois o meio alcalino favorece o aumento do potencial de ligações interfibras, pela introdução de grupos  $\text{OH}^-$  na estrutura das fibras, aumentando o número de ligações, conforme comentado anteriormente no item 4.6.1, e a resistência do papel a deformações.

Com a alteração da consistência de refino de 8 para 12%, foram observados aumentos significativos de ganhos percentuais no módulo de elasticidade específico, na maioria dos tratamentos.

Estudos realizados anteriormente por HARTLER (1995), DEFOE (1993) e GIERTZ (1989) permitem relatar que o aumento da consistência da massa aumenta o potencial de microcompressões e torções das fibras. Esses efeitos

fazem com que as fibras se tornem mais flexíveis, ao mesmo tempo que a camada mais externa da parede secundária é danificada e a fibra sofre inchamento e desfibrilamento, melhorando o seu potencial de ligações durante a consolidação da estrutura do papel, o que gera aumentos de resistência a deformações sob esforço de tração.

Com a alteração da temperatura inicial de refino de 10 para 30°C, observou-se que, nos refinados a 8% de consistência, a maioria dos tratamentos apresentou tendência de ganhos percentuais na propriedade com aumento da temperatura de refino, enquanto nos refinados realizados a 12% de consistência esse comportamento foi verificado na minoria dos tratamentos.

As polpas refinadas a 8% de consistência necessitaram de maior número de revoluções para alcançar os mesmos níveis de grau Schopper Riegler, o que proporcionou temperaturas finais de refino mais elevadas, gerando condições mais favoráveis de inchamento e, conseqüentemente, de desfibrilamento, com reflexos positivos na consolidação das fibras, na formação do papel (CLARK, 1985).

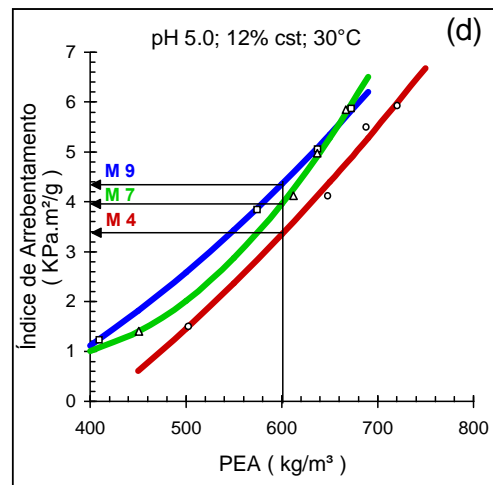
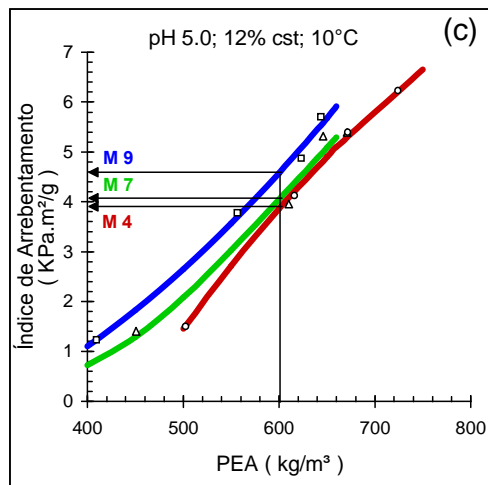
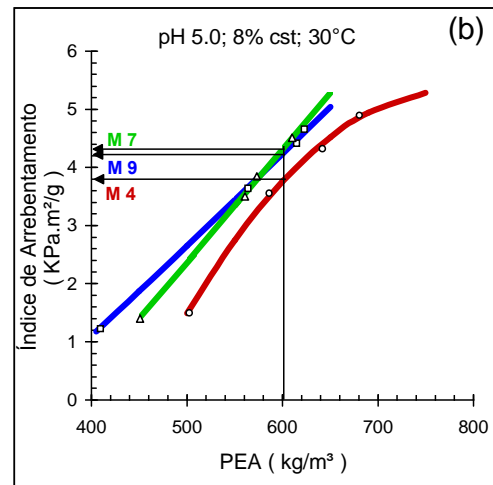
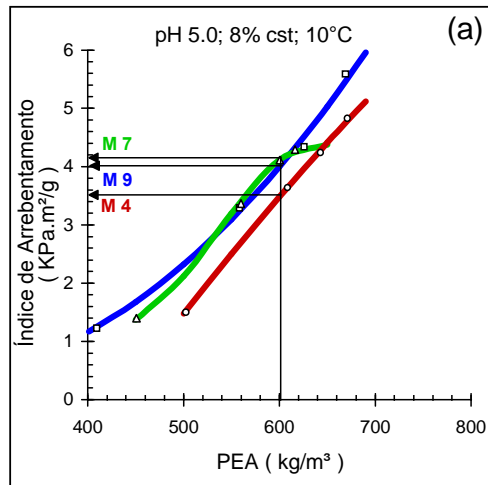
Como já mencionado anteriormente, a presença de microcompressões, dobras e torções nas fibras influencia o módulo de elasticidade. Esse efeito, associado à ação de refino, pode levar a um aumento do potencial de ligações interfibras e, conseqüentemente, da resistência à deformação do papel.

#### **4.6.3. Resistência ao arrebentamento**

A resistência ao arrebentamento é definida como a pressão necessária para produzir o arrebentamento do material, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico, de área circular, igual a 962 mm<sup>2</sup>.

As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento do índice de arrebentamento em função do peso específico aparente das folhas, das polpas obtidas das

madeiras de diferentes idades e refinadas à consistência de 8 e 12%, à temperatura de 10 e 30°C e a pH 5 e 9, respectivamente, em que os modelos



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 7-7 Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de arrebentamento das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 5.

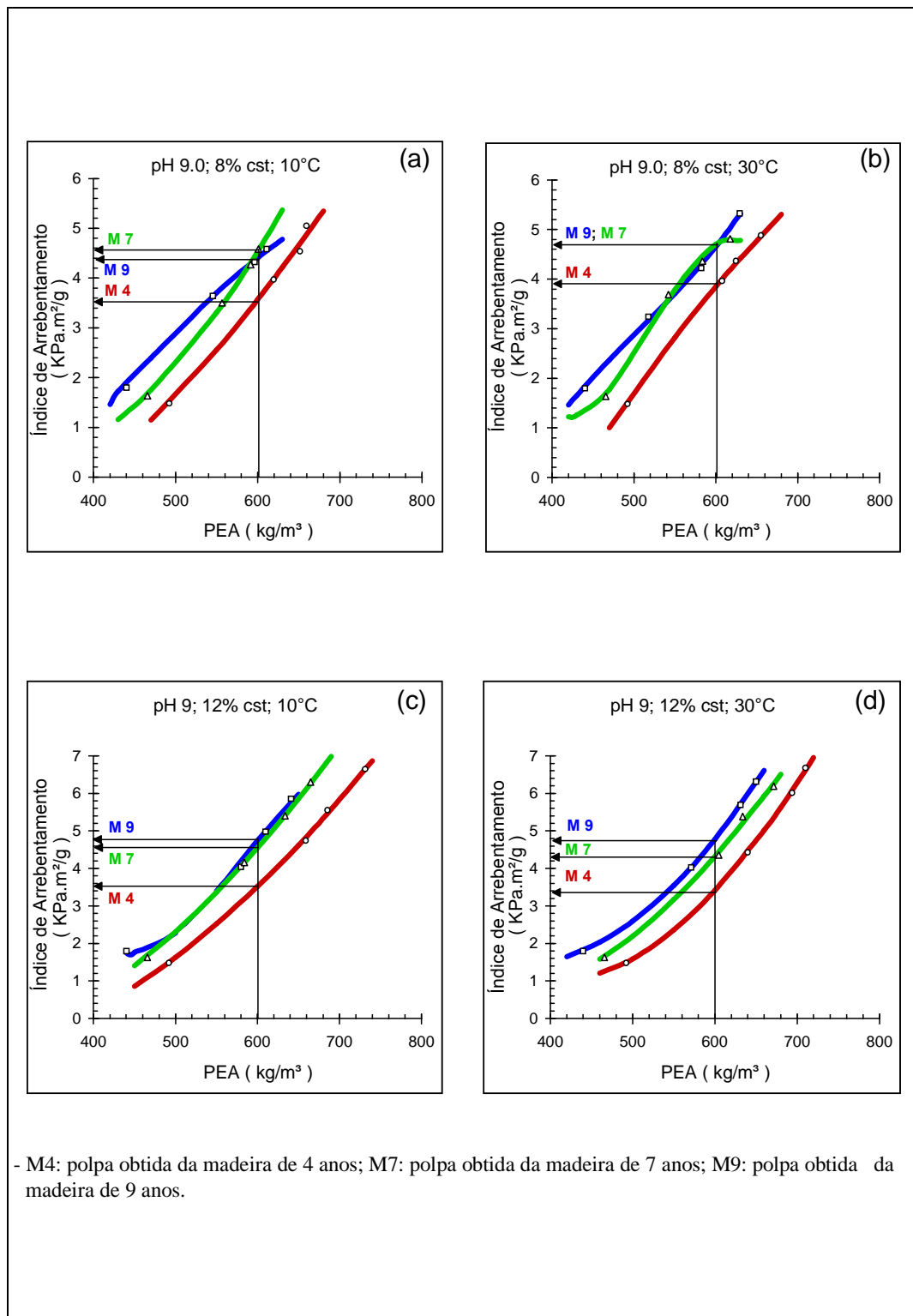


Figura 8-8 - Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de arrebentamento das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9. matemáticos do tipo “quadrático”, raiz quadrada” e “cúbico” (Apêndice A) se ajustam melhor às tendências dessa propriedade.

De maneira geral, notou-se uma tendência definida de as polpas de madeiras de maiores idades apresentarem maiores valores índice de arrebentamento. A polpa da madeira de 4 anos apresenta valores sempre inferior às demais polpas ao longo de toda a faixa de peso específico aparente analisada.

Já a polpa da madeira de 7 anos alternou maiores valores com a polpa da madeira de 9 anos, com exceção dos tratamentos a 12% de consistência, 10 e 30°C e pH 5 e 9, respectivamente, mostrados nas Figuras 7-c e 8-d, onde esses valores foram sempre inferiores ao longo de toda a faixa de peso específico aparente.

Quando se analisaram os valores da resistência ao arrebentamento a  $600 \text{ kg/m}^3$ , a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos foi de aproximadamente 3% (Figura 7-c), e a maior diferença, em torno de 27% (Figura 8-a). Quando comparada com a polpa de 9 anos, a diferença mínima foi de aproximadamente 12% (Figura 7-b), e a máxima, de aproximadamente 35% (Figura 8-c).

Esses comportamentos talvez possam ser explicados, principalmente, pelas características morfológicas de fibras (Quadro 3) encontradas para as madeiras, com atenção especial ao comprimento de fibra e teor de finos (Quadro 9). Autores como D'ALMEIDA (1988) e BARRICHELO e BRITO (1983) discorrem sobre essas características, colocando-as como decisivas no desenvolvimento de resistência ao arrebentamento.

Polpas com menores teores de finos e maior comprimento de fibras geram papéis com maior resistência ao arrebentamento, devido à presença de maior número de ligações do tipo  $\beta$  1-4. Estas ligações possuem maior energia de ligação que as do tipo pontes de hidrogênio, abundantes em polpas com maior

teor de finos e fibras de menor comprimento, que são facilmente rompidas quando da aplicação de uma força.

Se forem observados os resultados apresentados anteriormente no Quadro 3, o comprimento de fibras aumenta com a idade das árvores, e o teor de finos (apresentado no Quadro 9) decresce, o que reforça a discussão anterior.

Da mesma forma que para as propriedades já discutidas, referentes às análises dos efeitos das variáveis de refino, o Quadro 13 mostra uma relação percentual de ganhos no índice de arrebentamento para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor de módulo de elasticidade a  $600 \text{ kg/m}^3$ . A forma de análise desses resultados também segue a metodologia das propriedades discutidas anteriormente.

Quadro 13 - Ganho percentual do índice de arrebentamento em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				$\Sigma$
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	3,6%	11,9%	15,2%	0	6,3%	14,6%	4,8%	1,8	58,2%
M 7	4,1%	9,1%	2,5%	0	14,7%	19,0%	15,2%	9,4%	73,9%
M 9	0	5,8%	14,3%	8,7%	10,0%	16,3%	18,3%	19,3%	92,5%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos;  $\Sigma$ : somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

A alteração do pH de refino, de 5 para 9, favorece o aumento dos ganhos percentuais do índice de arrebentamento das polpas obtidas das madeiras de 7 e 9 anos, enquanto para a polpa obtida da madeira de 4 anos esse comportamento não foi tão acentuado. Essa polpa apresenta, nos tratamentos a 12% de consistência e 10°C, queda no percentual de ganho da propriedade.

Polpas com fibras de maior espessura de parede celular podem sofrer maior efeito de hidratação e inchamento, principalmente em meio alcalino, pela introdução de grupos  $\text{OH}^-$ , tendo como consequência elevação do potencial de ligações interfibras, importante para a evolução do índice de arrebetamento. Com a alteração da consistência de refino, de 8 para 12%, observou-se que as polpas obtidas das madeiras de 4 e 7 anos apresentaram tendência de redução dos ganhos percentuais no índice de arrebetamento na maioria dos tratamentos a que foram submetidas, com exceção do tratamento a pH 5 e  $10^\circ\text{C}$ , para polpa obtida da madeira de 4 anos, e do tratamento a pH 9 e  $10^\circ\text{C}$ , para a polpa da madeira de 7 anos, que tiveram aumentos no ganho percentual com a alteração da consistência. A polpa obtida da madeira de 9 anos apresentou tendência de aumento no ganho percentual, na propriedade, para todos os tratamentos.

Com base em informações encontradas na literatura (D'ALMEIDA, 1988), é reconhecido que menores resistências ao arrebetamento podem ser atribuídas, em parte, ao corte de fibras e ao teor de finos na polpa. O Quadro 9, apresentado anteriormente, mostra que as polpas das madeiras de 4 e 7 anos apresentaram fibras com menor comprimento médio, além de maiores teores de finos, que podem ajudar a explicar os resultados encontrados.

O efeito de corte de fibras no refinador, para polpas de eucalipto, não é muito pronunciado, devido ao próprio comprimento dessas fibras, quando comparada às fibras longas. Ocorre maior efeito de desfibrilamento, que também pode contribuir para o desenvolvimento de resistência ao arrebetamento do papel formado, principalmente para polpas com fibras que apresentam maiores espessuras de parede celular, como no caso da polpa obtida da madeira de 9 anos.

Com relação à alteração da temperatura inicial de refino, de  $10^\circ\text{C}$  para  $30^\circ\text{C}$ , observou-se que, nos refinamentos realizados a 8% de consistência e nas mesmas condições de pH, a tendência dos ganhos percentuais no índice de arrebetamento é de aumentar em todos os tratamentos. Nos refinamentos realizados a 12% de consistência, notou-se tendência de queda nos percentuais de ganho da



propriedade, com exceção do tratamento a pH 9 para a polpa obtida da madeira de 9 anos, que apresentou pequeno aumento no ganho percentual.

CLARK (1985) relatou que temperaturas mais elevadas de refino podem induzir flexibilidade às fibras e que fibras mais flexíveis acomodam-se melhor durante a formação, o que aumenta o potencial de ligações entre elas, produzindo papéis com maior resistência ao arrebentamento. Como as polpas refinadas à consistência de 8% apresentaram temperaturas finais de refino mais elevadas, isso possivelmente gerou fibras mais flexíveis, o que contribuiu para maior desenvolvimento de resistência ao arrebentamento no papel, pela melhor formação.

#### **4.6.4. Resistência ao rasgo**

Conforme metodologia já especificada em Materiais e Métodos, a resistência ao rasgo é mensurada com o auxílio do equipamento do tipo “Elmendorf”, que, por definição, é o trabalho executado por um *pendulum*, necessário para rasgar um conjunto de folhas, após um corte de rasgo inicial de especificada distância ter sido previamente realizado nas amostras.

A força necessária para rasgar a amostra sob condição de teste é obtida da divisão do valor do trabalho executado pela distância total de rasgo na qual a força é aplicada.

Neste estudo, a resistência ao rasgo é expressa na forma de índice de rasgo, que é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha, pela gramatura da amostra.

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento do índice de rasgo em função do peso específico aparente das folhas das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades e refinadas à consistência de 8 e 12%, à temperatura de 30°C e a pH 5 e 9, respectivamente, em que os modelos matemáticos do tipo “quadrático”, “cúbico” e “raiz cúbico” (Apêndice A) se aplicam melhor a essa propriedade.

De maneira geral, notou-se uma tendência definida de as polpas de madeiras de maiores idades apresentarem maiores valores de resistência ao rasgo.

A polpa da madeira de 4 anos apresentou valores de resistência ao rasgo inferiores aos das demais polpas ao longo de toda a faixa de peso específico aparente analisada, com exceção dos tratamentos a pH 5 e 8 e 12% de

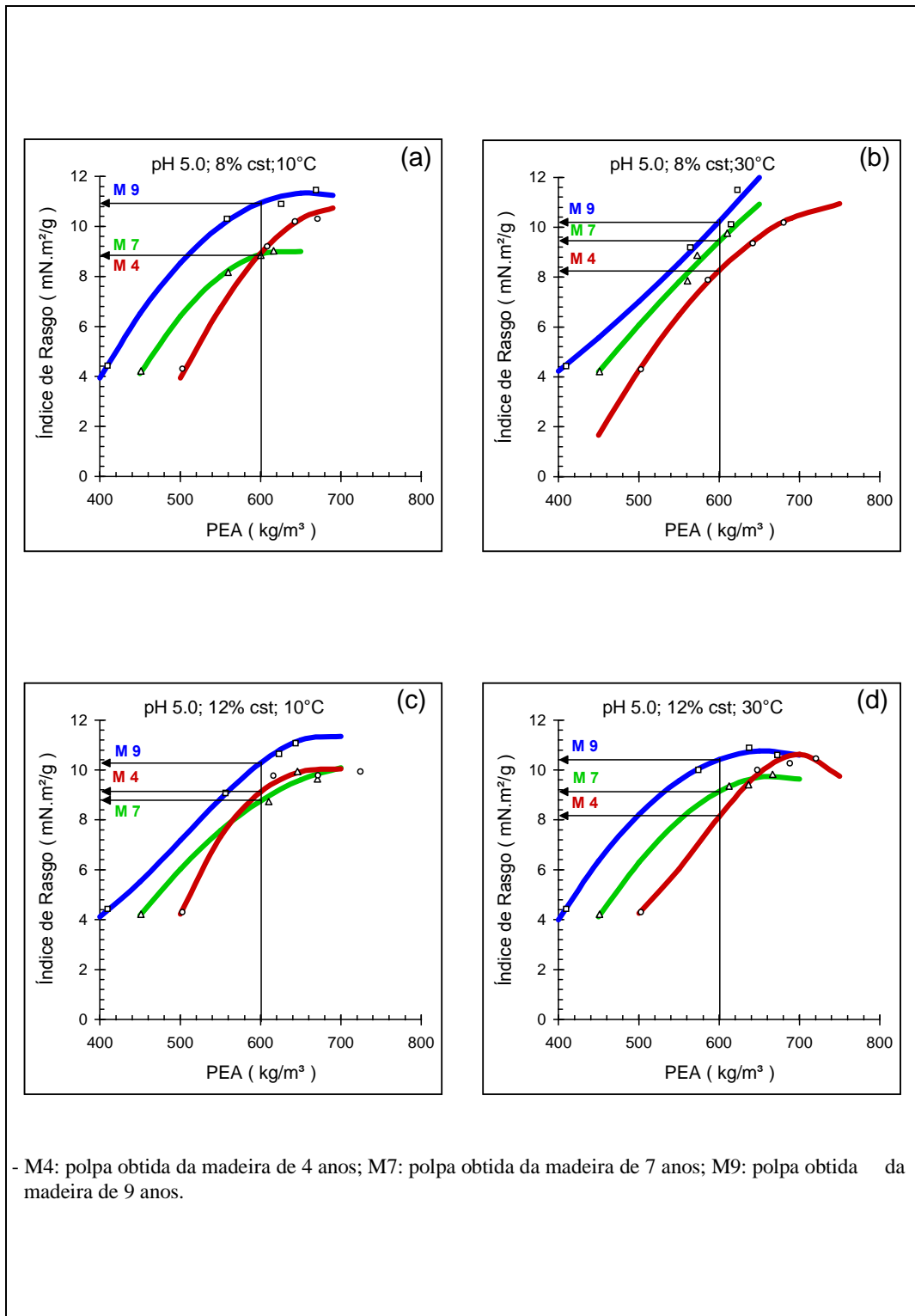


Figura 9 - Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de rasgo das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 5.

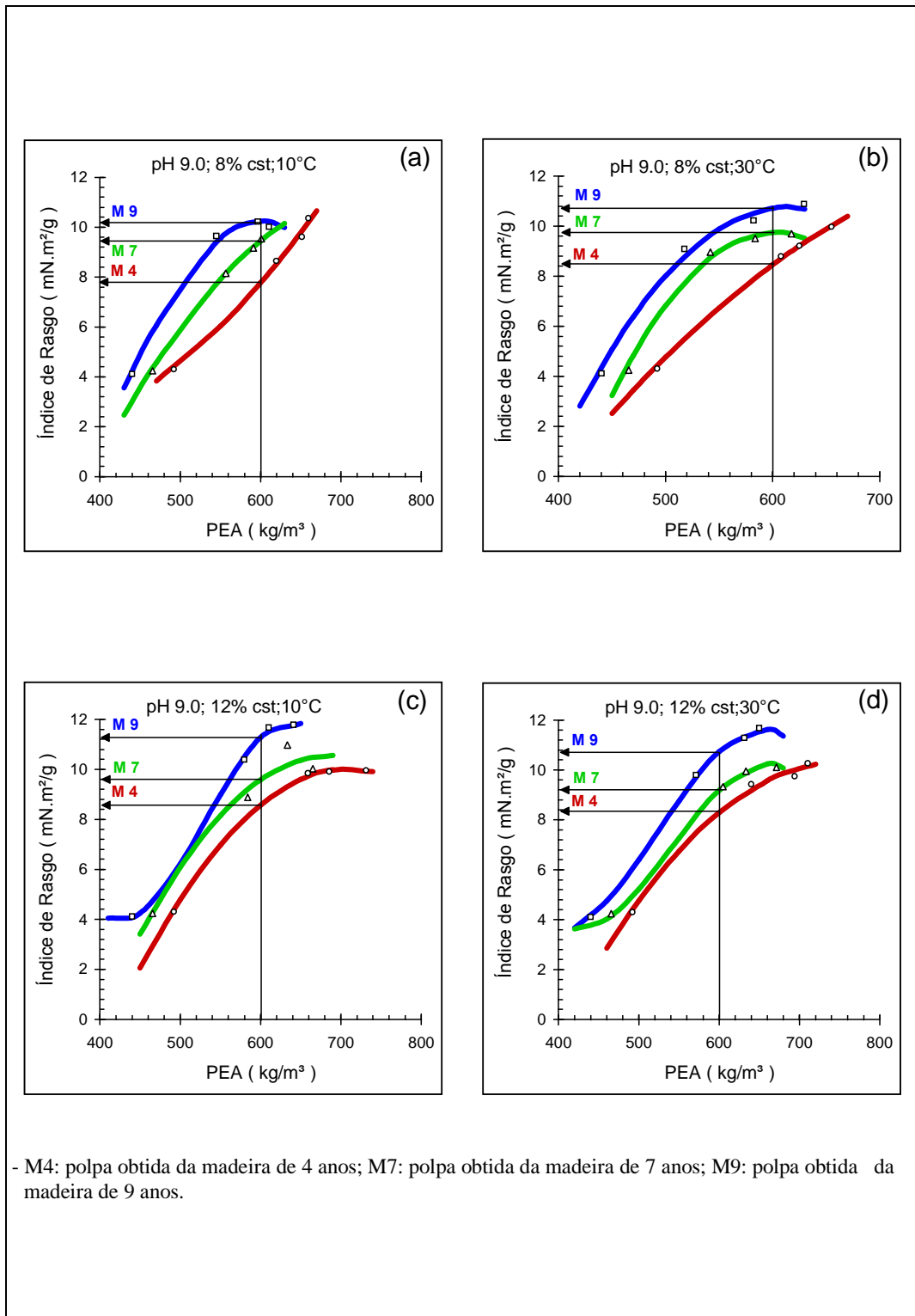


Figura 10 - Efeito da consistência e temperatura de refino no índice de rasgo das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9.

consistência, a 10°C, e, ainda a pH 5 e 12% de consistência, a 30°C, mostrados na Figura 10-a, c e d, onde se observou troca de posições com a polpa da madeira de 7 anos, principalmente em níveis acima de 600 kg/m<sup>3</sup>.

A polpa da madeira de 7 anos apresentou valores sempre inferiores aos da polpa da madeira de 9 anos.

Quando se analisaram os valores de resistência ao rasgo a 600 kg/m<sup>3</sup>, a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos foi de aproximadamente 1% menor (Figura 10-d) e 1 e 4% maior (Figura 9-a e c, respectivamente), e a maior diferença, em torno de 6% (Figura 10-a).

Quando comparada com a polpa de 9 anos, a diferença mínima foi de aproximadamente 12% (Figura 9-c), e a máxima, de aproximadamente 31% (Figura 10-c).

Alguns autores, como D'ALMEIDA (1988), citaram o comprimento de fibra como uma dimensão importante no desenvolvimento de resistência ao rasgo, já que fibras de maior comprimento possuem maior potencial de ligações interfibras, aumentando a área de ligações e, conseqüentemente, o número destas, favorecendo o índice de rasgo.

Os resultados de dimensões de fibras encontrados neste trabalho (Quadro 3) contribuem para explicar os resultados observados, uma vez que mostraram que o aumento da idade das árvores gera aumentos no comprimento e na espessura de parede das fibras, já que essa propriedade é significativamente influenciada pela espessura e pela parede das fibras.

PAAVILAINEN (1994) relatou a importância da resistência intrínseca das fibras, relacionadas à espessura de parede celular, no desenvolvimento de resistência ao rasgo.

O Quadro 3, apresentado anteriormente, mostrou que as fibras das madeiras de 7 e 9 anos apresentaram maior espessura de parede celular; e a introdução de grupos  $\text{OH}^-$  na estrutura das fibras pelo meio alcalino, como já discutido anteriormente, produz maior inchamento das fibras, que, associado à

ação de refino, eleva o potencial de ligações interfibras, aumentando a área de ligações, tendo como consequência o aumento da resistência ao rasgo.

Para melhor visualização dos efeitos das variáveis de refino, o Quadro 14 mostra uma relação percentual de ganhos na resistência ao rasgo para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor da propriedade a  $600 \text{ kg/m}^3$ .

Quadro 14 □-□ Ganho percentual do índice de rasgo em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				Σ
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	14,7%	6,3%	17,2%	4,5%	0	8,8%	10,3%	6,7%	68,5%
M 7	1,4%	7,6%	0	4,3%	7,3%	11,3%	9,2%	4,8%	45,9%
M 9	7,0%	0	0,6%	1,9%	0,2%	4,8%	10,3%	5,0%	29,7%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos; Σ: somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

Novamente, a análise desses resultados também segue a metodologia da propriedade discutida anteriormente, ou seja, mantendo-se constante duas das variáveis de refino, para melhor visualização do efeito da alteração de uma variável na operação.

Verificou-se que a alteração do pH de refino, de 5 para 9, gera aumentos no ganho percentual do índice de rasgo da polpa obtida da madeira de 7 e 9 anos, para a maioria dos tratamentos, enquanto a polpa obtida da madeira de 4 anos, apenas para os tratamentos a  $30^\circ\text{C}$ , seguiu esse comportamento.

PAAVILAINEN (1994) citou a importância da resistência intrínseca das fibras, relacionadas à espessura de parede celular, no desenvolvimento de

resistência ao rasgo. O Quadro 3 mostra que as fibras das madeiras mais velhas apresentaram maior espessura de parede celular, e, como já discutido anteriormente, o meio alcalino produz maior inchamento dessas fibras, que, associado à ação de refino, eleva o potencial de ligações interfibras, aumentando a área de ligações, tendo como consequência o aumento da resistência ao rasgo.

Para alteração da consistência de refino de 8 para 12%, notou-se que, quando as polpas são refinadas a pH 5 e a uma mesma temperatura, ocorre redução percentual de ganho em propriedade, com exceção do tratamento a 10 e 30°C para as polpas das madeiras de 4 e 9 anos, respectivamente, que apresentou pequeno acréscimo, da ordem de 2,5 e 1,9%, respectivamente.

Quando as polpas são refinadas em pH alcalino (pH 9) e à temperatura inicial de 10°C, observa-se aumento de ganhos percentuais no índice de rasgo, porém, quando refinadas à temperatura inicial de 30°C, esse comportamento reverte.

O aumento da consistência, como já relatado, favorece a ação de desfibrilamento em detrimento do corte de fibras, o que eleva o potencial de ligações interfibrilares, gerando aumentos na resistência ao rasgo da folha formada, até “um ponto” em que a resistência intrínseca das fibras não é afetada.

A partir “deste ponto”, a ação de desfibrilamento pode causar redução na resistência intrínseca das fibras, tendo como consequência a redução da resistência ao rasgo. Porém, neste estudo este ponto não foi atingido, pois, quando muito, houve tendência de estabilização da propriedade com o desenvolvimento da refinação, conforme mostrado no gráfico relacionado com o peso específico.

Novamente, com base no Quadro 14, com alteração da temperatura inicial de refino de 10 para 30°C, observaram-se comportamentos bastante distintos para as polpas de madeiras de diferentes idades.

A polpa da madeira de 4 anos apresentou queda nos ganhos percentuais na propriedade para a maioria dos tratamentos, com exceção da polpa refinada a pH 9 e a 8% de consistência. A polpa da madeira de 7 anos, ao contrário da anterior,

apresentou aumento nos ganhos percentuais da propriedade para a maioria dos tratamentos, com exceção do refino a pH 9 e 12% de consistência.

Já a polpa da madeira de 9 anos apresentou quedas de ganhos percentuais na ordem de 7%, quando refinada a pH 5 e 8% de consistência, e em torno de 5%, quando refinada a pH 9 e 12% de consistência; nos demais tratamentos, apresentou aumentos no ganho percentual de índice de rasgo.

PAAVILAINEN (1994) citou a influência da flexibilidade das fibras no desenvolvimento de resistência ao rasgo. CLARK (1985) relatou que o aumento da temperatura da polpa torna as fibras mais flexíveis, o que pode explicar o comportamento observado, principalmente, na maioria dos tratamentos da polpa da madeira de 7 anos, comportamento este que era esperado também para as polpas das madeiras de 4 e 9 anos, mas que ocorreu apenas em parte dos tratamentos a que essas polpas foram submetidas.

É importante verificar que o somatório de ganhos percentuais na propriedade decresceu com a idade das madeiras, o que equivale a dizer que a resistência ao rasgo de polpas de madeiras mais novas é mais sensível a variação de pH, consistência e temperatura inicial de refino que a de polpas de madeiras mais velhas.

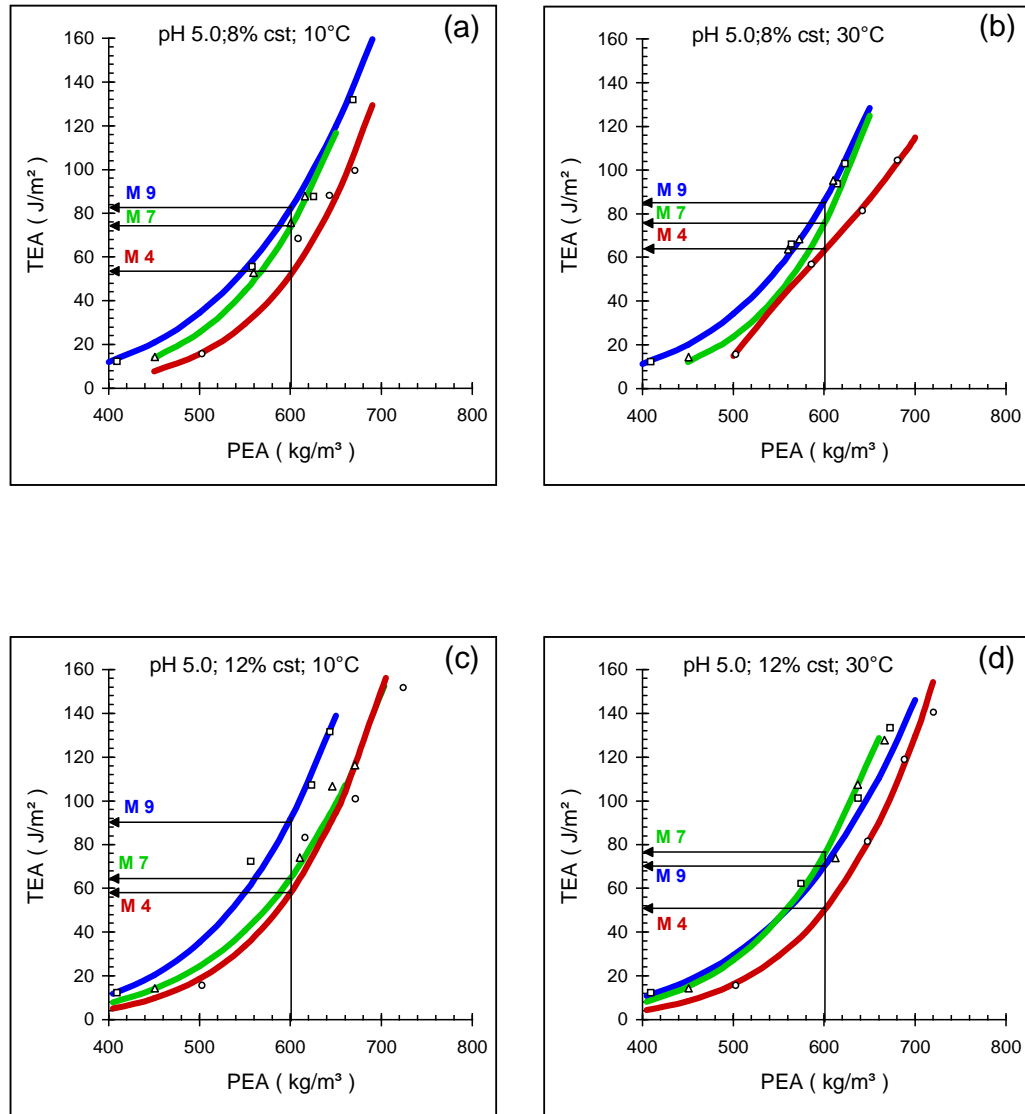
#### **4.6.5. Energia de deformação (TEA)**

A energia de deformação expressa o trabalho realizado por uma amostra de papel quando submetida a esforços de tração, até a sua ruptura total. Indica a habilidade em absorver energia sob condições de aplicações crescentes de carga.

As Figuras 11 e 12 mostram o comportamento da absorção de energia de deformação (TEA) em função do peso específico aparente das folhas, das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades e refinadas à consistência de 8 e 12%, a temperaturas de 10 e 30°C e a pH 5 e 9, respectivamente, em que os modelos do tipo “potencial” e “cúbico”(Apêndice A) se aplicam melhor a essa propriedade.



De maneira geral, notou-se uma tendência definida de as polpas das madeiras de maiores idades apresentarem maiores valores de TEA (energia de deformação).



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 11 - Efeito da consistência e temperatura de refino na energia de deformação das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 5.

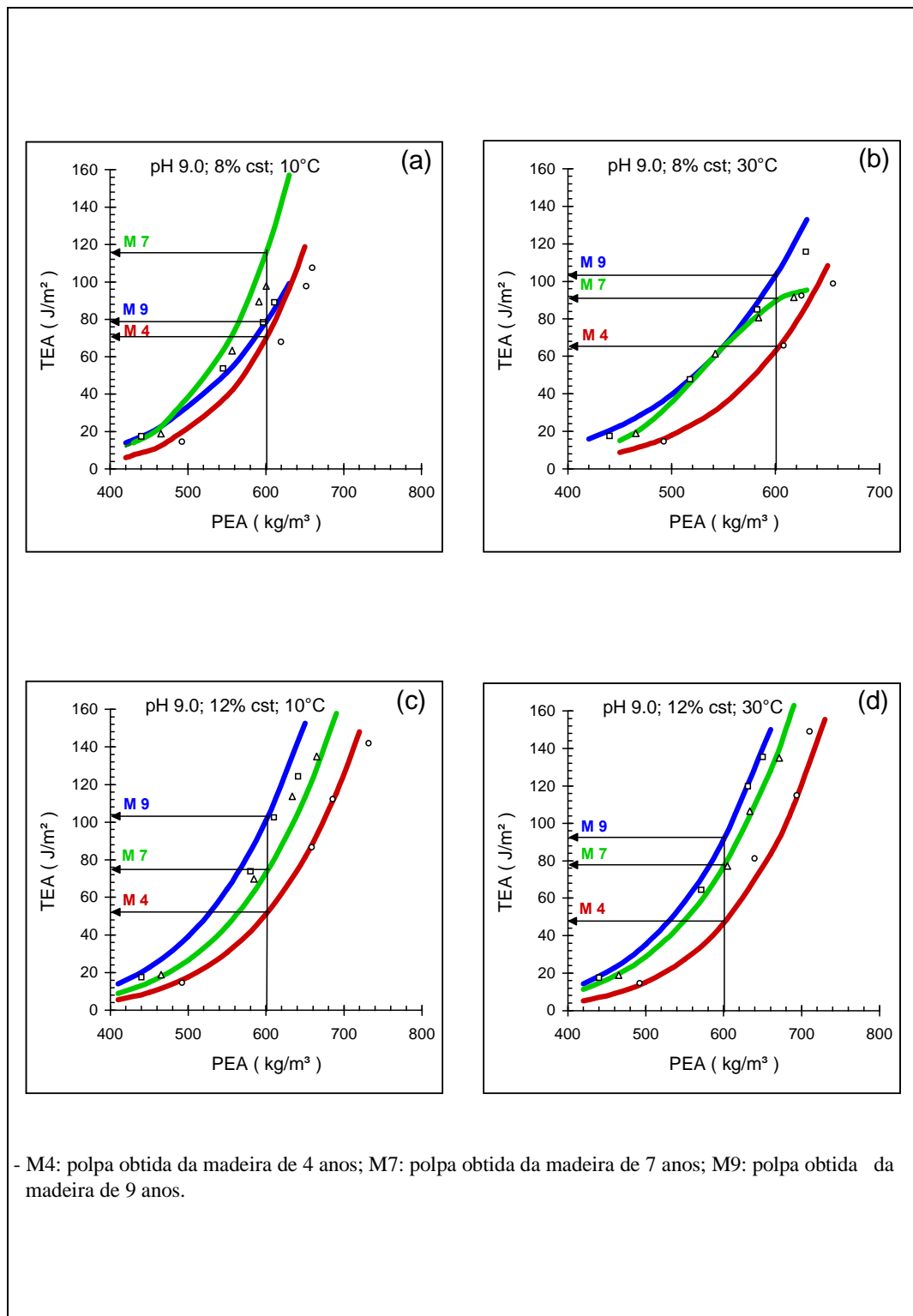


Figura 12 - Efeito da consistência e temperatura de refino na energia de deformação das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9.

A polpa da madeira de 4 anos apresentou, para a maioria dos tratamentos, valores sempre inferiores aos das demais polpas ao longo de toda a faixa de peso específico aparente analisada. Já a polpa da madeira de 7 anos apresentou valores inferiores aos da polpa da madeira de 9 anos, com exceção dos tratamentos a pH 5, 12% de consistência e 30°C (Figura 11-d) e a pH 9, 8% de consistência e 10°C (Figura 12-a), em que os valores são superiores, na maior porção das curvas, principalmente em níveis mais elevados de peso específico aparente.

Quando se analisaram os valores da energia de deformação a 600 kg/m<sup>3</sup>, a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos foi de aproximadamente 16% (Figura 11-c), e a maior diferença, em torno de 66% (Figura 12-a). Quando comparada com a polpa de 9 anos, a diferença mínima é de aproximadamente 13% (Figura 12-a), e a máxima, de aproximadamente 27% (Figura 12-c).

A energia de deformação é muito dependente das características de formação e do potencial de conformabilidade das fibras na folha de papel, o que torna as características morfológicas de fibras de grande importância para o desenvolvimento desta propriedade, principalmente comprimento de fibra, espessura de parede celular e diâmetro de lúmen.

Verificando o Quadro 3, apresentado anteriormente, observa-se que essa última dimensão apresentou uma tendência de redução com o aumento da idade da madeira, enquanto o comprimento e a espessura de parede tendem a aumentar.

Os valores da propriedade em discussão apresentaram uma tendência de aumento com o aumento da idade das madeiras. Uma possível explicação é que, dentre as características morfológicas de fibras, o diâmetro de lúmen tem maior influência no potencial de conformabilidade e colapsabilidade das fibras durante a formação do papel. Contudo, fibras mais longas são, em geral, mais flexíveis, o que também aumenta o potencial de conformabilidade na formação do papel.

Fibras com paredes mais espessas, com a ação do refino, podem sofrer maior efeito de desfibrilamento, aumentando o potencial de ligações interfibras, o

que pode favorecer a absorção de energia quando da aplicação de uma força de tração.

Da mesma forma que para as propriedades já discutidas, para análise dos efeitos das variáveis de refino, o Quadro 15 mostra uma relação percentual de ganhos no TEA para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor de módulo de elasticidade a  $600 \text{ kg/m}^3$ ; e a forma de análise desses resultados também segue a metodologia das propriedades discutidas anteriormente.

Quadro 15 - Ganho percentual da energia de deformação (TEA) em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				$\Sigma$
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	3,7%	26,4%	15,8%	0%	39,1%	25,8%	63,4%	83,2%	257,4%
M 7	8,8%	11,4%	0	11,7%	70,8%	28,0%	7,9%	13,9%	152,5%
M 9	17,1%	22,3%	30,6%	0	11,9%	42,9%	43,9%	30,4%	199,1%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos;  $\Sigma$ : somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

A alteração do pH de refino gera, para a polpa da madeira de 4 anos, uma tendência de aumento de ganhos percentuais na energia de deformação para a maioria dos tratamentos, com exceção do tratamento a 8% de consistência e temperatura de 30°C, que apresentou um pequeno decréscimo, da ordem de 0,6%, no ganho percentual de propriedade. A polpa da madeira de 7 anos apresentou aumentos no ganho percentual da propriedade para todos os tratamentos. A polpa da madeira de 9 anos segue a mesma tendência, com exceção da polpa refinada à consistência de 8% e 10°C.

O aumento do pH de refino, como já discutido anteriormente, aumentou o efeito dos processos de hidratação e inchamento, que, associados à ação de refino, aumentaram o potencial de ligação interfibras e favoreceram a conformabilidade das fibras na formação do papel, provavelmente por aumentarem a flexibilidade das fibras e, como consequência, absorção de energia antes de sua ruptura, quando sob ação de uma força de tração.

Com relação à alteração da consistência de refino de 8 para 12%, observou-se queda nos ganhos percentuais de TEA, na maioria dos tratamentos, para polpa obtida da madeira de 7 anos, com exceção do tratamento a pH 5 e 30°C de temperatura inicial, que apresentou pequeno aumento, da ordem de 0,3%. A polpa obtida da madeira de 4 anos apresentou queda do ganho percentual apenas no tratamento a pH 5 e 30°C de temperatura inicial. Já a polpa obtida da madeira de 9 anos apresentou redução no ganho percentual da propriedade nos tratamentos cuja temperatura inicial de refino foi de 30°C, seja a pH 5 ou a pH 9.

É reconhecido que, em consistências mais altas, o efeito de desfibrilamento é favorecido, enquanto menores consistências favorecem o efeito de corte e a formação de finos.

Fibras de menores comprimentos podem se acomodar melhor na estrutura da rede durante a formação do papel e fazem com que o contato entre elas seja maior, aumentando o número de ligações interfibras na estrutura do papel formado. Isso gera papéis com maior capacidade de absorver energia quando submetidos a uma força de tração, o que pode ajudar a explicar os resultados encontrados na maioria dos tratamentos das polpas obtidas da madeira de 4 anos, polpa esta que apresentou menor comprimento médio de fibra, exposto no Quadro 9.

Em consistências maiores, pode ocorrer que grande número de fibras não receba o tratamento adequado durante a refinação, por estarem protegidas dentro do maior colchão de fibras entre as áreas refinadoras, o que reduz o potencial de ligações interfibras, além de manter essas fibras mais rígidas, reduzindo o potencial de conformabilidade na estrutura do papel. Como consequência disso,

menores valores de TEA são gerados, como os observados, principalmente, nos tratamentos realizados nas polpas obtidas da madeira de 7 anos.

Ainda com relação ao Quadro 15, porém analisando a alteração de temperatura inicial de refino de 10 para 30°C, para as mesmas condições de pH e consistência, observou-se aumento dos percentuais de ganho na propriedade de TEA para a maioria dos tratamentos na polpa obtida da madeira de 7 e 9 anos, com exceção do refino a pH 9 e 8% de consistência, e na polpa obtida da madeira de 7 anos, e no refino a pH 5 e 9 a 12% de consistência, na polpa obtida da madeira de 9 anos. Observou-se que a tendência de ganhos na propriedade foi mais evidente nos tratamentos realizados à consistência de 8% e a pH 5.

O aumento da temperatura de refino, até certos níveis, pode aumentar a flexibilidade das fibras, o que aumenta o potencial de conformabilidade das fibras durante a formação do papel, aumentando o potencial de ligações interfibras, o que favorece a capacidade do papel em absorver energia até a sua ruptura, em regime de tração. Isso pode explicar os resultados observados na maioria dos tratamentos das polpas obtidas das madeiras de 7 e 9 anos e em alguns tratamentos da polpa obtida da madeira de 4 anos.

#### **4.6.6. Resistência à passagem de ar (RPA)**

A dificuldade com que um determinado volume de ar passa por uma folha de papel é denominada resistência à passagem de ar e depende do número, do tamanho, da forma e da distribuição dos poros no material.

As Figura 13 e 14 mostram o comportamento da resistência à passagem de ar em função do peso específico aparente das folhas, das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades e refinadas à consistência de 8 e 12%, às temperaturas de 10 e 30°C e a pH 5 e 9, respectivamente, em que o modelo do tipo “exponencial” (Apêndice A) se aplica melhor a essa propriedade.

As Figuras 13-a a 14-d mostram uma evolução da propriedade com o peso específico aparente semelhante para todas as polpas estudadas, com pequena tendência de aumento da propriedade com aumento da idade de corte.

Na maioria dos tratamentos, as curvas se sobrepõem, principalmente em menores níveis de refino, relacionados aos menores valores de peso específico

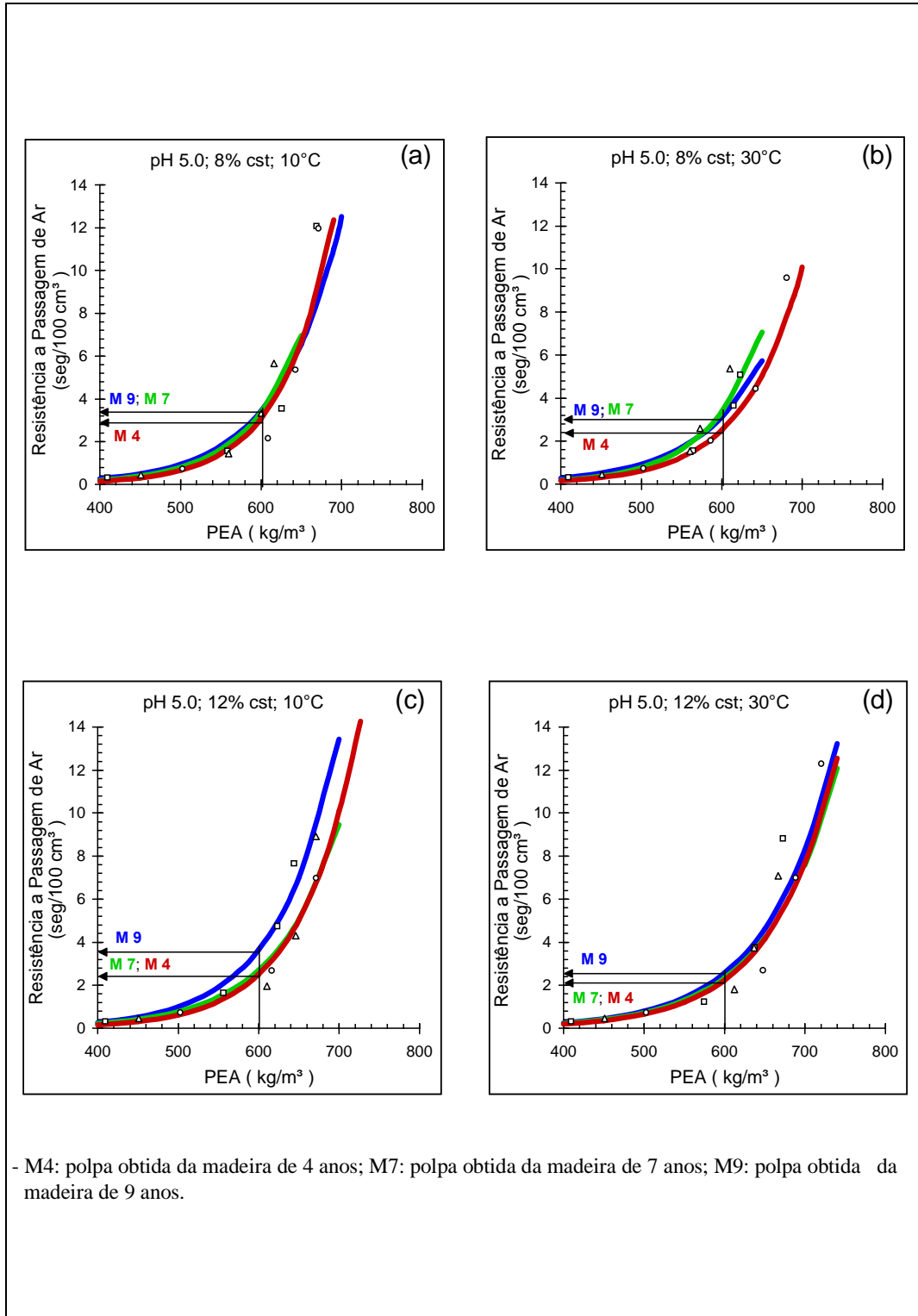
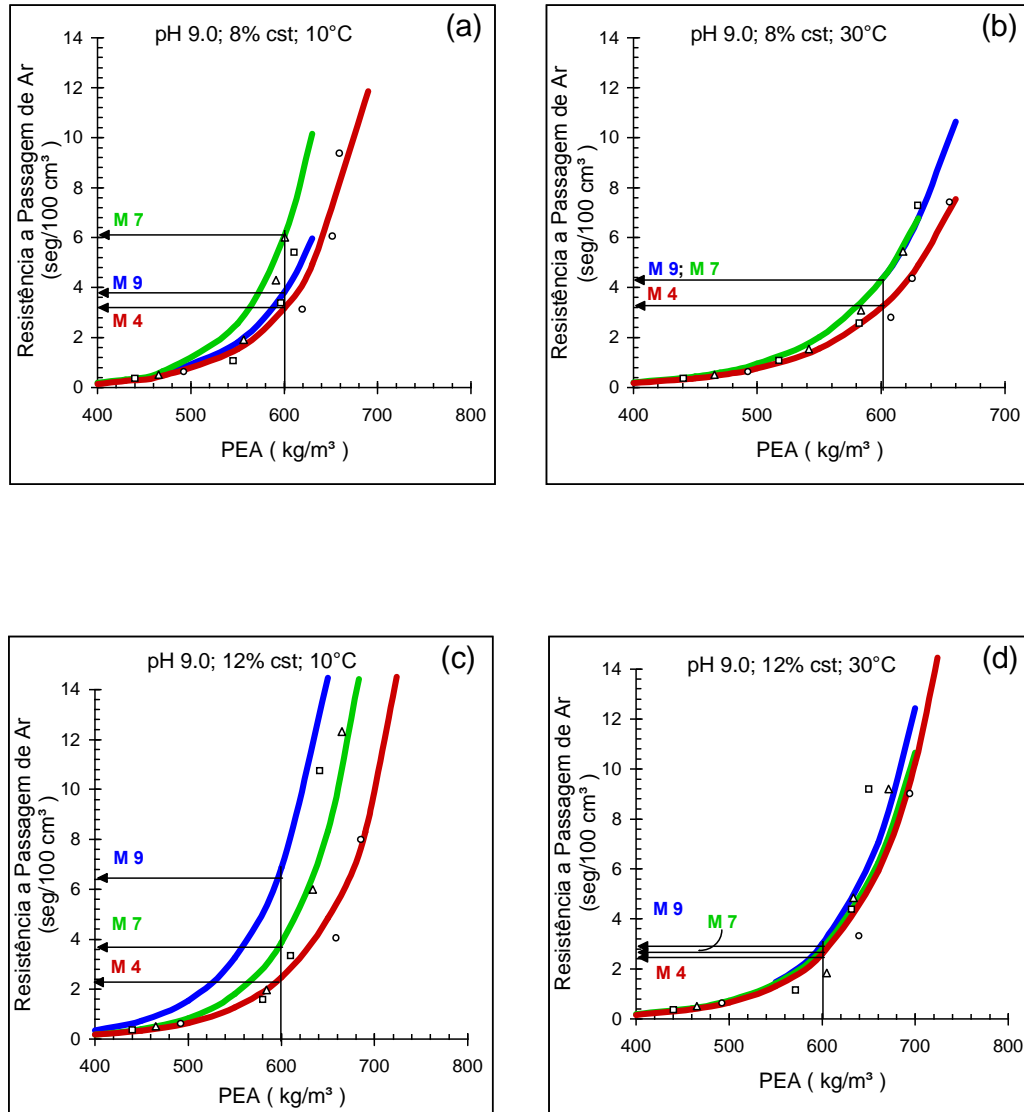


Figura 13 - Efeito da consistência e temperatura de refino na resistência à passagem de ar das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH5.





- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 14 - Efeito da consistência e temperatura de refino na resistência à passagem de ar das polpas obtidas das madeiras de diferentes idades, refinadas a pH 9.

aparente. Em níveis mais elevados de peso específico aparente, na maioria dos tratamentos, as polpas obtidas das madeiras de 7 e 9 anos sobressaem em relação às de 4 anos. Isso mostra o potencial de sensibilidade de arranjo e de desenvolvimento de ligações interfibrilares com o desenvolvimento do refino das fibras de maiores espessuras de parede na formação de estruturas mais fechadas, em folhas de papéis.

Quando se analisaram os valores da resistência à passagem de ar a  $600 \text{ kg/m}^3$ , a menor diferença entre a polpa da madeira de 4 anos e a polpa da madeira de 7 anos é menor que 1% verificado na Figura 13-c e d, e a maior diferença, em torno de 90% (Figura 14-a). Quando comparada com a polpa de 9 anos, a diferença mínima é de aproximadamente 14% (Figura 13-b), e a máxima, de aproximadamente 90% (Figura 14-d).

A resistência à passagem de ar está relacionada com a porosidade do material, ou seja, com número de poros, tamanho, forma e distribuição dos poros no papel.

Baseado nessas circunstâncias, observou-se que as características de formação do papel, como capacidade de colapsamento, habilidade de conformabilidade das fibras a estrutura do papel e potencial de ligações entre as fibras, poderão influenciar na resistência à passagem de ar pelo papel. Essas características são altamente dependentes das características morfológicas de fibras, como comprimento, espessura de parede e diâmetro de lúmen, além do número de fibras por grama e teor de finos.

Novamente, da mesma forma que para as propriedades já discutidas, o Quadro 16 mostra uma relação percentual de ganhos na resistência à passagem de ar para cada polpa estudada, em relação ao tratamento que obteve o menor valor de módulo de elasticidade a  $600 \text{ kg/m}^3$ ; e a forma de análise desses resultados também segue a metodologia das propriedades discutidas anteriormente.

A alteração do pH de refino, de 5 para 9, proporcionou aumento significativo nos ganhos percentuais da propriedade, na maioria dos tratamentos, principalmente para as polpas das madeiras de 7 e 9 anos. Isso pode ser explicado

Quadro 16 - Ganho percentual na resistência à passagem de ar (RPA) em relação ao menor valor alcançado, para cada polpa, nos tratamentos de refino

Polpa	pH 5				pH 9				Σ
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	37,9%	12,1%	20,5%	0	42,0%	42,4%	10,0%	16,1	181,7%
M 7	44,9%	44,4%	6,8%	0	159,0%	83,8%	44,4%	19,2%	402,6%
M 9	33,9%	21,4%	42,4%	0	48,2%	67,3%	146%	16,7%	394,6%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos; Σ: somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

pelo fato de o pH alcalino, como já visto, proporcionar maior efeito de hidratação e inchamento; e, como a ação do refino aumenta a superfície específica, ocorre maior desfibrilamento interno e externo, aumentando o potencial de ligações interfibrilares. Além disso, torna as fibras mais flexíveis, proporcionando aumento no potencial de consolidação das fibras durante a formação do papel e, conseqüentemente, formação de poros menores e melhor distribuídos, o que aumenta a resistência à passagem de ar no papel. Os resultados mostraram que esse efeito é maior em fibras com maiores comprimentos e espessuras de parede, observado nas polpas obtidas das madeiras de 7 e 9 anos (Quadro 3). Já com a alteração da consistência de refino de 8 para 12% observou-se que os ganhos percentuais de resistência à passagem de ar tendem a reduzir, na grande maioria dos tratamentos.

Polpas refinadas em menores consistências sofrem maior efeito de corte por apresentarem menores tamanhos de agregados, que, por sua vez, sofrem maior ação fibra-lâmina, gerando maior produção de finos. Durante a formação da folha, fibras menores possuem maior possibilidade de se acomodarem umas com as outras, devido às suas maiores superfícies específicas, que aumenta o potencial de conformabilidade das mesmas na estrutura do papel. Esses fatos geram como respostas formação de poros menores, aumentando a resistência à passagem de ar no papel formado.

Com relação à alteração da temperatura inicial de refino, de 10 para 30°C, observou-se redução do ganho da propriedade na maioria dos tratamentos, para todas as polpas em estudo.

Os estudos sobre a influência da temperatura de refino nas propriedades físico-mecânicas das polpas não são muitos, e os resultados disponíveis ainda são conflitantes. Para autores como HARTLER (1995), RATNIEKS (1993) e CLARK (1985), o aumento da temperatura gera fibras mais flexíveis; portanto, entende-se que, em menores temperaturas, essas fibras estariam mais rígidas. Associadas à ação de refino, fibras mais rígidas poderão gerar mais corte e teor de finos na polpa, o que aumenta o potencial de acomodação das fibras na folha formada, reduzindo o tamanho dos poros no papel, tendo como consequência o aumento na resistência à passagem de ar por essa folha.

O efeito de corte de fibras de eucalipto no moinho PFI é bastante minimizado; contudo, a produção de finos pelo próprio desfibrilamento pode ocorrer, principalmente, no início do refino, em que a polpa se encontra a temperaturas mais baixas, podendo estar mais rígida e este efeito ser maior, o que poderia ajudar a explicar os resultados encontrados na maioria dos tratamentos a que foram submetidas as polpas em estudo.

#### **4.6.7. Consumo de energia no refino**

Na área papeleira, já é reconhecido que os processos de refinação é uma das etapas da formação do papel em que o consumo de energia é elevado. Na literatura disponível, os autores não citam o percentual que essa energia representa dentro da linha de produção, mas relatam ser uma operação que demanda grande quantidade de energia (SFERRAZZA, 1996; MANFREDI et al., 1986).

Os estudos envolvendo variáveis de refino, como tipo de celulose, consistência, viscosidade, pH e produção, assim como potência de acionamento, área refinadora, velocidade do refinador, entre outras, estão geralmente

associados à economia de energia na operação, indicada pela facilidade da ação dos elementos refinadores sobre as fibras, promovendo ou melhorando propriedades com menor consumo de energia possível.

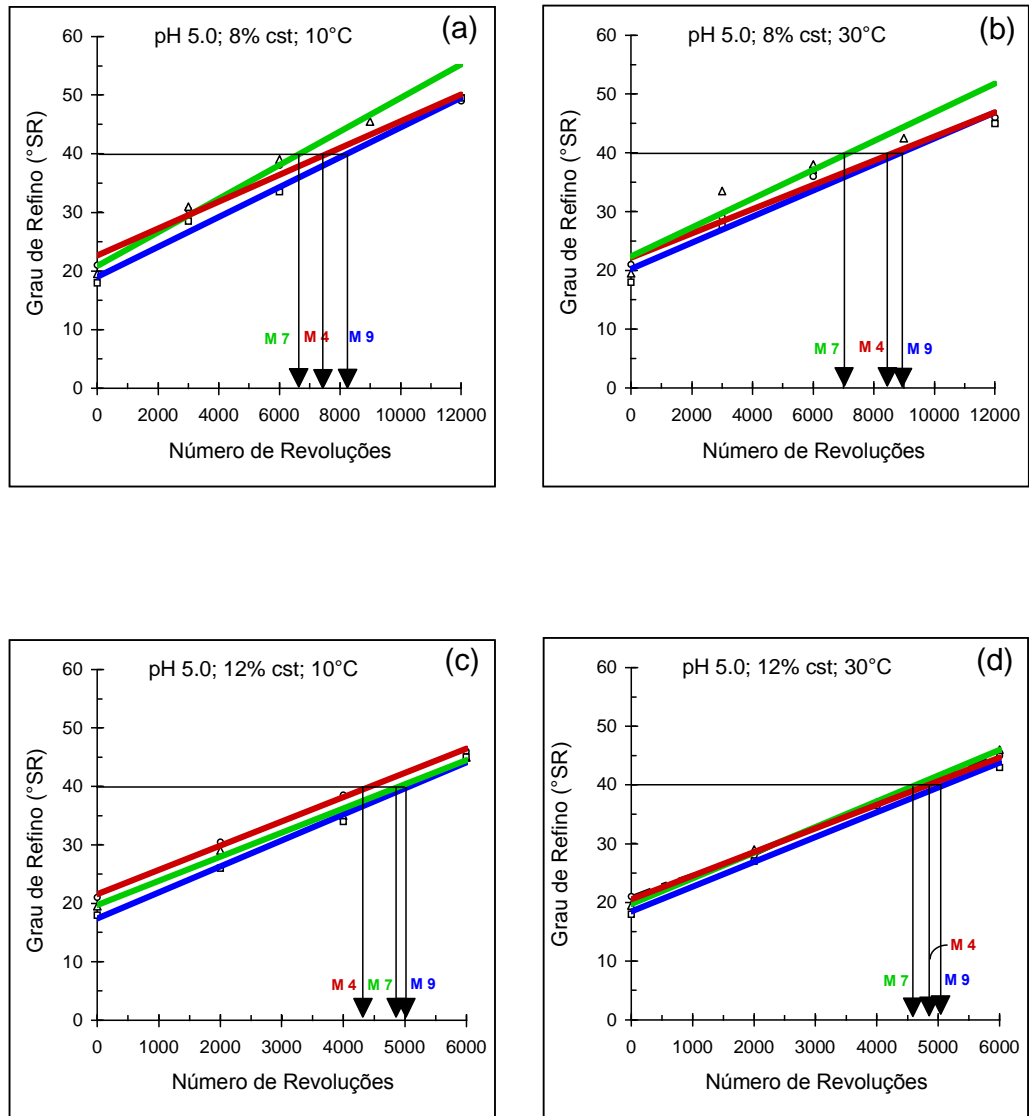
Neste trabalho foi analisado o consumo de energia pelo número de revoluções do moinho gasto, para se alcançar um determinado nível de refino (40°SR), relacionado à maior ou menor facilidade da ação dos elementos refinadores sobre as fibras, suficiente para atingir peso específico aparente das folhas de 600 kg/m<sup>3</sup>.

As Figuras 15 e 16 mostram o comportamento das polpas obtidas de madeiras de diferentes idades durante a ação de refino e relacionam o número de revoluções gastas para se alcançar 40 graus Schopper Riegler, nos diferentes tratamentos. O valor de 40°SR foi escolhido por ser um valor de grau de refinação que se situa dentro de uma faixa comumente utilizada por indústrias produtoras de papéis de impressão e escrita, a partir de polpas de eucalipto, e também por ser o grau de refinação suficiente para se obter o peso específico aparente de 600 kg/m<sup>3</sup>, que foi utilizado, neste trabalho, como referência nos estudos de propriedades.

Os gráficos foram confeccionados com auxílio do programa EXCEL FOR WINDOWS, considerando os dados observados para obter os valores de número de revoluções necessárias para se alcançar os respectivos níveis de graus Schopper Riegler das polpas.

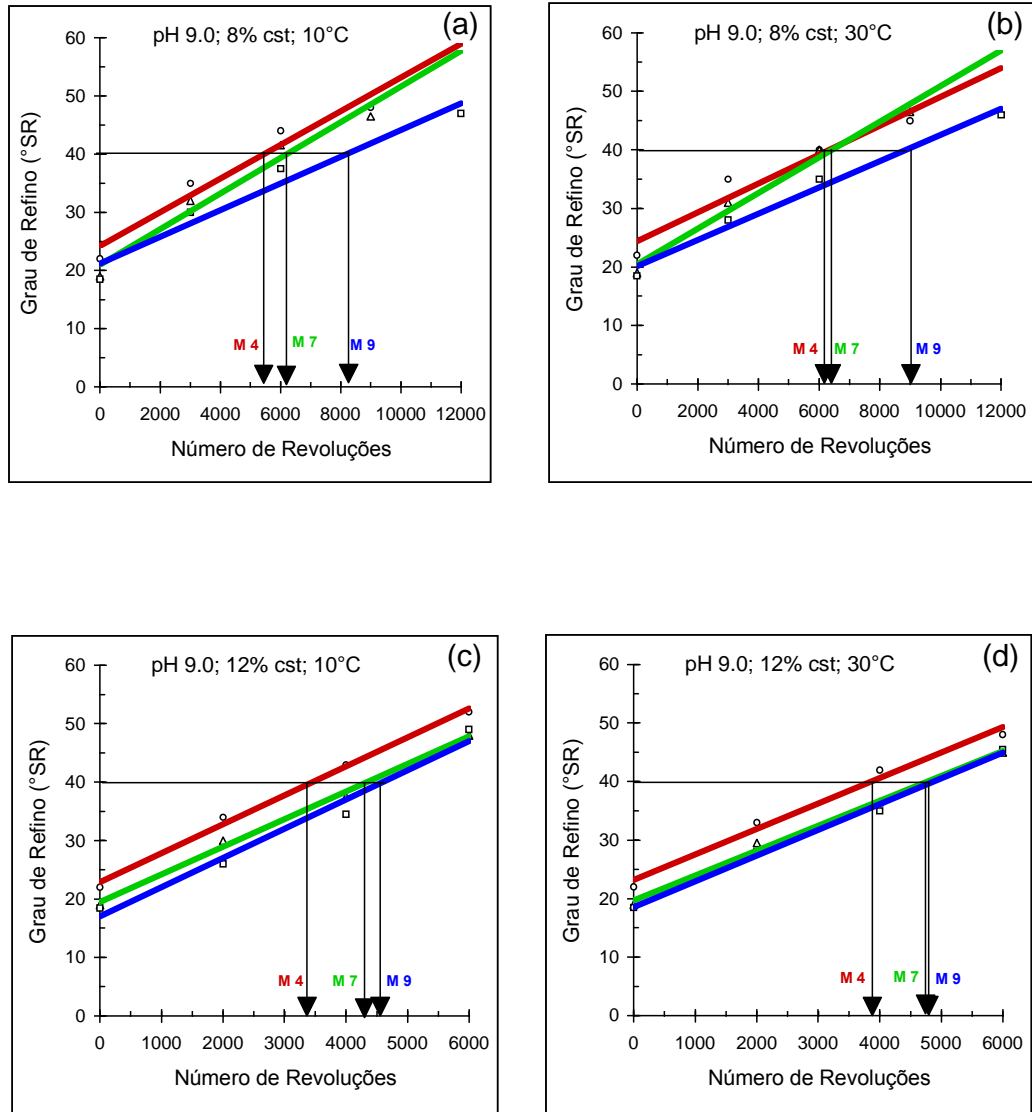
As Figuras 15 e 16 mostram a evolução do grau de refino (°SR) em função do número de revoluções gasto nos diferentes tratamentos das polpas obtidas de diferentes idades, refinadas, a consistências de 8 e 12%, temperatura inicial de refino de 10 e 30°C e pH 5 e 9, respectivamente.

De maneira geral, observou-se uma tendência de as polpas das madeiras mais novas (4 e 7 anos) exigirem menor número de revoluções para se alcançar o mesmo nível de refinação (40°SR), indicando maior facilidade de serem refinadas que a polpa obtida da madeira de 9 anos.



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 15 - Evolução do grau Schopper Riegler em função do número de revoluções do moinho, gasto nos refinamentos das polpas das madeiras de diferentes idades.



- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos.

Figura 16 - Evolução do grau Schopper Riegler em função do número de revoluções do moinho, gasto nos refinamentos das polpas das madeiras de diferentes idades.

As características morfológicas de fibras, apresentadas anteriormente no Quadro 3, podem ajudar a explicar esses resultados, já que fibras de maiores dimensões, principalmente comprimento e espessura de parede celular, os quais refletem maior robustez, podem apresentar maior resistência à ação dos elementos refinadores.

MILES e KARNIS (1995), descrevendo uma relação entre as características da madeira e o consumo de energia, relataram que a redução do “coarseness” das fibras durante o refino aumenta a flexibilidade das fibras e a produção de finos, ambos com efeitos no grau de refino. Isso também pode ser visualizado nas Figuras 15 e 16, onde, em um mesmo nível de número de revoluções, o °SR das polpas varia de forma decrescente com o aumento da idade das madeiras. Esse fato permite inferir que polpas com fibras de menores dimensões, por serem mais frágeis, sofrem maior ação do refino, despreendendo mais suas camadas superficiais, gerando mais finos e, assim, alcançando aumento no grau de refino (°SR) dessas polpas.

A Figura 15-a, b e d mostra os tratamentos onde a polpa da madeira de 7 anos foi ainda mais fácil de se refinar que a polpa da madeira de 4 anos. É importante lembrar que essa polpa apresentou maior dificuldade de deslignificação durante os cozimentos e teve sua viscosidade bastante reduzida (Quadro 6), o que provavelmente contribuiu para esse comportamento.

Para análise dos efeitos das variáveis de refino (pH, consistência e temperatura inicial de refino) no número de revoluções do moinho, o Quadro 17 mostra uma relação percentual entre os números de revoluções necessárias para se alcançar 40°SR, tendo como base o tratamento que exigiu menor número de revoluções.

Observou-se que, com a alteração do pH de refino de 5 para 9, o número de revoluções gastas para se alcançar o mesmo nível de refino (40°SR) tende a ser menor em todas as polpas estudadas, principalmente para as polpas das madeiras mais novas na grande maioria dos tratamentos, com exceção da polpa obtida da



madeira de 7 anos refinada a 12% de consistência e a 30°C, em que o número de revoluções utilizado teve pequeno aumento.

Quadro 17 - Aumento percentual no número de revoluções em relação ao menor valor alcançado nos diversos tratamentos na operação de refino, para cada polpa das madeiras de diferentes idades, para se alcançar 40°SR

Polpa	pH 5				pH 9				Σ
	8% *		12% *		8% *		12% *		
	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	10°C	30°C	
M 4	121,0%	147,7%	28,4%	42,1%	59,4%	82,5%	0	11,1%	492,1%
M 7	51,0%	61,6%	13,0%	5,3%	40,7%	44,6%	0%	7,6	223,8%
M 9	82,6%	95,7%	9,1%	11,5%	77,6%	96,6%	0	5,9%	379,0%

- M4: polpa obtida da madeira de 4 anos; M7: polpa obtida da madeira de 7 anos; M9: polpa obtida da madeira de 9 anos; Σ: somatório dos ganhos percentuais para cada polpa; \* consistência de refino.

A polpa da madeira de 9 anos, com exceção do tratamento a 8% de consistência e a 30°C, com pequeno ganho no percentual de aumento de revoluções, também apresentou, mesma tendência das madeiras mais novas (4 e 7 anos).

Como discutido anteriormente para as propriedades físico-mecânicas, o pH alcalino favorece processos de hidratação e inchamento, gerando condições nas fibras que facilitam a ação dos elementos refinadores. Provavelmente, esse fato é o principal responsável pelo menor consumo de energia, indicado pelo menor número de revoluções necessário para o desenvolvimento das propriedades. Esse efeito é mais pronunciado nas polpas obtidas da madeira de 4 anos, devido às características de maior fragilidade de suas fibras.

A alteração da consistência de refino de 8 para 12% fez com que o número de revoluções necessário para se alcançar 40°SR reduzisse significativamente.

Maiores consistências estão associadas a maiores agregados de fibras, o que aumenta o tempo de retenção das fibras entre as áreas refinadoras, e a

intensidade de desfibrilamento interno e externo é maior, o que torna o tratamento mais homogêneo e favorece o desenvolvimento de propriedades. A literatura (MANFREDI et al., 1986) confirma esses fatos.

Em menores consistências, o tempo de retenção, relativo às fibras, entre as áreas refinadoras é menor, o que torna necessário maior número de revoluções para se alcançar o mesmo nível de refino e, provavelmente, aumenta o consumo de energia, além de maior perda de energia em virtude de maior quantidade de água no sistema.

Com a alteração da temperatura inicial de refino de 10 para 30°C, observou-se, em geral, tendência definida para maior necessidade de revoluções do moinho para se alcançar o nível de refino (40°SR). As polpas estudadas, com exceção da polpa da madeira de 7 anos refinada a pH 5 e 12% de consistência, que teve redução no número de revoluções de aproximadamente 7%, apresentaram, para os demais tratamentos, aumentos do número de revoluções para se alcançar 40°SR. Esses aumentos são, da ordem mínima, em torno de 4%, e máxima, de 10%.

A polpa da madeira de 4 anos apresentou ganho mínimo de aproximadamente 11% e máximo de 27%. A polpa obtida da madeira de 9 anos apresentou aumentos de aproximadamente, no mínimo, de 2%, e, no máximo, de 10%.

O aumento da temperatura favorece os processos de inchamento e hidratação das fibras, aumentando a flexibilidade dessas fibras, o que poderia levar a interpretar como uma maior facilidade da ação do refino e, conseqüentemente, menor necessidade de rotações do rotor do refinador para se alcançar o mesmo nível de refinação. Porém, a ocorrência desses fenômenos não pôde ser observada na grande maioria dos tratamentos a que foram submetidas as polpas de madeiras de diferentes idades.

O aumento da temperatura inicial de refino não favorece a ação do refinador, o que talvez possa ser explicado pelo fato de que a temperatura menor no início do refino pode causar maior rigidez dessas fibras, facilitando a captura

dessas fibras pelas barras do refinador. A ação do refino, principalmente nos primeiros momentos da operação, pode favorecer a geração de finos pela delaminação das camadas mais externas, o que gera graus Schopper Riegler ligeiramente superiores que das polpas refinadas à temperatura inicial de 30°C.

A maior temperatura, favorecendo a flexibilização das fibras, pode promover maior “escape” dessas fibras dos elementos refinadores, tendo como consequência menor geração de finos, os quais, na determinação do °SR, influencia a drenabilidade da suspensão.

CLARK (1985) relatou que o aumento da temperatura da polpa durante o refino reduz a viscosidade da água, afetando o efeito de amortecimento ou a proteção das fibras contra os choques dos elementos refinadores. Esses fatos podem ajudar a explicar os resultados encontrados.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi avaliada a qualidade da madeira e da polpa celulósica kraft branqueada, resultante de árvores clonais de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, com idades de 4, 7 e 9 anos. As madeiras foram analisadas individualmente quanto às suas propriedades físicas, químicas e às características morfológicas de fibras, objetivando obter informações sobre suas características tecnológicas de polpação. Foi avaliado também o comportamento dessas polpas no processo de refinação, variando-se condições de pH, consistência e temperatura no refino.

Os resultados permitem obter as seguintes conclusões:

-□O aumento da idade das árvores causou aumento do comprimento e da espessura de parede das fibras e decréscimo do diâmetro de lúmen, porém não foi detectada uma relação direta com a largura das fibras.

-□Os teores de lignina e de extrativos totais das madeiras apresentaram tendência de elevação com o aumento da idade das madeiras, porém ela não foi estatisticamente significativa. Os teores de holocelulose e cinzas apresentaram tendência de redução, esta última com diferenças estatísticas significativas.

-□A densidade básica das madeiras aumentou com o envelhecimento destas.

-□As madeiras mais velhas (7 e 9 anos) necessitaram de maiores cargas alcalinas para alcançarem o mesmo grau de deslignificação. A madeira de 9 anos apresentou rendimento mais elevado e viscosidade alta, tendo necessidade de apenas 0,5% a mais de álcali ativo.

-□As madeiras mais velhas apresentaram maior eficiência na deslignificação com oxigênio, contudo a branqueabilidade da todas as polpas em estudo foi considerada a mesma.

-□As propriedades mecânicas das polpas não-refinadas, quando tratadas a pH 5, tenderam a reduzir com o aumento da idade das madeiras, com exceção do volume específico aparente; quando tratadas a pH 9, elas apresentaram tendência de aumento, novamente com exceção do volume específico aparente.

-□As propriedades ópticas e superficiais das polpas não-refinadas, quando tratadas tanto a pH 5 quanto a pH 9, apresentaram tendência de queda com o aumento da idade das madeiras. A alteração do pH das polpas de 5 para 9 gerou quedas nessas propriedades, com exceção da propriedade superficial de lisura das polpas obtidas das madeiras mais velhas (7 e 9 anos), que aumentou, e das alvuras das polpas, que se mantiveram estáveis.

-□Madeiras mais novas tratadas a pH 5 e sem refino apresentaram melhores características para produção de papel “tissue”.

-□As propriedades físico-mecânicas das polpas refinadas tenderam a aumentar com o aumento da idade das madeiras.

-□A alteração do pH de refino de 5 para 9 favoreceu o aumento das propriedades, principalmente das polpas de madeiras mais velhas (7 e 9 anos).

-□A alteração da consistência de refino de 8 para 12% favoreceu a diminuição das propriedades físico-mecânicas, principalmente para as polpas das madeiras mais novas (4 e 7 anos), em que a maioria dos valores das propriedades, nos diferentes tratamentos, foi reduzida.

-□A alteração da temperatura inicial de refino de 10 para 30°C favoreceu uma pequena tendência de aumento das propriedades físico-mecânicas das polpas

de madeiras de diferentes idades, já que pouco mais de 50% dos tratamentos a que foram submetidas as polpas apresentaram aumento no valor da propriedade.

-□O consumo de energia na operação de refino, baseado no número de revoluções necessárias para se atingir o mesmo grau Schopper Riegler, aumentou com a idade das madeiras, na maioria dos tratamentos, o que equivale a dizer que madeiras mais novas são mais fáceis de se refinar. Esse consumo de energia decresceu de forma significativa quando do aumento da consistência de refino de 8 para 12% .

-□Os refinamentos realizados a pH alcalino e a altas consistências favoreceram a operação de refino.

-□A alteração da temperatura de refino de 10 para 30°C apresentou pequeno efeito no consumo de energia, com pequeno prejuízo para a operação, ou seja, pequeno aumento no número de revoluções para se alcançar o mesmo nível de refinação.

-□O controle de variáveis de refino é fundamental, principalmente quando se refinam polpas obtidas de madeiras de diferentes idades. Uma possível necessidade de misturas dessas polpas, provavelmente, contribuiria para uma heterogeneidade no sistema de preparo de massa, com reflexos na formação e no controle de variáveis da produção industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATAIDE, M.R., FIGUEIREDO, M.M.L. Algumas considerações sobre a caracterização de fibras celulósicas. **Pasta e Papel**, setembro, 1992, 55-58p.
- BARRICHELO, E.L.G., BRITO, J.O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para indústria de celulose e papel. In: **Projeto de Desenvolvimento e pesquisa florestal**, Brasília, 1976, n.13, 145p.
- BARRICHELO, E.L.G., BRITO, J.O., BAZANELLI, A.V. Densidade básica e características das fibras de madeiras de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, 1983, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABCP, 1983, v.1.p.113-125.
- BRISTOW, J.A., KOLSETH, P. **Paper structure and properties**. Stockholm, Sweden, Marcel Dekker, Inc. 1986. v.8, 390p.
- BUGAJER, S., SILVA, O.F., PIRES, F.S. Influência do pH na refinação de pastas celulósicas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP - SEMANA DO PAPEL, 17, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1984. v.1, p.31-39.
- BUSNARDO, C.A., GONZAGA, J.V., FOEKEL, C.E.B., et al. Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para produção de celulose e papel II - Inter-relações entre propriedades das árvores e de suas madeiras. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1983. v.1. p.31-47.

- CARNEIRO, C.J.G., WEHR, T.R.; MANFREDI, VAIL, Efeito da viscosidade nas propriedades físico mecânicas de polpas branqueadas. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 28, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1995. p.227-233.
- CASEY, J.P. (Ed.). **Pulp and paper**. chemistry and chemical technology. 3.ed. New York: John Wiley, Sons, 1979. v.1, 771p.
- CLARK, J. D'A. **Pulp technology and treatment for paper**. 2.ed., San Francisco, Miller Freeman, 1985. 878p.
- CLARK, J. D'A. Some thoughts on fiber classification and length. **Tappi Press**, Process Engineering, Handbook, 1991, 3p.
- CAMPINHOS JUNIOR, E., CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. Desenvolvimento do eucalipto do futuro. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: 1990. p.83-94.
- CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. Efeito da moagem nas propriedades das fibras. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP - SEMANA DO PAPEL, 15 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1983. p.97-120.
- COLODETTE, J.L., GOMIDE, J.L., SALLES, D.V.C., et al. Fatores que afetam a branqueabilidade de polpas kraft com oxidantes derivados do oxigênio. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ACTCP, 28, 1985. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1995. p.49-68.
- D'ALMEIDA, M.L.O. (Cood.) **Celulose e papel**. Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2.ed. São Paulo: IPT, 1988. v.1, 559p.
- DA SILVA, A.P. Considerações sobre refinação de fibras. In: Trabalho apresentado no III Seminário de Papel e Cartão, s.d., 29-34p.
- DANILAS, R.M. Branqueamento de pastas celulósicas. In: D'ALMEIDA, M.L.O. (Cood.). **Celulose e papel**, tecnologia de fabricação de pasta celulósica. 2.ed. São Paulo, IPT, 1988. v.1, p.427-559.
- DASGUPTA, S. Mechanism of paper tensile-strength development due to pulp beating. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.77, n.6, p.158-166, 1994.
- DEFOE, R.J. Optimal refining conditions for development of OCC pulp properties. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.76, n.2, p.157-161, 1993.



- DEMUNER, B.J., DÓRIA, E.L.V., CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E., et al. Influência das características dos flocos sobre o refino de polpas químicas. **O Papel**, São Paulo, v.54 n.2, p.29-39, 1993.
- DEMUNER, B.J., DÓRIA, E.L.V., CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E., et al. As propriedades do papel e as características das fibras de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24, 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1991. p.621-640.
- DEMUNER, B.J., MANFREDI, V., CLÁUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. Refino de celulose de eucalipto - uma análise fundamental. **O Papel**, São Paulo, v.51, n.8, p.44-54, 1990.
- ESPY, H.H. The effects of pulp refining on wet-strength resin. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.70, n.7, p.129-133, 1990.
- FERREIRA, M. Optimization of operating speed, and design con reduce no-load power requirements, saving mills thousands of dollars a year. **Pulp & Paper**, Atlanta, v.70, n.2, p.89-91, 1996.
- FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maden nas idades 11, 12, 14 e 16 anos, **IPEF**, Piracicaba, n.4, 1972, 65-89p.
- FONSECA, S.M., OLIVEIRA, R.C., SILVEIRA, P.N. Industrial tree selection: procedures, risks, costs and benefits, CRC for temperate hardwood forestry, Hobart, 1995, **Proceedings...** Hobart: IUFRO, 1995, 14-19p.
- FUENTES, R., MONFUFAR, J.F., ORTEGA, R. Combined high and low consistency refining of unbleached kraft pulp. **Tappy Journal**, Atlanta, GA, v.64, n.7, p.59-62, 1981.
- GIERTZ, H.W. A influência da moagem sobre as fibras individuais e seus efeitos nas propriedades do papel. **O Papel**, São Paulo, v.50, n.1, p.62-66, 1989.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra, In: SARKANEN, K.V., LUSWIG, C.H. (Eds). **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p.241-246.
- GOMIDE, J.L. **Polpa de celulose**, química dos processos alcalinos de polpação. Viçosa. MG: UFV, Impr. Univ. 1979. 49p.

- GOMIDE, J.L., DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina na madeira pelo método klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v.47, n.8, p.36-38, 1986.
- GRACE, T.M., LEOPOLD, B., MALCOM, E.W. Kraft liquors. In: KOCUREK, J.M, e STEVENS, F. **Pulp and paper manufacture**, 3. ed. Atlanta, Montreal: TAPPI/CPPA, 1989. v.5, cap.2, p.15-22.
- GURNAGUL, N., PAGE, D.H., SETH, R.S. Dry sheet properties of canadian hardwood kraft pulps. **Journal of Pulp and Paper Science**, Lewiston, N.Y., v.16, n.1, p.j35-j40, 1990.
- HARTLER, N. Aspects on curled and microcompressed fibers. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, Stockholm, v.10, n.1, p.4-7, 1995.
- HIGGINS, H.G., DE YONG, J. The beating process: primary effects and their influence on Pulp and paper properties. In: **Formation and structure of paper**. v.2, 651-695p. 1986.
- HORN, R.A. Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on paper strength. **Research Paper FPL 312**, Madison, Wisconsin 53705, 1978, 6p.
- JANKWSKY, I.P. Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial. São Paulo: **IPEF**, 1989, 18p. (Circular técnica, 81).
- JETT, J.B. Wood and pulping and properties of young hardwoods. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.58, n.1, p.92-96, 1975.
- KATZ, S., LIEBERGOTT, N., SCALLAN, M. A mechanism for the alkali strengthening of mechanical pulps. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.64, n.7, p.97-100, 1981.
- KATZ, S., SCALLAN, A.M. Ozone and caustic soda treatments of mechanical pulp. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.6, n.1, p.85-87, 1983.
- KOKUREK, M.J., STEVENS, F. (Eds.) **Properties of fibrous raw materials and their preparation of pulping**. 3.ed., 1983. 174p. (Pulp and Paper Manufacture, 1).

- KUAN, S.S.G., BENAZZI, C.R., BERGMAN, S. Matérias-primas. In: D'ALMEIDA, M. L. O (Coord.) **Celulose e Papel**, tecnologia de fabricação de papel. 2.ed. São Paulo: IPT, 1988. v.2, p.561-581.
- MACHADO, F.J.J., GOMIDE, J.L., CAMPOS, W.O., et al. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus toelliana* e *Eucalyptus grandis* para produção de polpa kraft. **O Papel**, São Paulo, v.48, n.8, p.56-60, 1987.
- MAEGLIN, R.P. Juvenile wood, tension wood and growth stress effect on processing hardwood. IN: **Hardwood Symposium of the Hardwood research Concil**, 1987, may, 10-12, Memphis, TN, 100-108p.
- MANFREDI, V., VILELO, C.B., CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. Efeito das variáveis operacionais do refino na evolução das propriedades da polpa refinada. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP - SEMANA DO PAPEL, 19, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1986. p.189-207.
- MILANES, A.F., FOCHE, T., LUDWIG, J.L., et al. A importante participação da qualidade da água nos parâmetros de refino e resistência da polpa. **O Papel**, São Paulo, v.44, n.4, p.30-36, 1983.
- MILES, K.B., KARNIS, A. Characteristics and energy consumption in refiner pulps. In: **Journal of Pulp and Paper Science**, Lewiston, NY, v.21, n.11, p.j383-j399, 1995.
- PAAVILAINEN, L. Influence of morphology and processing on the paper making potential of softwood sulphate pulp fibers. In: **Pulping Conference**, book 2, San Diego, California, 1994, **Proceedings...** San Diego: 1994, 857-867p.
- PAGE, D.H., SETH, R.S. A note on the effect of fiber strength on the tensile strength of paper. **Tappy Journal**, Atlanta, GA, v.71, n.10, p.182-183, 1988.
- PAGE, D.H., SETH, R.S., GRACE DE, J.H. The elastic modulus of paper. **Tappi Journal**, Atlanta, GA., v.62, n.9, p.99-102, 1979.
- PIRES, F.S., KUAN, G.S.S., BENAZZI, R.C. et al. Preparação da massa. In: D'ALMEIDA, M.L. O (Coord.) **Celulose e Papel**. tecnologia de fabricação do papel. 2.ed., São Paulo. 1988, v.2, p.583-656.
- PULKKI, R. Literature synthesis on the effects of wood quality in the manufacture of pulp and paper. **Fabric Technical Note** (171), December, 1991. 8p.

- RATNIEKS, E. The effect of refining consistency on eucalyptus pulp strength. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 26, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo. ABTCP, 1993, p.765-776.
- RATNIEKS, E., DEMLER, C. O refino da polpa de eucalipto. **O Papel**, São Paulo, v.54, n.8, p.22-25, 1993.
- REINER, F.J.M. Mecanismo de ligação entre fibras e a importância do refino. **O Papel**, São Paulo, v.50, n.1, p.29-32, 1994.
- RETULAINEN, E., EBELING, K. Fiber-fiber bonding and ways of characterizing bond strength. **Appita**, Victoria, AV, v. 46, n. 4, p. 282 - 288, 1993.
- SCALLAN, A.M., TIGERSTRÖNG, A.C. Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibers. **Journal of Pulp and Paper Science**. Lewiston, NY, v.18, n.5, p.188-192, 1992.
- SCURFIELD, G. Structural features of hardwoods and their influence on paper properties. **Tappy Journal**, Atlanta, GA, v.59, n.7, p.110-113, 1976.
- SETH, R.S., PAGE, D.H. Fiber properties and tearing resistance. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.71, n.2, p.103-107, 1988.
- SFERRAZZA, M. Proper refiner selection, upkeep boost performance and savings. **Pulp & Paper**, Atlanta, v.70, n.2, p.89-91, 1996.
- SHIMOYAMA, V.R., BARRICHELO, L.E. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica de madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCP, 24, 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1991, p.23-35.
- SIHTOLA, H. et al. Comparison and conversion of viscosity and DP-values determined by different methods. In: **Paper och TRÄ**, Helsinki, n.4a, p.225-232, 1963. (Special number).
- SILVA, A.P., CARRETA, J.R. Refinação: suas mudanças e avanços tecnológicos na última década. **O Papel**, São Paulo, v.32, n.5, p.37-44, 1971.
- SILVA, D.J. Impacto da qualidade da madeira na deslignificação, no branqueamento e nas propriedades físico mecânicas de polpas de Eucalipto. Viçosa: UFV, 1996. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1996.

- SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & Paper Technologists**, 1987, 389p.
- SOUZA, A.P., DELLA LUCIA, R.M., RESENDE, G.C. Estudo da densidade básica da madeira de *Eucalyptus microcirys* F. Muel, cultivado na região de Dionísio MG. **R. Árvore**, Viçosa, v.3, n.1, p.16-27, 1979.
- SPINNER, H. Brightness reversion. **Process engineering handbook**, Tappi Press, 1991, 54-74p.
- TOMAZELLO FILHO, K. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. Piracicaba: ESALQ/USP, [19\_ \_]. p.45-37. (Apostila).
- TURGILHO, P.F., LIMA, J.T., MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v .2, n.1, p.094-111, 1996.
- VITAL, B.R., PEREIRA, A.R., DELLA LUCIA, R.M., et al. Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivado na região de serrado de Minas Gerais. Brasília: IBDF, 1984. p.41-52.
- WHER, T.R., BARRICHELO, L.E.G. Cozimento kraft com madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. **O Papel**, São Paulo, v.44, n.5, p.33-41, 1993.
- WRIGHT, J.A., CREMER-SLUIJS, H.J. Tracheid morphology and pulp and paper strength traits of *Pinus taeda* an *Pinus patula* at age years in South frica. **Tappi Journal**, Atlanta, GA, v.75, n.5, p.183-187, 1992.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

As propriedades físico-mecânicas e ópticas foram correlacionadas com o peso específico aparente das polpas (PEA). As equações e os coeficientes de determinação que melhor se aplicam às propriedades encontram-se a seguir, sendo:

M4: madeira de 4 anos; M7: madeira de 7 anos; M9: madeira de 9 anos

Cst: consistência de refino

°C: temperatura de refino

IT: índice de tração

IA: índice de arrebentamento

IR: índice de rasgo

MOE: módulo de elasticidade específico

TEA: energia de deformação

RPA: resistência à passagem de ar

Quadro 1A - Índice de tração (n.m/g)

POLPA	EQUAÇÃO	R <sup>2</sup>
M4/pH 5/8%Cst/10°C	IT = -323,332+1,0619 PEA-0,00070642 PEA <sup>2</sup>	97,0
M7/pH 5/8%Cst/10°C	IT = 578,469-3,55234 PEA+0,00726992 PEA <sup>2</sup> -0,0000045701 PEA <sup>3</sup>	99,7
M9/pH 5/8%Cst/10°C	IT = -46,5947+0,166615 PEA+0,00003456 PEA <sup>2</sup>	97,5
M4/pH 5/8%Cst/30°C	IT = -2453,16+11,9564 PEA-0,0191433 PEA <sup>2</sup> +0,0000103328 PEA <sup>3</sup>	98,1
M7/pH 5/8%Cst/30°C	IT = -42,4668+0,087213 PEA+0,000163754 PEA <sup>2</sup>	96,6
M9/pH 5/8%Cst/30°C	IT = -77,3455+0,283167 PEA-0,000067392 PEA <sup>2</sup>	98,4
M4/pH 5/12%Cst/10°C	IT = -219,398+0,659376 PEA-0,00031697 PEA <sup>2</sup>	98,0
M7/pH 5/12%Cst/10°C	IT = -105,357+0,341370 PEA-0,0000902173 PEA <sup>2</sup>	96,1
M9/pH 5/12%Cst/10°C	IT = -109,3+0,394426 PEA-0,000148559 PEA <sup>2</sup>	98,5
M4/pH 5/12%Cst/30°C	IT = -113,081+0,299893 PEA-0,00002353 PEA <sup>2</sup>	96,8
M7/pH 5/12%Cst/30°C	IT = 1053,48-5,6884 PEA+0,101266 PEA <sup>2</sup> -0,000005648 PEA <sup>3</sup>	97,9
M9/pH 5/12%Cst/30°C	IT = -400,9+2,12653 PEA-0,0035042 PEA <sup>2</sup> +0,0000021081 PEA <sup>3</sup>	99,3
M4/pH 9/8%Cst/10°C	IT = 1,39317-0,0845061 PEA+0,0002974 PEA <sup>2</sup>	97,3
M7/pH 9/8%Cst/10°C	IT = -6,31706-0,0567344 PEA+0,000314589 PEA <sup>2</sup>	94,9
M9/pH 9/8%/Cst/10°C	IT = -170,772+0,641115 PEA-0,0003984 PEA <sup>2</sup>	95,6
M4/pH 9/8%Cst/30°C	IT = -259,897+0,846142 PEA-0,0005133 PEA <sup>2</sup>	96,2
M7/pH 9/8%Cst/30°C	IT = 2243,43-1301921 PEA+0,257171 PEA <sup>2</sup> -0,00001626 PEA <sup>3</sup>	98,2
M9/pH 9/8%/Cst/30°C	IT = -81,239+0,280318 PEA-0,00004042 PEA <sup>2</sup>	97,1
M4/pH 9/12%Cst/10°C	IT = -65,7587+0,160707 PEA+0,00007665 PEA <sup>2</sup>	98,2
M7/pH 9/12%Cst/10°C	IT = -22,492+0,0101621 PEA+0,0002437 PEA <sup>2</sup>	96,7
M9/pH 9/12%Cst/10°C	IT = 1109,37-6,17724 PEA+0,011388 PEA <sup>2</sup> -0,000006613 PEA <sup>3</sup>	96,2
M4/pH 9/12%Cst/30°C	IT = -71,6319+0,168571 PEA+0,00008533 PEA <sup>2</sup>	96,7

M7/pH 9/12%Cst/30°C	IT = 1955,56-10,5124 PEA+0,018677 PEA <sup>2</sup> -0,00001066 PEA <sup>3</sup>	99,1
M9/pH 9/12%Cst/30°C	IT = 928,159-5,26427 PEA+0,00992413 PEA <sup>2</sup> -0,000005867 PEA <sup>3</sup>	98,3

Quadro 2A - Índice de arrebentamento (KPa.m<sup>2</sup>/g)

POLPA	EQUAÇÃO	R <sup>2</sup>
M4/pH 5/8%Cst/10°C	IA = -11,4417+0,0306484 PEA-0,000009633 PEA <sup>2</sup>	98,0
M7/pH 5/8%Cst/10°C	IA = 90,1527-0,535302 PEA+0,00104463 PEA <sup>2</sup> -0,0000006527 PEA <sup>3</sup>	99,3
M9/pH 5/8%Cst/10°C	IA = 1,68123-0,0116299 PEA+0,000025829 PEA <sup>2</sup>	97,5
M4/pH 5/8%Cst/30°C	IA = -24,9075+0,0778512 PEA-0,00005013 PEA <sup>2</sup>	97,8
M7/pH 5/8%Cst/30°C	IA = -7,32907+0,0194039 PEA	97,8
M9/pH 5/8%Cst/30°C	IA = -4,75849+0,013941 PEA+0,000001748 PEA <sup>2</sup>	98,6
M4/pH 5/12%Cst/10°C	IA = -17,1886+0,0482729 PEA-0,0000219733 PEA <sup>2</sup>	98,4
M7/pH 5/12%Cst/10°C	IA = 102,456-13,3742 raiz PEA+0,558513 PEA-0,0072066 PEA <sup>1.5</sup>	98,3
M9/pH 5/12%Cst/10°C	IA = -1,31211-0,00146399 PEA+0,00001885 PEA <sup>2</sup>	98,2
M4/pH 5/12%Cst/30°C	IA = -4,12595+0,00468289 PEA+0,00001297 PEA <sup>2</sup>	96,2
M7/pH 5/12%Cst/30°C	IA = 6,27412-0,0317907 PEA+0,0000465537 PEA <sup>2</sup>	97,1
M9/pH 5/12%Cst/30°C	IA = -1,75704+0,00119122 PEA+0,0000149906 PEA <sup>2</sup>	98,5
M4/pH 9/8%Cst/10°C	IA = 14,5474-1,92659 raiz PEA+0,0603551 PEA	95,4
M7/pH 9/8%Cst/10°C	IA = 2,6735-0,0202811 PEA+0,00003898 PEA <sup>2</sup>	96,9
M9/pH 9/8%/Cst/10°C	IA = -9,95468+0,0347493 PEA-0,00001803 PEA <sup>2</sup>	96,9
M4/pH 9/8%Cst/30°C	IA = -14,3218+0,0409893 PEA-0,00001784 PEA <sup>2</sup>	96,8
M7/pH 9/8%Cst/30°C	IA = 117,278-0,711733 PEA+0,00141783 PEA <sup>2</sup> -0,0000009072 PEA <sup>3</sup>	97,5
M9/pH 9/8%/Cst/30°C	IA = -23,7007+0,125975PEA-0,000218146 PEA <sup>2</sup> +0,0000001449PEA <sup>3</sup>	98,9
M4/pH 9/12%Cst/10°C	IA = -1,42015-0,00451818 PEA+0,00002124 PEA <sup>2</sup>	98,1
M7/pH 9/12%Cst/10°C	IA = 23,6832-2,78709 raiz PEA+0,0818937 PEA	96,8
M9/pH 9/12%Cst/10°C	IA = 82,2471-0,455496 PEA+0,000827476 PEA <sup>2</sup>	96,3
M4/pH 9/12%Cst/30°C	IA = 62,6316-6,00508 raiz PEA+0,146457 PEA	98,4
M7/pH 9/12%Cst/30°C	IA = 37,5125-3,93076 raiz PEA+0,105151 PEA	98,1
M9/pH 9/12%Cst/30°C	IA = 8,2671-0,0389673 PEA+0,00005524 PEA <sup>2</sup>	98,1

Quadro 3A - Índice de rasgo (mN.m<sup>2</sup>/g)

POLPA	EQUAÇÃO	R <sup>2</sup>
M4/pH 5/8%Cst/10°C	IR = 296,457-47,2585 raiz PEA+2,34924 PEA-0,00367076 PEA <sup>1.5</sup>	99,0
M7/pH 5/8%Cst/10°C	IR = 41,1491-13,5173 PEA+0,922388 PEA <sup>2</sup> -0,0173229 PEA <sup>3</sup>	90,1
M9/pH 5/8%Cst/10°C	IR = -36,2059+0,143933 PEA-0,000108918 PEA <sup>2</sup>	93,0
M4/pH 5/8%Cst/30°C	IR = -37,7853+0,114942PEA-0,000051718 PEA <sup>2</sup> -0,0000000199 PEA <sup>3</sup>	92,0
M7/pH 5/8%Cst/30°C	IR = -18,476+0,0619928 PEA-0,0000258 PEA <sup>2</sup>	91,5
M9/pH 5/8%Cst/30°C	IR = -2,70239+0,00884283 PEA+0,00002118 PEA <sup>2</sup>	90,9
M4/pH 5/12%Cst/10°C	IR = -162,922+0,690773PEA-0,000910766PEA <sup>2</sup> +0,0000003956 PEA <sup>3</sup>	89,0
M7/pH 5/12%Cst/10°C	IR = 25,3527-7,73844 raiz PEA+0,507904 PEA-0,00896630 PEA <sup>1.5</sup>	93,3
M9/pH 5/12%Cst/10°C	IR = 34,2828-0,230157 PEA+0,00052662 PEA <sup>2</sup> -0,0000003495 PEA <sup>3</sup>	99,4
M4/pH 5/12%Cst/30°C	IR = 144,47-0,803854 PEA+0,00147595 PEA <sup>2</sup> -0,0000008582 PEA <sup>3</sup>	96,6
M7/pH 5/12%Cst/30°C	IR = -28,904+0,0847604PEA+0,00000557912PEA <sup>2</sup> -0,00000068PEA <sup>3</sup>	96,1
M9/pH 5/12%Cst/30°C	IR = -33,1776+0,133428 PEA-0,000101288 PEA <sup>2</sup>	92,6
M4/pH 9/8%Cst/10°C	IR = 4,97514-0,0280598 PEA+0,00005453 PEA <sup>2</sup>	90,6
M7/pH 9/8%Cst/10°C	IR = -37,6171+0,130681 PEA-0,00008709 PEA <sup>2</sup>	90,2
M9/pH 9/8%/Cst/10°C	IR = 429,537-68,1009 raiz PEA+3,4635 PEA-0,0564245 PEA <sup>1.5</sup>	91,5
M4/pH 9/8%Cst/30°C	IR = -29,9328+0,0963885 PEA-0,00005402 PEA <sup>2</sup>	86,6
M7/pH 9/8%Cst/30°C	IR = -93,2301+0,342508 PEA-0,0002848 PEA <sup>2</sup>	89,4
M9/pH 9/8%/Cst/30°C	IR = -68,6959+0,258676 PEA-0,000210539 PEA <sup>2</sup>	88,0
M4/pH 9/12%Cst/10°C	IR = -48,8102+0,16515 PEA-0,00011585 PEA <sup>2</sup>	93,6
M7/pH 9/12%Cst/10°C	IR = -49,3294+0,174154 PEA-0,000126623 PEA <sup>2</sup>	91,4
M9/pH 9/12%Cst/10°C	IR = 228,953-1,36188 PEA+0,00267135 PEA <sup>2</sup> -0,000001677 PEA <sup>3</sup>	94,7
M4/pH 9/12%Cst/30°C	IR = -39,1323+0,131536 PEA-0,00008748 PEA <sup>2</sup>	94,5



M7/pH 9/12°Cst/30°C	IR = 146,886-0,859264 PEA+0,0016634 PEA <sup>2</sup> -0,000001023 PEA <sup>3</sup>	96,5
M9/pH 9/12°Cst/30°C	IR = 120,054-0,738704 PEA+0,00149943 PEA <sup>2</sup> -0,0000009532 PEA <sup>3</sup>	95,9

**Quadro 4A - Módulo de elasticidade específico (GPa)**

<b>POLPA</b>	<b>EQUAÇÃO</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
M4/pH 5/8°Cst/10°C	MOE = 3,51652+0,00541499 PEA	63,6
M7/pH 5/8°Cst/10°C	MOE = 42,37954+0,00772544 PEA	69,3
M9/pH 5/8°Cst/10°C	MOE = -3,87382+0,033744 PEA-0,0000247 PEA <sup>2</sup>	89,4
M4/pH 5/8°Cst/30°C	MOE = -440,4+53,1735 raiz PEA-2,11001 PEA+0,0279543 PEA <sup>1.5</sup>	78,4
M7/pH 5/8°Cst/30°C	MOE = 10,2732-0,0234012 PEA+0,00003011 PEA <sup>2</sup>	82,2
M9/pH 5/8°Cst/30°C	MOE = 9,77909-0,050929 PEA+0,0001488 PEA <sup>2</sup>	63,4
M4/pH 5/12°Cst/10°C	MOE = 34,8373-0,173051 PEA+0,0003288 PEA <sup>2</sup>	91,2
M7/pH 5/12°Cst/10°C	MOE= -11,7145+0,9258 raiz PEA+0,0025549 PEA-0,0003458 PEA <sup>2</sup>	96,0
M9/pH 5/12°Cst/10°C	MOE = 53,2751+0,9258 PEA+0,0006177 PEA <sup>2</sup> -0,0000004028 PEA <sup>3</sup>	95,6
M4/pH 5/12°Cst/30°C	MOE =2,16455+0,0081761 PEA	77,7
M7/pH 5/12°Cst/30°C	MOE = 11,7057-0,0549759 PEA+0,0001330 PEA <sup>2</sup>	97,1
M9/pH 5/12°Cst/30°C	MOE = -9,40106-0,14126 raiz PEA+0,086095 PEA-0,002262 PEA <sup>1.5</sup>	99,4
M4/pH 9/8°Cst/10°C	MOE = 3,51242+0,0053329 PEA	61,3
M7/pH 9/8°Cst/10°C	MOE = 14,7423-0,037628 PEA+0,00004171 PEA <sup>2</sup>	71,6
M9/pH 9/8°Cst/10°C	MOE = -5,2031+0,03953 PEA+0,00004171 PEA <sup>2</sup>	86,4
M4/pH 9/8°Cst/30°C	MOE = 6,88871-0,00720563 PEA+0,0000116 PEA <sup>2</sup>	73,7
M7/pH 9/8°Cst/30°C	MOE = -1,14886+0,0225443 PEA-0,000014 PEA <sup>2</sup>	75,6
M9/pH 9/8°Cst/30°C	MOE = 3,77569+0,005809 PEA	86,1
M4/pH 9/12°Cst/10°C	MOE = 93,3902-0,451521 PEA+0,0007622PEA <sup>2</sup> -0,000000416 PEA <sup>3</sup>	98,1
M7/pH 9/12°Cst/10°C	MOE =2,43047+0,00836504 PEA	68,7
M9/pH 9/12°Cst/10°C	MOE = 2,39783+0,008825 PEA	85,5
M4/pH 9/12°Cst/30°C	MOE = -5,2031+0,03953 PEA-0,00003020 PEA <sup>2</sup>	76,4
M7/pH 9/12°Cst/30°C	MOE = -2,20123+0,02578 PEA-0,0000162 PEA <sup>2</sup>	86,3
M9/pH 9/12°Cst/30°C	MOE = -8,3107+0,05144 PEA-0,0000412 PEA <sup>2</sup>	83,9

**Quadro 5A - Energia de deformação (J/m<sup>2</sup>)**

<b>POLPA</b>	<b>EQUAÇÃO</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
M4/pH 5/8°Cst/10°C	TEA = 3E -17 PEApot (6,5642)	94,9
M7/pH 5/8°Cst/10°C	TEA = 6E -15 PEApot (5,7907))	97,8
M9/pH 5/8°Cst/10°C	TEA =5E -12 PEApot (4,7667)	98,1
M4/pH 5/8°Cst/30°C	TEA = -1077,18+4,8949 PEA-0,007577 PEA <sup>2</sup> +0,00000431 PEA <sup>3</sup>	95,5
M7/pH 5/8°Cst/30°C	TEA = 2E -16 PEApot (6,3262)	96,3
M9/pH 5/8°Cst/30°C	TEA = 8E -13 PEApot (5,0500)	98,8
M4/pH 5/12°Cst/10°C	TEA = 4E -16 PEApot (6,1764)	94,6
M7/pH 5/12°Cst/10°C	TEA = 1E -13 PEApot (5,3307)	97,1
M9/pH 5/12°Cst/10°C	TEA = 3E -13 PEApot (5,2136)	98,0
M4/pH 5/12°Cst/30°C	TEA = 3E -16 PEApot (6,1985)	94,1
M7/pH 5/12°Cst/30°C	TEA = 2E -14 PEApot (5,6067)	92,2
M9/pH 5/12°Cst/30°C	TEA = 4E -12 PEApot (4,7669)	92,9
M4/pH 9/8°Cst/10°C	TEA = 2E -17 PEApot (6,6741)	97,5
M7/pH 9/8°Cst/10°C	TEA = 2,5E -16 PEApot (6,3296)	98,1
M9/pH 9/8°Cst/10°C	TEA = 3E -12 PEApot (4,8294)	94,4
M4/pH 9/8°Cst/30°C	TEA = 6E -18 PEApot (6,8459)	94,6
M7/pH 9/8°Cst/30°C	TEA = 2619,2-15,692PEA-0,030664PEA <sup>2</sup> -0,00001923PEA <sup>3</sup>	97,0
M9/pH 9/8°Cst/30°C	TEA = 3E -13 PEApot (5,2322)	95,3
M4/pH 9/12°Cst/10°C	TEA = 3E -15 PEApot (5,8423)	98,1
M7/pH 9/12°Cst/10°C	TEA = 3E -14 PEApot (5,5378)	96,5
M9/pH 9/12°Cst/10°C	TEA = 4E -13 PEApot (5,1837)	96,2
M4/pH 9/12°Cst/30°C	TEA = 4E -16 PEApot (6,1430)	97,5

M7/pH 9/12%Cst/30°C	TEA = 9E -14 PEApot (5,3746)	97,6
M9/pH 9/12%Cst/30°C	TEA = 3E -13 PEApot (5,2133)	96,8

**Quadro 6A - Resistência à passagem de ar (s/100cm<sup>3</sup>)**

<b>POLPA</b>	<b>EQUAÇÃO</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
M4/pH 5/8%Cst/10°C	RPA = 0,0003 exp (0,0154 PEA)	91,7
M7/pH 5/8%Cst/10°C	RPA = 0,0006 exp (0,0144 PEA)	94,7
M9/pH 5/8%Cst/10°C	RPA = 0,0015 exp (0,0129 PEA)	94,7
M4/pH 5/8%Cst/30°C	RPA = 0,0006 exp (0,0139 PEA)	97,4
M7/pH 5/8%Cst/30°C	RPA = 0,0005 exp (0,0147 PEA)	97,3
M9/pH 5/8%Cst/30°C	RPA = 0,0022 exp (0,0121 PEA)	96,5
M4/pH 5/12%Cst/10°C	RPA = 0,0006 exp (0,0139 PEA)	97,8
M7/pH 5/12%Cst/10°C	RPA = 0,0015 exp (0,0125 PEA)	92,5
M9/pH 5/12%Cst/10°C	RPA = 0,0015 exp (0,0013 PEA)	98,1
M4/pH 5/12%Cst/30°C	RPA = 0,0014 exp (0,0123 PEA)	94,1
M7/pH 5/12%Cst/30°C	RPA = 0,0021 exp (0,0117PEA)	92,2
M9/pH 5/12%Cst/30°C	RPA = 0,0023 exp (0,0117 PEA)	92,9
M4/pH 9/8%Cst/10°C	RPA = 0,0005 exp (0,0146 PEA)	94,7
M7/pH 9/8%Cst/10°C	RPA = 0,0002 exp (0,0168 PEA)	97,8
M9/pH 9/8%/Cst/10°C	RPA = 0,0005 exp (0,0149 PEA)	92,9
M4/pH 9/8%Cst/30°C	RPA = 0,0006 exp (0,0143 PEA)	93,7
M7/pH 9/8%Cst/30°C	RPA = 0,0005 exp (0,0151 PEA)	97,0
M9/pH 9/8%/Cst/30°C	RPA = 0,0005 exp (0,0151 PEA)	97,0
M4/pH 9/12%Cst/10°C	RPA = 0,0008 exp (0,0134 PEA)	96,3
M7/pH 9/12%Cst/10°C	RPA = 0,0004 exp (0,0153 PEA)	94,9
M9/pH 9/12%Cst/10°C	RPA = 0,0009 exp (0,0139 PEA)	95,4
M4/pH 9/12%Cst/30°C	RPA = 0,0007 exp (0,0137 PEA)	96,3
M7/pH 9/12%Cst/30°C	RPA = 0,0009 exp (0,0134 PEA)	92,5
M9/pH 9/12%Cst/30°C	RPA = 0,0006 exp (0,0142 PEA)	90,9



## APÊNDICE B

Quadro 1B - Resultados das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas provenientes das madeiras de diferentes idades

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/ refino	63,18	27,18	1,23	4,44	1,02	0,33	15,44	409,35	2,44	12,25	5,79	6,16	43,74
2000	64,67	64,24	3,79	9,09	2,44	1,65	11,62	556,38	1,80	72,41	7,33	14,48	37,30
4000	64,67	78,29	4,88	10,64	3,01	4,76	10,38	623,19	1,60	107,21	7,82	20,49	28,83
6000	64,67	83,59	5,72	11,08	3,48	7,66	10,05	643,84	1,55	131,60	7,56	21,68	26,66
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	27,18	1,23	4,44	1,02	0,33	15,44	409,35	2,44	12,25	5,79	6,16	43,74
2000	63,18	63,64	3,86	10,01	2,21	1,24	11,01	574,31	1,74	62,17	7,50	16,05	38,08
4000	64,17	76,63	5,07	10,89	2,93	3,78	10,07	637,36	1,57	101,33	7,74	20,81	32,05
6000	63,68	85,89	5,88	10,61	3,51	8,84	9,47	672,52	1,49	133,41	7,65	25,07	27,73
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 10°C.													
s/ refino	63,18	27,18	1,23	4,44	1,02	0,33	15,44	409,35	2,44	12,25	5,79	6,16	43,74
3000	63,68	57,53	3,29	10,31	2,14	1,57	11,42	558,18	1,79	55,45	7,22	15,42	34,61
6000	65,67	69,80	4,34	10,98	2,76	3,56	10,50	625,75	1,60	87,62	7,56	20,33	28,23
12000	65,17	81,59	5,60	11,45	3,53	12,09	9,75	668,91	1,50	131,94	7,63	26,92	26,41
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	27,18	1,23	4,44	1,02	0,33	15,44	409,35	2,44	12,25	5,79	6,16	43,74
3000	63,68	60,62	3,65	9,20	2,42	1,56	11,29	564,01	1,77	66,07	7,16	15,33	34,46
6000	64,17	71,32	4,43	10,12	2,91	3,66	10,44	614,71	1,63	93,65	7,39	19,53	26,72
12000	62,68	73,20	4,66	11,51	3,20	5,09	10,07	622,78	1,61	103,01	7,14	21,57	26,49

Continua...

Quadro 1B, Cont.

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/refino	63,18	33,53	1,81	4,12	1,18	0,37	14,36	440,19	2,27	17,46	6,31	9,52	40,65
2000	63,68	65,89	4,04	10,40	2,54	1,60	10,98	579,99	1,72	73,90	7,35	16,63	36,38
4000	63,18	78,30	4,99	11,68	2,96	3,35	10,36	610,05	1,64	102,42	7,79	23,04	30,92
6000	62,68	88,74	5,86	11,80	3,22	10,77	9,78	641,17	1,56	124,26	8,18	23,56	30,00
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	33,53	1,81	4,12	1,18	0,37	14,36	440,19	2,27	17,46	6,31	9,52	40,65
2000	64,67	65,85	4,02	9,81	2,18	1,17	11,33	571,22	1,75	64,36	7,74	18,22	36,99
4000	63,68	82,65	5,69	11,29	3,28	4,38	10,09	631,30	1,58	119,85	7,52	22,78	28,77
6000	64,67	88,78	6,31	11,68	3,48	9,21	9,95	650,07	1,54	135,43	7,86	24,52	24,91
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 10°C.													
s/refino	63,18	33,53	1,81	4,12	1,18	0,37	14,36	440,19	2,27	17,46	6,31	9,52	40,65
3000	63,18	60,76	3,65	9,65	2,01	1,08	11,59	545,25	1,83	53,79	7,39	17,02	52,00
6000	63,18	68,53	4,33	10,23	2,57	3,38	10,60	596,33	1,68	78,39	7,56	13,23	38,14
12000	64,67	73,56	4,59	10,01	2,68	5,42	10,59	610,74	1,64	89,21	7,75	15,53	43,32
Tratamento: polpa da madeira de 9 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	33,53	1,81	4,12	1,18	0,37	14,36	440,19	2,27	17,46	6,31	9,52	40,65
3000	64,67	53,95	3,24	9,10	1,97	1,09	12,50	517,53	1,93	47,79	6,80	14,68	56,62
6000	64,17	67,51	4,22	10,23	2,79	2,59	11,03	582,23	1,72	84,92	7,17	19,84	36,65
12000	63,18	79,73	5,32	10,89	3,30	7,29	10,04	629,18	1,59	115,78	7,43	25,24	32,31

Continua...

Quadro 1B, Cont.

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/ refino	65,67	30,00	1,40	4,22	1,06	0,45	14,56	451,07	2,22	14,23	5,86	10,21	50,79
2000	65,67	66,63	3,96	8,74	2,42	1,96	10,77	610,30	1,64	73,97	7,34	14,97	29,16
4000	64,17	81,03	5,32	9,94	2,73	4,32	9,93	646,16	1,55	106,59	7,98	21,89	21,35
6000	64,18	82,60	5,40	9,65	3,14	8,92	9,57	671,08	1,49	116,26	7,86	26,75	19,45
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 30°C.													
s/ refino	65,67	30,00	1,40	4,22	1,06	0,45	14,56	451,07	2,22	14,23	5,86	10,21	50,79
2000	65,18	68,17	4,12	9,35	2,38	1,81	10,65	612,36	1,63	73,84	7,49	13,90	28,92
4000	64,67	80,51	4,99	9,40	2,97	3,76	10,16	636,85	1,57	107,41	7,78	17,31	19,34
6000	63,18	88,99	5,85	9,83	3,27	7,09	9,48	666,75	1,50	127,66	7,86	20,86	18,40
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 10°C.													
s/ refino	65,67	30,00	1,40	4,22	1,06	0,45	14,56	451,07	2,22	14,23	5,86	10,21	50,79
3000	65,67	57,51	3,38	8,18	2,02	1,45	11,73	559,76	1,79	52,78	6,81	18,95	39,58
6000	64,67	64,85	4,12	8,85	3,13	3,33	10,77	600,40	1,67	75,76	6,54	21,40	31,76
9000	65,18	69,89	4,29	9,03	2,75	5,67	10,58	616,26	1,62	87,81	7,27	22,35	30,28
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	65,67	30,00	1,40	4,22	1,06	0,45	14,56	451,07	2,22	14,23	5,86	10,21	50,79
3000	65,67	57,30	3,50	7,86	2,40	1,53	11,72	560,66	1,78	63,80	6,53	14,29	38,42
6000	64,18	61,34	3,85	8,87	2,48	2,61	11,20	572,92	1,75	68,33	6,79	13,33	31,12
9000	65,18	72,45	4,51	9,76	2,88	5,36	10,69	610,14	1,64	95,24	7,25	12,50	32,71

Continua...

Quadro 1B, Cont.

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/ refino	63,18	34,87	1,64	4,25	1,23	0,52	13,58	465,56	2,15	18,87	6,28	11,49	49,36
2000	64,67	64,68	4,16	8,88	2,41	1,98	11,07	584,23	1,71	69,86	7,31	22,93	36,52
4000	63,18	85,64	5,41	10,97	3,05	6,10	9,97	633,64	1,58	113,70	7,86	27,65	35,03
6000	64,18	90,52	6,32	10,02	3,38	12,32	9,65	665,00	1,50	135,05	7,91	31,04	30,18
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	34,87	1,64	4,25	1,23	0,52	13,58	465,56	2,15	18,87	6,28	11,49	49,36
2000	65,67	68,36	4,35	9,33	2,49	1,84	10,86	604,76	1,65	77,30	7,30	23,15	38,47
4000	63,18	82,23	5,38	9,95	2,93	4,86	9,97	633,71	1,58	106,56	7,90	24,78	35,97
6000	64,18	88,88	6,19	10,10	3,41	9,21	9,56	671,56	1,49	134,89	7,71	28,35	32,65
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 10°C.													
s/ refino	63,18	34,87	1,64	4,25	1,23	0,52	13,58	465,56	2,15	18,87	6,28	11,49	49,36
3000	64,18	59,81	3,52	8,15	2,36	1,91	11,54	556,34	1,80	63,32	6,64	15,47	37,42
6000	65,18	70,85	4,28	9,17	2,81	4,31	11,03	591,22	1,69	89,45	7,22	10,46	31,12
9000	64,67	72,63	4,59	9,54	2,97	6,02	10,77	600,59	1,67	97,70	7,12	11,59	31,29
Tratamento: polpa da madeira de 7 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	63,18	34,87	1,64	4,25	1,23	0,52	13,58	465,56	2,15	18,87	6,28	11,49	49,36
3000	64,18	59,36	3,69	8,97	2,30	1,54	11,85	541,84	1,85	61,42	6,79	21,73	49,41
6000	63,18	70,97	4,36	9,51	2,59	3,10	10,83	583,71	1,71	80,63	7,39	27,43	39,20
9000	65,18	74,24	4,81	9,69	3,07	5,45	10,56	617,55	1,62	91,58	7,28	27,66	39,31

Continua...

Quadro 1B, Cont.

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/ refino	66,17	31,76	1,51	4,31	1,05	0,74	13,17	502,58	1,99	15,73	6,25	13,89	51,63
2000	64,18	66,30	4,14	9,78	2,73	2,68	10,42	616,15	1,62	17,84	7,48	24,35	31,40
4000	65,18	80,39	5,41	9,79	2,76	6,99	9,71	671,19	1,49	101,00	8,01	32,46	26,29
6000	65,18	92,21	6,24	9,94	2,76	16,76	9,00	724,25	1,38	151,81	8,06	35,47	22,07
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 5; consistência 12%; temperatura 30°C													
s/ refino	66,17	31,76	1,51	4,31	1,05	0,74	13,17	502,58	1,99	15,73	6,25	13,89	51,63
2000	64,67	68,48	4,13	10,03	2,61	2,70	9,99	647,77	1,54	81,52	7,35	26,54	36,57
4000	64,67	85,87	5,50	10,27	3,43	7,00	9,40	688,11	1,45	118,90	8,19	32,86	28,86
6000	65,67	89,77	5,94	10,45	3,49	12,13	9,12	720,37	1,39	140,53	7,79	34,20	27,20
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 10°C													
s/ refino	66,17	31,76	1,51	4,31	1,05	0,74	13,17	502,58	1,99	15,73	6,25	13,89	51,63
3000	65,18	60,17	3,65	9,20	2,51	2,17	10,72	608,36	1,64	68,46	6,72	22,11	42,65
6000	65,67	68,68	4,24	10,20	2,82	5,38	10,22	642,82	1,56	88,21	7,10	26,10	33,42
12000	65,18	70,91	4,83	10,29	3,06	11,96	9,71	671,19	1,49	99,61	7,12	28,58	30,83
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 5; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	66,17	31,76	1,51	4,31	1,05	0,74	13,17	502,58	1,99	15,73	6,25	13,89	51,63
3000	63,18	59,41	3,56	7,89	2,18	2,04	10,78	586,08	1,71	56,93	6,90	18,88	47,07
6000	65,18	66,04	4,32	9,36	2,70	4,44	10,16	641,96	1,56	81,40	7,28	29,11	39,19
12000	62,19	74,81	4,90	10,19	3,22	9,61	9,14	680,48	1,47	104,41	7,07	33,96	36,17

Continua...



Quadro 1B, Cont.

RV	Gramatura g/cm <sup>2</sup>	Índ. tração n.m/g	Índ. arreb. KPa.m <sup>2</sup> /g	Índ. rasgo mN.m <sup>2</sup> /g	Alongamento %	ResPas.Ar s/100cm <sup>3</sup>	Espessura µm	PEA kg/m <sup>3</sup>	VEA cm <sup>3</sup> /g	TEA J/m <sup>2</sup>	MOE Gpa	Lisura s/50cm <sup>3</sup>	Maciez s/100cm <sup>3</sup>
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 10°C.													
s/ refino	65,67	31,53	1,48	4,32	1,04	0,65	13,35	492,16	2,03	14,63	6,12	13,27	50,19
2000	63,18	73,61	4,74	9,85	2,65	4,07	9,59	658,73	1,52	86,72	7,72	25,82	34,44
4000	65,18	80,81	5,55	9,91	3,07	8,00	9,51	685,27	1,46	112,32	7,68	31,55	30,61
6000	64,67	92,46	6,65	9,96	3,46	18,97	8,84	731,29	1,37	141,93	7,90	37,81	28,75
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 9; consistência 12%; temperatura 30°C.													
s/ refino	65,67	31,53	1,48	4,32	1,04	0,65	13,35	492,16	2,03	14,63	6,12	13,27	50,19
2000	65,61	72,87	4,44	9,44	2,46	3,32	10,26	639,74	1,56	81,34	7,60	27,71	33,07
4000	65,18	82,20	6,02	9,75	3,12	9,02	9,39	693,93	1,44	114,85	7,35	31,55	28,48
6000	64,67	94,12	6,69	10,27	3,57	15,39	9,11	710,21	1,41	149,00	7,81	34,53	27,15
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 10°C.													
s/ refino	65,67	31,53	1,48	4,32	1,04	0,65	13,35	492,16	2,03	14,63	6,12	13,27	50,19
3000	63,18	62,66	3,98	8,64	2,46	3,14	10,20	619,46	1,61	67,92	6,73	27,18	39,91
6000	66,17	73,87	4,54	9,61	2,87	6,08	10,16	651,67	1,53	97,72	7,21	29,99	32,79
9000	65,67	74,59	5,06	10,37	3,18	9,39	9,96	659,19	1,52	107,67	6,91	30,70	32,99
Tratamento: polpa da madeira de 4 anos; pH 9; consistência 8%; temperatura 30°C.													
s/ refino	65,67	31,53	1,48	4,32	1,04	0,65	13,35	492,16	2,03	14,63	6,12	13,27	50,19
3000	64,67	63,65	3,97	8,80	2,31	2,82	10,64	607,63	1,65	65,85	6,90	16,22	40,94
6000	65,67	70,30	4,37	9,21	2,88	4,37	10,51	624,87	1,60	92,35	6,89	29,89	31,92
9000	64,67	73,77	4,89	9,99	2,98	7,43	9,87	655,12	1,53	98,71	7,15	32,47	31,40