



abcp

**Associação Técnica Brasileira
de Celulose e Papel**

II CONVENÇÃO ANUAL ABCP

"SEMANA DO PAPEL"

Influência da Gramatura sobre as Propriedades Físico-Mecânicas da Celulose

LUIZ ERNESTO GEORGE BARRICHELO

CELSO EDMUNDO BOCHETTI FOELKEL

N.º 10

SÃO PAULO, 24 A 28 DE NOVEMBRO DE 1969

*Senhores convencionais
sejam bem-vindos.*

*desejamos-vos um ótimo aproveitamento nesta
convenção.*

A B C P

Influência da gramatura sobre as propriedades físico-mecânicas da celulose

Luiz Ernesto George Barrichelo

Professor Assistente do Departamento de Silvicultura, Secção de Celulose e Papel da ESALQ-USP, Piracicaba.

Celso Edmundo Bochetti Foelkel

Acadêmico da ESALQ, estagiário da Secção de Celulose e Papel do Departamento de Silvicultura.

**INFLUENCIA DA GRAMATURA SÓBRE AS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA CELULOSE**

LUIZ ERNESTO GEORGE BARRICHELO
Prof Assistente do Departamento de Silvi-
cultura, Secção de Celulose e Papel da
ESALQ-USP, Piracicaba.

CELSO EDMUNDO BOCHETTI FOELKEL
Acadêmico da ESALQ, estagiário da Sec-
ção de Celulose e Papel do Departamento
de Silvicultura.

Trabalho apresentado na II CONVENÇÃO
ANUAL DA ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRA-
SILEIRA DE CELULOSE E PAPEL
— ABCP.

SÃO PAULO — BRASIL — 1969

**INFLUÊNCIA DA GRAMATURA SÓBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DA CELULOSE**

Visando estudar a influência da gramatura sobre as propriedades físico-mecânicas da celulose foram preparadas, em laboratório, folhas de celulose sulfato de eucalipto branqueada.

Mantendo constante o grau de refinação expresso em "SR, foram estudados quatro níveis de gramaturas.

Os ensaios envolveram o estudo da resistência à tração, ao rasgo, ao arrebentamento, ao dobramento, espessura, peso específico aparente e porosidade

Os dados obtidos foram analisados estatisticamente e interpretados à luz dos conhecimentos atuais.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da forma e da intensidade com que a gramatura poderá influenciar as propriedades físico-mecânicas das folhas de celulose tem sido objeto de estudos por diversos autores.

Com este propósito, BRANDON (1966) estudou o efeito das variações da gramatura sobre a resistência ao dobramento e GUSTAFSSON et al. (1950) procuraram determinar a influência da gramatura sobre a espessura e peso específico aparente do papel.

Para a determinação de suas propriedades, a celulose é transformada em folhas com uma dada gramatura padrão que é expressa em gramas por metro quadrado.

A fim de que os resultados obtidos quando se ensaiam diversas amostras de celulose sejam comparáveis, a gramatura deverá estar dentro de uma faixa na qual as variações devidas a esse fator sejam eliminadas.

A norma TAPPI T220m-60 especifica que para se conseguir reprodutibilidade igual ou menor que 2% para o índice de arrebentamento a gramatura média deverá estar entre 57 e 63 g/m².

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 — Material

Para o presente estudo foram utilizadas amostras de celulose sulfato branqueada de eucalipto.

2.2 — Métodos

A celulose foi refinada em moinho centrifugal Jokro a 1 500 rpm e consistência de 6%. O grau de moagem médio conseguido foi 45°SR. A celulose refinada foi homogeneizada e a seguir foram preparadas folhas com gramaturas médias de 48,9 — 57,8 — 67,8 — 77,4 g/m². Foram feitas seis repetições por tratamento e a ordem de preparação inteiramente casualizada sendo utilizado o formador de folhas e conjunto de secagem Köthen-Rapid.

O acondicionamento foi feito em ambiente com umidade relativa de 65 ± 2% e temperatura de 20 ± 2°C, conforme norma ABCP P4/67.

A obtenção dos corpos de prova, procedimentos e cálculos foram conduzidos de acordo com a norma TAPPI Standard T220m-60.

3. RESULTADOS

Os quadros I a XVI apresentam os resultados obtidos com as respectivas análises estatísticas.

Os gráficos I a VII apresentam os resultados médios dos ensaios em função dos níveis de gramaturas empregados.

Quadro I — Gramatura expressa em g/m²

Gramatura	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	48,9	0,55	1,12
G ₂	57,8	0,67	1,16
G ₃	67,8	0,09	0,13
G ₄	77,4	0,51	0,66

Quadro II — Gramatura — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S. Q.	Q. M.	F
Tratamento	3	2 744,38	914,79	3 518,42++
Resíduo	20	5,11	0,26	
Total	23	2.749,49		

++ significativo ao nível de 1% de probabilidade.

A diferença mínima significativa (D.M.S.) para a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% é 0,82 e ao nível de 1% é 1,04.

Quadro III — Comprimento de auto-ruptura expresso em metros

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
G ₁	6328	133	325,8	5,15
G ₂	6754	119	291,0	4,31
G ₃	6814	85	210,6	3,09
G ₄	7105	54	131,4	1,85

Quadro IV — Comprimento de auto-ruptura — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S. Q.	Q. M.	F
Tratamento	3	1 850 289	616.763	9,78++
Resíduo	20	1 261.860	63.093	
Total	23	3.112.149		

++ significativo ao nível de 1% de probabilidade.

D.M.S. a 5% = 405,89

D.M.S. a 1% = 514,65

Quadro V — Índice de rasgo

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	81	1	2,80	3,46
G ₂	88	1	2,56	2,91
G ₃	88	2	4,22	4,80
G ₄	86	3	6,80	7,91

Quadro VI — Índice de rasgo — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S. Q.	Q. M.	F
Tratamento	3	209	69,67	6,03 ++
Resíduo	20	231	11,55	
Total	23	440		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade

D.M.S. a 5% = 5,49

D.M.S. a 1% = 6,97

Quadro VII — Índice de arrebatamento

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	35,1	0,5	1,14	3,25
G ₂	39,3	0,9	2,20	5,60
G ₃	39,8	0,4	0,89	2,24
G ₄	41,5	0,2	0,44	1,06

Quadro VIII — Índice de arrebatamento — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S. Q.	Q. M.	F
Tratamento	3	134,07	44,69	25,11 ++
Resíduo	20	35,64	1,78	
Total	23	169,71		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade

D.M.S. a 5% = 2,16

D.M.S. a 1% = 2,74

Quadro IX — Dobras duplas expressa em números

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	68	8	19,90	26,26
G ₂	119	9	22,40	18,82
G ₃	157	16	39,40	25,10
G ₄	256	21	52,30	20,43

Quadro X — Dobras duplas — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento	3	114 259	38 086	29,32 ++
Resíduo	20	25 984	1 299	
Total	23	140 243		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade.

D.M.S. a 5% — 58,18

D.M.S. a 1% = 73,76

Quadro XI — Espessura expressa em milímetros

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	0,079	0,0003	0,00063	0,80
G ₂	0,090	0,0006	0,00140	1,56
G ₃	0,101	0,0003	0,00063	0,62
G ₄	0,112	0,0003	0,00078	0,70

Quadro XII — Espessura — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento	3	0,003696	0,0012320	1 760 ++
Resíduo	20	0,000014	0,0000007	
Total	23	0,003710		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade

D.M.S. a 5% = 0,0014

D.M.S. a 1% 0,0017

Quadro XIII — Pêso específico aparente expresso em g/cm³

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	0,620	0,004	0,0107	1,73
G ₂	0,643	0,004	0,0092	1,43
G ₃	0,672	0,002	0,0043	0,64
G ₄	0,696	0,001	0,0018	0,26

Quadro XIV — Pêso específico aparente — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento	3	0,01726	0,00575	95,83 ++
Resíduo	20	0,00125	0,00006	
Total	23	0,01851		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade

D.M.S. a 5% = 0,012

D.M.S. a 1% = 0,016

Quadro XV — Porosidade expressa em segundos/100 cm³

Gramatura	Média	Erro Padrão da Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
G ₁	4	0,4	1,03	25,7
G ₂	8	0,3	0,81	10,1
G ₃	12	0,4	1,05	8,7
G ₄	16	0,6	1,38	8,6

Quadro XVI — Porosidade — Análise de Variância

Causas de Variação	Graus de Liberdade	S.Q.	Q.M.	F
Tratamento	3	418,80	139,60	118,31 ++
Resíduo	20	23,70	1,18	
Total	23	442,50		

++ — significativo ao nível de 1% de probabilidade

D.M.S. a 5% = 1,76

D.M.S. a 1% = 2,23

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para maior clareza a discussão dos resultados será conduzida na mesma sequência geral observada para os mesmos, no item anterior.

4.1 — Gramatura

Os resultados contidos no quadro I mostram pequena variação entre as repetições dentro de cada tratamento enquanto os do quadro II evidenciam, como altamente significativas as diferenças entre os níveis estudados.

Do exposto conclue-se que os tratamentos foram homogêneos, porém estatisticamente diferentes entre si.

4.2 — Resistência à tração

Através dos resultados dos quadros III e IV observamos:

a) pequenos coeficientes de variação dentro dos tratamentos e decrescentes de G_1 para G_4 mostrando que o aumento da gramatura diminui o erro padrão da média;

b) a influência da gramatura se mostrou significativa ao nível de 1%.

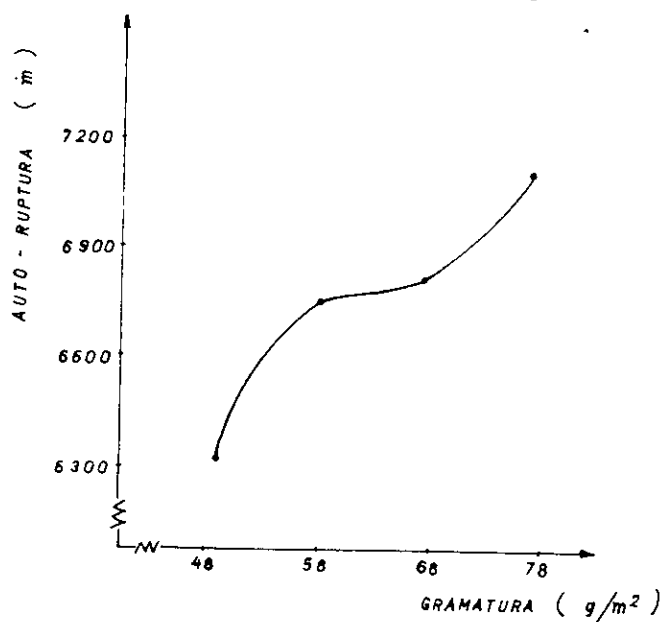


GRÁFICO I - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - COMPRIMENTO DE AUTO-RUPTURA

No gráfico I notamos que na faixa normal de ensaio (gramaturas ao redor de 63g/m²) e utilizando-se o equipamento em aprêço há um ponto de inflexão da curva e em suas proximidades, pequena influência da gramatura sobre o comprimento de auto-ruptura.

4.3 — Resistência ao rasgo

A análise dos quadros V e VI permite observar que os coeficientes de variação foram ligeiramente superiores àqueles encontrados para o comprimento de auto-ruptura evidenciando uma maior variação dentro de cada tratamento. Como consequência às gramaturas mais elevadas observamos maiores erros padrões das médias.

A gramatura influenciou a resistência ao rasgo de forma significativa.

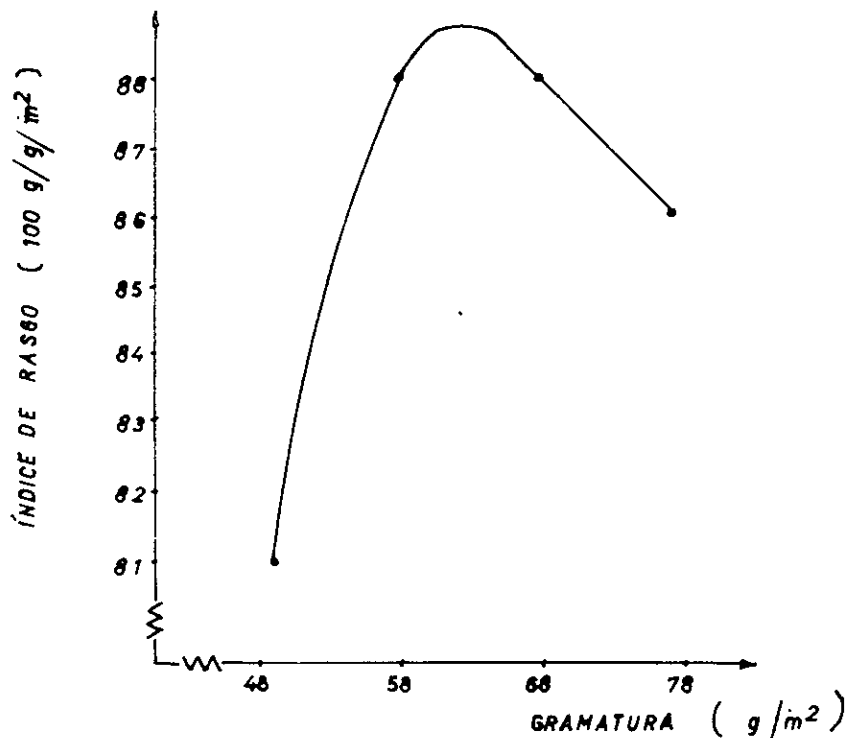


GRÁFICO II — RESISTÊNCIA AO RASGO — ELMENDORF

O exame do gráfico II permite reconhecer um ponto de máxima ao redor de $63 g/m^2$. A exemplo do anterior são encontradas diferenças não significativas em suas proximidades decorrendo deste fato que estatisticamente não há influência da gramatura sobre o índice de rasgo no intervalo usual de ensaio. Como consequência, nesse intervalo, a resistência ao rasgo pode ser corrigida pela gramatura calculando-se o índice de rasgo.

4.4 — Resistência ao arrebentamento

A análise dos dados apontados nos quadros VII e VIII revela certa

semelhança com os resultados e conclusões apresentados em relação à resistência à tração.

O exame do gráfico III permite concluir que ao redor de 63 g/m² a resistência ao arrebentamento pode ser corrigida pela gramatura calculando-se o índice de arrebentamento.

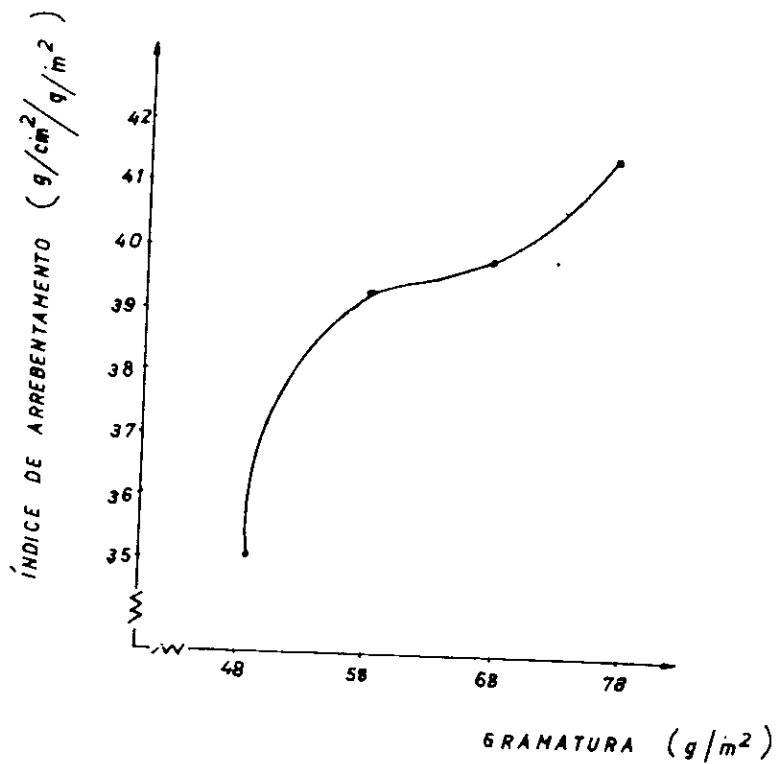


GRÁFICO III - RESISTÊNCIA AO ARREBENTAMENTO - MULLEN

4 5 — Resistência ao dobramento

Os resultados contidos no quadro IX mostram altos coeficientes de variação dentro dos tratamentos. Devido a isso é recomendável em trabalhos futuros, realizar maior número de repetições.

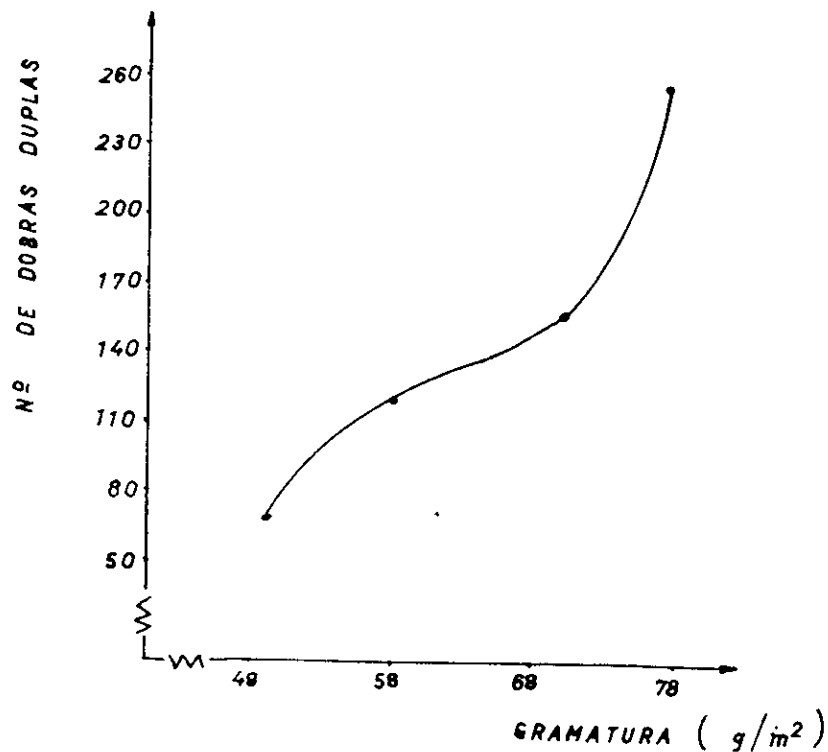


GRÁFICO IV - RESISTÊNCIA AO DOBRAMENTO

No intervalo estudado, desde 48,9 até 77,4 g/m², o número de dobras duplas aumentou proporcionalmente com a gramatura, conforme podemos observar através dos resultados contidos no quadro IX. Porém, entre os tratamentos G₂ e G₃ ocorreu a menor diferença entre as médias que por sua vez não se mostrou significativa através do teste de Tukey. Decorre do exposto, uma menor influência da gramatura no intervalo citado.

Segundo BRANDON (1966), já citado, às gramaturas mais altas deverá ocorrer um ponto de máxima e o número de dobras passará a decrescer com o aumento da gramatura. Além da umidade relativa e temperatura ambiente, dois fatores afetam a resistência ao dobramento quais sejam a resistência à tração e flexibilidade da amostra. Aumentado a gramatura, a resistência à tração aumenta, porém a amostra se torna menos flexível. Para baixas gramaturas o aumento na resistência à tração é muito mais importante que o decréscimo na flexibilidade e a resistência ao dobramento aumenta. Um ponto é eventualmente alcançado no qual a diminuição da flexibilidade é mais importante que o aumento

da resistência à tração e então a resistência ao dobramento diminui com o aumento da gramatura.

4.6 — Espessura

É fato reconhecido que a espessura da folha de celulose aumenta com o aumento da gramatura o que pode ser constatado pelo exame dos dados do quadro XI, onde esse aumento se mostrou altamente significativo.

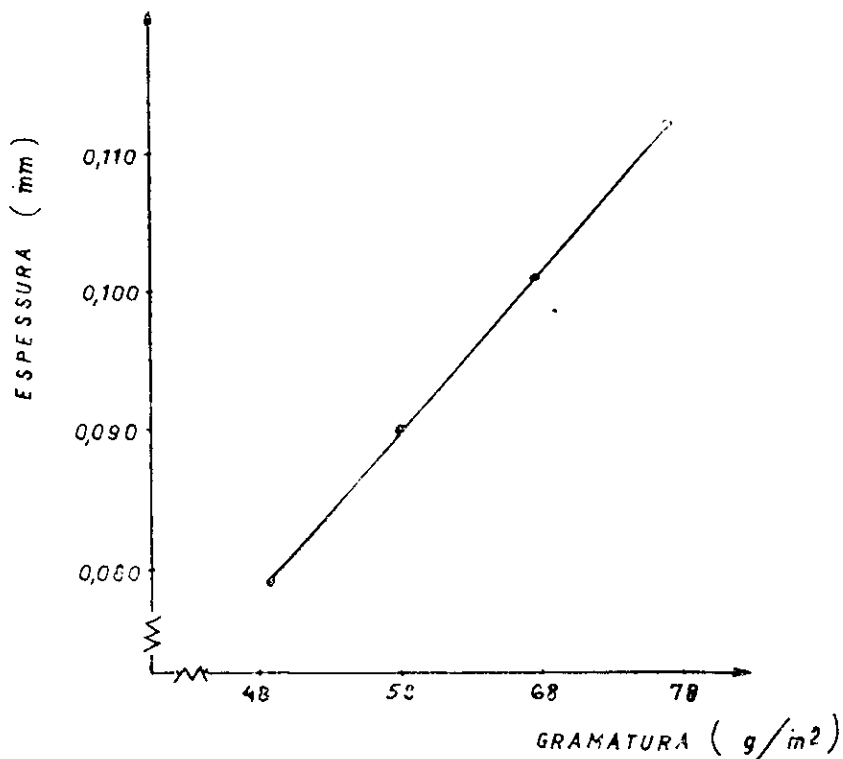


GRÁFICO V — ESPESSURA

Examinando-se o gráfico V verifica-se que o acréscimo na espessura mantém uma relação linear com o aumento da gramatura. Através de regressão a reta obtida pode ser representada pela equação 1.

$$E = 0,00116G + 0,023 \quad (\text{Equação 1})$$

onde

E = espessura em mm

G = gramatura em g/m²

Nos ensaios foram utilizadas 5 folhas superpostas e uma pressão do disco superior do micrômetro igual a 1,0 m/m kg/cm². Qualquer mo-

dificação no procedimento citado implicará numa alteração dos parâmetros da equação 1, porém manter-se-á relação linear.

Pela equação 1 observamos que a reta obtida não passa pela origem das coordenadas, mas corta o eixo das ordenadas no valor 0,023. Isso significa que há um espaço entre as folhas causado pela rugosidade das superfícies das mesmas. É de se esperar que esse valor seja tanto maior quanto mais numerosas foram as superfícies de contato no conjunto de folha.

4.7 — Pêso específico aparente

A gramatura influencia significativamente o pêso específico aparente das folhas de celulose como pode ser verificado pelo exame dos dados do quadro XIV. Analisando os erros padrões da média e os coeficientes de variação contidos no quadro XIII concluímos que dentro de cada tratamento foi muito pequena a variação e que a mesma diminui com o aumento da gramatura.

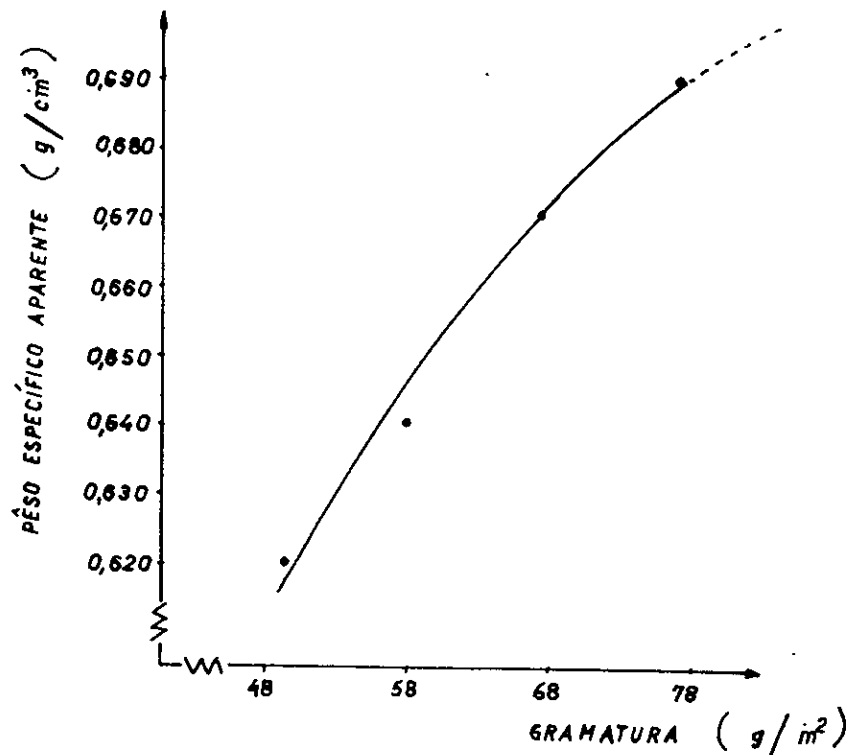


GRÁFICO VI

PÊSO ESPECÍFICO APARENTE

O peso específico aparente é uma propriedade dependente da espessura sendo obtido através da seguinte expressão:

$$Pe = \frac{G}{1000 E}$$

onde

Pe = peso específico aparente em g/cm³

G = gramatura em g/m²

E = espessura em mm

Ao analisarmos os resultados para espessura, estabelecemos a equação que permite obter a espessura em função da gramatura. Se na fórmula do peso específico aparente substituímos a equação da espessura ficaremos com uma expressão que fornece o mesmo em função da gramatura.

$$Pe = \frac{G}{1000(0,00116G + 0,023)}$$

e daí

$$Pe = \frac{1}{1,16 + \frac{23}{G}} \quad (\text{Equação 2})$$

Na equação 2 observamos que o aumento da gramatura corresponde a uma diminuição na relação $\frac{23}{G}$ e, para gramaturas elevadas este termo praticamente se anula. Aplicando-se limite temos:

$$\lim_{G \rightarrow \infty} Pe = \frac{1}{1,16} = 0,862$$

Podemos verificar então que a curva do peso específico aparente tende a se tornar assintótica para o valor $\frac{1}{1,16}$, onde a é o coeficiente angular

da equação da reta que representa graficamente a variação da espessura em relação à gramatura. Esse valor limite foi considerado por GUSTAFSSON et al.(1950) como o "peso específico aparente corrigido" onde os erros causados pela rugosidade das folhas na determinação da espessura são praticamente eliminados.

4.8 — Porosidade

Espessura, peso específico aparente e porosidade são propriedades que mantêm uma certa interdependência.

Como decorrência, para a porosidade a influência da gramatura foi altamente significativa conforme se pode depreender do exame dos dados do quadro XVI.

Aumentando a gramatura também aumentou a espessura e o peso específico aparente, dificultando dessa forma a passagem do ar através da folha de celulose em ensaios; conseqüentemente aumenta o tempo em segundos, pelo qual é expresso a porosidade.

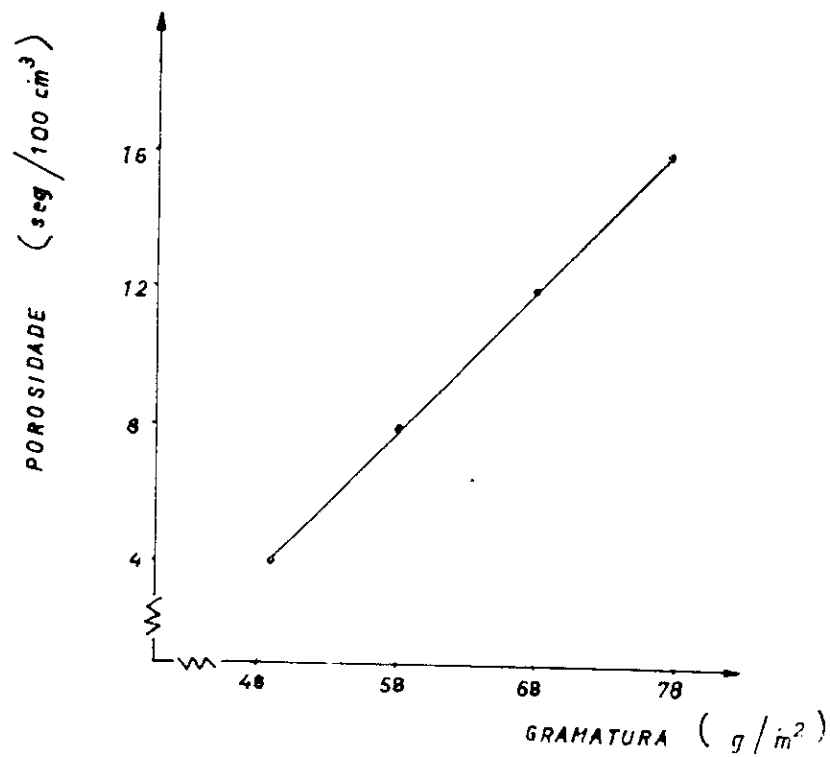


GRÁFICO VII - POROSIDADE

Pela análise dos dados do quadro XV e pelo exame do gráfico VII pode-se verificar que esse aumento foi diretamente proporcional ao aumento da gramatura e a curva que expressa o fenômeno é uma reta cuja equação foi determinada graficamente como sendo:

$$P = 0,39185 G - 14,93$$

onde

P = porosidade expressa em seg/100 cm³ ar

G = gramatura expressa em g/m²

5. BIBLIOGRAFIA

- ABCP — Normas de ensaio — Associação Técnica Brasileira de Celulose e Papel.
- BRANDON, C.E. — 1966. Effect of Basis Weight on Folding Endurance, TAPPI 49(6): 233-235.
- GUSTAFSSON, C. e LARS NORDMAN. 1950. On the Basis Weight, Thickness and Apparent Specific Gravity of Paper. Publ. LXXIII. The Pulp and Paper Finish Laboratory. Finland.
- GRANT, J. 1961. A laboratory Handbook of Pulp and Paper Manufacture. Edward Arnold Publishers LTD. London.
- LIBBY, C.E. 1962. Pulp and Paper Science and Technology. Mc Graw-Hill Book Company. New York.
- TAPPI — Testing Methods and Recommended Practices — Technical Association of Pulp and Paper Industry.

PARA UM ÍNDICE CADA VEZ MAIS
ELEVADO DESTAS REUNIÕES, VOLTEMOS
DESDE JÁ NOSSOS PENSAMENTOS PARA
A III CONVENÇÃO ANUAL DA A B C P,
NO PRÓXIMO ANO.

PROCURE VOCÊ TAMBÉM REALIZAR
UM TRABALHO TÉCNICO.

LEMBRE-SE QUE, COM ISTO, VOCÊ
SE DESENVOLVE E AJUDA O DESENVOLVI-
MENTO TÉCNICO DO SETOR PAPELEIRO.

A B C P