

# Desenvolvimento de um sistema instrumentado para ensaios de filtração em batelada

Pedro Tersiguel de Oliveira

Bolsista de Iniciação Científica, Engenharia Mecânica, UFRJ

Claudio L. Schneider

Orientador, Engenheiro de Minas, Ph.D.

## Resumo

Um sistema para ensaios de filtração em batelada foi implantado no laboratório de separação sólido-líquido do CETEM. O sistema foi aperfeiçoado e já é capaz de produzir dados úteis para a determinação dos parâmetros envolvidos em processos de filtração. A teoria envolvida no escalonamento de filtros a vácuo industriais é apresentada e discutida. Alguns resultados preliminares são mostrados para uma amostra de caulim. O sistema automatizado a ser desenvolvido é apresentado de forma sucinta, com base na experiência obtida a partir destes experimentos.

## 1. Introdução

A filtração é utilizada em operações de remoção de água de processo em plantas de processamento mineral. Frequentemente as operações de remoção de água se tornam congestionadas, reduzindo a capacidade de produção para os níveis de capacidade de filtração. Como resultado, rotas de processo que evitam os processos de filtração são preferíveis. Nos casos em que a filtração é utilizada para a remoção de água, filtros contínuos a vácuo são os mais utilizados. Estes filtros estão disponíveis em diversas formas, entre as mais comuns estão os tambores rotativos, os discos rotativos e os filtros de correia horizontal. Entre estes, os filtros de tambor rotativo são os mais comumente utilizados.

Em geral, a taxa de fluxo de filtrado através da torta é lenta. Este fato faz com que a equação de Kozeny-Carman (Bear, 1988) se torne válida para descrever o processo de filtração.

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu V_s}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (1)$$

Esta equação relaciona o fluxo de filtrado através da torta ao gradiente de pressão. Na equação (1) temos:

$V_s$  = velocidade superficial do líquido;

$\varepsilon$  = porosidade da torta;

$d_p$  = diâmetro de superfície específica de partícula. Para partículas esféricas este diâmetro está relacionado à área superficial por unidade de volume ( $S_0$ ) da seguinte forma:  $d_p = 6/S_0$ . Para partículas irregulares,

$d_p = \Psi/S_0$  onde  $\Psi$  é um fator de forma que pode ser medido experimentalmente.

Se definirmos  $A_t$  como a área da torta de filtração e  $L$  como a sua espessura, a equação (1) pode ser re-escrita da seguinte forma para partículas esféricas:

$$\frac{\Delta P A_t}{\mu L} = \frac{4,17(1-\varepsilon)^2 S_0^2}{\varepsilon^2} Q \quad (2)$$

onde  $Q$  é o fluxo volumétrico de filtrado, através da torta, que é produzido pelo gradiente de pressão aplicado. A constante 4,17 (= 150/36) na equação (2) varia com as propriedades das partículas (e flocos em caso de polpas floculadas) que formam a torta. Assim, uma forma simplificada da equação de Kozeny-Carman, conhecida como lei de Darcy (Bear, 1988) para meios porosos, pode ser utilizada com vantagem:

$$\frac{\Delta P A_t}{\mu L} = \frac{Q}{K} \quad (3)$$

onde

$$K = \frac{\varepsilon^2}{4,17(1-\varepsilon)^2 S_0^2} \quad (4)$$

é a permeabilidade da torta.

É mais conveniente trabalhar com a resistência da torta  $R = L/K$ . Assim, a lei de Darcy pode ser escrita como mostrado na equação (5).

$$\Delta P = \frac{\mu Q R}{A_t} \quad (5)$$

A espessura da torta está relacionada com a massa de sólidos por unidade de área  $M_t^A$ :

$$M_t^A = \rho_s (1-\varepsilon) L \quad (6)$$

e a resistência da torta está relacionada com  $M_t^A$  por:

$$R = \alpha M_t^A \quad (7)$$

onde  $\alpha$  é chamado de resistência específica da torta.

Em circunstâncias normais, a resistência do meio filtrante (papel filtro, pano, etc.) contribui com alguma significância para a resistência total do sistema e é necessário adicionar a resistência do meio filtrante:

$$R = R_{torta} + R_{mf} \quad (8)$$

A resistência do meio filtrante pode variar durante a filtração já que algum sólido pode penetrar o meio e alterar sua resistência em relação ao fluxo de filtrado. Este efeito é negligenciado nesta análise. Substituindo as equações (8) e (7) na equação (5) chegamos em:

$$\Delta P = \Delta P_t + \Delta P_{mf} = \mu Q \left( \frac{\alpha M_t}{A_t} + \frac{R_{mf}}{A_t} \right) \quad (9)$$

No caso de um simples ensaio de filtração em batelada, temos:

$$Q = \frac{dV_f}{dt} \quad (10)$$

onde  $V_f$  é o volume de filtrado.

A massa de sólidos depositada na torta está relacionada à quantidade de filtrado coletado:

$$M_t^A = \frac{V_f C_a}{A_t} \quad (11)$$

onde  $C_a$  é a concentração de sólidos na polpa de alimentação, em kg de sólidos / m<sup>3</sup> de água. Este cálculo não leva em conta o líquido que fica retido pela torta de filtração, porém, em condições normais, este volume pode ser desprezado nas aplicações práticas.

Substituindo as equações (11) e (10) na equação (9) chegamos em:

$$\Delta P = \mu \frac{dV_f}{dt} \frac{1}{A_t^2} \alpha C_a (V_f + V_e) \quad (12)$$

onde  $V_e$  é um volume fictício, requerido para construir um leito de torta que tenha a mesma resistência do meio filtrante (pano ou papel filtro). Reorganizando a equação (12):

$$\frac{dt}{dV_f} = \frac{\mu \alpha C_f}{\Delta P A_t} \left( \frac{V_f}{A_t} + \frac{V_e}{A_t} \right) = k_1 \frac{V_f}{A_t^2} + k_2 \frac{1}{A_t} \quad (13)$$

Para pressão constante, a equação (13) pode ser integrada facilmente, resultando em:

$$t = \frac{k_1}{2} \frac{V_f^2}{A_t^2} + k_2 \frac{V_f}{A_t} \quad (14)$$

As constantes  $k_1$  e  $k_2$  podem ser medidas a partir de um simples teste de filtração em batelada, a partir do gráfico de  $t/V_f$  versus o volume de filtrado  $V_f$

$$\frac{t}{V_f} = \frac{k_1}{2A_t^2} V_f + \frac{k_2}{A_t} \quad (15)$$

que deve produzir uma linha reta com inclinação igual a  $\frac{k_1}{2A_f^2}$ , sendo que o valor da constante  $k_1$  é definida

como  $k_1 = \frac{\alpha\mu C_a}{\Delta P}$ . Assim, conhecendo-se o gradiente de pressão, a concentração de sólidos na alimentação, a

viscosidade do fluido e a área da torta, pode-se calcular a resistência específica da torta. O valor de  $\alpha$  é constante para tortas incompressíveis, e deve ser possível obter estimativas acuradas de  $\alpha$  a partir de testes com concentrações de sólidos diversas e gradientes de pressão diversos. Tortas compressíveis podem ser produzidas a partir de polpas floculadas, e nestes casos, o valor de  $\alpha$  pode variar com o gradiente pressão e com a concentração de sólidos na alimentação (Concha, 2001). Aqui, serão consideradas apenas tortas incompressíveis, formadas a partir de polpas de partículas não floculadas.

## 2. Objetivos

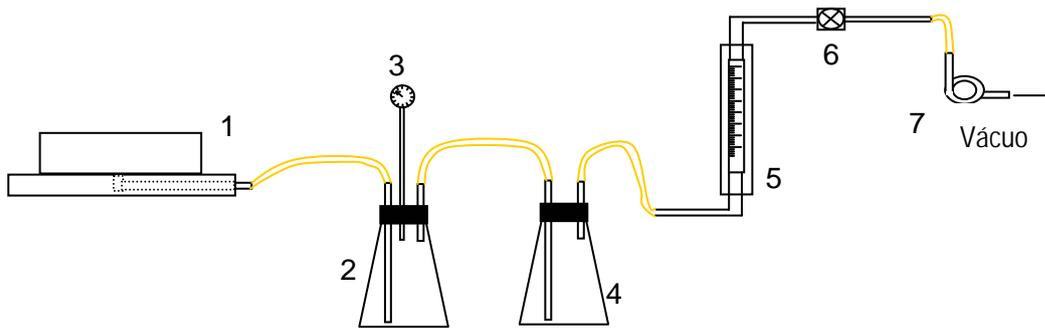
Os objetivos deste projeto são, de forma sucinta:

1. Desenvolver um aparato adequado para testes de filtração de batelada, equipado com um sistema de aquisição de dados completo, para todas as variáveis de ensaio.
2. Desenvolver um aplicativo (software) que, a partir do processamento dos dados gerados no sistema de aquisição automático, calcule os parâmetros relevantes para o processo de filtração, como por exemplo a resistência específica da torta e a permeabilidade.
3. Desenvolver um aplicativo que permita o escalonamento dos diversos tipos de filtros a vácuo (tambor, disco, correia, etc.) a partir dos parâmetros obtidos com os dados de ensaios de filtração de batelada, e das variáveis operacionais do filtro industrial a ser empregado.

Embora estes objetivos pareçam ser bastante ousados, espera-se que, com recursos e tempo suficientes, seja possível alcança-los sem maiores dificuldades. O processo científico se inicia com o aprendizado das práticas de laboratório envolvidas e com o estudo da teoria correntemente empregada para descrever os processos. Como descrito acima, a teoria que suporta a caracterização dos processos de filtração à vácuo é relativamente simples, e este entendimento é parte importante no cumprimento dos objetivos. O foco deste projeto ainda se encontra no primeiro objetivo, e embora o sistema automático de aquisição de dados ainda não tenha sido implantado, um primeiro protótipo de instrumento para ensaios de filtração de batelada já se encontra operacional, e alguns resultados experimentais já se encontram disponíveis.

## 3. Experimental

O aparato para o ensaio de filtração em batelada é mostrado de forma esquemática na Figura 1.



**Figura 1:** Aparato básico para execução de um teste de filtração de batelada. 1) filtro de mesa; 2) recipiente para coleta do filtrado; 3) vacuômetro; 4) recipiente de contenção para proteção do rotâmetro; 5) rotâmetro; 6) válvula de agulha; 7) bomba ou linha de vácuo.

O equipamento disponível no laboratório de separação sólido-líquido do CETEM é baseado na linha de vácuo do laboratório, e não há necessidade de uma bomba de vácuo dedicada. A linha de vácuo do laboratório é controlada por uma válvula de agulha, e isso permite algum controle sobre a vazão de ar e pressão. Os recipientes de filtrado e de contenção são frascos de vidro tipo Erlenmeyer com vedação de borracha. O vacuômetro é analógico. Existe um segundo vacuômetro analógico instalado na saída da linha de vácuo. O filtro de mesa é feito de aço e tem uma área de filtração circular com 24 cm de diâmetro.

Uma amostra de caulim foi gentilmente cedida pela Rohm & Haas para execução de ensaios de filtração de bancada. Ensaios preliminares foram executados para verificar a vedação e a funcionalidade dos equipamentos. As mangueiras foram substituídas por mangueiras de látex com parede de 3mm. O maior problema de vedação foi observado no próprio filtro de mesa, e o sistema de vedação foi solucionado com uma tira de borracha e aplicação de vaselina. O sistema foi considerado apto quando o vácuo medido na saída da linha de vácuo foi igual ao vácuo medido no frasco de filtrado.

Uma série de três ensaios com o caulim, sem adição de floculante, foi executada com 5, 10 e 15% de sólidos na polpa de alimentação. Isso equivale a concentrações de 50, 100 e 150 kg/m<sup>3</sup>. Para medir o tempo de filtração foi utilizado um cronômetro manual, acionado assim que a polpa de alimentação é adicionada ao filtro de mesa. Para medir o volume de filtrado, uma adaptação foi feita com sucesso. Uma balança de mesa com capacidade de 3 kg foi instalada de forma que o peso de filtrado pudesse ser medido durante o ensaio. Para tanto, a tara da balança deve ser feita com o recipiente de filtrado, antes do início do ensaio. Esta adaptação facilitou em muito a execução dos ensaios.

#### 4. Resultados

Os resultados dos ensaios com a amostra de caulim não floculada são mostrados na Figura 2. Pode-se observar que os ensaios com 10 e 15% de sólidos produziram dados lineares no gráfico  $t/V_f$  versus  $V_f$  como previsto na teoria para tortas incompressíveis. Isto é confirmado pela linha de tendência adicionada aos pontos medidos. Já o ensaio com 5% de sólidos parece iniciar com uma inclinação maior e posteriormente atinge uma inclinação menos acentuada. A linha de tendência mostra a inclinação média do ensaio.

A resistência específica da torta, calculada a partir das inclinações da linha de tendência como mostrado na equação (15), e a partir da definição da constante  $k_1$ , foi idêntica para os ensaios com 5 e 10% de sólidos, em torno de  $1,9 \times 10^{12}$ , e significativamente maior no ensaio com 15% de sólidos, em torno de  $2,6 \times 10^{12}$ . Estes resultados indicam que a torta formada passa a ser compressível para concentrações de sólidos maiores do que 10% para as partículas de caulim natural (não floculado). No entanto, ensaios com concentrações de sólidos maiores devem ser realizados para confirmar esta tendência. Como o objetivo deste projeto não é determinar os parâmetros de filtração da amostra de caulim, e sim instrumentar o ensaio de filtração em batelada, pode-se considerar que estes resultados atingiram seu objetivo primário, que é estabelecer um procedimento adequado para o ensaio de filtração, aplicar os aspectos teóricos e estabelecer um sistema para a instrumentação do ensaio.

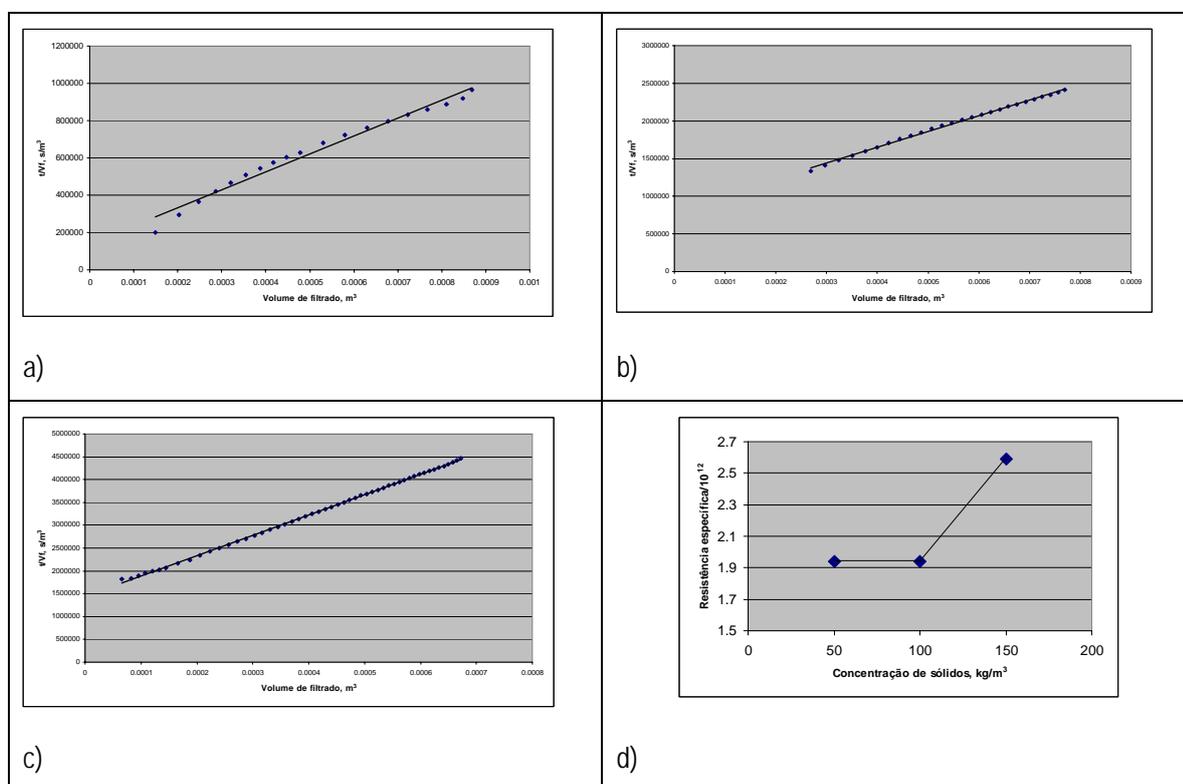


Figura 2: Resultados dos ensaios de filtração de caulim. a) 5% de sólidos, b) 10% de sólidos, c) 15% de sólidos, d) resistência específica calculada.

## 5. Discussão e conclusões

Os primeiros passos foram tomados na direção de um sistema automatizado para ensaios de filtração em batelada. Um protótipo de laboratório que permite medir a resistência específica da torta para um minério foi comissionado. Os aspectos teóricos envolvidos na teoria da filtração estão suficientemente entendidos. Desta

forma, pode-se considerar que o caminho encontra-se aberto para o desenvolvimento de um ensaio automatizado.

O sucesso na utilização de uma balança para medir o volume de filtrado tem implicações. Medidores de nível ultrassônicos e a LASER seriam alternativas porém, ambos necessitam uma distância de trabalho considerável, e não parece, em princípio, que poderiam ser acomodados em um recipiente de baixo volume (2 litros). Balanças eletrônicas de laboratório podem ser adquiridas com uma interface RS232, que permite a leitura do peso por software. Assim, duas balanças já foram adquiridas, e um aplicativo está sendo criado para tarar as balanças simultaneamente, e iniciar as medições. Uma balança medirá o peso do recipiente de filtrado enquanto a outra medirá o peso do filtro de bancada. Estes dados são redundantes, porém a medição simultânea permitirá estimar perdas, o volume de água retido na torta ao final do ensaio e a taxa de evaporação na torta areada após o ensaio. Estes dados têm importância no dimensionamento da área de secagem que é comumente utilizada em filtros de correia, em aplicações que exigem um produto sólido com baixa umidade. Os dados redundantes também poderão ser utilizados para compensar oscilações de leitura durante o ensaio, como observadas na Figura 1a.

Um item importante no ensaio de filtração de batelada é o próprio filtro de bancada. O filtro utilizado atualmente tem uma área muito grande, e dificilmente uma torta se forma com espessura homogênea. Além disso, o filtro em si pesa mais de 30 kg, sendo de difícil manipulação. Um filtro de bancada está sendo confeccionado em polyester, com um encaixe para papel filtro de 18,5 cm de diâmetro. Com isso, não haverá necessidade de uso de selante (vaselina ou silicone), nem risco de vazamento pela borda do meio filtrante. Espera-se também obter um vácuo mais uniforme. Como o novo filtro de mesa será consideravelmente mais leve que o atual, uma balança com capacidade de 3 kg será suficiente para completar o sistema redundante de pesagem.

Outros instrumentos a serem adquiridos serão um vacuômetro modelo VDR-920 fabricado pela Instrutherm, e com interface RS232. Com isso, as condições e a qualidade do gradiente de pressão poderão ser analisadas pós teste. Um termômetro para monitorar a temperatura ambiente DHT-3140, fabricado pela perceptec, também com interface RS232. Este termômetro permitirá corrigir o valor da viscosidade da água para a temperatura do ensaio. Finalmente, e completando o sistema, o rotâmetro analógico será substituído por um rotâmetro com sinal eletrônico proporcional ao fluxo mássico de ar, modelo Sierra 822, fabricado pela Sierra Instruments. Isso requer uma interface analógico/digital, e esta deverá ser implantada no aplicativo a ser desenvolvido neste projeto.

## 6. Referências

BEAR, J. Dynamics of Fluids in Porous Media: Dover Publications, Inc. 1988.

CONCHA, F. Manual de Filtracion & Separacion: Editorial Diario El Sur S.A. 2001.