

# AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE PASTAS CELULÓSICAS REFINADAS EM MOINHO PFI E COMPARAÇÃO COM REFINADOR DE DISCOS

*Patrícia Kaji Yasumura*<sup>1</sup>, *Maria Luiza Otero D'Almeida*<sup>1</sup>, *Song Won Park*<sup>2</sup>. (1) IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Estado de São Paulo Telefone: +55 11 37674407 [pkaji@ipt.br](mailto:pkaji@ipt.br) (2) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Luciano Gualberto 380 trv3, São Paulo Brasil. Telefone: +5511 30911171 fax: +5511 38132380; [songwon.park@poli.usp.br](mailto:songwon.park@poli.usp.br)

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é em entender, quantitativa e qualitativamente, a diferença entre o refinador industrial e o moinho PFI, entender melhor a ação de refino neste tipo de moinho, e comparar os dados de propriedades físicas medidas como decorrentes deste tratamento mecânico. Este trabalho foi motivado pelos resultados obtidos no programa interlaboratorial para ensaios em pasta celulósica gerenciados pelo IPT. Com os dados obtidos neste programa foi possível verificar a variação das propriedades físicas das pastas refinadas em diversos moinhos PFI. Assim, realizam-se experimentos a partir de uma pasta celulósica em diversos tempos de refino em moinho PFI e em refinador de discos para que as respostas em características da pasta celulósica refinada em PFI possam ser mais bem entendidas. Finalmente estas diferenças são analisadas e discutidas para cada propriedade física. Comparativamente, o moinho PFI apresenta resultados maiores para o índice de tração, rasgo e arrebentamento, enquanto que o refinador de discos apresenta valores maiores de volume específico e opacidade, para um mesmo °SR.

## PALAVRAS CHAVES

Refinação de pastas, PFI, Refinadores de disco, Celulose e papel.

## ABSTRACT

The main goal of the present work is to understand, quantitatively and qualitatively, the difference between the industrial refiner and PFI mill and to better understand the action of refining in this type of mill. To do this the physical properties of handsheets of pulp refined by both refiners were compared. This work was motivated by the results obtained in the interlaboratorial program for tests in pulp managed by IPT. With the data obtained in this program it was possible to verify the variation of the physical properties of the pulp refined in different PFI mills. Experiments with a pulp in different times of refining in mill PFI and disc refiner were made, so that the answers in characteristics of the pulp refined in PFI mill could be better understood. Finally these differences are analyzed and discussed for each physical property. Compared to the disc refiner, the PFI mill gave larger tensile, tear and burst indexes, while the disc refiner presented larger values of specific volume and opacity, for the same °SR.

## KEYWORDS

Pulp refining; PFI; disc refiners; pulp and paper

## INTRODUÇÃO

As propriedades do papel são influenciadas pelo tipo de fibra utilizado e pelo tratamento ao qual as fibras foram submetidas até a formação da folha. Os tratamentos a que as fibras podem ser submetidas podem ser químicos, como a polpação e o branqueamento, e mecânicos, como a refinação.

O refino possui uma grande influência sobre as propriedades do papel. É uma parte essencial na análise das propriedades, já que a seleção do procedimento de refino pode alterá-las

significativamente. O objetivo do refino em escala laboratorial é obter uma curva que descreva a evolução das propriedades do papel em função do refino aplicado. Isso é feito refinando a pasta celulósica em diferentes tempos e analisando as propriedades finais. O refinador de laboratório mais utilizado ainda é o moinho PFI. É usualmente reconhecido que a curva de refinação do moinho PFI não reproduz a curva de refinadores industriais. Entretanto, de um lado, o moinho PFI tem a capacidade de discriminar diferentes fibras possibilitando resultados comparativos, ou seja, consegue prever com sucesso diferenças em propriedades finais em relação a diferenças do tipo de fibra utilizado e do tratamento ao qual estas fibras foram submetidas até a formação da folha. Além disso, o crescente entendimento do mecanismo de refino ao qual uma fibra é submetida em moinho PFI, que é diferente do mecanismo do refinador de industrial, permite aos pesquisadores utilizarem o moinho PFI como um instrumento de procedimento laboratorial com maior segurança.

Desde a criação em do moinho PFI em 1962 muitos trabalhos têm surgido avaliando-o ou utilizando-o nos seus estudos sobre o refino. Já em 1966, Ebeling e Balac (1966) mostram a influência da consistência do refino, em moinhos PFI e Valley nas propriedades finais das folhas formadas. Outros como Keays, McDowell e Hatton (1977), desenvolveram um método de avaliação por um único ponto de refinação em moinho PFI, estimando o número de revoluções através do histórico do moinho. Hughes (1970) comparou o desempenho dos moinhos PFI e Valley para vários tipos de pasta celulósica.

Cowan (1995a) procurou utilizar os resultados obtidos através do equipamento Pulmac de qualidade de fibras para explicar os resultados de resistência obtidos através de folhas formadas em laboratório, previamente refinadas em PFI. Para isto utilizou os números de qualidade de fibras FS (resistência da fibra), L (comprimento de fibra) e B (ligação de fibras) obtidos pelo equipamento de análise de qualidade de fibras fabricado pelo Pulmac. Através destes dados Cowan (1995a) afirma que com estes parâmetros (FS, L e B) é possível obter uma base confiável para a avaliação da resposta da pasta ao refino. No entanto, em trabalho posterior Cowan (1995b) comparou as propriedades físicas de folhas formadas a partir de pastas celulósicas refinadas em PFI e no moinho Kady fabricado pela Pulmac. O moinho Kady é uma modificação de uma unidade de dispersão pigmentos e partículas usada nas indústrias de tintas, revestimentos e alimentos. Segundo ele, a conclusão é que os resultados obtidos para o moinho PFI não são aqueles obtidos para refinadores comerciais, e que a interpretação de dados obtidos pelo refino em PFI não oferecem mais do que uma direção de como uma dada pastas celulósicas irá se comportar em um ambiente industrial.

Seth (1999) comparou as respostas de pastas celulósicas de fibra longa ao refino em PFI e refinador de laboratório Escher-Wyss, que afirma possuir efeitos mais próximos aos de refinadores comerciais. Segundo ele, os resultados obtidos pelo refino em PFI permitem concluir que este tipo de refinador não consegue prever com precisão a resposta de pastas celulósicas ao refino comercial. Stoere, Nazhad e Kerekes (2001) utilizaram também estes dois tipos de refinadores para estudar o efeito do refino sobre a formação de folha. Os resultados também se apresentam diferentes para os dois refinadores. Segundo os autores isto ocorre devido aos efeitos dos refinadores serem diferentes: no caso do refinador Escher-Wyss ocorre maior fibrilação externa, e no caso do PFI, maior fibrilação interna.

Vários autores propuseram modificações no desenho do moinho PFI para atingir desempenhos mais satisfatórios. Bovin (1978) introduziu placas de metal de 52 mm por 2 mm, com 1 mm de espessura. Estas placas foram afixadas na parede interna da panela de refinação. A finalidade desta modificação foi simular uma refinação industrial utilizando um PFI modificado. Bovin (1978) afirma que não é sempre possível caracterizar diferentes pastas celulósicas de uma maneira relevante após refinação laboratorial, e que o PFI modificado oferece uma maneira de simular a refinação industrial usando uma quantidade menor de amostra.

Para Ghosh (2002) o moinho PFI, apesar de ser tradicionalmente usado nos estudos do impacto do refino na qualidade das fibras em escala laboratorial, fornece poucas informações em termos de definição de parâmetros de refino como carga específica, energia específica, carga e recirculação, juntamente com as outras variáveis de operação.

Welch e Kerekes (1994) procuram desenvolver uma base de comparação entre o moinho PFI e os demais refinadores através do fator  $C$ , que possibilita a estimativa dos valores representativos  $N$  (número de impactos) e  $I$  (intensidade de impactos). O fator  $C$  é definido como sendo um parâmetro

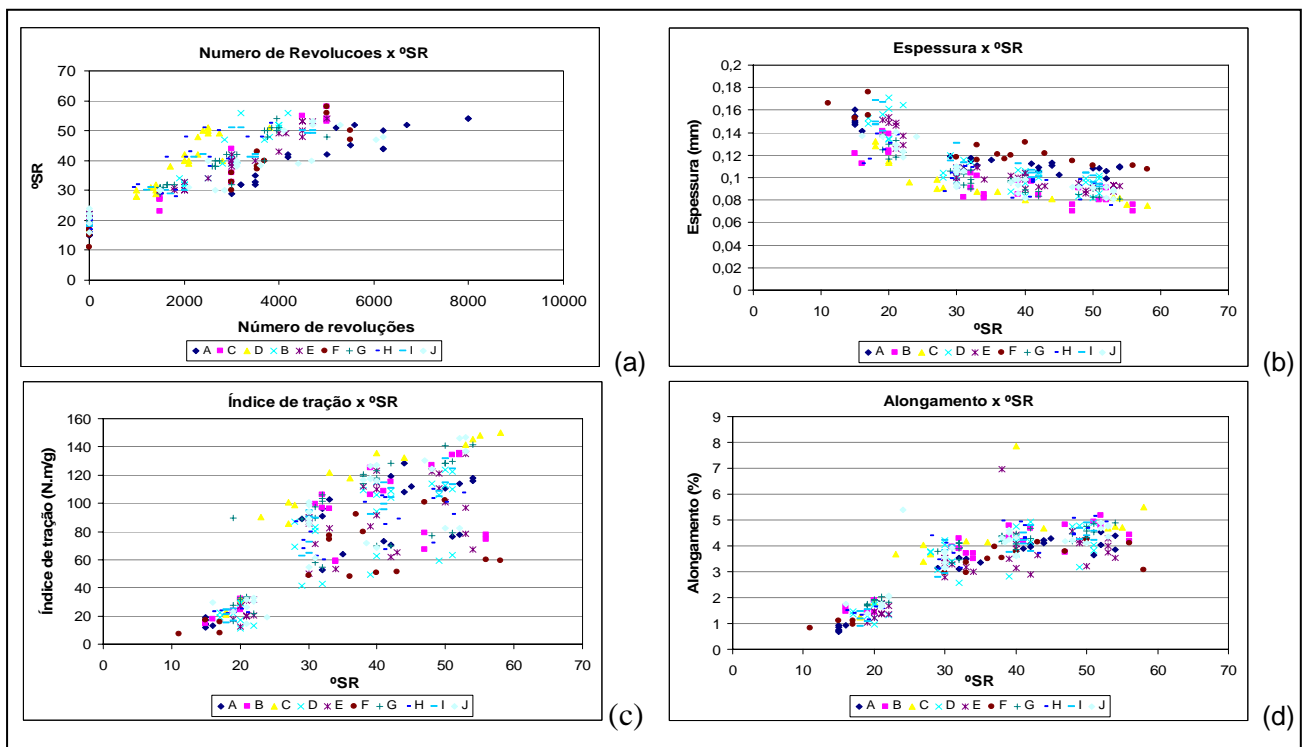
que relaciona o energia líquida de entrada  $P$  e a vazão mássica  $F$ , para um dado refinador, com o número  $N$  e a intensidade de impactos  $I$  imposta às fibras. O estudo de Kerekes et al. (1993) comparou diversos refinadores de disco com o refinador Escher-Wyss para demonstrar a utilidade deste método. Mudanças semelhantes nas propriedades da pasta celulósica são obtidas a valores iguais de  $N$  e  $I$  apesar da grande diferença entre o desenho e operação dos refinadores. Recentemente, Kerekes (2005) publicou uma comparação entre refino em moinho PFI e um refinador cônico.

Entretanto o presente trabalho reporta-se ao Yasumura (2004). Este trabalho foi motivado devido ao programa interlaboratorial de ensaios em pasta celulósica, gerenciado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo que analisa, entre outros ensaios, a refinação em moinhos PFI. Para este ensaio, foram enviadas amostras de pasta celulósica branqueada de fibra curta a dez laboratórios, que realizaram o refino e a formação de folhas em seus equipamentos. O parâmetro de refino utilizado foi a resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler, que fornece valores em  $^{\circ}\text{SR}$ . Cada laboratório realizou o refino em quatro pontos distintos: ao redor de  $30^{\circ}\text{SR}$ ; ao redor de  $40^{\circ}\text{SR}$  e ao redor de  $50^{\circ}\text{SR}$ . Para cada um destes pontos e, incluindo o ponto sem refino, foram formadas folhas, que foram então enviadas ao IPT, onde foram realizados os testes físicos necessários. O procedimento para a refinação de pastas celulósicas em laboratório, em moinho PFI é normalizado pela ABNT, na norma NBR 14345. O procedimento utiliza  $(30,0 \pm 0,5)$  g de pasta celulósica seca em estufa em uma consistência de 10% para cada ensaio no moinho PFI. Os testes escolhidos para análise foram:

Quadro 1: Ensaios realizados para o refino em moinho PFI

Propriedade	Norma	Expressão do resultado	Unidade
Espessura	NM – ISO 534: 2000	Espessura	mm
Resistência ao rasgo	NBR NM – ISO 1974: 2001	Índice de rasgo	$\text{mN.m}^2/\text{g}$
Resistência à tração	NBR NM – ISO 1924-1: 2001	Índice de tração	$\text{Nm/g}$
Alongamento	NBR NM – ISO 1924-1: 2001	Alongamento	%
Permeância ao ar, Gurley	NBR NM – ISO 5636: 2001	Permeância ao ar, Gurley	$\text{s}/100\text{mL}$
Opacidade	NBR NM – ISO 2471: 2001	Opacidade	%

Além destes resultados, cada laboratório enviou ao IPT o número de revoluções e o grau de refino obtido para cada ponto.



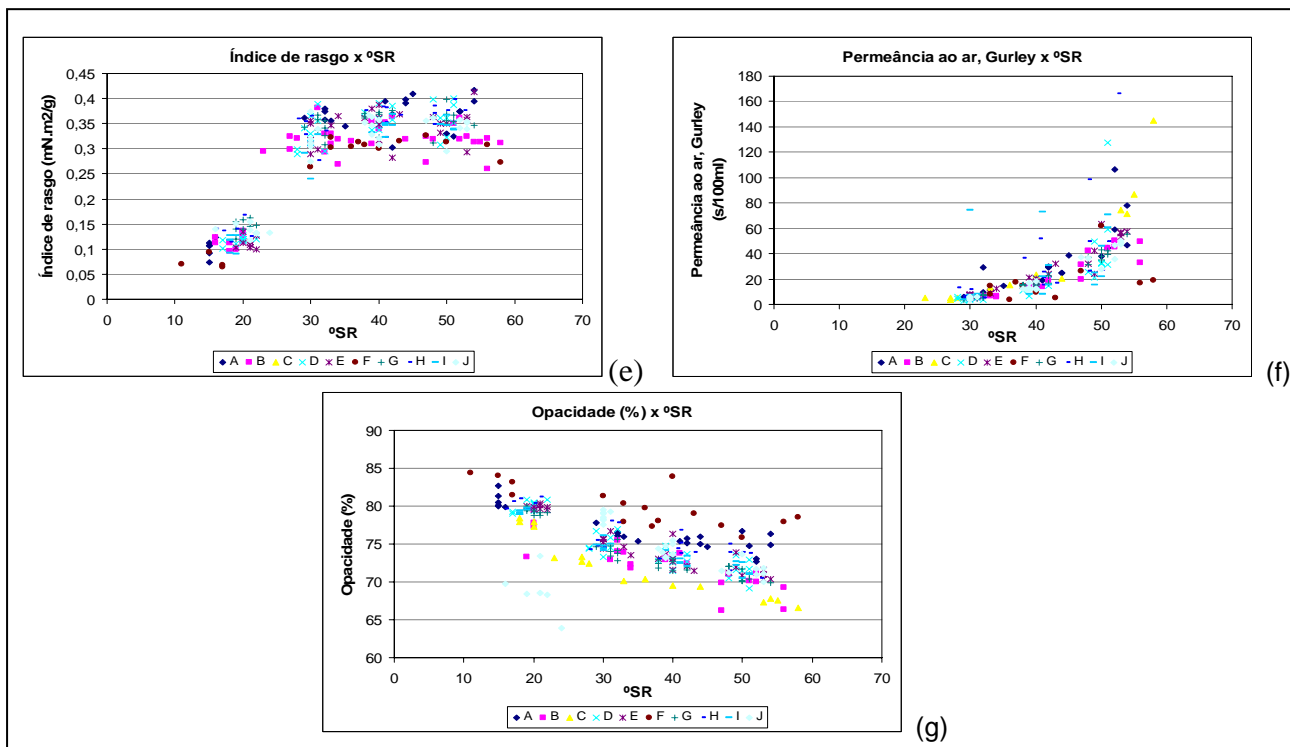


Figura 1: Gráficos que ilustram a variação dos resultados das operações de moinhos PFI de 10 laboratórios diferentes (a legenda indica os códigos dos laboratórios)

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Utilizou-se uma pasta celulósica de eucalipto branqueada, produzida industrialmente. Para a refinação a pasta celulósica foi rasgada manualmente, desagregada e homogeneizada no próprio tanque. As principais partes de um ensaio tradicional de uma pasta celulósica são:

- Desintegrar a pasta celulósica em água;
- Refinar a pasta celulósica em um refinador de escala laboratorial;
- Ensaios para determinação das propriedades da pasta celulósica (por exemplo, drenabilidade);
- Preparação de folhas;
- Prensagem e secagem das folhas;
- Condicionamento das folhas em condições padronizadas de temperatura e umidade;
- Ensaio das propriedades físicas das folhas.

Para este estudo foi utilizado um moinho PFI, descrito anteriormente. Para o procedimento de refino seguiu-se a norma NBR 14345: 1999. Para a comparação do efeito de refino em um moinho PFI e em um refinador de maior intensidade, foi utilizado um refinador de discos.

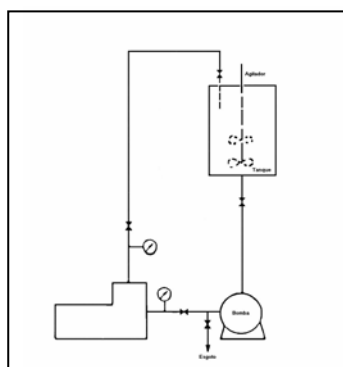


Figura 2: Esquema de instalação do circuito de refinação (de discos).

Este refinador é uma máquina robusta de simples funcionamento, equipada com dois discos refinadores, sendo um deles rotativo e montado no porta disco do eixo principal e o outro estacionário, fixado na tampa. O corpo principal é fabricado em ferro fundido, alojando o conjunto rotativo e a tampa. A comparação foi feita através do refinador de discos simples, com 300 mm de diâmetro e discos com lâminas de: 3mm de largura, espaçamento de 3 mm e inclinação de 5°. Este tipo de disco é o mais indicado para o refino de pastas celulósicas de fibras curtas. O refinador foi acoplado a um variador de velocidade e montado em um circuito de refinação conforme ilustrado na figura ao lado.

A alimentação foi feita através de uma bomba de massa, mantendo-se constantes a vazão e a velocidade de rotação. A refinação foi feita através de passagem contínua pelo equipamento recolhendo-se amostras em tempos determinados na saída para o tanque. A vazão foi mantida constante em 5 m<sup>3</sup>/h.

Seguindo esta ordem para avaliar o processo de refinação nestes dois tipos de refinadores, efetuou-se inicialmente a determinação da resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler, formação de folhas e determinação de características físicas destas folhas. Os métodos utilizados para a pasta celulósica foram:

- Refinação em laboratório – Método PFI – NBR 14345:1999;
- Desagregação a úmido em laboratório – NBR 14030:1998;
- Resistência à drenagem pelo aparelho Schopper-Riegler – NBR 14031:1998;
- Preparação de folhas em laboratório para ensaios físicos – Método convencional – NBR 14479: 2000;
- Determinação das propriedades físicas em folhas formadas em laboratório – NBR 14527: 2002.

As folhas formadas foram condicionadas a  $(23 \pm 1)^\circ \text{C}$  e  $(50 \pm 2)\%$  de umidade relativa, previamente à determinação das suas propriedades físicas. Para avaliar o efeito do refino em moinho PFI e no refinador de discos foram tiradas fotografias da superfície de algumas folhas formadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca JEOL, modelo JSM 5200, no modo SEI (secondary electron image) e em aumentos de 350 e 1000 vezes. As amostras foram preparadas através de recobrimento com uma fina camada de material condutor, no caso, ouro no equipamento marca JEOL, modelo JFC – 1100 (ion sputter). As fotos foram obtidas no Laboratório de Metalografia e Análise de Falhas da Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentadas as fotografias da superfície folhas formadas tiradas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, para alguns pontos de refino com o moinho PFI e de discos. Comparando as micrografias das Figuras 3 e 4 note-se que o moinho PFI produz fibras com maior fibrilação interna, ou seja, com maior conformidade devido ao aumento da sua flexibilidade. Mesmo em um grau de refino de 50°SR, as fibras refinadas em discos apresentam-se menos colapsadas, mas com maior grau de torção (*fiber curl*). Mohlin, Molin e Puiseau (2003) afirmam que o refino em laboratório causa um “endireitamento” das fibras. Nas medições de *zero-span* o “endireitamento” das fibras causa um aumento nos valores obtidos tanto para as medições a seco quanto a úmido. Para se medir a resistência da fibra com o teste *zero-span* é sugerido que o ensaio seja realizado em folhas formadas a partir de fibras “endireitadas”, por exemplo, após refino em moinho PFI a 4 000 revoluções. Portanto, as micrografias concordam com esta afirmação, apresentando fibras mais alinhadas para o PFI e mais “curvadas” para o refinador de discos.

De uma maneira geral, pode-se perceber que os resultados possuem valores maiores para os índices de rasgo, tração e arrebentamento, e para a permeância ao ar, Gurley. Para o volume específico e a opacidade, o refinador de discos apresenta valores maiores. Isto indica que o moinho PFI produz folhas mais resistentes, mas o refinador tipo discos apresenta maior “*bulk*”. Kerekes (2002) obteve para uma pasta Kraft de fibra longa branqueada, na comparação entre o PFI e o refinador Escher-Wyss, resultados semelhantes. Antes de comparar os efeitos produzidos por refinadores diferentes deve-se ter em mente que as lâminas dos discos e o tempo de residência nos refinadores podem ter grande influência nos resultados.

Stoere, Nazhad e Kerekes (2001) explicam que, para moinho PFI e o refinador Escher-Wyss esta diferença de resultados é explicada pela diferença do efeito destes sobre as fibras. O PFI causa maior fibrilação interna que o refinador de disco, ao passo que este apresenta maior fibrilação externa que o PFI. A fibrilação interna aumenta a flexibilidade. Esta informação explicaria o menor volume específico no caso do PFI.

Os resultados das propriedades físicas do refino estão de acordo com as observações realizadas para as micrografias. As propriedades de resistência da pasta obtida por refino em refinador de discos apresentam valores menores, devido, provavelmente, ao formato mais tubular das suas fibras.

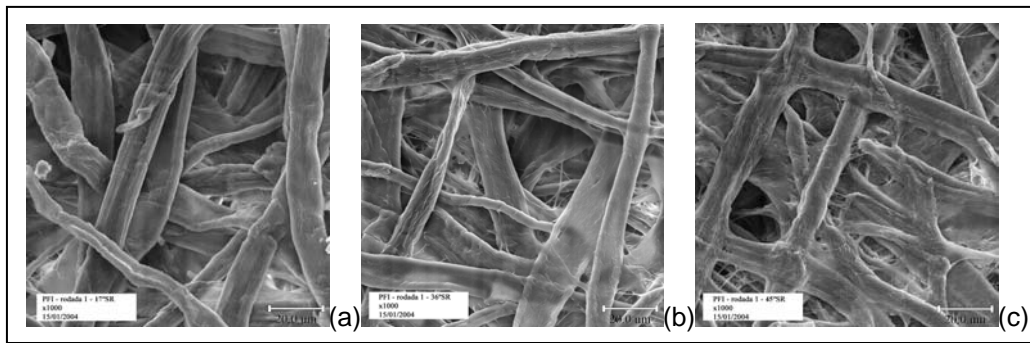


Figura 3: Micrografias (x1000) de fibras refinadas com moinho PFI: (a)17°SR; (b)36°SR; (c)45°SR.

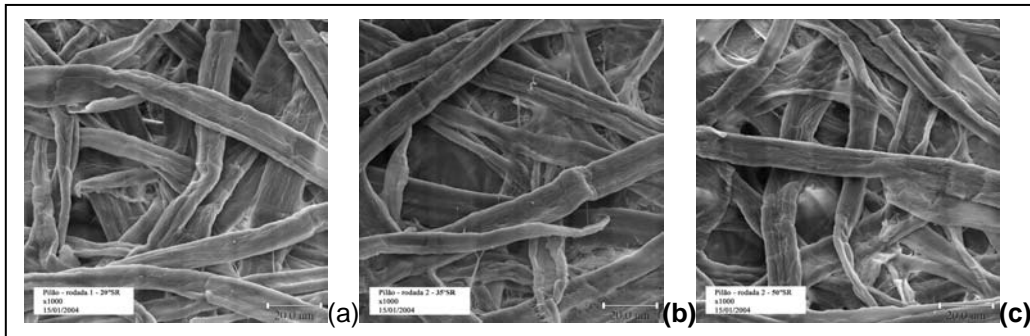


Figura 4: Micrografias (x1000) de fibras refinadas com refinador de discos: (a)20°SR; (b)35°SR; (c) 50°SR.

O PFI é um refinador de baixa intensidade, possui cerca de um décimo da intensidade de refino de refinadores industriais. Um valor representativo da intensidade de refino para o refinador PFI apresentada por Kerekes (2002) é de  $S = 1 \text{ kJ/kg/impacto}$  e para os refinadores industriais a intensidade é da ordem de 10 a 50  $\text{kJ/kg/impacto}$ , para pastas celulósicas de fibra longa.

Para Seth (1999), enquanto que a energia específica de refino em um moinho PFI é muito alta, a intensidade do tratamento é menor do que é praticado em refinadores industriais. Em estudos com o refinador Escher-Wyss (EW), os resultados obtidos por Seth (1999) mostram que um aumento na densidade do papel ou uma diminuição no coeficiente de espalhamento da luz ao longo da curva de refino, é um índice do aumento da área de ligação entre as fibras. Em um dado valor de energia específica, o coeficiente de espalhamento de luz é maior para valores maiores de energia específica. Logo, as fibras refinadas em refinadores que utilizam alta intensidade formam folhas com menos ligações entre as fibras. Seth (1999) em seus estudos também utilizou um moinho PFI, que apresentou folhas com melhor ligação entre as fibras.

Uma possível explicação para estes resultados seria que, com uma intensidade de refino menor, as fibras sofrem um maior número de impactos, que são mais suaves. Assim, o tratamento é homogêneo e as fibras apresentam maior fibrilação interna e, conseqüentemente, maior conformidade, gerando papéis com maior resistência e menor opacidade. Em refinadores de maior intensidade de refino, o tratamento é heterogêneo e as fibras recebem menor número de impactos, mas cada impacto é mais forte.

Para auxiliar no entendimento dos efeitos dos refinamentos na pasta celulósica, realizou-se a análise das fibras para ambos os refinamentos, em quatro pontos distintos. Estes resultados estão em acordo com as discussões realizadas acima. Apesar de não se poder quantificar a diferença entre os efeitos dos refinadores, pode-se afirmar qualitativamente que, como esperado o moinho PFI apresentou fibras com comprimento médio maior, pois o refinador de discos, que tem intensidade de refino maior, possui tratamento mais agressivo, causando a diminuição do comprimento médio das fibras. Em relação ao *coarseness*, ou seja, a massa por unidade de comprimento das fibras, observa-se o refinador de discos produz fibras com menor *coarseness* devido à fibrilação externa que causa o arrancamento das camadas externas das fibras. O PFI com menor intensidade de refino produz fibras com maior fibrilação interna.

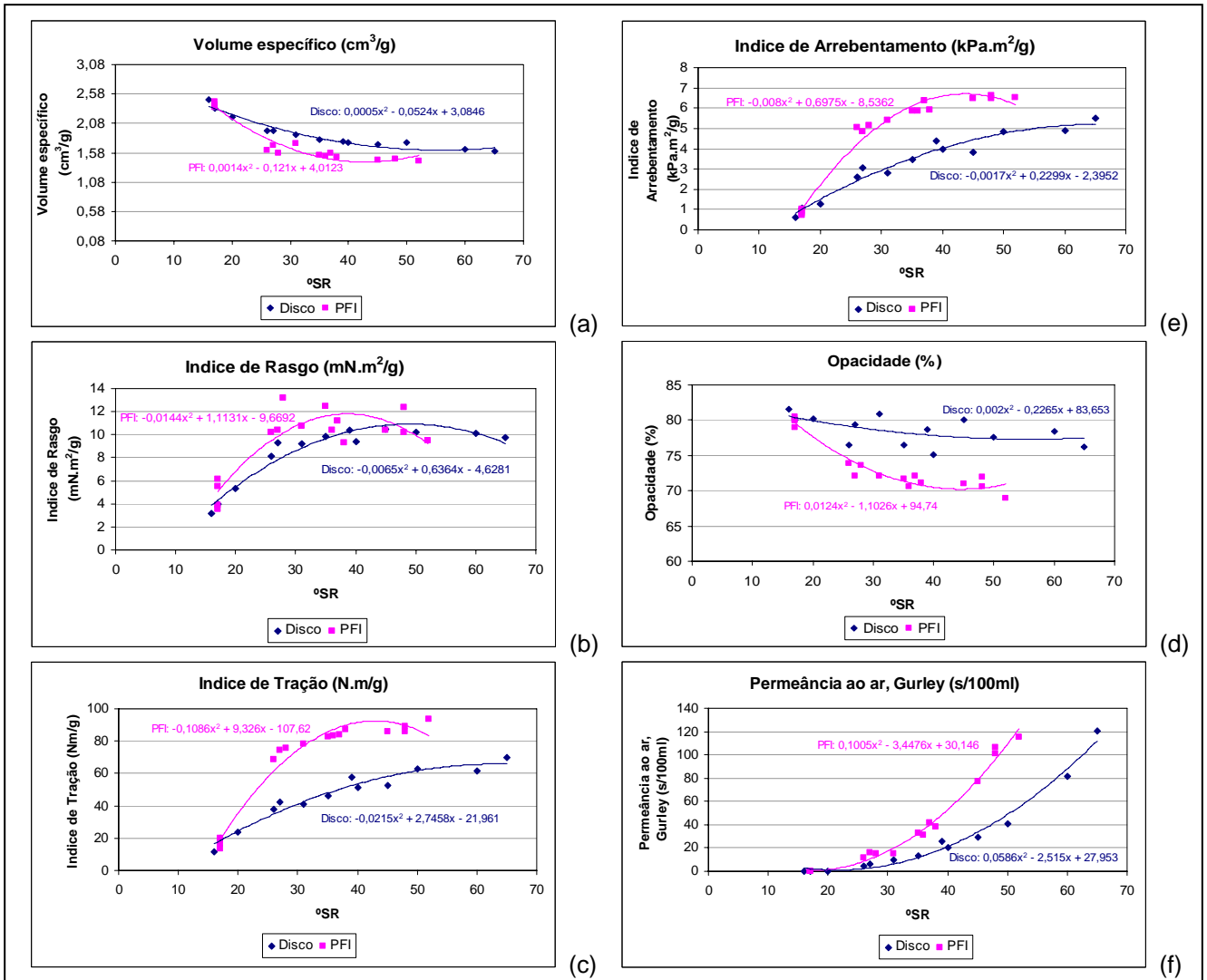


Figura 5: Comparação entre o efeito do refino em moinho PFI e de discos

Tabela 1: Resultados da análise de fibras para o refino em moinho PFI e refinador de discos

Refinador	°SR	Comprimento Médio (mm)	Coarseness (mg/100m)	Nº de fibras (10 <sup>6</sup> /g)
PFI	17	0,71	8,53	19,72
	26	0,71	9,14	19,75
	36	0,73	8,87	20,15
	45	0,70	8,67	20,99
Discos	26	0,69	8,18	22,23
	35	0,68	7,87	23,33
	40	0,68	8,11	23,26
	50	0,65	7,45	26,07

## CONCLUSÕES

Os gráficos da Figura 5 mostram que o moinho PFI produz pastas celulósicas com maior resistência, mas com menor *bulk* e menor opacidade que as pastas refinadas em refinador de discos, para um dado grau de refino (°SR), o que concorda com as conclusões de Kerekes (2005).

Em Kerekes (2005), o efeito do refino em moinho PFI e refinador Escher-Wyss (EW) em uma pasta celulósica kraft de fibra longa branqueada são comparados. Inicialmente foi considerado uma comparação de pares de propriedades, como resistência à tração em uma dado *freeness*. Neste

caso, a pasta refinada em moinho PFI apresenta maior resistência em um dado *freeness*. No entanto, Kerekes (2005) mostra que os resultados são reversos quando comparados na mesma energia. Em uma energia específica comum, o refinador EW produz uma pasta com maior resistência que um moinho PFI. Este fato também é verdade para refinadores industriais. A resistência ao rasgo após o refino no EW diminui em um grau mais acentuado à mesma energia. As diferenças entre as comparações baseadas no *freeness* e na energia são explicadas, em parte, pela mudança significativamente maior em *freeness* produzido pelo refinador EW em uma dada energia.

As curvas levantadas na Figura 5 podem ser facilmente obtidas pelos laboratórios para seus equipamentos, fazendo uma comparação entre o moinho PFI e seus refinadores industriais. A partir destas curvas, os laboratórios podem, por exemplo, com um novo ponto de refino em moinho PFI, estimar a resposta da pasta celulósica no refinador industrial, considerando que as características das pastas celulósicas utilizadas sejam similares. Assim, pode-se estimar o grau de refino necessário para atingir uma propriedade física determinada realizando apenas um refino em moinho PFI.

Porém, os dados apresentados neste trabalho não podem ser generalizados para qualquer moinho PFI. Como mostrado na Figura 1, cada laboratório deve realizar a comparação em seus próprios equipamentos, já que a diferença entre as condições de operação de cada moinho PFI é grande.

Realizada a caracterização da ação de refino dos refinadores, os laboratórios podem então obter as características em termos de energia de seus refinadores e assim, obter uma estimativa para ajustes de controle de seus refinadores industriais.

## BIBLIOGRAFIA

- Ebeling, K.; Balac, J-P. High Consistency Refining. **Paperi ja Puu**, Specialnummer 4a, p. 121-123; 125-128, 1966.
- Keays, J.L.; Mcdowell, P.F.; Hatton, J.V. Single-point procedure for PFI-mill evaluation of softwood kraft pulps. **Tappi Journal**, vol. 60, n. 6, p. 81-83, June 1977.
- Hughes, F.P. A Comparison of the performance of the Valley and PFI laboratory Beaters, **Pulp and Paper Magazine of Canada**, vol. 71, n.16, Aug. 1970.
- Cowan, W.F. Explaining handsheet tensile and tear in terms of fiber-quality numbers. **Tappi Journal**, vol. 78, n. 1, p.101-106, Jan. 1995a.
- Cowan, W.F. High-shear laboratory beating and fiber-quality testing offer new insights into pulp evaluation. **Tappi Journal**, vol. 78, n. 3, p.133-137, Mar. 1995b.
- Seth, R.S. Beating and refining response of some reinforcement pulps. **Tappi Journal**, vol. 82, n. 3, p.147-155, Mar. 1999.
- Stoere, P.; Nazhad, M.; Kerekes, R. An Experimental study of the effect of refining on paper formation. **Tappi Journal Peer Reviewed Paper**, vol. 84, n. 7, July 2001.
- Bovin, A. Laboratory beating in paper pulp characterization. **Svensk Papperstidning**, n. 11, p. 359-364, May. 1978.
- Ghosh, A.K. Use of a pilot refiner and screening system to improve stock quality. **Appita Journal**, vol. 55, n. 2, p.112-117; 122. Mar. 2002.
- Welch, L.V.; Kerekes, R.J. Characterization of the PFI mill by the C-factor. **Appita Journal**, vol. 47, n. 5, p. 387-390, Sept. 1994.
- Kerekes, R.J.; Clara, M.; Dharni, S.; Martinez, M. Application of the C-factor to characterize pulp refiners. **Journal of Pulp and Paper Science**, vol. 19, n.3, May 1993.
- Kerekes, R.J. Characterizing refining action in PFI mills. **Tappi Journal**, vol. 4, n.3, p.9-14, Mar. 2005.
- YASUMURA, P.K. **Avaliação de propriedades físicas de pastas celulósicas refinadas em moinho PFI**. São Paulo, 2004. 172p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- KERKES, R.J. Characterizing refining action in PFI mills. **Tappi Paper Summit**, 2002.