

**A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel**

MFN -0495

N CHAMADA:

TITULO: A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel

AUTOR(ES): CARPIM, M.A.BARRICHELO, L.E.G.SILVA J., E.C.DIAS, R.L.V.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO: 04. Papel

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual da ABCP, 20

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 16-20.11.1987

IMPRESSÃO: Sao Paulo, 1987, ABTCP

PAG/VOLUME: p.183-205,

FONTE: Congresso Anual da ABCP, 20, 1987, São Paulo, p.183-205

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR: opacidade, propriedades óticas, propriedades físico-mecânicas

RESUMO: O objetivo deste estudo é analisar a influência do número de fibras por grama de polpa obtidas de folhosas e coníferas e suas características sobre as propriedades de espalhamento de luz e opacidade do papel e os reflexos nas principais resistências físico-mecânicas

A INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FIBRAS POR GRAMA  
NAS PROPRIEDADES ÓTICAS DO PAPEL

CARPIM, M.A. - JOHNSON & JOHNSON S.A.  
BARRICHELO, L.E.G.-ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"-USP  
CLAUDIO - DA - SILVA, JR., E. - ARACRUZ CELULOSE S.A.  
DE VASCONCELLOS DIAS, R.L.

SUMMARY

The objectives of this work were to evaluate the influence of the number of fibers per gram of pulp in the properties of light scattering and opacity of a sheet of paper, and try to explain how these parameters can interfere in the consolidation of fibers in a sheet of paper with pulps obtained from wood of different transversal cross sections of trees of *E. grandis*, and from not refined commercial pulps of *E. grandis*, *E. urophylla*, *Betula verrucosa*, tropical pine, *E. deglupta*, *E. globulus* and *Gmelina arborea*.

The first four commercial pulps described were analysed in their original form and also had their fibers classified by the "Bauer McNett" through three sieves of 30, 50 and 100 mesh, which have resulted in four fractions of pulps (called R-30, R-50, R-100 and P-100) for each species. These fractions were submitted to tests of optical and physical properties of the paper, and had their fibers characterized through anatomical determinations.

The analysis of results indicated that pulps with the greatest number of fibers per gram showed the greatest paper opacity, since they had more air-fiber interfaces which increased the light scattering and opacity of the paper.

In relation to the physical properties, it had been proved that pulps with high quantities of fibers give high indices of resistance to burst and tensile, since they had many more contact points and much more interfiber bonding. At the same time, a greater resistance the passing air has been observed in these pulps.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é um dos principais exportadores mundial de celulose de fibra curta e importante fornecedor de papéis de escrita e impressão para os mercados da África, Ásia, América Latina e Oceania.

A crescente demanda por produtos de melhor qualidade é uma indicação da necessidade de serem desenvolvidos estudos acerca dos principais parâmetros que a condicionam. No contexto geral, a opacidade se destaca como uma das propriedades mais exigidas na fabricação de papéis de escrita e impressão.

Uma das formas usuais para melhorar esta propriedade é através do aumento da gramatura (gramas de papel por metro quadrado). Todavia, esta afirmativa contraria a tendência atual no sentido de se diminuir este parâmetro para reduzir o custo. Outras soluções como redução do grau de refinação ou aumento do teor de cargas trazem como consequências desfavoráveis a diminuição das resistências mecânicas do papel produzido.

No que se refere à matéria-prima, as características das fibras e composição química da polpa também influenciam as propriedades do papel. Os aspectos anatômicos são considerados os mais importantes e diretamente relacionados com as propriedades óticas e de resistências.

Dessa maneira, se torna fundamental a compreensão das inter-relações entre características das fibras e propriedades do papel. Em particular, o estudo de novos parâmetros, como o número de fibras por grama, deve possibilitar melhor conhecimento das características da polpa, que podem melhorar sua qualidade.

O objetivo deste estudo é analisar a influência do número de fibras por grama de polpas obtidas de folhosas e coníferas e suas características sobre as propriedades de espalhamento de luz e opacidade do papel e os reflexos nas principais resistências físico-mecânicas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estrutura do papel é constituída por vários elementos formando interfaces entre si e com o ar. Devido esse fato, a luz incidente em uma folha torna-se difusa quando parte é refletida, espalhada a diferentes ângulos e absorvida (CLARK, 1978). Os fenômenos de reflexão, espalhamento e absorção da luz são responsáveis pela alvura e opacidade do papel.

O método convencional utilizado para avaliação dessas propriedades óticas é baseado na teoria do espalhamento da luz desenvolvida por Kubelka e Munk em 1931. Esta teoria foi modificada em trabalhos posteriores, sendo ainda sumarizada em trabalhos mais recentes (HILLEND, 1966; ROBINSON, 1975 e SCALLAN, 1985).

A teoria de Kubelka e Munk considera a folha de papel como uma fina camada formada por grande número de pequenos elementos, cada um contribuindo para reflexão e diluição da luz que incide sobre a folha, proporcionando o espalhamento e absorção. Pela utilização das equações que governam esses processos elementares, Kubelka e Munk derivaram outras que podem estimar os coeficientes de espalhamento ( $s$ ) e absorção de luz ( $k$ ), a alvura e a opacidade do papel, através dos fatores de reflectância  $R_0$  e  $R^\infty$ . O primeiro fator é obtido de uma única folha com fundo escuro e o segundo,  $R^\infty$ , por um conjunto de folhas suficientemente opaco.

Desta maneira, o valor da opacidade descreve a habilidade de uma única folha de papel em obstruir a passagem de luz e pode ser obtida através da relação  $R_0/R^\infty$ . A opacidade é dependente das duas constantes básicas da teoria de Kubelka e Munk, ou seja, os coeficientes de espalhamento e absorção de luz.

Segundo GIERTZ (1965), o coeficiente de absorção é de secundário interesse, porque é controlado pelo processo de cozimento, grau de branqueamento e reversão da alvura. Por outro lado, o coeficiente de espalhamento é influenciado pela matéria-prima fibrosa, condições de polpação e maioria das operações de fabricação do papel. Todas estas variáveis podem ser alteradas e modificar outras propriedades do papel além da opacidade.

Posteriormente, SCALLAN e BORCH (1972), baseados também nos coeficientes de espalhamento e absorção, apresentaram novo modelo teórico para interpretar a reflectância da luz na folha de papel.

Estes autores descreveram a teoria em termos de um modelo que considera a estrutura interna da folha constituída de limitado número de camadas paralelas, alternadas com ar e material sólido (camadas de celulose), sendo este modelo mais relacionado com a morfologia do papel.

Utilizando este modelo SCALLAN e BORCH (1972, 1974 e 1976) demonstraram que a teoria pode descrever a variação das propriedades óticas das polpas de diferentes níveis de alvura, graus de moagem, gramatura e espécies, além de explicar o efeito da distribuição de massa no papel. Esses autores consideram que esta teoria tem algumas vantagens sobre a que foi apresentada por Kubelka-Munk. O modelo é mais próximo da real morfologia do papel do que o modelo homogêneo assumido anteriormente e as equações são derivadas de uma consideração mais realista dos processos elementares de espalhamento e absorção de luz.

Para DINWOODIE (1965), o aumento da média da espessura da parede e, por consequência, do volume específico, a inclusão de fibras mais curtas e a adição de cargas resulta num aumento da opacidade do papel.

A falta de uma teoria adequada que demonstre como as características das fibras estabelecem o arranjo estrutural no papel, esclarecendo melhor suas correlações com as propriedades óticas, proporciona muitos resultados divergentes na literatura. Assim, são citados a seguir trabalhos que, baseados em outros parâmetros, algumas vezes chegaram a conclusões contraditórias à maioria encontradas na literatura.

Segundo GIERTZ (1965), as grandes diferenças na opacidade entre vários tipos de papel são primariamente causadas pelas diferenças nas quantidades de ligação fibra-a-fibra e do número de superfícies óticas de refração e de partículas de espalhamento de luz. Assim sendo, o número, a dimensão e a forma das fibras ou de outros constituintes do papel e seus índices de refração, são os fatores que determinam a quantidade de luz que será refletida, refratada e dispersa pelo papel.

Desta maneira, também são encontrados na literatura, trabalhos que, além de levarem em consideração as dimensões das fibras, analisam a quantidade de fibras presentes na polpa.

KUBBLEWHITE (1973) estudando polpas produzidas de madeira de *Pinus radiata*, e também UPRICHARD (1973) trabalhando com a mesma espécie e com "douglasfir" (*Pseudotsuga menziesii*), encontraram nas polpas de madeira juvenil dessas espécies, maiores coeficientes de espalhamento de luz do que na madeira adulta; esses resultados foram justificados pelo fato dessas polpas conterem maior número de fibras por grama, e portanto, maior área superficial disponível para o espalhamento da luz.

O número de fibras por grama, além de ter influência direta sobre a formação do papel, tem importância significativa na resposta da polpa ao tratamento de refinação e influencia a conformabilidade das fibras na folha de papel (CLAUDIO-DA-SILVA, 1983).

No trabalho apresentado por UPRICHARD (1973), observou-se também que, quando levemente refinadas, as polpas da região do cerne da madeira apresentaram baixa resistência ao rasgo, mas boa resistência à tração e à energia de tensão, além de maior opacidade. O autor concluiu que a excessiva moagem dessas polpas deve ser evitada, pois as melhores qualidades das mesmas serão perdidas.

KIBBLEWHITE (1984) estudando as características das fibras e dos finos da madeira de cerne e alburno de *Pinus radiata*, em pastas mecânicas e termomecânicas, concluiu que as excelentes propriedades óticas obtidas para as polpas de cerne da madeira podem estar relacionadas com os efeitos de consolidação do grande número de fibras curtas e finas e dos elementos de fibras. Assim, as folhas da polpa do cerne continham muito mais interfaces fibra-ar (ou elementos de fibra-ar) do que aquelas feitas com polpa de alburno.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Os materiais utilizados constituíram-se de polpas sulfato branqueadas fornecidas pelas indústrias e produzidas em laboratório como identificadas a seguir.

##### 3.1.1 Polpas produzidas em laboratório

As polpas produzidas em laboratório foram obtidas a partir de madeira de *Eucalyptus grandis*, provenientes de árvores matrizes com 7 anos de idade, plantadas em Lençóis Paulista (SP), de propriedade de Duraflora Silvicultura e Comércio Ltda.

##### 3.1.2 Polpas sulfato branqueadas industriais

- . Polpa de *E. grandis* de híbridos naturais - produzida no Brasil.
- . Polpa com 67% de *E. urophylla* e 33% de *E. grandis* - produzida no Brasil.
- . Polpa de *E. globulus* - proveniente de Portugal.
- . Polpa de *E. deglupta* produzida no Brasil.
- . Polpa de betula (*Betula verrucosa*) - proveniente da Finlândia.
- . Polpa de gmelina (*Gmelina arborea*) - produzida no Brasil
- . Polpa de pinheiro tropical - produzida no Brasil.

#### 3.2 Métodos

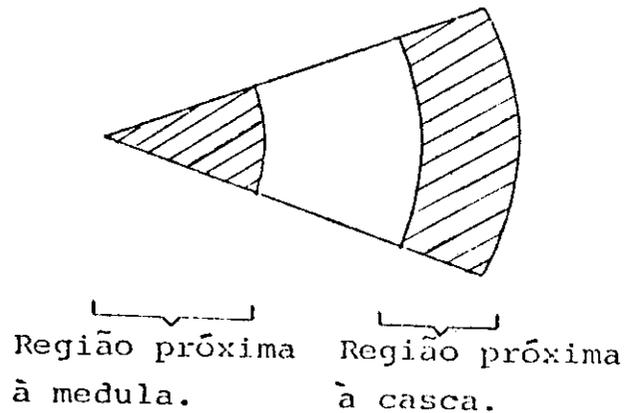
##### 3.2.1 Polpas produzidas em laboratório

Foram retirados discos a diversas alturas de 20 árvores de *E. grandis* (DAP, 25%, 50% e 75% da altura comercial).

Baseado em trabalhos apresentados na literatura (BRASIL, 1976 ; BARRICHELO *et alii*, 1983; CARPIM *et alii*, 1985), que mostraram tendência do comprimento de fibras variar na secção transversal da madeira, foram separadas uma cunha de cada disco de *E. grandis*, e estas foram seccionadas em duas regiões distintas, resultando as seguintes frações:

- a. Correspondente a 40% da região próxima à medula (40% da distância medula-casca).
- b. Correspondente a 20% da região próxima à casca (20% da distância casca-medula).

Gráficamente temos:



As frações correspondentes a cada região foram agrupadas e transformadas em cavacos por picagem manual e em seguida foram colocadas em câpsulas de tela de aço, que permitiram a permanência das mesmas, separadas, dentro do digestor, durante o processo de cozimento.

Após o cozimento das polpas, procedeu-se o branqueamento, realizado em quatro estágios, com a sequência CEDD (cloração, Extração alcalina, Dioxidação e Dioxidação).

Além das duas polpas obtidas a partir das frações de madeira, foram feitas quatro misturas com as mesmas, totalizando-se seis amostras produzidas em laboratório. A composição das seis amostras é descrita a seguir:

- A. polpa da região próxima à casca
- B. 80% polpa da região da casca e 20% polpa da região da medula
- C. 60% polpa da região da casca e 40% polpa da região da medula
- D. 40% polpa da região da casca e 60% polpa da região da medula
- E. 20% polpa da região da casca e 80% polpa da região da medula
- F. polpa da região próxima à medula

### 3.2.2 Polpas Comerciais

Com o objetivo de se obter polpas de uma mesma espécie com comprimento de fibras diferentes, foram separadas as fibras de quatro polpas comerciais, a saber: *Eucalyptus grandis*, *E.urophylla*, betula e pinheiro.

A separação das fibras foi realizada através do classificador "Bauer McNett", seguindo Norma SCAN-M6:69. Foram utilizadas peneiras de 30, 50 e 100 mesh, obtendo-se das quatro espécies as seguintes polpas:

- a. R-30 : fibras retidas na peneira mesh 30
- b. P-30/R-50: fibras que passaram pela peneira 30 mesh e foram retidas na peneira 50 mesh
- c. P-50/R-100: fibras que passaram pela peneira 50 mesh e foram retidas na peneira 100 mesh
- d. P-100: fibras que passaram pela peneira de 100 mesh.

As demais polpas comerciais (*E.deglupta*, *E.globulus* e *Gmelina arborea*) foram analisadas somente na forma original, sem separação das fibras.

### 3.2.3 Análises das propriedades das polpas

#### - Medições das dimensões das fibras

Através do analisador de fibras Kajaani FS-100, obteve-se o número de fibras por grama e a porcentagem de finos ( o analisador pode ser programado para apresentar como finos as fibras, elementos ou pedaços de fibras que passam pela peneira de 200 mesh). O cálculo do "coarseness" foi baseado nos resultados fornecidos pelo mesmo analisador.

#### - Preparo das folhas

A formação e o preparo das folhas para testes foram de acordo com as Normas SCAN-C26:76, SCAN-M5:76. As condições de condicionamento obedeceram Norma SCAN-P2:75.

#### - Propriedades óticas

- a. Opacidade (Norma SCAN-P 8:75)
- b. Coeficiente de Espalhamento de Luz (Norma SCAN-C 27:69)

#### - Propriedades físico-mecânicas

- a. Densidade aparente do papel (Norma SCAN-P 7:75)
- b. Resistência ao ar Gurley (Norma SCAN-P 19:66)
- c. Resistência à tração (Norma SCAN-P 44:81)
- d. Resistência ao estouro (Norma SCAN-P 25:68)
- e. Resistência ao rasgo (Norma SCNA-P 11:73)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades Óticas

#### 4.1.1 Propriedades das polpas comerciais de *E.grandis* e *E.urophylla*

Na análise de polpas celulósicas, normalmente o estudo da densidade básica da madeira, da composição química e das características anatômicas dessas polpas costumam responder

pela maioria de suas propriedades. Entretanto, em alguns casos, certos fenômenos, à primeira vista, não podem ser facilmente compreendidos baseados apenas nos parâmetros normalmente utilizados.

Os resultados da análise das propriedades das polpas de *E. grandis* e *E. urophylla*, apresentados na Tabela 1, constituem um bom exemplo desses casos.

Tabela 1 - Propriedades das polpas não refinadas de *E. grandis* e *E. urophylla*

Propriedade	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>
densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	574 ± 2*	533 ± 1
índice de tração (kNm/kg)	28,6 ± 0,5	21,9 ± 0,5
índice de rasgo (Nm <sup>2</sup> /kg)	5,8 ± 0,4	4,7 ± 0,2
resistência do ar Gurley (s/100 ml)	2,57 ± 0,07	1,31 ± 0,06
coeficiente de espalhamento de luz (m <sup>2</sup> /kg)	44,4 ± 0,4	40,6 ± 0,3
opacidade (%)	79,1 ± 0,2	77,3 ± 0,2

\* intervalo de confiança a nível de 95% de probabilidade.

Nota-se de modo geral, que as propriedades da polpa de *E. grandis* apresentaram valores superiores aos da polpa *E. urophylla*. Os maiores resultados da densidade aparente, dos índices de tração e rasgo e da resistência ao ar da polpa de *E. grandis* indicam que, mesmo antes de um tratamento mecânico, suas fibras se ajustam e conformam melhor na estrutura do papel, ou seja, o papel apresenta uma estrutura mais consolidada do que a polpa *E. urophylla*, o que sugere maior flexibilidade das fibras de *E. grandis*.

De certo modo, estes resultados poderiam ser esperados, pois a madeira de *E. grandis* apresenta densidade básica de 480 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o *E. urophylla* possui densidade em torno de 530 kg/m<sup>3</sup>\*. A maior densidade básica da madeira é geralmente em eucaliptos, decorrente de maiores proporções de fibras com paredes mais espessas, conseqüentemente mais rígidas, apresentando menor conformabilidade. Assim sendo, as propriedades de resistência que dependem da interligação entre fibras são prejudicadas em relação àquelas polpas com fibras de paredes mais finas e flexíveis (COLLEY, 1973).

Neste contexto, foi de certo modo surpreendente observar que o coeficiente de espalhamento e a opacidade da polpa *E. urophylla* também mostraram menores valores do que a polpa de *E. grandis*. Isto porque era de se esperar que papéis com estruturas mais consolidadas e compactas fossem também mais transparentes, devido a menor refração da luz, conseqüente de menos interfaces fibra-ar.

O espalhamento da luz num corpo óticamente heterogêneo como o papel, depende das suas superfícies de refração de luz. Utilizando-se uma figura esquemática, reproduzida neste trabalho na Figura 1, GIERTZ

\* Dados fornecidos pelo Centro de Pesquisas e Tecnologia da Aracruz Celulose S.A.

(1965) expõe que no papel a luz incidente, mesmo se orientada, irá incidir nos vários elementos de superfície em todos os ângulos possíveis e se espalhará difusamente no interior do corpo ótico. Em cada superfície ótica a luz incidente se divide, sendo uma porção mínima refletida (cerca de 5%) e uma parte maior refratada, penetrando mais ainda. Após repetidas reflexões e refrações, parte da luz incidente irá retornar à superfície original e deixará o corpo, enquanto outra parte irá passar através deste e sairá pelo lado oposto.

Desse modo, quanto mais superfícies óticas de refração estiverem presentes no papel, mais fácil será para a luz incidente ser refratada de volta à superfície original e menor será a luz que irá alcançar o lado oposto, saindo como luz transmitida.



Figura 1 - Representação esquemática do espalhamento da luz num corpo com partículas de formas irregulares (GIERTZ, 1965).

Baseado nesta descrição, hoje amplamente difundida e aceita, a qual destaca a importância da quantidade de superfícies óticas de refração quando a luz atravessa uma folha de papel, pode-se também analisar a propriedade de opacidade do papel em termos de outro parâmetro importante da polpa, ou seja, o número de fibras por grama, o qual tem recentemente despertado grande interesse.

A análise desta propriedade indicou, como é observado na Tabela 2, que o *E. grandis* apresenta um número de fibras por grama bastante superior à polpa *E. urophylla*. Com maior número de partículas, a luz pode sofrer mais refrações e reflexões, pois é obrigada a atravessar mais interfaces fibra-ar, o que aumenta a sua dispersão. Neste caso, o coeficiente de espalhamento e a opacidade do papel poderiam também aumentar, apesar da maior consolidação da folha de *E. grandis*. Esta foi uma hipótese extensivamente testada neste estudo.

Tabela 2 - Características anatômicas das polpas de *E. grandis* e *E. urophylla* (determinadas pelo analisador de fibras Kajaani FS-100)

Polpa	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>
comprimento médio de fibra (mm)	0,65	0,68
número de fibras/g (milhões)	23,6	18,9
"coarseness" (mg/100 m)	7,9	9,5

Resultados interessantes foram apresentados por CLAUDIO-DASILVA (1981) ao analisar polpas de *E. grandis* e *E. rostrata*, que possuem diferentes números de fibras por grama. A primeira polpa apresentou 14,7 milhões de fibras por grama e a polpa de *E. rostrata* possuía 18,5 milhões (medições baseadas em outro tipo de técnica). A Figura 2\* mostra o corte transversal do papel dessas duas polpas. Nota-se que a folha do papel *E. rostrata*, devido ao maior número de fibras, apresenta muito mais interfaces fibra-ar, o que levou à maior difração da luz e, conseqüentemente, o coeficiente de espalhamento da polpa de *E. rostrata* foi de 52,0 m<sup>2</sup>/kg, enquanto para o *E. grandis* foi de 48,6 m<sup>2</sup>/kg.

Dessa maneira, as propostas anteriores somente baseadas em aspectos relativos à flexibilidade de fibras e consolidação do papel, não foram satisfatórias para explicar o comportamento das polpas do *E. grandis* e *E. urophylla* em relação ao coeficiente de espalhamento e à opacidade. Como o número de fibras por grama parece ser também um parâmetro importante para o arranjo estrutural das fibras no papel, este foi extensamente analisado neste trabalho, dentre os vários parâmetros e suas propriedades, sendo que maior ênfase foi dada às propriedades de espalhamento de luz e opacidade do papel.

#### 4.1.2 Polpas separadas pelo classificador de fibras "Bauer McNett"

Com interesse de buscar uma avaliação mais abrangente das influências das características das fibras nas propriedades do papel, as polpas de *E. grandis* e *E. urophylla* foram separadas pelo classificador de fibras "Bauer McNett", a fim de se obter, para a mesma espécie, frações das polpas com características morfológicas diferentes.

Foram classificadas também pelo "Bauer McNett", polpas de betula e de pinheiro, que possuem características de fibras bem distintas das polpas e eucalipto.

Desse modo, a discussão de influência das características das fibras abrange uma ampla faixa de variáveis anatômicas. O número de fibras por grama e "coarseness" das polpas são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

\*Ver Anexo 1.

Tabela 3 - Número de fibras por grama (milhões) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	15,4*	12,9	8,5	1,2
P-30/R-50	20,4	15,6	13,9	3,4
P-50/R-100	26,6	23,3	21,1	6,9
P-100	30,1	26,5	25,6	10,9

\* repetições não exibem diferenças significativas a nível de 95% de probabilidade.

O "coarseness" representa o peso (mg) de 100 m de fibras (alinhas). Este parâmetro é dependente do diâmetro, da espessura da parede e da densidade do material das fibras (CLARK, 1978); portanto, o aumento das dimensões das fibras deve provocar maior peso por unidade de comprimento, ou seja, maior "coarseness".

Tabela 4 - "Coarseness" (mg/100 m) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	9,1*	10,3	12,6	34,8
P-30/R-50	8,3	9,5	9,2	24,3
P-50/R-100	7,5	8,3	8,5	20,2
P-100	11,4	11,9	9,8	26,7

\* repetições não exibem diferenças significativas a nível de 95% de probabilidade,

Dessa maneira, é fácil se entender a diminuição do "coarseness" da polpa R-30 para R-100, uma vez que, com a classificação pelo "Bauer McNett", as dimensões das fibras também tenderam a diminuir neste sentido. Porém, as frações P-100 das quatro espécies estudadas apresentaram elevação no valor do "coarseness", sendo que, para betula e pinheiro, o "coarseness" dessas frações só não superaram as frações R-30. Uma das prováveis explicações para o fato pode estar no alto teor de cinzas das frações P-100 (CARPIM, 1986).

Nas Tabelas 5 e 6, são apresentados os resultados das propriedades óticas das polpas separadas no "Bauer McNett".

Tabela 5 - Coeficiente de espalhamento de luz (m<sup>2</sup>/kg) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	pinheiro
R-30	39,5 ± 0,6*	34,9 ± 0,4	34,2 ± 0,6	28,5 ± 0,6
P-30/R.50	41,7 ± 0,6	36,3 ± 0,7	38,0 ± 0,5	35,1 ± 0,6
P-50/R-100	45,4 ± 0,4	41,1 ± 0,5	43,1 ± 0,3	39,1 ± 0,3
P-100	48,6 ± 0,3	45,4 ± 0,5	48,7 ± 0,4	41,6 ± 0,8

\* intervalo de confiança a nível de 95% de probabilidade.

Tabela 6 - Opacidade (%) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	pinheiro
R-30	77,4 ± 0,3*	75,7 ± 0,2	75,9 ± 0,2	70,5 ± 0,3
P-30/R-50	78,8 ± 0,3	76,1 ± 0,4	77,4 ± 0,2	76,1 ± 0,1
P-50/R-100	80,8 ± 0,2	79,6 ± 0,3	80,9 ± 0,2	79,6 ± 0,2
P-100	87,1 ± 0,1	85,8 ± 0,2	89,3 ± 0,1	91,2 ± 0,6

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Observa-se que o coeficiente de espalhamento de luz e consequentemente a opacidade, aumentaram partindo-se da polpa R-30 para P-100, nos quatro casos estudados.

Neste sentido também se aumentou o número de fibras por grama; com acréscimo de mais elementos às polpas gerou-se mais espaços intercelulares e interfaces fibra-ar nas folhas de papel. Como o espalhamento da luz ocorre nas interfaces de dois materiais com diferentes índices de refração (NORDMAN, 1970), o maior número de espaços inter-celulares forçou a luz a atravessar mais interfaces fibra-ar, aumentando assim a sua dispersão.

Outro parâmetro que deve ser lembrado é a área da superfície das fibras, uma vez que o coeficiente de espalhamento é função linear da superfície por unidade de massa do papel (CASEY, 1960), e um alto coeficiente de espalhamento pode ser esperado das fibras com grande área de exposição em relação ao seu peso (NORDMAN, 1970). Assim, o maior número de elementos aumentou a área superficial interna das folhas, favorecendo o espalhamento da luz.

Outros processos, como o refino, também produzem maior área de exposição das fibras, mas a área de contato e ligação entre fibras também aumenta, devido à maior flexibilização (um dos principais efeitos do refino), o que vem a reduzir a opacidade. Consequentemente, os resultados apresentados na literatura após tratamento de refino das polpas, mostram o aumento da densidade aparente do papel, com a diminuição da opacidade, como resultado do aumento das ligações entre fibras.

Portanto, o aumento do número de fibras por grama deve ter sido essencial para elevar o coeficiente de espalhamento de luz e a opacidade, pois forneceu maior número de interfaces fibra-ar e aumentou a área de exposição das partículas que compõem o papel e que não estão em contato mecânico.

#### 4.1.3 - Polpas produzidas em laboratório.

O mesmo comportamento observado nas polpas separadas pelo "Bauer McNett" foi encontrado nos testes realizados em polpas especiais produzidas em laboratório. Foram analisadas misturas de polpas de diversos comprimentos de fibras, produzidas a partir de madeira de *E. grandis* da região próxima à medula e próxima à casca.

Tabela 7 - Características anatômicas das fibras de polpas de *E. grandis* produzidas em laboratório.

AMOSTRAS	Nº DE FIBRAS/GRAMA (milhões)	"COARSENESS" (mg/100m)	FINOS (%)
A	16,7**	8,0**	1,65**
B	19,9	7,5	1,76
C	21,6	7,6	2,25
D	25,4	6,9	2,47
E	27,2	6,8	2,43
F	28,6	7,6	3,48

A = polpa da região próxima à casca

B = 80% polpa da região da casca e 20% polpa da região da medula

C = 60% polpa da região da casca e 40% polpa da região da medula

D = 40% polpa da região da casca e 60% polpa da região da medula

E = 20% polpa da região da casca e 80% polpa da região da medula

F = polpa da região próxima à medula.

\*\* = repetições não exibem diferenças significantes à nível de 95% de probabilidade.

Tabela 8 - Propriedades óticas das polpas produzidas em laboratório de *E. grandis*.

AMOSTRAS	COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO DE LUZ ( $m^2/kg$ )	OPACIDADE (%)
A	$38,5 \pm 0,5^*$	$78,4 \pm 0,3^*$
B	$39,1 \pm 0,4$	$79,3 \pm 0,2$
C	$41,4 \pm 0,3$	$80,0 \pm 0,1$
D	$42,7 \pm 0,6$	$80,5 \pm 0,1$
E	$44,0 \pm 0,3$	$81,0 \pm 0,1$
F	$45,1 \pm 0,2$	$81,5 \pm 0,1$

A = polpa da região próxima à casca

B = 80% polpa da região da casca e 20% polpa da região da medula

C = 60% polpa da região da casca e 40% polpa da região da medula

D = 40% polpa da região da casca e 60% polpa da região da medula

E = 20% polpa da região da casca e 80% polpa da região da medula

F = polpa da região próxima à medula

\* = intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

À medida que se aumentou a proporção de polpa da medula, acrescentando fibras mais curtas à polpa, o número de fibras por grama aumentou, como pode ser observado na Tabela 7 o que proporcionou mais partículas à constituição das folhas de papel, gerando mais interfaces fibra-ar. Como consequência, o coeficiente de espalhamento e a opacidade (Tabela 8) aumentaram, pois a ação de difusão da luz pelas partículas (fibras ou elementos de fibra) aumenta com o número de suas interfaces com o ar.

Resultados semelhantes foram apresentados por UPRICHARD (1973), encontra do para as polpas de madeira juvenil maior coeficiente de espalhamento comparadas às de madeira adulta de *Pinus radiata* e *Pseudotsuga men*

*ziessi*. Concluiu que as primeiras possuem fibras de paredes mais finas e as folhas de papel contêm maior número de fibras por unidade de área (ou de massa); assim as polpas de madeira juvenil têm mais superfícies disponíveis para o espalhamento da luz.

Portanto, as adições proporcionais de polpa de medula, que apresentam fibras mais curtas, fornecem maior número de fibras por grama, resultando num acréscimo de partículas, o que gerou maior número de interfaces fibras-ar, aumentando o espalhamento da luz e a opacidade do papel.

#### 4.1.4 Polpas comerciais.

Com objetivo de confirmar o fenômeno observado nas polpas observadas anteriormente, foram também analisadas diversas polpas comerciais com características anatômicas bem distintas, relacionando-as com as propriedades óticas do papel.

Tabela 9 - Características anatômicas de fibras das polpas comerciais.

POLPAS	"Coarseness" (mg/100 m)	Nº de fibras/g milhões	Finos (%)
<i>E. grandis</i>	7,9**	23,3**	4,6
<i>E. urophylla</i>	9,9	17,8	4,0
<i>E. globulus</i>	8,6	19,8	3,6
<i>E. deglupta</i>	8,3	22,9	4,9
<i>Betula verrucosa</i>	9,6	15,5	4,2
<i>Gmelina arborea</i>	11,1	14,4	5,2
Pinheiro	29,3	2,2	5,1

\*\* repetições não exibem diferenças significativas à nível de 95% de probabilidade.

Nota-se através da Tabela 9, que as polpas de eucaliptos exibem os maiores números de fibras por grama, já que as fibras de eucalipto são mais curtas e finas, enquanto a polpa de pinheiros possui comprimento de fibra e espessura de parede superiores às demais, o que também gera maior peso por unidade de comprimento, e portanto, maior "coarseness".

Em relação às propriedades óticas, apresentadas na Tabela 10, verifica-se que entre as quatro espécies que mostraram maior opacidade (*E. deglupta*, *Gmelina arborea*, *E. grandis* e *E. globulus*) encontram-se as três espécies que também apresentaram maior número de fibras por grama (*E. grandis*, *E. deglupta*, *E. globulus*), comprovando a influência deste parâmetro nas propriedades óticas do papel.

Tabela 10 - Propriedades óticas das polpas comerciais.

POLPAS	Coefficiente de espalhamento de luz (m <sup>2</sup> /kg)	Opacidade (%)
<i>E. grandis</i>	44,4±0,4*	79,1±0,2*
<i>E. urophylla</i>	40,6±0,3	77,3±0,2
<i>E. globulus</i>	43,2±0,2	79,0±0,2
<i>E. deglupta</i>	48,7±0,1	82,3±0,1
<i>Betula Verrucosa</i>	41,5±0,6	78,5±0,2
<i>Gmelina arborea</i>	46,6±0,5	81,7±0,1
Pinheiro	30,6±0,2	71,6±0,2

\* intervalo de confiança a nível de 95% de probabilidade.

A partir dos resultados que foram obtidos para os diversos tipos de polpa estudadas, foi de interesse verificar estatisticamente o nível de correlação existente entre as propriedades de espalhamento de luz e de opacidade do papel e as características anatômicas das fibras.

#### 4.1.5 Análise de regressão linear.

Pela análise estatística, apresentada na Tabela 11, ficou demonstrado que existe correlação significativa entre número de fibras por grama e as propriedades óticas do papel (coeficiente de espalhamento de luz e opacidade), através dos valores obtidos para os coeficientes de correlação linear entre as variáveis. Estas correlações também podem ser observados nos Gráficos 1 e 2.

Tabela 11 - Regressões lineares obtida entre o número de fibras por grama (x) e o coeficiente de espalhamento de luz e opacidade (y) das polpas estudadas (modelo:  $y = a + bx$ ).

Polpas		Coef. Espalhamento Luz	Opacidade
Separadas no "Bauer McNett"	a	31,11	73,91
	b	0,55	0,38
	r	0,88**	0,60**
Produzidas em Laboratório	a	28,70	74,43
	b	0,56	0,24
	r	0,98**	0,99**
Comerciais	a	30,73	72,06
	b	0,69	0,39
	r	0,85**	0,79**

Y = variável independente

x = variável dependente

a = coeficiente linear

b = coeficiente angular

r = coeficiente de correlação linear

\*\* = valores significativos à nível de 95% de probabilidade.

GRÁFICO 1. Coeficiente de espalhamento de luz x número de fibras/g.

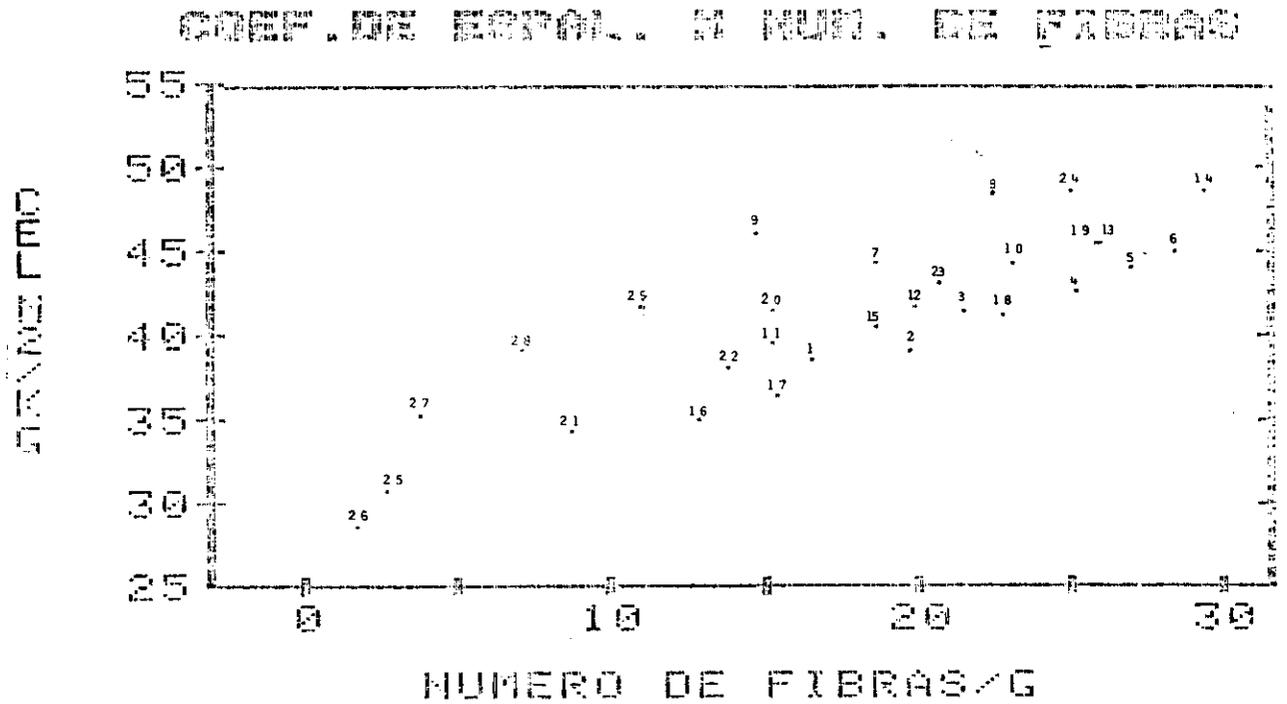
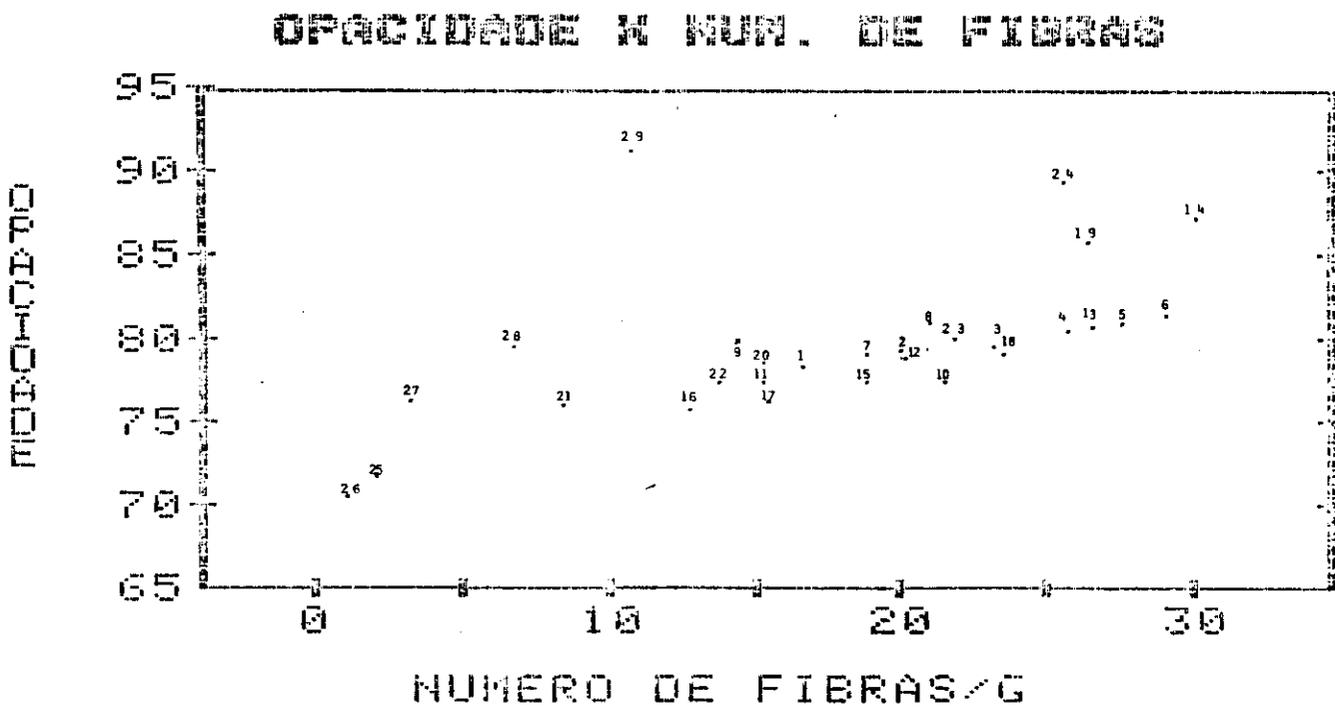


GRÁFICO 2: Opacidade x número de fibras/g.



A identificação das polpas é feita a seguir:

01. A (região próxima à casca)
02. B (80% região da casca e 20% região da medula)
03. C (60% região da casca e 40% região da medula)
04. D (40% região da casca e 60% região da medula)
05. E (20% região da casca e 80% região da medula)
06. F (região próxima à medula)
07. *E. Globulus*
08. *E. deglupta*
09. *Gmelina arborea*
10. *E. grandis* (original)
11. *E. grandis* (R-30)
12. *E. grandis* (P-30/R-50)
13. *E. grandis* (P-50/R-100)
14. *E. grandis* (P-100)
15. *E. urophylla* (original)
16. *E. urophylla* (R-30)
17. *E. urophylla* (P-30/R-50)
18. *E. urophylla* (P-50/R-100)
19. *E. urophylla* (P-100)
20. *Betula verrucosa* (original)
21. *Betula verrucosa* (R-30)
22. *Betula verrucosa* (P-30/R-50)
23. *Betula verrucosa* (P-50/R-100)
24. *Betula verrucosa* (P-100)
25. Pinheiro (original)
26. Pinheiro (R-30)
27. Pinheiro (P-30/R-50)
28. Pinheiro (P-50/R-100)
29. Pinheiro (P-100)

No Gráfico 2, pode-se notar também que quatro polpas, referentes as frações P-100 de *E. grandis*, *E. urophylla*, pinheiro e *Betula* possuem opacidades muito superiores às das demais polpas, o que pode ser explicado, pelo alto coeficiente de absorção dessas polpas, causado provavelmente pelos altos teores de extrativos em etanol-tolueno e dicloro-metano (CARPIM, 1986).

Dessa maneira, os resultados das correlações lineares comprovam a importância do número de fibras por grama para diversos tipos de polpas estudadas, desde aquelas produzidas com diferentes comprimento de fibras (separadas pelo "Bauer McNett" ou geradas a partir de regiões diferentes da madeira de uma mesma árvore), como para as polpas comerciais de várias espécies, abrangendo uma ampla faixa de características anatômicas.

#### 4.2 Propriedades físico-mecânicas.

Para complementação do estudo das influências das características anatômicas sobre as propriedades do papel, foram avaliadas também as propriedades físico-mecânicas das polpas analisadas anteriormente.

De maneira geral, nota-se para as polpas classificadas pelo "Bauer McNett", que as propriedades apresentadas nas Tabelas 12 a 15, tenderam a aumentar a partir da fração R-30 para P-100. Comportamento semelhante foi encontrado para as polpas produzidas em laboratório, quando se aumentou a proporção de polpa da região da madeira mais próxima à medula (Tabela 16).

Tabela 12 - Densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ ) das polpas separadas no "Bauer Mc Nett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	516±3*	476±3	591±2	452±2
P-30/R-50	535±3	489±2	603±2	547±3
P-50/R-100	554±3	528±2	628±1	547±2
P-100	695±5	653±3	660±2	688±4

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Tabela 13 - Índice de tração ( $\text{Nm/g}$ ) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	18,0±0,5*	13,6±0,3	19,8±0,4	6,7±0,5
P-30/R-50	18,5±0,4	13,4±0,2	18,6±0,4	13,2±0,4
P-50/R-100	20,5±0,5	16,4±0,3	21,0±0,5	14,8±0,6
P-100	35,6±0,8	33,0±0,6	29,6±0,6	31,0±0,6

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Tabela 14 - Índice de estouro ( $\text{kPa m}^2/\text{g}$ ) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	0,79±0,03*	0,52±0,05	0,81±0,02	0,28±0,04
P-30/R-50	0,79±0,02	0,49±0,02	0,77±0,02	0,72±0,02
P-50/R-100	0,93±0,03	0,64±0,03	1,01±0,03	0,79±0,03
P-100	2,12±0,05	1,88±0,05	1,47±0,03	1,55±0,02

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Tabela 15 - Índice de rasgo ( $\text{Nm}^2/\text{kg}$ ) das polpas separadas no "Bauer Mc Nett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	3,7±0,2*	2,9±0,2	4,6±0,2	5,3±0,3
P-30/R-50	3,3±0,1	2,4±0,1	3,1±0,2	5,5±0,4
P-50/R-100	3,2±0,2	2,5±0,2	3,1±0,4	4,2±0,2
P-100	6,1±0,1	5,5±0,4	3,7±0,2	4,3±0,1

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Tabela 16 - Propriedades físico-mecânicas das polpas produzidas em laboratório.

AMOSTRAS	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de rasgo (Nm <sup>2</sup> /kg)	Índice de tração (Nm/g)	Índice de estouro (kPam <sup>2</sup> /g)	Resistência ao ar Gurley (s/100 ml)
A	574 ± 4 *	6,6 ± 0,4	35,9 ± 1,0	1,81 ± 0,06	1,03 ± 0,35
B	594 ± 3	6,2 ± 0,7	39,7 ± 1,2	2,10 ± 0,08	1,43 ± 0,08
C	615 ± 5	6,6 ± 0,3	40,6 ± 0,8	2,10 ± 0,06	2,16 ± 0,07
D	630 ± 5	6,5 ± 0,5	42,8 ± 2,3	2,31 ± 0,14	2,63 ± 0,06
E	662 ± 3	8,0 ± 0,4	43,3 ± 0,7	2,37 ± 0,06	3,84 ± 0,07
F	688 ± 4	7,6 ± 0,2	44,8 ± 1,5	2,63 ± 0,08	5,49 ± 0,16

A = polpa da região próxima à casca

B = 80% polpa da região da casca e 20% polpa da região da medula

C = 60% polpa da região da casca e 40% polpa da região da medula

D = 40% polpa da região da casca e 60% polpa da região da medula

E = 20% polpa da região da casca e 80% polpa da região da medula

F = polpa da região próxima à medula

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade

Em relação a resistência ao ar Gurley, apresentada na Tabela 17, este também se mostrou crescente da polpa R-30 para P-100, confirmando uma maior consolidação da folha de papel, o que concorda com as observações de DIN WOODIE (1965) e ENRICH (1985).

Estas propriedades, dependentes do grau de interligação das fibras, como densidade aparente e os índices de tração e estouro, demonstraram incrementos, provavelmente devido ao fato que também aumentaram neste sentido o número de fibras por grama. Assim, as polpas com mais fibras produziram papéis com maior número de ligações entre fibras e com estrutura mais consolidada.

Tabela 17 - Resistência ao ar Gurley (s/100 ml) das polpas separadas no "Bauer McNett".

	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	Betula	Pinheiro
R-30	0,47±0,02*	0,23±0,02	0,60±0,08	0,16±0,03
P-30/R-50	0,68±0,02	0,28±0,02	0,90±0,09	0,75±0,07
P-50/R-100	1,21±0,03	0,63±0,01	2,40±0,10	1,58±0,05
P-100	42,67±0,61	21,12±0,67	18,80±0,70	469,3±36,6

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

Portanto, as polpas com maior número de fibras por grama apresentaram maior área de exposição das fibras e mais interfaces fibra-ar, aumentando o espalhamento da luz e a opacidade do papel. Ao mesmo tempo, este parâmetro também aumentou a área de ligação entre fibras, resultando em maiores índices de resistência físico-mecânicas.

Em relação as polpas comerciais, essas propriedades também parecem ter sido beneficiadas pelo aumento do número de fibras por grama, uma vez que os maiores índices de tração e estouro foram obtidos pelo *E. deglupta* e *E. grandis*, (Tabela 18), sendo essas as espécies com maior número de fibras por grama.

Tabela 18 - Propriedades físico-mecânicas das polpas comerciais.

POLPAS	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de tração (Nm/g)	Índice de estouro (kPam <sup>2</sup> /g)	Índice de rasgo (Nm <sup>2</sup> /kg)	Resistência ao ar Gurley (seg/100 m <sup>2</sup> )
<i>E. grandis</i>	574±2*	28,6±0,5	1,53±0,05	5,8±0,4	2,57±0,07
<i>E. urphylla</i>	533±1	21,9±0,6	1,05±0,03	4,7±0,2	1,31±0,06
<i>E. globulus</i>	488±2	14,0±0,4	0,56±0,03	2,4±0,2	0,52±0,05
<i>E. deglupta</i>	636±2	33,7±0,5	1,86±0,06	6,1±0,4	7,76±0,20
<i>Betula verrucos</i>	589±2	21,2±0,4	0,95±0,02	4,2±0,2	2,00±0,10
<i>Gmelina arborea</i>	594±1	18,9±0,3	0,94±0,03	3,9±0,2	4,00±0,10
Fiebreiro	490±2	14,7±0,3	0,89±0,04	11,7±0,7	0,40±0,01

\* intervalo de confiança à nível de 95% de probabilidade.

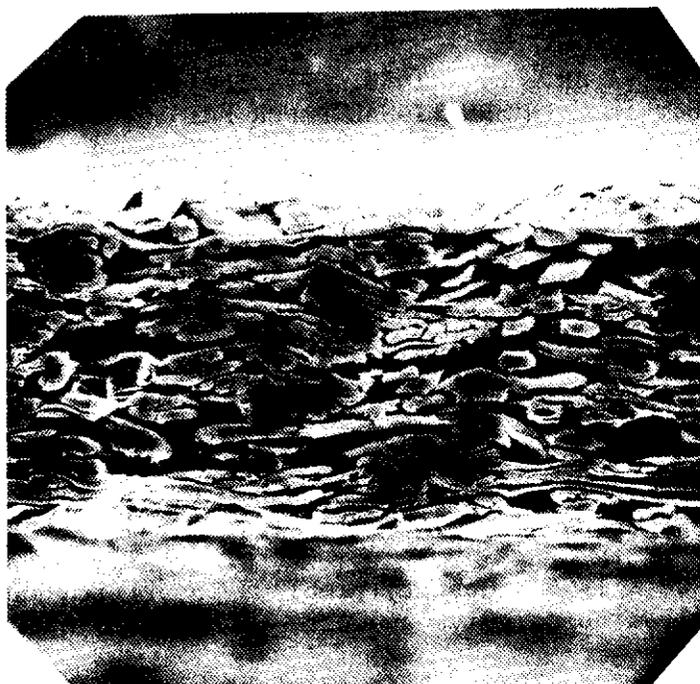
## 5. CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. As polpas comerciais, fracionadas ou não, e as provenientes de diferentes regiões da secção transversal da madeira, mostraram diferenças importantes em termos de características de fibras, "coarseness" e número de fibras por grama.
2. As polpas contendo maior número de fibras produziram papéis com maiores coeficientes de espalhamento de luz e opacidade. Esta observação se apoia no fato da existência de elevado número de espaços intercelulares, o que obriga a luz a atravessar mais interfaces fibra-ar.
3. Os resultados da análise estatística confirmaram, para os diversos tipos de polpas estudados, alta correlação linear entre o número de fibras por grama e as propriedades de espalhamento de luz e opacidade.
4. As propriedades que dependem do grau de ligação entre fibras, como densidade aparente e as resistências à tração e ao estouro, mostraram maiores índices nas polpas com mais fibras por grama. Isto comprova que esta característica proporciona mais pontos de contato, aumentando o número de ligações. Ao mesmo tempo, se observou nessas polpas maior resistência ao ar Gurley.



2A. *E. grandis* - coeficiente de espalhamento de luz  
48,6 m<sup>2</sup>/kg.



2B. *E. rostrata* - coeficiente de espalhamento de luz  
52,0 m<sup>2</sup>/kg.

Figura 2 - Cortes transversais de papel (ampliação 400X) (CLAUDIO-DA-SILVA, 1981).

## LITERATURA CITADA

- BARRICHELO, L.E.G. & J.O. BRITO, 1979. A utilização da madeira na produção de celulosa. Circular técnica. IPEF, Piracicaba, (68):1-16.
- BARRICHELO, L.E.G. J.O. BRITO & A.V. BAZANELLI, 1983. Densidade básica e características das fibras de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, São Paulo 21-26 nov. v. 1 p: 113-25.
- BRASIL, M-A.M., 1976. Densidade Básica e características das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos 3 anos de idade. Piracicaba, ESALQ/USP, 126 p. (Tese de Doutorado).
- BRITT, K.W., 1966. Fiber coarseness in wood. TAPPI, Atlanta, 49(5):202-6.
- CARPIM, M.A. R.V. SCUZA & L.E.G. BARRICHELO, 1985. Comparação das Características da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* de diferentes procedências. In: CONGRESSO ANUAL ABCP, 18, São Paulo, 18-22 nov. v. 1 p: 57-68.
- CASEY, J.P., 1960. Pulp and paper: chemistry and chemical technology. 2<sup>a</sup> ed. New York, Interscience. 3v.
- CLARK, J.A., 1978. Pulp technology and treatment for paper. San Francisco, Miller Freeman. 751 p.
- CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. 1981. - "Chemical pulp beating related to fiber structure" - Syracuse. College of Environmental Science and Forestry. 295 p. (Tese-Doutorado-SUNY).
- CLAUDIO-DA-SILVA JR., E., 1983. Flexibility of pulp fibers a structural approach. In: INTERNATIONAL PAPER PHYSICS CONFERENCE, p. 13-25.
- COLLEY, J., 1973. Properties of blends of high and low density eucalypt pulps. APPITA, Melbourne, 26(6):430-6.
- DINWOODIE, J.M., 1965. The relation between fiber morphology and paper properties: a review of literature. TAPPI, Atlanta, 48(8):440-7.
- ENRICH, R.V., 1985. Desarrollo de las propiedades de resistencia del papel. Ingenieria Quimica: 55-62, abr.
- GIERTZ, H.W., 1965. Some optical consequences of consolidation of paper. In: CONSOLIDATION OF THE PAPER WEB. TRANSACTIONS OF THE CAMBRIDGE SYMPOSIUM, London, p. 928-33.
- HILLEN, N.J., 1966. Opacity problems in printing papers: Kubelka-Munk theory gives good, quick answers. TAPPI, Atlanta, 49(7):41-47.
- KIBBLEWHITE, R.P., 1973. Effects of beating and wood quality on radiata pine kraft properties. New Zealand Journal of Forestry Science, Rotorua, 3(2):220-39.
- KIBBLEWHITE, R.P., 1984. Fibres and fines of some radiata pine corewood and slabwood thermomechanical and refiner mechanical pulps. APPITA, Melbourne, 37(8):650-7.

- NORDMAN, L., P. AALTONEN & T. MAKKONEN, 1965. Relationships between mechanical and optical properties of paper affected by web consolidation. In: CONSOLIDATION OF THE PAPER WEB TRANSACTIONS OF THE CAMBRIDGE SYMPOSIUM, London, p. 909-927.
- NORDMAN, L., 1970. Opacity and pulp properties. Papierweseld. The Finnish and Paper Research Institute, Helsinki, (451):1-111.
- ROBINSON, J.V., 1975. A summary of reflectance equations for application of the Kubelka-Munk theory to optical properties of paper. TAPPI, Atlanta, 58(10):152-153.
- ROBINSON, J.V., 1976. Optical properties of paper as affected by wet-end chemistry. TAPPI, Atlanta, 59(2):77-84.
- SCALLAN, A.M., 1985. An alternative approach to the Kubelka-Munk theory. Journal of pulp and Paper Science, Montreal, 11(3):80-84.
- SCALLAN, A.M. & J. BORCH, 1972. An interpretation of paper reflectance based upon morphology: inicial considerations. TAPPI, Atlanta, 55(4):583-588.
- SCALLAN, A.M. & J. Borch, 1974. An interpretation of paper reflectance based upon morphology: general applicability. TAPPI, Atlanta, 57(5):143-147.
- SCALLAN, A.M. & J. BORCH, 1976a. An interpretation of paper reflectance based upon morphology: the effect of mass distribution. TAPPI, Atlanta, 59(10):102-105.
- UPRICHARD, J.M., 1973. Effects of wood age on optical and strength properties of softwood kraft pulps. APPITA, Melbourne, 27(3):179-184.
- CARPIM, M.A., 1986. Uma nova abordagem para análise da opacidade do papel. Piracicaba, ESALQ/USP. 76p. (tese de mestrado)