



Diagnóstico da lavagem de polpa marrom através de parâmetros de filtração

Diagnostic of brownstock washing using basic filtration parameters

Autores: C. R. F. Pacheco*
J.L. de Paiva*
A. S. Reynol Júnior*

Palavras-chave: Lavagem, filtração, polpa marrom, filtro rotativo a vácuo.

RESUMO

Apresentam-se a modelagem e o cálculo da operação de lavagem pelo filtro cilíndrico rotativo a vácuo. Elaborou-se um modelo matemático baseado na teoria fundamental de filtração a pressão constante e a partir de parâmetros empíricos, determinados experimentalmente. Foi aplicada a técnica do System Engineering Analysis de modo a se obterem os valores das variáveis operacionais em todas as seções que compõem o filtro, permitindo-se, assim, um diagnóstico de sua operação. Os resultados da eficiência da lavagem e da capacidade de filtração são apresentados em um estudo paramétrico.

INTRODUÇÃO

A lavagem de polpa marrom é a operação em que material orgânico e substâncias químicas inorgânicas dis-

Abstract

It was showed the modeling and calculation of washing operation by a rotary drum vacuum filter. A mathematical model was elaborated based on the fundamental theory of filtration at constant pressure and from empiric parameters, determined experimentally. It was applied the technique of "System Engineering Analysis" to obtain the values of the operational variables in all section that composes the filter, allowing the diagnosis of the filter operation. A parametric study is done to obtain the washing efficiency and the filtration capacity.

Keywords: washing, filtration, brownstock washing, rotary drum vacuum filter.

solvidas são separadas das fibras celulósicas. Um dos propósitos da lavagem é remover o licor residual que poderia contaminar a pasta durante etapas subsequentes do processo. Outro objetivo é recuperar substâncias dissolvidas de valor, como o material orgânico do licor negro utilizado como combustível na caldeira de recuperação e substâncias químicas inorgânicas para a regeneração do licor branco para o cozimento. Uma lavagem eficiente exige o controle do volume do fluido de lavagem adicio-

nado ao sistema. Empregando-se grandes quantidades de fluido de lavagem, obtém-se uma polpa mais limpa, porém, para uma eficiente operação do sistema de recuperação, necessita-se de uma diluição mínima do licor negro, de modo a minimizar o gasto de energia no processo de evaporação. Por outro lado, no caso de uma lavagem insuficiente, tem-se excessiva perda de licor negro, afetando o balanço térmico da linha e de produtos químicos do setor de recuperação, além de maior consumo de

Referências dos autores:

* Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Química (São Paulo, Brasil). E-mail: crfp@usp.br, jolpaiva@usp.br, reynolas@airproducts.com

agentes oxidantes no branqueamento gerando maior carga poluidora. Portanto, a execução de uma lavagem eficiente contribui significativamente para um melhor balanço energético, um menor consumo de água e de produtos químicos e a diminuição da geração de efluentes poluidores.

Um dos primeiros equipamentos utilizados em operações contínuas para lavar a polpa marrom foi o filtro cilíndrico rotativo a vácuo, que ainda hoje é empregado. O filtro consiste em um tambor perfurado recoberto por um meio filtrante, geralmente uma malha sintética ou de metal. Durante a operação, o tambor é parcialmente imerso numa tina alimentada com uma suspensão diluída. O vácuo aplicado através do tambor do filtro extrai parte do licor negro da suspensão de polpa marrom formando uma torta na superfície do meio filtrante. Conforme o tambor gira, os chuveiros espalham o fluido de lavagem por sobre a torta de polpa, deslocando o licor presente na torta por um licor com uma concentração menor de sólidos. A torta é, então, separada da superfície do meio filtrante pela interrupção do vácuo. Um sistema de lavagem usa um número de filtros, idênticos ou diferentes, em série, com o filtrado a escoar em contracorrente em relação à polpa marrom a ser lavada.

Neste artigo, o filtro cilíndrico rotativo a vácuo foi decomposto em operações unitárias, e, para cada uma, elaborou-se um modelo matemático baseado na teoria fundamental de filtração a pressão constante. Desenvolveu-se um algoritmo a partir da metodologia System Engineering Analysis - conforme Rudd e Watson (1968), Barton (1995) e Barton (1998) - de maneira a se terem disponíveis os valores das variáveis operacionais em todas as seções de entrada e saída das operações unitárias que compõem o filtro cilíndrico rotativo a vácuo, permitindo, nesta descrição, um diagnóstico de operação.

Os resultados obtidos pelo procedimento de cálculo dispõem informações complementares àquelas constantes do painel de controle e/ou obtidas por análises químicas usuais feitas no sistema de filtro lavador. Configura-se, assim, uma importante ferramenta no diagnóstico e gerenciamento da operação de lavagem de polpa marrom.

ANÁLISE DO FILTRO LAVADOR ROTATIVO A VÁCUO

O filtro cilíndrico rotativo a vácuo pode ser dividido em módulos de operações unitárias. Segundo Edwards *et al.* (1986), tal procedimento é importante para melhor compreensão do processo de lavagem. No esquema ilustrado pela Figura 1, a suspensão de alimentação (1) é diluída em um tanque agitado, que alimenta a tina de filtração com uma suspensão a determinada consistência. A polpa diluída (2) é transferida para a tina de filtração, onde a água é drenada através de filtração para a formação da torta em um tambor de sucção. Quando a região do tambor entra no setor de lavagem (4), o fluido lavador (7) desloca o fluido presente na torta (8), a qual (6) sofre uma última

drenagem em que é engrossada (9) para ser descarregada para o próximo equipamento da linha de operação. No presente estudo, os filtrados provenientes da filtração (5), da lavagem (8) e da drenagem (10) são misturados num tanque do qual uma fração da vazão (11) é dividida, retornando-se uma parte (3) para o módulo de diluição e seguindo a outra (12) para as operações da linha.

MODELO MATEMÁTICO DO FILTRO ROTATIVO A VÁCUO

Um modelo matemático foi desenvolvido para cada um dos módulos da Figura 1, a partir de variáveis específicas.

Cada corrente especificada na Figura 1 pode ser definida pelos seguintes parâmetros: (M_{pi}) vazão mássica de polpa celulósica; (M_{wi}) vazão mássica de água; (SS_{pi}) consistência da suspensão polpa marrom; (W_{pi}) fração de água por polpa; (X_{si}) razão entre a massa de sólidos e a massa de água na suspensão.

W_{pi} pode ser expressa, numa corrente genérica (i), por:

$$W_{pi} = \frac{1 - S_{SPi}}{[S_{SPi}(1 + X_{Si}) - X_{Si}]} \quad (1)$$

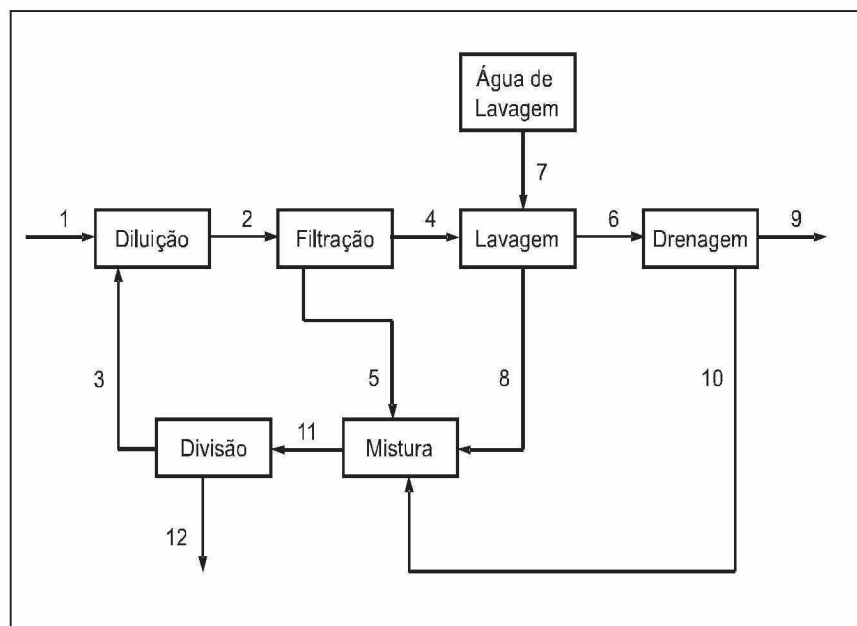


Figura 1. Fluxograma de funcionamento do filtro rotativo a vácuo.

BALANÇO DE MASSA

No estado estacionário, os balanços de massa para cada um dos módulos individuais da Figura 1 são descritos pelas equações abaixo:

Módulo de diluição:

• *Balanço de massa para a polpa celulósica:*

$$M_{P2} = f_1 M_{P1} \quad (2)$$

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{P1} W_{P1} + M_{W3} = M_{P2} W_{P2} \quad (3)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{P1} W_{P1} X_{S1} + M_{W3} X_{S3} = M_{P2} W_{P2} X_{S2} \quad (4)$$

Módulo de filtração:

• *Balanço de massa para a polpa celulósica:*

$$M_{P4} = f_2 M_{P2} \quad (5)$$

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{P2} W_{P2} = M_{P4} W_{P4} + M_{W5} \quad (6)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{P2} W_{P2} X_{S2} = M_{P4} W_{P4} X_{S4} + M_{W5} X_{S5} \quad (7)$$

Módulo de lavagem:

• *Balanço de massa para a polpa celulósica:*

$$M_{P6} = f_3 M_{P4} \quad (8)$$

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{P4} W_{P4} + M_{W7} = M_{P6} W_{P6} + M_{W8} \quad (9)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{P4} W_{P4} X_{S4} + M_{W7} X_{S7} = M_{P6} W_{P6} X_{S6} + M_{W8} X_{S8} \quad (10)$$

Módulo de drenagem:

• *Balanço de massa para a polpa celulósica:*

$$M_{P9} = f_4 M_{P6} \quad (11)$$

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{P6} W_{P6} = M_{P9} W_{P9} + M_{W10} \quad (12)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{P6} W_{P6} X_{S6} = M_{P9} W_{P9} X_{S9} + M_{W10} X_{S10} \quad (13)$$

Módulo do tanque de mistura:

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{W5} + M_{W8} + M_{W10} = M_{W11} \quad (14)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{W5} X_{S5} + M_{W8} X_{S8} + M_{W10} X_{S10} = M_{W11} X_{S11} \quad (15)$$

Módulo do tanque divisor:

• *Balanço de massa para a água:*

$$M_{W3} + M_{W12} = M_{W11} \quad (16)$$

• *Balanço de massa para os sólidos solúveis:*

$$M_{W3} X_{S3} + M_{W12} X_{S12} = M_{W11} X_{S11} \quad (17)$$

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

Para filtrações a pressão constante, o tempo de filtração (t_F) é expresso pela equação (18).

$$t_F = \frac{K_C V_F^2}{2\Delta P_F} + \frac{K_{MF} V_F}{\Delta P_F} \quad (18)$$

sendo:

$$K_C = \frac{\alpha S_{SP2} \rho_S \mu_S}{(1 - S_{SP2} F_{WS}) A_F^2} \quad (19)$$

e

$$K_{MF} = \frac{R_{MF} \mu_S}{A_F} \quad (20)$$

Expressa-se o tempo de filtração (t_F) pela divisão do ângulo do setor de filtração (θ_F) pela velocidade angular do tambor do filtro (ω).

$$t_F = \frac{\theta_F}{\omega} \quad (21)$$

As equações (22) e (23) relacionam as variáveis do módulo de filtração com as variáveis do escoamento dentro do filtro lavador.

$$M_{W5} (1 + X_{S5}) = \rho_S \frac{V_F}{t_F} \quad (22)$$

$$M_{P4} (1 + W_{P4} X_{S4}) = \frac{S_{SP2} \rho_S V_F}{(1 - S_{SP2} F_{WS}) t_F} \quad (23)$$

A fração de água por celulose na torta (W_{P4}) pode ser expressa em função da relação de torta úmida e torta seca (F_{WS}):

$$W_{P4} = \frac{F_{WS} - 1}{(1 - X_{S4}) - F_{WS} X_{S4}} \quad (24)$$

LAVAGEM

A lavagem de uma torta depois da etapa de filtração ocorre por deslocamento e difusão. Para calcular o tempo de lavagem (t_L), assume-se que as condições de escoamento são as mesmas que as existentes ao final da filtração, ou seja, a estrutura da torta não é afetada quando o líquido de lavagem desloca o líquido presente na torta proveniente da filtração.

Semelhante à equação (21), obtém-se o tempo de lavagem (t_L) dividindo-se o ângulo do setor de lavagem (θ_L) pela a velocidade angular do tambor do filtro (ω).

$$t_L = \frac{\theta_L}{\omega} \quad (25)$$

A área de lavagem (A_L) é relacionada com a área de filtração (A_F) e os ângulos de lavagem (θ_L) e filtração (θ_F):

$$A_L = A_F \left(\frac{\theta_L}{\theta_F} \right) \quad (26)$$

No caso de filtros rotativos a vácuo, a área de lavagem (A_L) é diferente da área de filtração (A_F). Dessa forma, temos de corrigir o coeficiente característico da torta (K_{CL}) e o coeficiente característico do meio filtrante (K_{MFL}) para a seção de lavagem - equações (28) e (29), respectivamente. Em filtros nos quais o líquido de lavagem flui em uma só direção e operando a pressão constante, tem-se para o tempo de lavagem (t_L):

$$t_L = \frac{(K_{CL} V_F + K_{MFL}) V_L}{\Delta P_L} \quad (27)$$

sendo:

$$K_{CL} = K_C \left(\frac{\theta_L}{\theta_F} \right) \quad (28)$$

e

$$K_{MFL} = K_{MF} \left(\frac{\theta_L}{\theta_F} \right) \quad (29)$$

A equação (30) relaciona o tempo (t_L) e o volume (V_L) com o balanço de massa da etapa de lavagem.

$$M_{W8} (1 + X_{S8}) = \rho_8 \frac{V_L}{t_L} \quad (30)$$

EFICIÊNCIA DA LAVAGEM

Segundo Gullichsen (2000) e Casey (1980), dois parâmetros determinam o desempenho do sistema de lavagem: o fator de diluição (FD) e a relação de deslocamento (RD). A quantidade de água usada para lavar a polpa normalmente é expressa pelo fator de diluição (FD), que é definido como a quantidade de água de lavagem excedente àquela requerida idealmente para um deslocamento total. Um fator de diluição negativo representa o caso em que se acrescenta menos água de lavagem ao sistema do que a quantidade de água que deixa o lavador. A equação (31) prevê a expressão matemática para o fator de diluição (FD):

$$FD = \left(\frac{M_{W7}}{M_{P2}} \right) - W_{P9} \quad (31)$$

A eficiência de um único estágio de lavagem na remoção de sólidos da polpa pode ser expressa em termos da relação de deslocamento (RD), que é definida como a relação entre a redução de sólidos num único estágio com a máxima redução possível naquele estágio. A equação (32) expressa a relação de deslocamento (RD) em função das frações de sólidos solúveis (X_{si}):

$$RD = \left(\frac{X_{S2} - X_{S9}}{X_{S2} - X_{S7}} \right) \quad (32)$$

Define-se, também, o rendimento da lavagem (Y) de acordo com o balanço de massa de sólidos solúveis:

$$Y = \frac{M_{W12} X_{S12} - M_{W7} X_{S7}}{M_{P1} W_{P1} X_{S1}} \quad (33)$$

Nordén (1973) *apud* Rogers *et al.* (1995) propõe outro método para medir a eficiência da lavagem da polpa. O número de Nordén (E) - equação (34) - é definido como o número de estágios ideais de lavagem por extração em contracorrente, necessários para se obter o mesmo desempenho que um dado lavador com a mesma consistência de descarga e fator de diluição. Como a consistência de descarga é variável, este método não pode ser usado diretamente para comparar lavadores com diferentes consistências de descarga.

$$E = \frac{\log \left(\frac{W_{P2} \left(\frac{X_{S2} - X_{S11}}{X_{S9} - X_{S7}} \right)}{W_{P9}} \right)}{\log \left(\frac{M_{W7}}{M_{P9} W_{P9}} \right)} \quad (34)$$

RENDIMENTO LOCAL DA LAVAGEM

O rendimento local (Y_L) para o módulo de lavagem pode ser expresso por:

$$Y_L = \frac{M_{P4} W_{P4} X_{S4} + M_{W7} X_{S7} - M_{P6} W_{P6} X_{S6}}{M_{P4} W_{P4} X_{S4} + M_{W7} X_{S7}} \quad (35)$$

Substituindo-se a equação (10) na equação (35), tem-se:

$$Y_L = \frac{M_{W8} X_{S8}}{M_{P6} W_{P6} X_{S6} + M_{W8} X_{S8}} \quad (36)$$

A equação (37) determina o limite inferior para a lavagem (Y_{Li}), no qual se admite estágio de equilíbrio. Neste caso, tem-se a mistura perfeita do licor presente na torta com o licor aplicado pelos chuveiros. Assim, $X_{S6} = X_{S8}$.

$$Y_{Li} = \frac{M_{W8}}{M_{P6} W_{P6} + M_{W8}} \quad (37)$$

A equação (38) expressa o limite superior para o rendimento da lavagem (Y_{Ls}). Neste caso, admite-se que todo licor presente na torta é deslocado pelo licor aplicado pelos chuveiros, cujo escoamento do licor é pistonado, ou seja, $X_{S6} = X_{S7}$.

$$Y_{Ls} = 1 - \frac{M_{P6} W_{P6} X_{S7}}{M_{P4} W_{P4} X_{S4} + M_{W7} X_{S7}} \quad (38)$$

Assim, o rendimento da lavagem (Y_L) pode ser expresso em termos do limite superior (Y_{Ls}) e o limite inferior da lavagem (Y_{Li}), pela relação:

$$Y_L = Y_{Ls} x_f + (1 - x_f) Y_{Li} \quad (39)$$

Sendo: $x_f \rightarrow 0$ implica "mistura perfeita" e $x_f \rightarrow 1$ implica "pistonado".

HIPÓTESES DO MODELO

As seguintes hipóteses foram adotadas para a resolução do sistema de equações:

1. Não há perda de polpa celulósica no filtro; portanto, $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 1$

2. A perda de carga na lavagem (ΔP_L) é igual a perda de carga na filtração (ΔP_F):

$$\Delta P_L = \Delta P_F \quad (40)$$

3. A quantidade de sólidos solúveis na corrente 4 ($M_{P4}W_{P4}X_{S4}$) é desprezível em relação à quantidade de polpa celulósica (M_{P4}). Assim, a equação (23) pode ser simplificada:

$$M_{P4} = \frac{S_{SP2}P_5}{(1 - S_{SP2}F_{WS})} V_F \quad (41)$$

4. A quantidade de sólidos solúveis ($M_{W5}X_{S5}$) nas correntes 5 e 8 é desprezível em relação à quantidade de água (M_{W5}); portanto, as equações (22) e (30) podem ser simplificadas para:

$$M_{W5} = \rho_5 \frac{V_F}{t_F} \quad (42)$$

$$M_{W8} = \rho_8 \frac{V_L}{t_L} \quad (43)$$

5. As concentrações de sólidos solúveis nas correntes de entrada e saída dos estágios de filtração, drenagem, tanque divisor são idênticas. Assim, a fração X_{Si} nestes estágios é expressa, respectivamente, da seguinte maneira:

$$\Delta P_L = \Delta P_F \quad (44)$$

$$X_{S5} = X_{S2} \quad (45)$$

$$X_{S9} = X_{S6} \quad (46)$$

$$X_{S10} = X_{S6} \quad (47)$$

$$X_{S11} = X_{S3} \quad (48)$$

$$X_{S12} = X_{S3} \quad (49)$$

6. O valor da fração de sólidos X_{Si} é muito pequeno em relação à fração W_{Pi} . Assim, as equações (1) e (24) podem ser simplificadas para:

$$W_{Pi} = \frac{1 - S_{SPi}}{S_{SPi}} \quad (50)$$

$$W_{P4} = F_{WS} - 1 \quad (51)$$

O valor da resistência específica da torta (α) é determinado experimental-

mente pelo procedimento *Leaf Test* descrito por Reynol (2005). Para tortas celulósicas, compressíveis, este valor pode ser estimado para diferentes pressões de filtração, pela equação (52):

$$\alpha = 7,76 \cdot 10^5 \Delta P_C^{0,77} \quad (52)$$

SYSTEM ENGINEERING ANALYSIS

Se um sistema de equações é composto por λ equações não lineares e λ variáveis, este sistema apresenta uma única solução. Entretanto, o número de maneiras em que as equações podem ser ordenadas é igual a $(\lambda!)^2$. Dessa forma, se λ é um número maior ou igual que 3, a estrutura do algoritmo de cálculo não pode ser feita por inspeção. Deve-se, então, buscar um método mais sistemático para fazê-lo.

Para tal, pode ser utilizado o algoritmo descrito por Rudd e Watson (1968), Barton (1995) e Barton (1998), obtendo-se um conjunto de equações e variáveis que serão calculadas através dessas equações. Tal procedimento foi detalhado por Reynol *et al.* (2005) e Reynol (2005).

ALGORITMO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O equacionamento do filtro apresenta um número de variáveis igual a $\sigma = 61$ e um número de equações igual a $\lambda = 43$; portanto, o grau de liberdade do sistema é $GL = \sigma - \lambda = 18$. Dessa forma, deve-se assumir o prévio conhecimento das seguintes variáveis de projeto:

Para as condições operacionais:

- Fator de Diluição (FD).
- Consistência da suspensão de polpa marrom na entrada do filtro (S_{SP1}).
- Consistência da suspensão de polpa marrom na saída do filtro (S_{SP9}).
- Fração de sólidos solúveis na entrada do filtro (X_{S1}).
- Fração de sólidos solúveis aplicado pelo chuveiro (X_{S7}).
- Velocidade angular do cilindro do filtro: ω .

Para o módulo de filtração:

- Umidade da torta: F_{WS} .
- Perda de carga durante a filtração: ΔP_F .
- Resistência do meio filtrante: R_{MF} .
- Consistência da suspensão de polpa marrom na tina do filtro (S_{SP2}).
- Resistência específica da torta: α .
- Viscosidade dinâmica do filtrado na corrente de saída 5: μ_5 .
- Densidade do filtrado na corrente de saída 5: ρ_5 .

Para o módulo de lavagem:

- Densidade do filtrado na corrente de saída 8: ρ_8 .

Para as características do filtro:

- Área de filtração: A_F .
- Ângulo do setor de filtração: \hat{e}_F .
- Ângulo do setor de lavagem: \hat{e}_L .

Rendimento local da lavagem:

- Fator x_f .

O algoritmo do procedimento de cálculo é alimentado com os dados acima, ou seja, com as variáveis de projeto. A seqüência de cálculo pode ser resumida a seguir:

1. t_F é calculado pela equação (21);
2. t_L é calculado pela equação (25);
3. K_C é calculado pela equação (19);
4. K_{MF} é calculado pela equação (20);
5. A_L é calculado pela equação (26);
6. Com K_C , calcula-se K_{CL} pela equação (28);
7. Com K_{MF} , calcula-se K_{MFL} pela equação (29);
8. ΔP_L é calculado pela equação (40);
9. Com K_C , K_{MF} e t_F , obtém-se V_F pela equação (18);
10. Com K_{CL} , K_{MFL} , t_F , ΔP_L e V_F , obtém-se V_L pela equação (27);
11. Com V_F e t_F , calcula-se M_{P4} pela equação (41);
12. M_{P2} com M_{P4} pela equação (2);
13. M_{P1} com M_{P2} pela equação (5);
14. M_{P6} com M_{P4} pela equação (8);
15. M_{P9} com M_{P6} pela equação (11);
16. Com V_F e t_F , calcula-se M_{W5} pela equação (42);

17. Com V_L e t_L , calcula-se M_{W8} pela equação (43);
18. W_{P1} é calculado pela equação (50);
19. W_{P2} é calculado pela equação (50);
20. W_{P9} é calculado pela equação (50);
21. W_{P4} é calculado pela equação (51);
22. M_{W7} com M_{P2} e W_{P9} pela equação (31);
23. Com M_{P4} , W_{P4} , M_{W7} , M_{P6} e M_{W8} , calcula-se W_{P6} pela equação (9);
24. Com M_{P6} , W_{P6} , M_{P9} e W_{P9} , calcula-se M_{W10} pela equação (12);
25. Com M_{W3} , M_{W8} e M_{W10} , calcula-se M_{W11} pela equação (14);
26. Com M_{P1} , W_{P1} , M_{P2} e W_{P2} , calcula-se M_{W3} pela equação (3);
27. Com M_{W11} e M_{W3} , calcula-se M_{W12} pela equação (16);
28. Assumimos o valor inicial para X_{S4} ;
29. Assumimos o valor inicial para X_{S8} ;
30. Início do loop X_{S8} ;
31. Início do loop X_{S4} ;
32. Com M_{P6} , W_{P6} e M_{W8} , calcula-se Y_{Li} pela equação (37);
33. Com M_{P4} , W_{P4} , X_{S4} , M_{P6} , W_{P6} , M_{W7} calcula-se Y_{Ls} pela equação (38);
34. Com Y_{Li} e Y_{Ls} , calcula-se Y_L pela equação (39);
35. Com M_{P4} , W_{P4} , X_{S4} , M_{P6} , W_{P6} , M_{W7} e Y_L , calcula-se X_{S6} pela equação (35);
36. X_{S9} com X_{S6} pela equação (46);
37. X_{S10} com X_{S6} pela equação (47);
38. Com M_{P4} , W_{P4} , M_{P6} , W_{P6} , X_{S6} , M_{W7} , M_{W8} e X_{S8} , calcula-se X_{S4C} pela equação (10);
39. Usando o valor de X_{S4} e X_{S4C} para calcular um novo valor de X_{S4} e retornando ao passo 31 até atingir a convergência;
40. X_{S2} com X_{S4} pela equação (44);
41. X_{S5} com X_{S2} pela equação (45);
42. Com M_{P1} , W_{P1} , M_{P2} , W_{P2} , X_{S2} e M_{W3} , calcula-se X_{S3} pela equação (4);
43. X_{S11} com X_{S3} pela equação (48);
44. X_{S12} com X_{S3} pela equação (49);
45. X_{S8C} com M_{W3} , X_{S5} , M_{W8} , M_{W10} , X_{S10} , M_{W11} e X_{S11} pela equação (15);
46. Usando o valor de X_{S8} e X_{S8C} para calcular um novo valor de X_{S8} e retornando ao passo 30 até atingir a convergência;
47. RD com X_{S2} e X_{S9} pela equação (32);

48. Y com M_{P1} , W_{P1} , M_{W7} , M_{W12} e X_{S12} pela equação (33);
49. E com M_{P9} , W_{P9} , X_{S2} , X_{S9} , X_{S11} , M_{W7} e X_{S9} pela equação (34).

VALORES INICIAIS PARA O PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Para avaliar o modelo desenvolvido para o diagnóstico da operação de lavagem de polpa marrom, foram adotadas as condições abaixo, representativas das condições de um filtro lavador de polpa marrom industrial.

Para as condições operacionais:

- $FD = 2$ a 6 ;
- $S_{SP1} = 0,12$ kg de sólido seco / kg de suspensão ou 12% ;
- $S_{SP9} = 0,12$ kg de sólido seco / kg de suspensão ou 12% ;
- $X_{S1} = 0,005$ kg de sólido solúvel / kg de licor;
- $X_{S7} = 0,0005$ kg de sólido solúvel / kg de licor;
- $\omega = 0,1$ a 1 rd s^{-1} ou $0,96$ a $9,6$ rpm.

Para o módulo de filtração:

- $F_{WS} = 18$;
- $\Delta P_F = 13332$ a 66661 Pa;
- $R_{MF} = 1,00.10^7$ a $1,00.10^9$ m^{-1} ;
- $S_{SP2} = 0,01$ a $0,04$ kg de sólido seco/kg de suspensão ou 1% a 4% ;
- $\alpha = 1,16.10^9$ a $4,02.10^9$ m kg^{-1} ;
- $\mu_5 = 0,5.10^{-3}$ kg $(m$ $s)^{-1}$;
- $\rho_5 = 10^3$ kg m^{-3} .

Para o módulo de lavagem:

- $\rho_8 = 10^3$ kg m^{-3} .

Para as características do filtro:

- $A_F = 10$ m^2 ;
- $\theta_F = 2,5$ rd;
- $\theta_L = 0,9$ rd.

Fator xf :

- $x_f = 0$ a 1 .

RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A partir do modelo elaborado no presente trabalho e dos valores iniciais, realizou-se um estudo paramétrico

para demonstrar a influência de alguns parâmetros na eficiência e na produção do filtro lavador de polpa marrom.

A Figura 2 apresenta a relação de deslocamento (RD), calculada para diferentes fatores de diluição (FD), em função do parâmetro de mecanismo de lavagem (x_f). Confirma-se que, no caso de escoamento pistonado, $x_f = 1$ a relação de deslocamento $RD = 1$. Observa-se uma correlação direta entre x_f e RD . No caso da lavagem por deslocamento, para uma situação ideal ($x_f = 1$), considera-se que o volume de água empregado é igual ao volume de solução presente na torta. No entanto, mesmo para os processos mais eficientes, os volumes de líquido de lavagem empregados são significativamente superiores à situação ideal. Explica-se tal desempenho devido ao escoamento pelo leite fibroso e mecanismo de difusão e mistura do soluto por entre as fibras, assim como das etapas de adsorção/dessorção deste nas fibras.

Na Figura 3 o mesmo tipo de resultado é apresentado na forma de perda na lavagem ($1-Y$). Outra maneira clássica de se expressar a eficiência (ou rendimento) de lavagem é na forma do número de Nordén (E). Apresenta-se, na Figura 4, o comportamento de E em função dos parâmetros FD e x_f .

Os resultados ilustrados nas Figuras 2 a 4 permitem uma pertinente e eficaz forma de interpretação dos parâmetros macroscópicos RD , FD e E usuais na área de lavagem de celulose, com o parâmetro x_f que representa o mecanismo de lavagem.

As Figuras de 2 a 4 confirmam que, quanto maior o deslocamento ($x_f \rightarrow 1$), mais eficiente será a operação de lavagem. Os resultados também ilustram que, quanto maior o fator de diluição (FD), ou seja, quanto maior a quantidade de licor por polpa utilizado, mais eficiente será a lavagem. A decisão do fator de diluição ótimo depen-

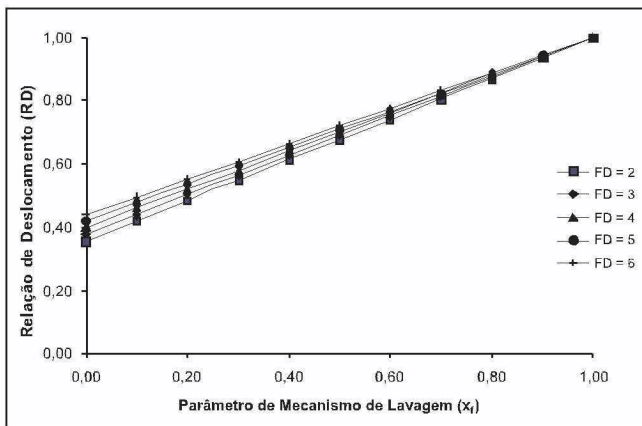


Figura 2. Relação de deslocamento (RD) em função do parâmetro de mecanismo de lavagem (x_f) para diferentes fatores de diluição (FD). Observa-se uma correlação direta entre x_f e RD

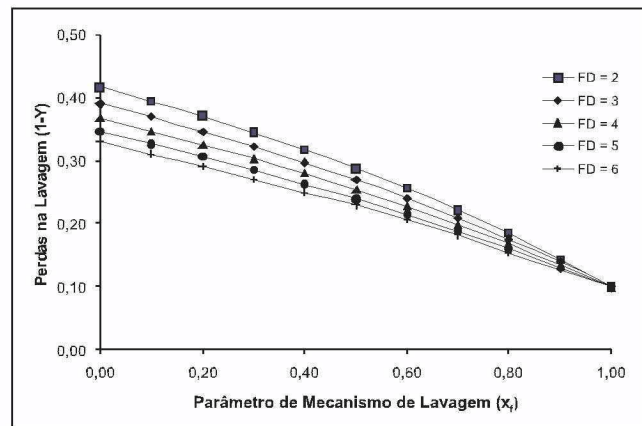


Figura 3. Perda da lavagem ($1-Y$) em função do parâmetro de mecanismo de lavagem (x_f) para diferentes fatores de diluição (FD)

derá das características individuais de cada processo.

A avaliação da eficiência de lavagem de um filtro cilíndrico rotativo a vácuo, em operação, pressupõe, numa etapa preliminar, um pleno conhecimento das vazões e concentrações das correntes referentes às diferentes etapas do processo.

A Figura 5 ilustra a variação da fração dos sólidos solúveis (X_{si}) em cada operação unitária realizada pelo filtro para um valor fixo de $x_f = 0,7$. Percebe-se que uma grande parte dos sólidos solúveis são removidos nas operações de diluição e principalmente lavagem, desta forma deve-se assegurar uma

boa agitação na tina do filtro a fim de que se promova a difusão dos sólidos solúveis presentes nas fibras celulósicas e uma eficiente remoção do licor negro na operação de lavagem.

As Figuras 6 a 9 ilustram a influência da velocidade do filtro (ω), da consistência da tina (S_{SP2}), da resistência do meio filtrante (R_{MF}) e da perda de carga na filtração (ΔP_F) na produtividade específica do filtro. Para todos os casos foram mantidos os valores de entrada das frações de sólidos solúveis, das propriedades do licor e da geometria do filtro, para um valor de $FD = 4$ e $x_f = 0,7$.

Como esperado, quanto maior a velocidade angular do filtro (ω), maior será sua produção (Figura 6), mas não na mesma proporção, devido à espessura decrescente da torta.

Pelos resultados mostrados na Figura 7, a consistência da tina (S_{SP2}) apresenta uma grande influência na produtividade do filtro. Isso ocorre porque quanto maior a consistência da tina, menor será a quantidade de licor a ser filtrado para uma mesma massa de suspensão.

Os resultados da Figura 8 confirmam que a escolha do meio filtrante é uma variável importante na produtividade do filtro. Assim, em filtros industriais deve-se optar por

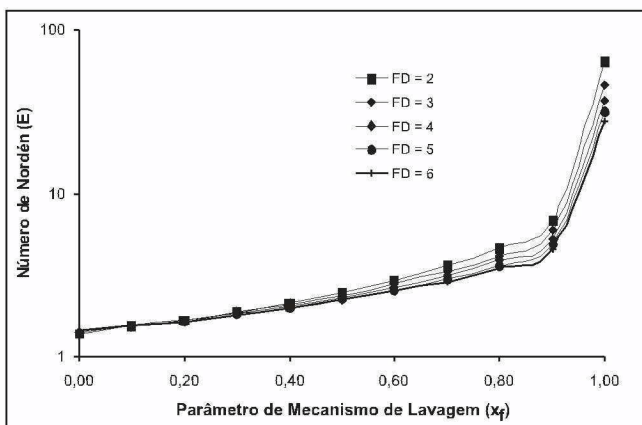


Figura 4. Número de Nordén (E) em função do parâmetro de mecanismo de lavagem (x_f) para diferentes fatores de diluição (FD). Observa-se a correlação entre o número de Nordén (E) e x_f

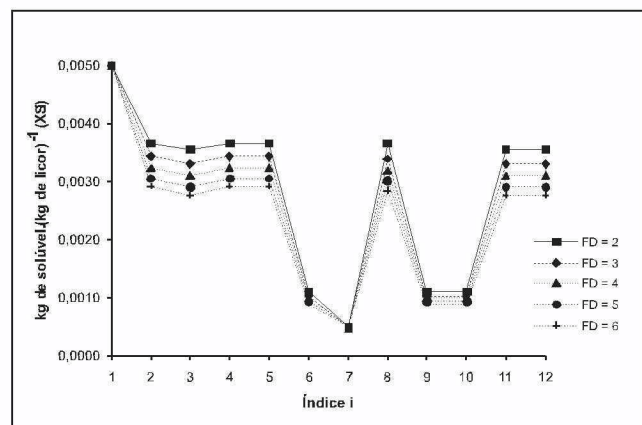


Figura 5. X_{si} para as diferentes correntes da Figura 1 em função do fator de diluição (FD)

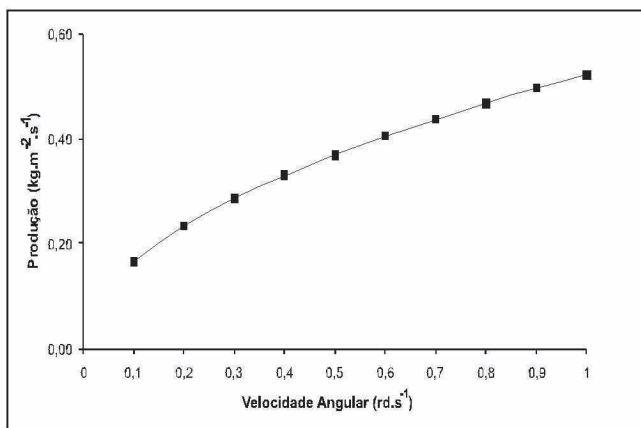


Figura 6. Produção específica de celulose em função da velocidade angular (ω)

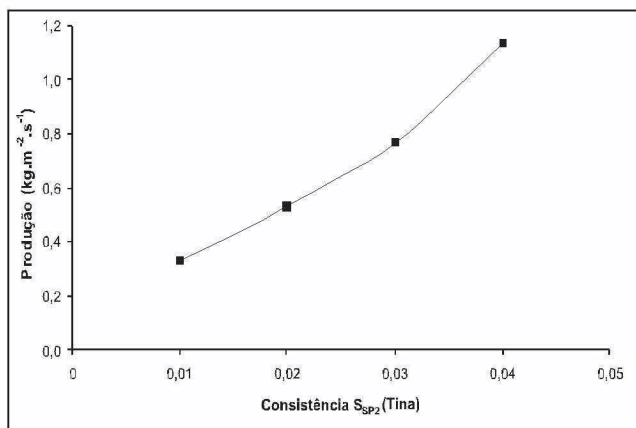


Figura 7. Produção específica de celulose em função da consistência da tina (S_{SP2})

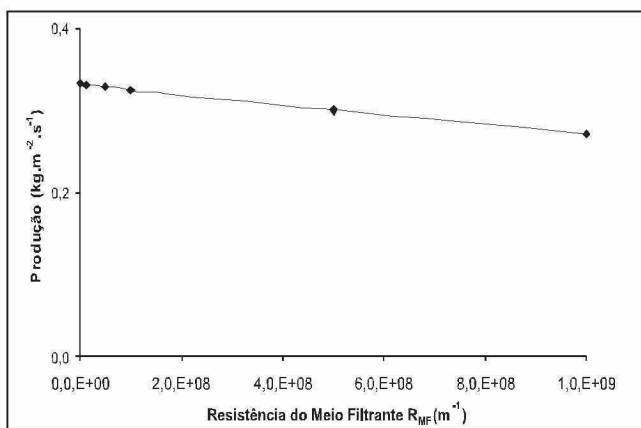


Figura 8. Produção específica de celulose para diferentes resistências do meio filtrante (R_{MF})

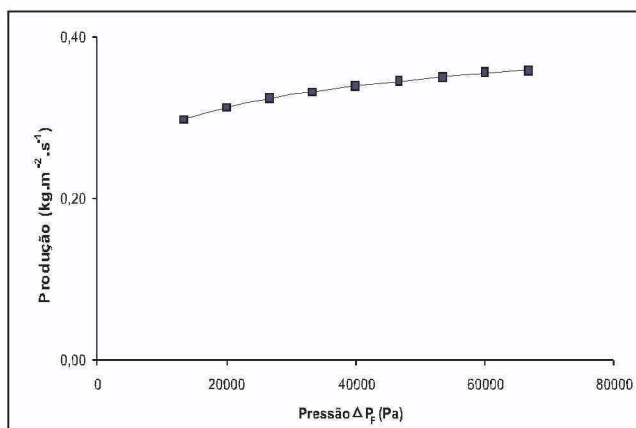


Figura 9. Produção específica de celulose em função da perda de carga da filtração (ΔP_F) (Pa)

um meio filtrante que apresente perda de carga desprezível em relação à perda de carga da torta (ΔP_C), mas que garanta a retenção das fibras.

Devido à compressibilidade das fibras celulósicas, não se esperam ganhos significativos em produtividade com o aumento da perda de carga da filtração (ΔP_F), como mostrado pela Figura 9, pois um aumento da perda de carga da filtração (ΔP_F) implica maior dificuldade do fluido escoar na torta devido à diminuição da porosidade, caracterizando, assim, o fenômeno de compressibilidade em tortas celulósicas.

CONCLUSÕES

A divisão da operação do filtro cilíndrico rotativo a vácuo numa

estrutura modular mostrou-se importante no entendimento de cada uma das operações unitárias desempenhadas. A combinação das variáveis do balanço de massa do filtro cilíndrico rotativo a vácuo com as variáveis fundamentais de filtração a pressão constante permitiu a criação de um modelo de lavagem que descreve os fenômenos físicos nos respectivos módulos e são bastante úteis no entendimento da operação de lavagem.

A definição de eficiência de lavagem através do parâmetro x_f oferece uma alternativa ao emprego dos parâmetros RD e FD .

O modelo proposto configura-se numa importante ferramenta tanto para

o gerenciamento como no projeto de filtros rotativos a vácuo para a operação de lavagem, pois permite um melhor entendimento físico das operações unitárias que estão acontecendo em cada seção do equipamento lavador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Processo 131359/03-7) os auxílios financeiros recebidos e à Indústria de Celulose e Papel Ripasa S.A. a oportunidade da visita às suas instalações, contribuindo para a presente análise do sistema de lavagem.

BIBLIOGRAFIA

BARTON, P. I. Modeling and analysis of systems from physical

principles. Lectures Notes. Department of Chemical Engineering - Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, 1998. Não Publicado.

BARTON, P. I. Structural analysis of systems of equations. Lectures Notes. Department of chemical Engineering - Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, 1995. Não Publicado.

CASEY, J. P. Brown stock washing. In: CASEY, J. P. Pulp and paper chemistry and chemical Technology. New York: Wiley - Interscience, 1980. p. 443 - 452.

EDWARDS, L.; PEYRON, M.;

MINTON, M. Models for cross-flow pulp washing calculations. Pulp and Paper Canada, v. 87, n.1, p. T17 - T21, 1986.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. (Ed.). Papermaking Science and Technology. Jyväskylä: Fapet Oy, 2000. 1 CD-ROM.

REYNOL Jr., A. S.; PACHECO, C. R. F. de PAIVA, J. L. Avaliação da Operação de Filtros Rotativos à Vácuo na Lavagem de Polpa Marrom através dos Parâmetros de Filtração. O Papel, São Paulo, Ano LXVI, n. 04, p. 69 - 76, Abril, 2005.

REYNOL Jr. A. S. Estudo da Lavagem da Polpa Marrom do

Processo Sulfato: Mecanismos da Filtração e Balanços de Massa. 2005. 120p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ROGERS, J.; FUNO, P.; NERY, J. A lavagem da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL NA ABTCP, 28, São Paulo, 1995. Anais. São Paulo: ABTCP, 1995. p. 179 - 197.

RUDD, D. F.; WATSON, C. C. The structure of systems. In: RUDD, D. F., WATSON, C. C. Strategy of process engineering. New York: Wiley, 1968. p. 34 - 79.

NOMENCLATURA

A_F	Área de filtração, m ²
A_L	Área de lavagem, m ²
E	Número de Nordén
f_i	Fração de perda de celulose
FD	Fator de diluição, kg.kg ⁻¹
F_{WS}	Razão de massa de torta úmida por massa de torta seca, kg.kg ⁻¹
GL	Grau de liberdade
K_C	Coefficiente característico da torta na seção de filtração, N.s.m ⁸
K_{CL}	Coefficiente característico da torta na seção de lavagem, N.s.m ⁸
K_{MF}	Coefficiente característico do meio filtrante na seção de filtração, N.s.m ⁵
K_{MFL}	Coefficiente característico do meio filtrante na seção de lavagem, N.s.m ⁵
M_{Pi}	Vazão mássica de polpa celulósica, kg.s ⁻¹
M_{Wi}	Vazão mássica de água, kg.s ⁻¹
RD	Relação de deslocamento
R_{MF}	Resistência do meio filtrante, m ⁻¹
S_{SPi}	Consistência da suspensão polpa marrom, kg.kg ⁻¹
t_F	Tempo de filtração, s
t_L	Tempo de lavagem, s
V_F	Volume de filtrado, m ³
V_L	Volume de líquido de lavagem no intervalo de tempo t_L , m ³

W_{Pi}	Razão entre a massa de água e a massa de celulose na suspensão, kg.kg ⁻¹
x_f	Parâmetro de mecanismo de lavagem
X_{Si}	Razão entre a massa de sólidos e a massa de água na suspensão, kg.kg ⁻¹
Y	Rendimento da lavagem
Y_L	Rendimento local da lavagem
Y_{Li}	Rendimento inferior da lavagem
Y_{Ls}	Rendimento superior da lavagem

LETRAS GREGAS

α	Resistência média específica da torta, m.kg ⁻¹
ΔP_C	Perda de carga na torta, Pa
ΔP_F	Perda de carga no setor de filtração, Pa
ΔP_L	Perda de carga no setor de lavagem, Pa
θ_F	Ângulo do setor de filtração, rd
θ_L	Ângulo do setor de lavagem, rd
λ	Número de equações
μ_s	Viscosidade dinâmica do filtrado na corrente de saída 5, kg.(m.s) ⁻¹
ρ_5	Densidade do filtrado na corrente de saída 5, kg.m ⁻³
ρ_8	Densidade do filtrado na corrente de saída 8, kg.m ⁻³
σ	Número de variáveis
ω	Velocidade angular do cilindro do filtro, rd.s ⁻¹