

# Propriedades do Papel

Paulo Ferreira

30.10.2008

1

## Parâmetros que afectam as propriedades do papel

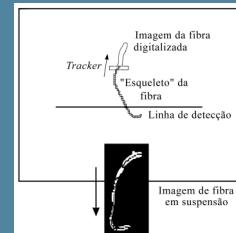
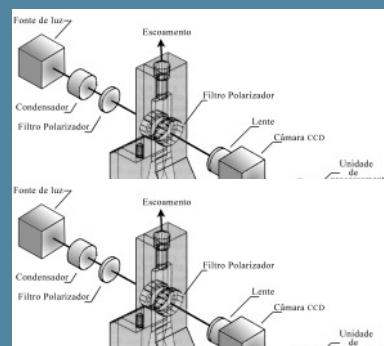


2

## Propriedades da matéria-prima

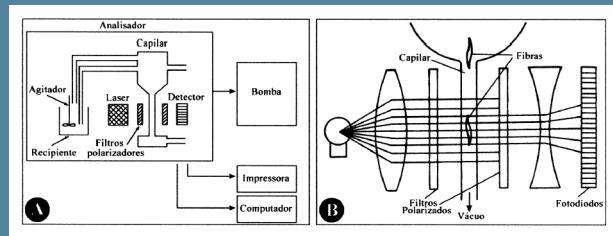
- Densidade da madeira (EW / LW, vasos, parénquima,...)
- Percentagem de fibras
- **Comprimento das fibras / Distribuição de comprimentos**
- **Dimensões transversais das fibras** (largura, coarseness, área da secção recta do lúmen e da fibra, espessura da parede)
- Composição química (celulose, hemiceluloses, lenhina, extractivos e cinzas)
- **Ângulo fibrilar**
- Cristalinidade das fibras
- Grau de polimerização da celulose
- Porosidade da parede da fibra
- ...

3

Representação esquemática do analisador de fibras *Fiber Quality Analyzer* (FQA)  
(adaptado de Olson *et al.*, 1995, e de Trepanier, 1998)

$$L = 2k + \sum_{i=1}^{N-k} \frac{\sqrt{(x_{i+k} - x_{i-k})^2 + (y_{i+k} - y_{i-k})^2}}{2k}$$

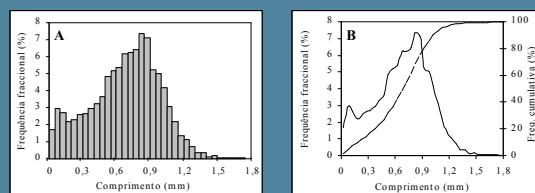
4

Representação esquemática do analisador de fibras *Kajaani FS-200*

A – Os diversos componentes do aparelho (adaptado de Bichard e Scudamore, 1988);  
 B – O princípio de funcionamento (adaptado de Jackson, 1988).

5

## Distribuições de comprimentos



Comprimento médio pesado em número (média aritmética):

$$L_n = \frac{\sum n_i \cdot l_i}{\sum n_i}$$

Comprimento médio pesado em comprimento:

$$L_l = \frac{\sum n_i \cdot l_i^2}{\sum n_i \cdot l_i}$$

6

Comprimento médio pesado em massa:

$$L_w = \frac{\sum w_i \cdot l_i}{\sum w_i}$$

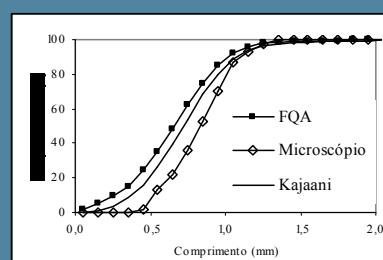
$$w_i = c \cdot l_i \quad \longrightarrow \quad L_w = \frac{\sum n_i \cdot c \cdot l_i^2}{\sum n_i \cdot c \cdot l_i} = \frac{\sum n_i \cdot l_i^2}{\sum n_i \cdot l_i}$$

$$w_i = c_i \cdot l_i = k \cdot l_i \cdot l_i = k \cdot l_i^2 \quad \longrightarrow \quad L_w = \frac{\sum n_i \cdot k \cdot l_i^2 \cdot l_i}{\sum n_i \cdot k \cdot l_i^2} = \frac{\sum n_i \cdot l_i^3}{\sum n_i \cdot l_i^2}$$

$$L_w = \frac{w_1 \cdot L_1 + w_2 \cdot L_2 + w_3 \cdot L_3 + w_4 \cdot L_4 + w_5 \cdot L_5}{W}$$

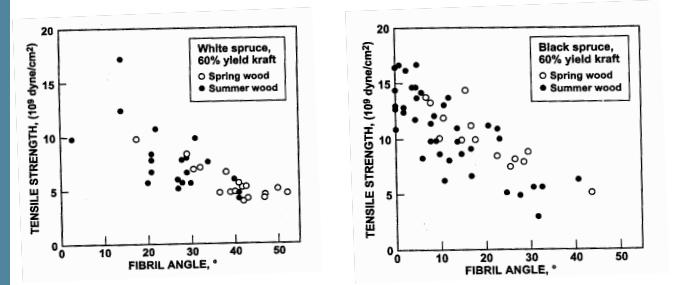
7

Comparação das distribuições de comprimentos de uma pasta não refinada, sem finos, dadas por diferentes equipamentos



8

Relação entre a resisténcia das fibras à tracção e o  
ângulo fibrilar



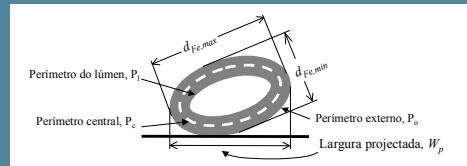
9

Propriedades das fibras na pasta

- Largura da fibra
- Espessura da parede
- Coarseness
- Resisténcia intrínseca
- Deformações (*weak-points, curl*)
- Conformabilidade (colapsabilidade, flexibilidade)
- Índice de *curl* e curvatura
- Fibrilação (interna e externa)
- Distribuição de comprimentos
- Percentagem de finos
- N° de fibras por unidade de massa
- ...

10

Representação esquemática da secção transversal de uma fibra e algumas das correspondentes dimensões.

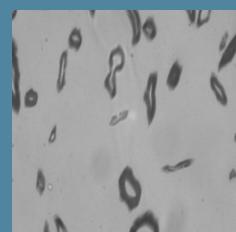


Medição da espessura da parede numa fibra de pasta *kraft* por microscopia óptica



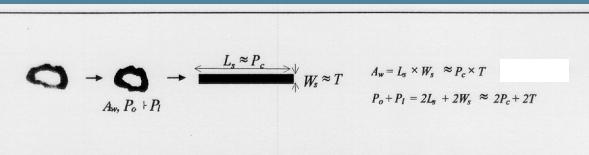
$W$  – largura da fibra  
 $W_l$  – largura do lúmen  
 $W - W_l = 2 \times$  espessura da parede      11

Imagen de cortes histológicos de fibras de *E. globulus* obtidas por microscopia de luz convencional.



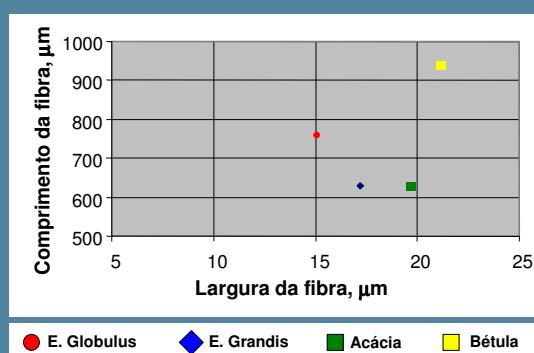
Cálculo da espessura da parede a partir de imagens da secção transversal das fibras

$$T = \frac{A_w}{P_c}$$



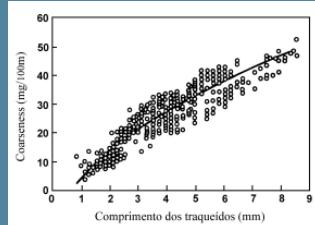
13

Características morfológicas das fibras  
(pastas *kraft* branqueadas)



14

## Coarseness e comprimento das fibras



Fracção Retida*	Variação do Comprimento das fibras	Coarseness das fibras (mg/100 m)				
		<i>E. globulus</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. urophylla</i>	<i>B. verrucosa</i>	<i>P. radiata</i>
R-30		—	9,1	10,3	12,6	34,8
P-30/R-50	▼	8,1	8,3	9,5	9,2	24,3
P-50/R-100		6,5	7,5	8,3	8,5	20,2
P-100/R-200		5,4	—	—	—	—

\* R-30 – Fracção retida no peneiro de 30 mesh.

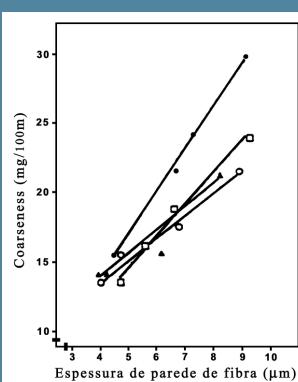
P-30/R-50 – Fracção que passou no peneiro de 30 mesh e ficou retida no de 50 mesh.

P-50/R-100 – Fracção que passou no peneiro de 50 mesh e ficou retida no de 100 mesh.

P-100/R-200 – Fracção que passou no peneiro de 100 mesh e ficou retida no de 200 mesh.

15

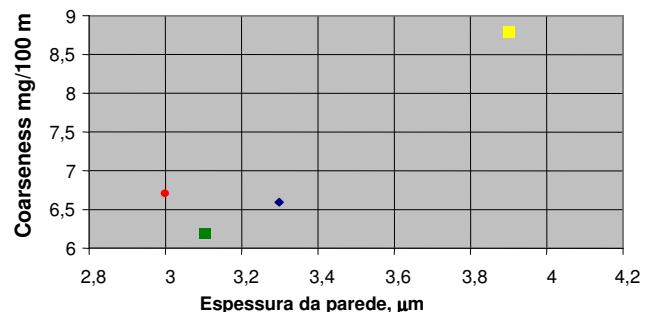
## Coarseness e espessura da parede das fibras



$$c = A_w \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot (d_o^2 - d_l^2) \cdot \rho$$

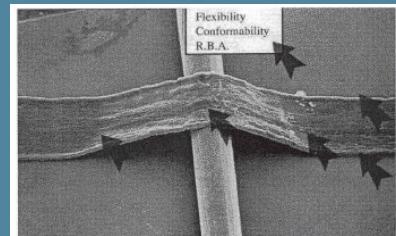
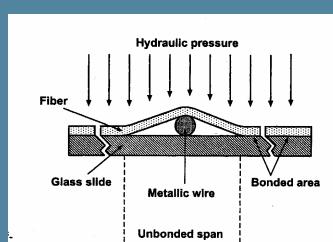
16

## Coarseness e espessura da parede das fibras



● E. GLOBULUS      ■ BIRCH  
◆ E. GRANDIS      ■ ACACIA

17

Medição da flexibilidade das fibras  
(método de Steadman, CyberMetrics)

18



## Índice de curl das fibras

$$I_c = \frac{L}{d_{Fe,max}} - 1$$

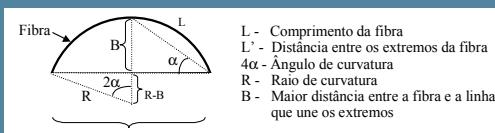
$$I_c = \frac{L}{L'} - 1$$

$L'$  - comprimento da fibra  
 $d_{Fe,max}$  - maior distância entre dois pontos da fibra  
 $L'$  - distância entre os extremos da fibra  
 (Jordan e Nguyen (1986))

19



## Curvatura das fibras

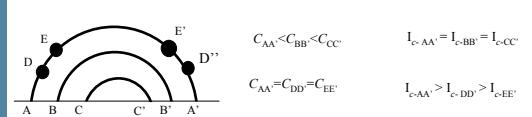


L - Comprimento da fibra  
 L' - Distância entre os extremos da fibra  
 $4\alpha$  - Ângulo de curvatura  
 R - Raio de curvatura  
 B - Maior distância entre a fibra e a linha que une os extremos

Representação esquemática de uma fibra e das dimensões para o cálculo da curvatura  
 (adaptado de Nguyen e Jordan, 1995)

$$C = \frac{1}{R} = \frac{8B}{4B^2 + L'^2}$$

20

Diferéncia entre *Curl* e Curvatura das fibras

$$C_{AA'} < C_{BB'} < C_{CC'}$$

$$I_{c-AA'} = I_{c-BB'} = I_{c-CC'}$$

$$C_{AA'} = C_{DD'} = C_{EE'}$$

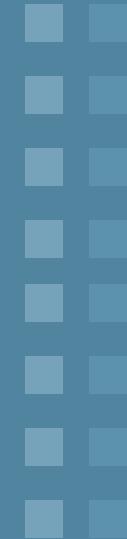
$$I_{c-AA'} > I_{c-DD'} > I_{c-EE'}$$

21

Potencial papeleiro do *furnish*

- *Paper and Pulp Testing – L&W Handbook* (Lorentzen and Wettre)
- Paulapuro, H., Levlin, J., Soderhjelm, L., *Papermaking Science and Technology*; Finnish Paper Engineer's Association; Technical Association of Pulp and Paper Industry, 2000. - Vol. 17 - *Pulp and Paper Testing*, Jan-Erik Levlin and Liva Soderhjelm
- Mark, R.E., *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*; Vol 2., Marcel & Dekker Inc., 1984.
- *Estructura y propiedades de la hoja: su influencia en las características físicas del papel*, Catedra de Tecnología papelera - UPB

22

**Amostragem (norma ISO 186)****Condicionamento (norma ISO 187)**

**Todos os testes realizados devem ser executados em ambiente condicionado com o objectivo de controlar a influência de:**

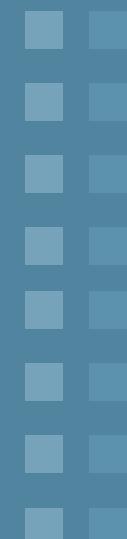
- Temperatura
- Luz
- Exposição a vapores e líquidos

**Condições de condicionamento:**

- $T = 23^\circ C \pm 1^\circ C$
- $HR = 50\% \pm 2\%$

$HR = \text{Humidade do ar} / \text{humidade do ar saturado de vapor de água nas mesmas condições de P e T (NP EN 20287 / ISO 287)}$

23

**Humidade relativa influencia teor de água no papel (moisture content):**

- $HR \approx 50\% \Rightarrow \text{moisture content} \approx 5-7\% \text{ (teor de sólidos} \approx 93-95\%)$
- $HR = 100\% \text{ (ambiente saturado)} \Rightarrow \text{moisture content} \approx 25-30\% \text{ (teor de sólidos} \approx 70-75\%)$
- Fala-se em *Moisture content* para valores de  $M_{\text{água}} / M_{\text{total}}$  até 30%
- Fala-se em *Teor de sólidos* para valores de  $M_{\text{água}} / M_{\text{total}}$  superiores a 30%
- Há histerese: o teor de sólidos a uma dada HR é diferente consoante o papel está a absorver ou a perder água (o teor de sólidos a uma dada HR é diferente se o papel vem de ambientes secos ou húmidos)

24

**Propriedades da pasta dependem de:**

- Tipo / natureza das fibras
- Processo de obtenção da pasta (químico, mecânico, TMP)
- Sequência de branqueamento
- Grau de refinação
- Formação da folha

**Necessário ter em conta:**

- Bilateralidade da folha (face da folha): lado teia / lado filtro
- Anisotropia da folha (direcção MD / direcção CD)  
(as maiores diferenças são na direcção transversal (CD))

25

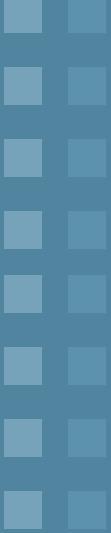
**Potencial papeleiro do *furnish*****▪ Resisténcia à drenagem****▪ Propriedades estruturais:**

- Gramagem (+)
  - Espessura (+)
  - Densidade / Índice de mão (*bulk*) (+)
  - Permeabilidade ao ar / porosidade (+)
  - Formação / Orientação da fibra
  - Humidade
  - Lisura / Rugosidade superficial
- } Na matriz
- } Na superfície

**▪ Propriedades ópticas:**

- Brancura (+)
- Opacidade (+)
- Dispersão de luz (+)
- Absorção de luz (+)
- Brilho

26



### Potencial papeleiro do *furnish*

- **Propriedades de resisténcia mecânica:**

- Resisténcias à tracção (+)
- Resisténcia ao rebentamento (+)
- Resisténcia ao rasgamento (+)
- Resisténcia a duplas dobras
- Resisténcia interna (de Scott-Bond)
- Resisténcia de zero-span
- Resisténcia à compressão
- Rigidez à tracção
- *Bending stiffness* (rigidez ao encurvamento)

- **Propriedades de absorção**

- Capilaridade (teste Klemm)
- Teste Cobb

27



### Potencial papeleiro do *furnish*

- **Propriedades estruturais da matriz:**

São propriedades gerais associadas à estrutura do material e são fundamentais para a especificação do produto

- **Propriedades estruturais da superfície:**

Estão associadas à topografia do produto e são fundamentais para a qualidade de impressão

- **Propriedades Ópticas:**

Estão associadas a fenómenos físicos, dizem respeito ao aspecto da folha e são fundamentais para a qualidade de impressão

28

**Potencial papeleiro do *furnish*****Propriedades de resistência mecânica:**

Estão associadas a fenómenos de natureza física e são fundamentais para a resistência do material

(são de extrema importância dado que o papel é submetido a tensões consideráveis durante a sua transformação e utilização)

**Propriedades de absorção:**

Estão associadas à estrutura da folha e são importantes na interacção do papel com fluidos

29

**Avaliação do grau de refinação**

- **Water Retention Value (WRV)**  
Determinação da quantidade de água retida nas fibras (intumescimento das fibras)
- **Grau de Shopper-Riegler (°SR)**  
Medida da drenabilidade de uma pasta
- **Canadian Standard Freeness (°CSF)**  
Medida da drenabilidade de uma pasta

30

### Gramagem

Quociente entre a massa e a área de uma amostra. Define-se como a massa por unidade de superfície de papel.

- Unidades: g/m<sup>2</sup>
- Norma: NP EN ISO 536 / ISO 536

### Espessura

É a distância perpendicular entre as duas faces de uma folha de papel determinada nas condições do método de ensaio normalizado (100 kpa de pressão e 200 mm<sup>2</sup> de área)

- Unidades: mm (x10<sup>-6</sup> m)
- Norma: NP EN ISO 20534 / ISO 534



Micrómetro 31

### Índice de Mão / Densidade (Massa Volúmica)

Índice de Mão é o volume por unidade de peso de papel, expresso em cm<sup>3</sup>/g.

Densidade aparente é a massa por unidade de volume de papel, expressa em g/cm<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)

- Norma: NP EN 20534 / ISO 534
- Densidade aparente (bulk) / densidade skeletal / densidade verdadeira (true)

Dependendo do uso específico de cada produto, o controlo desta característica pode assumir particular relevância. (*por exº: papel para arquivo deverá ter um Índice de Mão baixo; em oposição papel para desenho é especificado com Índice de Mão elevado.*)

*Papel para caixas de bolo deverá ter um Índice de Mão baixo.*)

32

**Espessura em Micras**  
**(função de gramagem e densidade)**

g/m <sup>2</sup>	VOLÚMENES ESPECÍFICOS (MANOS)									
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,2
50	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110
60	72	78	84	90	96	102	108	114	120	132
70	84	91	98	105	112	119	126	133	140	154
80	96	104	112	120	128	136	144	152	160	176
90	108	117	126	135	144	153	162	171	180	198
100	120	130	140	150	160	170	180	190	200	220
115	138	149,5	161	172,5	184	195,5	207	218,5	230	253
125	150	162,5	175	187,5	200	212,5	225	237,5	250	275
130	156	169	182	195	208	221	234	247	260	286
135	162	175,5	189	202,5	216	229,5	243	256,5	270	297
140	168	182	196	210	224	238	252	266	280	308
150	180	195	210	225	240	255	270	--	--	--
170	204	221	238	255	272	289	306	--	--	--
200	240	260	280	300	320	340	360	--	--	--
250	300	325	350	375	400	425	450	--	--	--

33

- Espessura (t) pode ser calculada em função da rigidez à tracção ( $S_t$ ) e da rigidez ao encurvamento ( $S_b$ ):

$$S_b = S_t \times t^2 / 12 \quad [t] = \text{m}, [S_t] = \text{N/m}, [S_b] = \text{Nm}$$

- Espessura (t) pode ser medida por perfilometria óptica

- Densidade:

- Aparente (ISO 524; porosimetria de mercúrio (bulk density,  $P = 1 \text{ psia}$ ))
- Skeletal (porosimetria de mercúrio,  $P=30000 \text{ psia}$ )
- Verdadeira (picnomteria de hélio)

34



### Permeabilidade ao ar / Porosidade



Volume de ar que atravessa 1 m<sup>2</sup> de área de folha sob diferença de pressão de 1 pa em 1 s, sob pressão constante, uma determinada área de papel.



Quantifica a capacidade que o papel tem em se deixar atravessar pelo ar.



- Unidades: ml / (m<sup>2</sup>.Pa.s) = 1 µm/(Pa.s)

- Métodos:



- Schopper (norma ISO 5636-2)



- Bendtsen (norma ISO 5636-3)



- Sheffiled (norma ISO 5636-4)



35



### Resisténcia ao ar (Gurley)



Tempo necessário para um certo volume de ar atravessar, sob pressão constante, uma determinada área de papel.



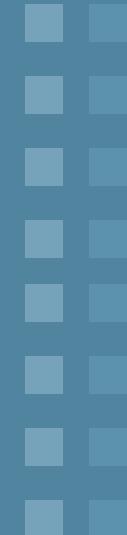
Tal como a permeabilidade ao ar, quantifica a capacidade que o papel tem em se deixar atravessar pelo ar.



- Unidades: s/100 ml (pode ser medido para 50 ml ou 200 ml)

- Norma: NP 795, ISO 5636-5





### Lisura Bekk

Tempo necessário para o escoamento de um determinado volume de ar entre uma superfície polida (vidro) e a amostra de papel aplicada contra o vidro.

A resisténcia à passagem de ar entre o proveta e a superfície polida será tanto maior quanto mais liso for o papel.

Se o papel fosse perfeitamente liso o ar não poderia passar.

- Unidades: s
- Norma: ISO 5627



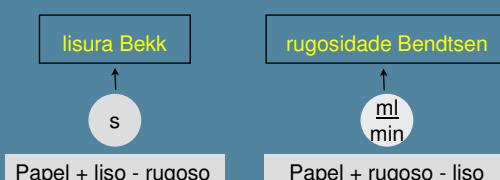
→ A lisura Bekk é determinada em ambas as faces da folha

37



### Rugosidade Bendtsen

Medida do caudal de ar que passa entre uma cabeça de medida circular plana de vidro e a superfície de papel.



- Unidades: ml/min
- Norma: ISO 8791-2

- Rugosidade pode ser medida pelo método Sheffield (ISO 8791-3)
- Rugosidade pode ser medida por perfilometria óptica, obtendo-se parâmetros como  $S_a$ ,  $S_v$ ,  $S_p$ ,  $SSk$ ,  $Sdr$



38

### Propriedades ópticas

Definições (ISO 2469, ISO 2470):

- Reflectânci (%) – Razão entre a intensidade do feixe incidente e a do feixe reflectido (percentagem de luz reflectida)
- Factor de reflectânci (%) – Razão entre a quantidade de luz reflectida por um corpo de teste e a reflectida por um difusor reflectante perfeito, nas mesmas condições
- Factor de reflectânci difusa (%) – Factor de reflectânci quando a luz usada é difusa
- Factor de reflectânci difusa intrínseca ( $R_{00}$ , %) – Factor de reflectânci difusa de uma folha de papel (não se altera por adicionar mais uma folha)
- Factor de reflectânci difusa no azul (brightness, brancura, %) – Factor de reflectânci difusa intrínseco de uma folha de papel na banda do azul (457 nm); Iluminante / observador – C / 2°; valores entre 92 e 98% ISO
- Brancura CIE (whiteness) – Medida do aspecto branco de uma folha; Factor de reflectânci difusa intrínseco de uma folha de papel usando todo o espectro visível; Iluminante / observador – D65 (luz do dia) / 10°; C / 2°

39

### Brancura ISO

- Factor de reflectânci difusa intrínseco de uma folha de papel na banda do azul (457 nm); percentagem de luz reflectida por uma folha de papel na banda do azul; Iluminante / observador – C / 2°
- É o atributo mais solicitado nos papeis para impressão e escrita. Para a impressão, a brancura realça as cores, devido à luminosidade de fundo.
- A brancura pode ser natural, mantendo a cor natural das fibras, ou induzida por branqueadores ópticos (fazem com que o papel se torne fluorescente quando exposto a luz ultravioleta).

### Opacidade

- Capacidade de uma folha de papel para impedir a observação de caracteres impressos na face oposta (nível de não transparéncia da folha)
- É o quociente entre o factor de reflectânci de uma única folha contra um fundo completamente preto ( $R_0$ ) e o factor de reflectânci de um conjunto de folhas opaco ( $R_{00}$ ):

$$\text{Opacidade (\%)} = R_0 / R_{00}$$

- Norma: Tappi T425, ISO 2469, ISO 2471

40

**Coeficiente específico de dispersão da luz (CEDL)**

- É uma medida da capacidade da folha para dispersar a luz (relaciona a intensidade do feixe de luz incidente com a do feixe de luz dispersa)
- Afecta a opacidade
- A dispersão contempla os fenómenos de reflexão, refracção e difracção e é função do tipo de fibras (do seu IR) e da superfície das fibras envolvidas nas ligações
- Pela teoria de Kubelka-Munk é dado por:

$$CEDL = \frac{R_{\infty}}{w(1-R_{\infty}^2)} \cdot \ln \frac{R_{\infty} \cdot (1-R_{\infty} R_0)}{R_{\infty} - R_0}$$

[CEDL] = m<sup>2</sup>/kg, w – gramagem, [w] = g/m<sup>2</sup>

- Norma ISO 2469

**Coeficiente específico de absorção da luz (CEAL)**

- É uma medida da capacidade da folha absorver a luz, i.e., de parecer mais escura
- Norma ISO 2469

41

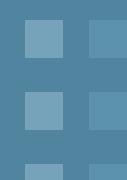
**Resistência à Tracção**

- Força requerida para a ruptura de uma folha de papel de 15 mm de largura quando submetida a uma tracção exercida nas suas extremidades nas condições indicadas no ensaio
- Unidades: N/m
- Norma: ISO 1924-2

**Índice de Tracção**

- Razão entre a resistência à tracção e a gramagem
- Unidades: N.m/g
- Norma: ISO 1924-2

42

**Comprimento de ruptura**

- Comprimento a partir do qual uma folha de papel de largura uniforme e suposta suspensa por uma das extremidades se romperia pelo seu próprio peso.
- Unidades: m
- Norma: ISO 1924-2

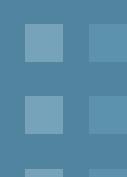
**Alongamento**

- Deformação sofrida pelo papel até à resistência à tracção máxima antes da ruptura.
- Unidades: %
- Norma: ISO 1924-2

43

**Resistência ao Rasgamento**

- Força média necessária para rasgar uma folha de papel na qual foi feito um rasgamento inicial.
- Unidades: mN
- Norma: ISO 1974

**Índice de Rasgamento**

- Razão entre a resistência ao rasgamento e a gramagem
- Unidades: mN.m<sup>2</sup>/g
- Norma: ISO 1974

44

**Resisténcia ao Rebentamento**

- Pressão máxima uniforme suportada por um provete de papel numa área de 30,5 mm de diâmetro.
- É independente da orientação das fibras
- Unidades: KPa
- Norma: ISO 2758

**Índice de Rebentamento**

- Razão entre a resisténcia ao rebentamento e a gramagem
- Unidades: KPa.m<sup>2</sup>/g
- Norma: ISO 2758



45

**Factores que afectam propriedades de tracção:**

- Resisténcia individual das fibras
- Comprimento das fibras
- Ligação entre as fibras (++)
- Formação e estrutura de folha (++)
- Refinação (++)

**Factores que afectam resisténcia ao rasgamento:**

- N<sup>o</sup> total de fibras
- Comprimento das fibras (++)
- N<sup>o</sup> e resisténcia de ligações entre fibras
- Refinação (++) (diminui c/ refinação a partir de determinado ponto)

**Factores que afectam resisténcia ao rebentamento:**

- Comprimento das fibras
- Ligação entre as fibras (++)
- Formação
- Refinação

46

**Resisténcia interna**

- Energia requerida para delaminar uma folha de papel na direcção Z sob acção de um pêndulo de massa e velocidade controlada (resisténcia de Scott-Bond)
- Equivalente à resisténcia à tracção na direcção Z
- Unidades:  $J/m^2$
- Norma: Tappi T403

**Factores que afectam resisténcia interna:**

- Formação (ligação entre camadas)
- Refinação

47

**Aplicações das pastas de Eucalipto em função dos requisitos dos papéis**

Segmentos de mercado do papel*	Tipos de papel*	Volume específico	Porosidade	Opacidade	Resisténcia à tracção
Impressão e escrita (não revestidos) (sem pasta mecânica)	Normal, cópia, <i>inkjet</i> , <i>offset</i> , <i>laser</i> , livro	Elevado	Reduzido	Elevado	Elevado
Impressão e escrita (revestidos) (sem pasta mecânica)	Todos os níveis de revestimento	Elevado	Reduzido	Elevado	Elevado
Papel e Cartão de embalagem	Com aplicação de superfície Cartão para caixas planificadas	...	Elevado	Elevado	Elevado
	Sobescritos e Bolsas	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
Papéis especiais	Laminados para decoração Revestidos de alto brilho Papel para fumar Pergaminho	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
	Suporte para papel fotográfico	Elevado	...	Elevado	Elevado
	Etiquetas Papel de Segurança	Elevado	Reduzido	Elevado	Elevado
	Papel de filtro	Elevado	Elevado	...	Elevado
Papel <i>Tissue</i>	<i>Tissue</i> facial	Elevado	...	...	Elevado

## Efeito da refinação nas Propriedades das Pastas Químicas

