

Monitoramento e previsão operacional de sistemas de desaguamento de polpas minerais com auxílio de modelos matemáticos

Monitoring and operational forecasting of mineral pulp dewatering systems with the support of mathematical models

Rafaella Fernanda de Almeida
Bolsista PCI, Eng. Química, D.Sc.

Sílvia Cristina Alves França
Supervisora, Eng. Química, D. Sc.

Resumo

O processamento de minérios cada vez mais finos torna-se um grande desafio para a eficiência dos sistemas de separação sólido-líquido. Entretanto, a previsão do comportamento e eficiência do desaguamento ainda é feita de maneira empírica, sendo necessário um estudo mais aprofundado das condições e especificidades operacionais das novas tecnologias disponíveis. A primeira etapa do projeto consiste em caracterizar a amostra quanto às variáveis (distribuição granulométrica, carga superficial resultante e área superficial específica) envolvidas no processo de espessamento e filtração, com base nas equações que descrevem essas operações unitárias, para posterior determinação da influência das mesmas na eficiência de desaguamento de polpas minerais com elevado teor de finos.

Palavras chave: separação sólido-líquido; finos; desaguamento; filtração.

Abstract

The processing of ores rich in fine particles becomes a major challenge for the efficiency of solid-liquid separation systems. However, the prediction of dewatering behavior and efficiency is still done in an empirical way, requiring a more in-depth study of the operational conditions and specificities of the new technologies available. The first step of the project consists in characterizing the sample as to the variables (particle size distribution, net surface charge and specific surface area) involved in the thickening and filtration operations, based in the equations which describe these unit operations, for later determination of their influence on the dewatering process of fine mineral slurry.

Key words: solid-liquid separation; fine particles; dewatering; filtration.

1. Introdução

Os sistemas de separação sólido-líquido (em especial a sedimentação e a filtração) têm se tornado cada vez mais importantes e desafiadores devido à expansão nas operações de processamento mineral. Os concentrados minerais obtidos por processos a úmido, por exemplo, por flotação, ou polpas minerais transportadas por um mineroduto, devem ser desaguados a fim de atingir o mais baixo teor de umidade residual do material após a filtração, para reduzir os custos de secagem ou para dar continuidade às etapas posteriores, por exemplo, o processo de pelotização, como no caso de minério de ferro (OLIVEIRA et al., 2004).

A separação de partículas de um fluido pelo processo de sedimentação se dá pela ação da gravidade sobre as partículas. A velocidade terminal de sedimentação v de uma partícula isolada em movimento no fluido é dada pela Equação 1 (FRANÇA e MASSARANI, 2018).

$$v = \frac{\mu_f}{D_p \rho_f} \left[\left(k_1 \frac{C_D Re^2}{24} \right)^{-1,20} + \left(\frac{C_D Re^2}{k_2} \right)^{-0,60} \right]^{-0,83} \quad (1)$$

Onde D_p é o diâmetro da partícula, ρ_f é a densidade do fluido, μ_f é a viscosidade do fluido, Re é número de Reynolds e C_D é coeficiente de arraste da partícula, k_1 e k_2 são constantes, dados pelas expressões (2,3,4 e 5):

$$Re = \frac{p_f v D_p}{\mu_f} \quad (2) \quad C_D Re^2 = \frac{4 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g D_p^3}{3 \mu_f^2} \quad (3)$$

$$k_1 = 0,843 \log_{10} \frac{\phi}{0,065} \quad (4) \quad \text{e} \quad k_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (5), \text{ onde } \phi \text{ é a esfericidade.}$$

No processo de filtração, a polpa escoar por ação da pressão contra o meio filtrante, resultando na separação entre o filtrado e a torta. O fenômeno é expresso pela Equação 6 (FRANÇA e MASSARANI, 2018).

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_f}{A(\Delta P)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle V \rho_f C}{A} + R_m \right] \quad (6)$$

Onde t é tempo de filtração, V é o volume de filtrado, A é área de filtração, ΔP é queda de pressão no filtro, $\langle \alpha \rangle$ é a resistividade média da torta, C é a concentração de sólidos na polpa que alimenta o filtro e R_m é a resistência do meio filtrante.

O processamento de minérios cada vez mais finos mostra a necessidade de avanços nos estudos sobre desaguamento. Além disso, o rigor das leis de proteção ambiental que limitam as condições de disposição de rejeitos e efluentes industriais no meio ambiente também tem papel essencial nos desafios tecnológicos e operacionais para remoção e reutilização da água utilizada nos processos de separação sólido-líquido (MANONO, 2019; OLIVEIRA et al., 2004).

2. Objetivos

Estudar as variáveis envolvidas nas operações de separação sólido-líquido, com base nas equações matemáticas que as descrevem. Nesta etapa do trabalho serão avaliadas a distribuição granulométrica, carga superficial resultante e área superficial específica das partículas, para estabelecer, posteriormente, uma possível correlação entre as mesmas e a eficiência de desaguamento.

3. Material e Métodos

3.1 Material

Amostras de concentrado de minério de ferro, com diferentes quantidades de partículas finas e ultrafinas, provenientes de uma usina de beneficiamento de Minas Gerais foram submetidas à caracterização física e físico-química.

3.2 Métodos

3.2.1 Distribuição granulométrica

A determinação de distribuição granulométrica da amostra foi realizada por peneiramento com 30L de água. Utilizou-se a seguinte série de peneiras: 65, 100, 150, 200, 325, 400 e 635 mesh. Após o peneiramento, as frações retidas em cada faixa foram secas na estufa a 105 °C e pesadas.

Utilizou-se também a técnica de difratometria a laser, por meio do equipamento Malvern Mastersizer 2000, para caracterização da fração de granulometria mais fina presente na amostra.

3.2.2 Determinação da carga superficial resultante

A determinação de carga superficial resultante das amostras do concentrado bem como das amostras de finos e suas misturas foi realizada em equipamento da série Malvern Zetasizer Nano, na faixa de pH de 2 a 12, utilizando solução eletrolítica indiferente (KCl 0,01 M) e soluções diluídas de HCl e KOH para ajuste do pH. Nessa análise mede-se a mobilidade eletroforética das partículas constituintes da polpa, e o potencial zeta é calculado. As medidas foram realizadas para a faixa de pH mencionada, sendo medidas por varredura em meio ácido e em seguida em meio alcalino.

3.2.3. Determinação da densidade

A densidade das amostras foi determinada por picnometria a hélio, no picnômetro da marca Micromeritics modelo AccuPyc II 1340. O procedimento consiste em preencher $\frac{3}{4}$ do volume da cápsula do equipamento com amostra, anotar sua massa e preenchê-la no respectivo campo indicado no software de operação do equipamento. Em seguida, a densidade em g/cm³ é obtida em triplicata, sendo informado o valor da média e o desvio padrão.

3.2.4 Determinação da superfície específica pelo método Blaine

A área superficial específica (externa e interna) das partículas é um parâmetro de grande importância em operações de desaguamento, pois tem influência direta na reologia da polpa mineral, bem como na operação de filtragem (porosidade). A área superficial específica é medida em permeabilímetro de Blaine e segue a norma ABNT NBR 16372 (ABNT, 2015).

A área superficial específica da amostra é determinada pela Equação 7,

$$S = k \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \sqrt{t}}{\rho(1-\varepsilon)\sqrt{0,1\eta}} \quad (7)$$

Onde S é a superfície específica em cm^2/g , k é a constante de calibração do aparelho, ε é a porosidade da camada compactada, ρ é a massa específica (g/cm^3), t é a média dos tempos determinados (s) e $\sqrt{0,1\eta}$ é o parâmetro que é função da viscosidade do ar e é determinado pela temperatura (tabelada no Anexo A da norma ABNT NBR 16372:2015).

4. Resultados e Discussão

4.1 Caracterização das Amostras

Segundo a classificação Sivamoham (1990), partículas finas estão abaixo de $100 \mu\text{m}$ e superfinas estão abaixo de $20 \mu\text{m}$. Os resultados de distribuição granulométrica para o concentrado são apresentados na Figura 1a com 50% da massa passante em $37 \mu\text{m}$, sendo classificada como fina. Na Figura 1b nota-se que 50% das partículas dessa amostra apresentam granulometria abaixo de $18 \mu\text{m}$, classificadas, então como superfinas. A mistura de 1% (p/p) de amostra de superfinos no concentrado não promove alteração visível na distribuição granulométrica (D_{50} em $37 \mu\text{m}$); já a adição de 4% (p/p) tende a deslocar a curva de distribuição granulométrica para a esquerda alargando-a (D_{50} em $32 \mu\text{m}$). Uma ampla faixa de distribuição granulométrica resulta em uma torta mais compacta e, conseqüentemente, de maior umidade (WAKEMAN, 2007).

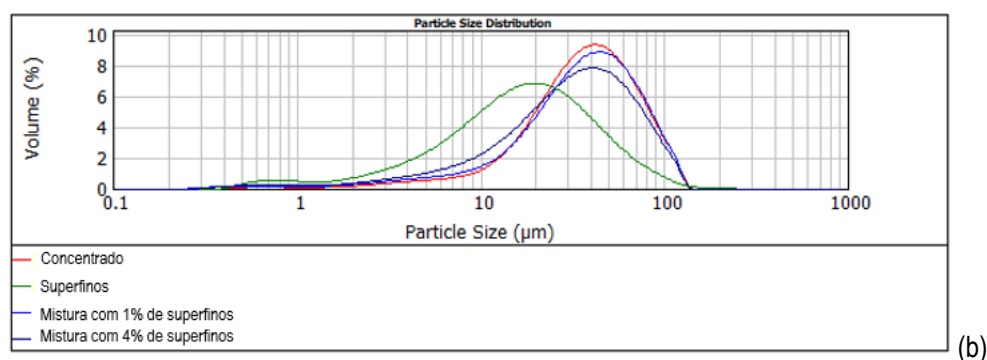
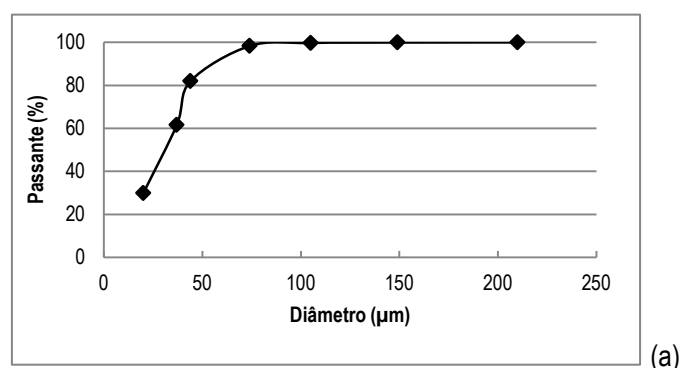


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica das amostras: (a) peneiramento a úmido e (b) difratometria a laser

Tabela 1. Diâmetros característicos da amostra

Amostra	D(10) (μm)	D(50) (μm)	D(90) (μm)
Concentrado	13,63	37,89	80,11
Superfinos	4,06	17,14	49,54
Mistura com 1% de superfinos	10,56	37,52	80,61
Mistura com 4% de superfinos	7,59	32,56	76,82

A determinação de carga superficial resultante, por meio de medidas de potencial zeta, tem o objetivo de avaliar a estabilidade da polpa e a sinergia entre os reagentes utilizados (polímeros floclantes, dispersantes, etc), necessários às operações de separação sólido-líquido. Os resultados das análises (Figura 2) mostraram que o concentrado tem carga superficial resultante eletronegativa (-50 mV) na faixa de operação industrial (pH 11,8) e que a influência da adição de superfinos em percentuais de até 4%(p/p) é muito baixa ou pouco significativa na carga superficial resultante. Ou seja, espera-se que a adição de superfinos até este percentual no concentrado não aumenta a demanda por consumo de reagentes devido à carga superficial praticamente não ser alterada. Contudo, o elevado potencial eletronegativo da superfície das partículas da polpa implica em sua maior instabilidade e dispersão das partículas, o que torna mais difícil sua agregação. Isso implica em maior demanda por reagentes, principalmente floclantes, elevando a viscosidade da polpa. Consequentemente, a maior viscosidade levará à queda da taxa unitária de filtragem (TUF) e produção de tortas mais úmidas.

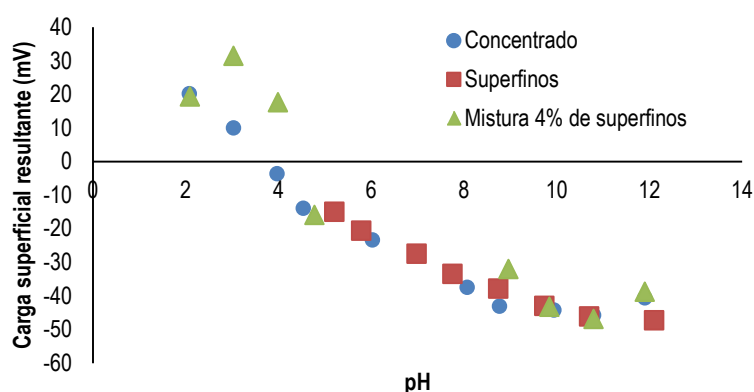


Figura 2. Carga superficial resultante para o concentrado, superfinos e mistura com 4% (p/p) de superfinos

4.1 Área superficial Específica

Para realização do cálculo da área superficial específica foi determinada a densidade da amostra conforme descrito na Tabela 2. A densidade permite o cálculo da porosidade, que por sua vez é uma característica que influencia significativamente a etapa de filtragem, pois, uma maior porosidade implica na redução da resistividade e na diminuição da umidade da torta (WAKEMAN, 2007).

Tabela 2. Densidade da amostra.

Amostra	Densidade (g/cm ³)	Erro (g/cm ³)
Concentrado	5,27	
Superfinos	3,78	0,002
Mistura com 1% (p/p) de superfinos	5,28	0,001
Mistura com 4% (p/p) de superfinos	5,21	0,001

E então, pela Equação 7 obtiveram-se as seguintes áreas superficiais específicas pelo método de Blaine (Tabela 3).

Tabela 3. Área superficial específica pelo método Blaine.

Amostra	Área superficial específica (cm ² /g)
Concentrado	1032,23
Superfinos	9674,00
Mistura com 1% de superfinos	1100,12
Mistura com 4% de superfinos	1362,73

Observa-se que houve um aumento de 6,5% da área superficial específica com a adição de 1% (p/p) de superfinos e de 32% com a adição de 4% (p/p) superfinos. A superfície específica expressa a área superficial por grama de um determinado produto e sua magnitude está ligada diretamente na eficiência da filtragem, uma vez que maiores valores devem-se às partículas de tamanhos menores, as quais promovem a menor

permeabilidade do meio filtrante, e consequentemente maior umidade da torta, prejudicando a produtividade da filtração e elevando os custos de produção (SMITH et al., 2018; RODRIGUES; RODRIGUES; RODRIGUES, 2019).

5. Conclusão

No presente trabalho, a adição de 1% (p/p) de partículas superfinas não promove grande mudança na distribuição granulométrica, porém a adição de 4% (p/p) resulta no alargamento da faixa resultando em uma torta mais compacta. A determinação da carga superficial resultante mostrou que a adição de partículas superfinas em uma polpa com carga superficial de elevada eletronegatividade (-50 mV), não alterou, de forma significativa, a carga superficial desta mistura, porém o elevado potencial eletronegativo da superfície das partículas da polpa implica em sua maior instabilidade e dispersão das partículas, exigindo maior demanda por reagentes e consequentemente a produção de tortas mais úmidas. Por fim, a adição de superfinos aumentou substancialmente a área superficial específica, mesmo que em pequenas quantidades, este parâmetro tem influência direta na reologia da polpa mineral. A compreensão do efeito da presença de finos nessas variáveis é importante para a realização das etapas posteriores do projeto e avaliação dos impactos no processo de filtração.

As etapas seguintes do trabalho contemplarão a influência das variáveis aqui estudadas no processo de agregação de partículas, espessamento e comportamento reológico da polpa espessada, para posterior avaliação do comportamento do empacotamento do leito de partículas na operação de filtração.

6. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa através do programa PCI/CETEM/MCT; à supervisora Sílvia França e ao Caio Moura pela orientação e apoio, assim como ao CETEM pela infraestrutura.

7. Referências Bibliográficas

FRANÇA, S.C.A., MASSARANI G. Separação Sólido-Líquido. **Tratamento de Minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, p. 597-644, 2018.

JI, Y., LU, Q., LIU, Q., ZENG, H. **Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculants**. Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.430, p. 29-38, 2013.

MANONO, M.S et al. **To Recycle or Not? A Bench Scale Simulation of Water Recirculation in Sulfidic Cu-Ni Ore Flotation**. In: IMWA Mine Water: Technological and Ecological Challenges. Cape Town, South Africa, p. 225-231, 2019.

NORMA BRASILEIRA. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). **ABNT NBR 16372**, 2015.

OLIVEIRA, M.L.M., LUZ, J.A.M., LACERDA, C.M.M. **Espessamento e filtração**. Departamento de Engenharia de Minas. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

RODRIGUES F.A., RODRIGUES O.M.A., RODRIGUES R.A. **Influência das características do *pellet feed* de minério de ferro na etapa de filtração**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v.16, p.239-245, 2019.

WAKEMAN, R. **The influence of particle properties on filtration**. Separation and Purification Technology, v.58, p.234-241, 2007.

SIVAMOHAN, R. The problem of recovering very fine particles in mineral processing - a review. **International Journal of Mineral Processing**. Amsterdam, Holland: Elsevier Science Publishers B. V., v. 28, p. 247-288, 1990.

SMITH, J., SHERIDAN, C., VAN, D.L., NAIK, S., PLINT, N., TURRER, H.D.G. **Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron ore concentrate**. Minerals Engineering, v.115, p.1-3, 2018.