



EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NO BOMBEAMENTO DE POLPAS

SEVERINO, R.O.¹, LUZ, J.A.M.²

^{1,2}Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas.
e-mail: rodrigoalseve@gmail.com

RESUMO

A operação de bombeamento de suspensões é fundamental no manuseio de polpas minerais ou similares. Devido à sua complexidade, os aspectos reológicos do bombeamento de polpa são motivo de esforço continuado de pesquisas em nível fundamental e aplicado. O objetivo deste trabalho foi estudar empiricamente o efeito da distribuição granulométrica das partículas sobre o comportamento de suspensões minerais durante o bombeamento por bombas centrífugas usualmente aplicadas em polpas minerais de partículas polidispersas. As variáveis estudadas foram: concentração volumétrica de sólidos em suspensão e concentração volumétrica de polpa. A vazão volumétrica de polpa apresentou diminuição nas três maiores faixas granulométricas estudadas com valores acima de 8 % de concentração volumétrica, já a vazão volumétrica de sólidos manteve seu comportamento com relação a concentração mássica em todos os ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Bombeamento, Suspensão, Granulometria, Polpa, Reologia.

ABSTRACT

Suspension pumping operation is fundamental in the handling of mineral slurries. Due to their complexity, the rheological aspects of pulp pumping are a reason for continued research efforts at a fundamental and applied level. The objective of this work was to empirically study the effect of particle size distribution on the behavior of mineral slurries during pumping by centrifugal pumps usually applied in mineral suspensions of polydisperse particles. The variables studied were: volumetric concentration of suspended solids and volumetric concentration of pulp. Pulp volumetric flow showed decrease in the three largest particle size ranges studied with values above 8% of volumetric concentration, while solids volume flow maintained its behavior with respect to mass concentration in all tests.

KEYWORDS: Pumping, Suspension, Granulometry, Pulp, Rheology.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas particulados costumam ser descritos por distribuições granulométricas contínuas. Raramente, em sistemas minerais, ocorre adequada aderência estatística à distribuição de Gauss, pois, como regra, há assimetria. A curva de distribuição de probabilidade mais empregada em tecnologia mineral é a chamada distribuição de Rosin-Rammler-Sperling-Benett, um caso especial da distribuição de Weibull (LUZ, 2005).

Por seu turno, a porosidade de um sistema disperso não densificado é um parâmetro que representa a relação entre o volume de vazios e volume total do material de interesse, sendo que costuma haver gradientes de porosidade num sistema de manuseio como no bombeamento de polpa (PRADO, 2015). Ao se aumentar a concentração de sólidos a interação mecânica e fluidodinâmica entre as partículas aumenta, impactando propriedades reológicas como viscosidade dinâmica e tensão mínima de escoamento (para sistemas não newtonianos). Para ilustração, cita-se uma das mais usadas equações para essa viscosidade aparente do suspensóide, a equação de Krieger-Dougherty, dada por (DÖRR *et al.*, 2013):

$$\eta = \eta_f \times \left[1 - \left(\frac{c_v}{c_{vmax}} \right) \right]^{-k \times c_{vmax}} \quad (1)$$

Onde: η — viscosidade dinâmica do suspensóide [Pa.s]; η_f — viscosidade dinâmica da fase fluida [Pa.s]; c_v — concentração volumétrica de sólidos [-]; c_{vmax} — concentração volumétrica limite de sólidos [-]; k — viscosidade intrínseca [-]. Para partículas esféricas rígidas, o valor do parâmetro $k = 2,5$.

A proposta deste trabalho foi realizar experimentos de bombeamento de polpa centrífuga de eixo horizontal. Foi variada a agudez n das distribuições das partículas constituintes da fase dispersa em água, bem como a porcentagem de sólidos na suspensão, de modo a quantificar o efeito da porosidade do leito fluente sobre a potência do bombeamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de bombeamento de polpa aquosa de areia quartzosa e de esférulas de vidro foram executados, aproveitando-se um circuito de tubulação na instalação de hidrociclonagem do laboratório do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP. Os procedimentos experimentais seguiram o método descrito detalhadamente em Rocha (2010).

2.1 Amostras

Areia quartzosa e esférulas de vidro bitoladas por faixas granulométricas. A esfericidade de Wadell (razão entre a superfície da esfera de volume equivalente e a superfície da partícula) era superior a 0,97.

2.2 Ensaios preliminares

Inicialmente, a fim de se determinar as condições de trabalho no hidrociclone, foi realizado um ensaio preliminar usando areia, sem que a mesma fosse separada por faixas granulométricas. Os ensaios foram realizados em triplicata a fim de se obter uma média com os valores encontrados.

2.3 Classificação do material

O material foi separado utilizando peneiras da série ABNT/Tyler com as seguintes aberturas: 0,840 mm; 0,590 mm; 0,418 mm; 0,297 mm; 0,212 mm; 0,150 mm; 0,106 mm; 0,075 mm e 0,038 mm. O peneiramento foi realizado a seco com o auxílio de um vibrador de bancada.

Pesou-se o material previamente separado para determinar quais massas seriam utilizadas nos ensaios. As alíquotas foram armazenadas em sacos plásticos.

2.4 Determinação da massa específica

A massa específica foi determinada através de picnometria. Foram preparadas três alíquotas de cada faixa granulométrica, as quais foram utilizadas para determinação da massa específica com o auxílio de picnômetros de vidro de fundo chato com 50 ml de capacidade a partir da equação (2).

$$\rho_s = \rho_f \times \left[\frac{(M_2) + (M_1)}{(M_4 + M_2) - (M_1 + M_3)} \right] \quad (2)$$

Onde: ρ_s — massa específica real [kg/m³]; ρ_f — massa específica do fluido [kg/m³]; M_1 — massa do picnômetro [kg]; M_2 — massa do picnômetro + amostra [kg]; M_3 — massa do picnômetro + água + amostra [kg]; M_4 — massa do picnômetro + água [kg].

Com o valor encontrado fez-se uma média aritmética para obtenção do valor da massa específica para cada faixa granulométrica utilizada.

2.5 Ensaios para determinação da vazão volumétrica de polpa e sólidos

As massas do material separado em faixa granulométrica foram utilizadas para realização dos ensaios de determinação de vazão volumétrica de polpa e sólidos.

A fim de se obter maior número de pontos para análise de resultados, foram realizados ensaios variando a concentração mássica (c_m) de 5 %, 10 %, 15 % e 20 %. As porcentagens mássicas foram calculadas a partir da equação (3).

$$c_m = \frac{m_s}{m_s + m_f} = \frac{m_s}{m_s + \rho_f \times V_f} \quad (3)$$

Onde: V_f — volume do fluido [m³]; m_s — massa do sólido [kg]; m_f — massa específica do fluido (água) [kg/m³].

Com as porcentagens mássicas calculadas, o material foi levado à bancada de ciclonagem, provida de bomba centrífuga de polpa de eixo horizontal (sem a injeção de água de gaxeta). Preenchia-se o silo alimentador com água até se obter o volume de polpa desejado e iniciavam-se os ensaios, acionando a bomba e monitorando a pressão manométrica.

Inicialmente ligou-se o agitador de polpa para manter a mesma em suspensão. Após a homogeneização do material, ligou-se a bomba e, com auxílio de um balde, coletou-se o material provindo do *underflow* e *overflow* do ciclone, enquanto se cronometrava o tempo. O material recolhido foi levado a uma balança (com precisão de 1 grama). O tempo gasto na coleta do material e a massa da polpa eram anotados. A polpa foi seca em estufa e, após a

secagem, pesava-se novamente para a obtenção da massa de sólidos. Esse procedimento foi realizado em triplicata, sendo que se adotaram os valores médios para análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições de trabalho da bomba

Depois de realizados os ensaios preliminares com areia para determinar as condições de trabalho da bomba na bancada de hidrociclonagem, os dados obtidos e mantidos para todos os ensaios foram, 2,0 kPa de pressão e 2,13 kg/s de vazão de água.

3.2 Massa específica

Após os cálculos da massa específica, utilizando picnometria, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Dados obtidos para massa específica (kg/m³) por faixa granulométrica (mm).

Faixa granulométrica (mm)	Massa específica (kg/m ³)
0,297 a 0,212	2471,6
0,212 a 0,150	2447,8
0,150 a 0,106	2357,8
0,106 a 0,075	2450,0

3.2 Determinação da vazão volumétrica de polpa e sólidos

Nos primeiros ensaios realizados foram utilizadas esferulas na faixa granulométrica entre 0,297 mm e 0,212 mm. Os dados obtidos, apresentados na Tabela 2, possibilitaram a construção de gráficos de vazão volumétrica de polpa e vazão volumétrica de sólidos (Figura 1).

Tabela 2. Dados obtidos com concentração mássica de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % (-0,297 mm +0,212 mm).

Concentração mássica [%]	Concentração volumétrica [%]	Vazão volumétrica de polpa [m ³ /s]	Vazão volumétrica de sólidos [m ³ /s]
4,92	2,05	0,002806	0,000103
9,98	4,29	0,002904	0,000299
14,98	6,65	0,002967	0,000333
19,96	9,16	0,002522	0,000374

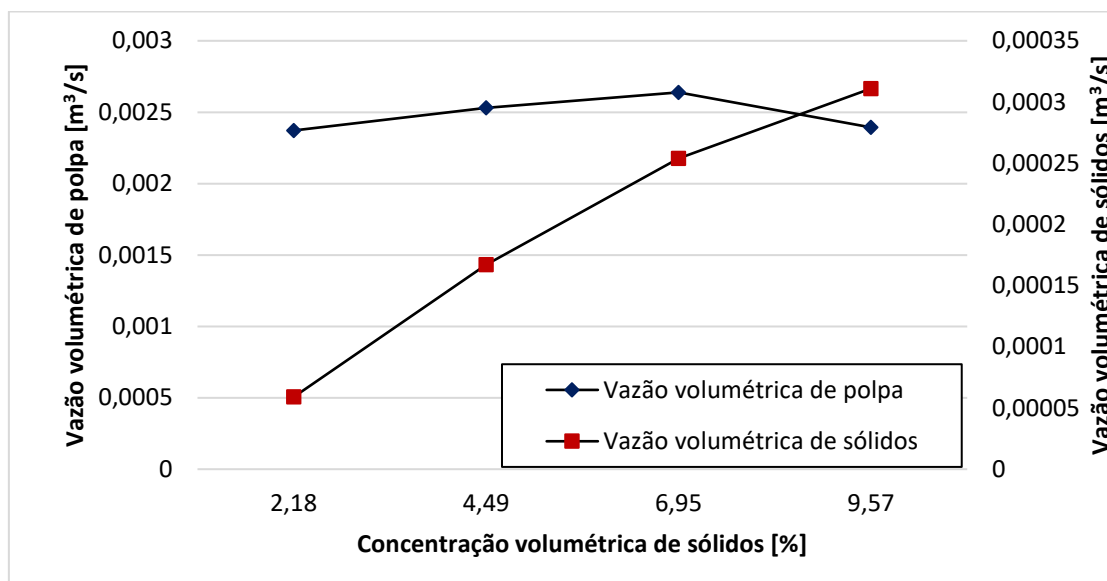


Figura 1. Vazão volumétrica de polpa e de sólidos (-0,297 +0,212 mm).

O gráfico da vazão volumétrica de polpa indica que tal fator é decrescente com a variação da concentração mássica da polpa, uma vez que, ao serem comparadas as concentrações nominais de 20 % e 5 %, nota-se uma diminuição de mais de 10 % na vazão. Porém, o gráfico da vazão volumétrica de sólidos indica comportamento inverso, pois conforme se aumentou a concentração mássica, a vazão também aumentou 263 % a mais em 20 % de concentração mássica nominal ao se comprar com 5 %. Isso se dava porque, embora a vazão volumétrica de polpa tenda a diminuir com a concentração de sólidos, a vazão de sólidos aumente, já que para cada metro cúbico de polpa se teria maior quantidade de partículas. Naturalmente, o aumento de potência requerida (proporcional à massa específica da polpa, se o aumento de viscosidade não for considerado) não era limitador do experimento, em função da potência instalada (3,7 kW).

Para a faixa granulométrica entre 0,212 mm e 0,150 mm percebeu-se que o comportamento das vazões foi semelhante ao observado na faixa anterior. A vazão volumétrica de sólidos foi monotonicamente crescente com a concentração mássica, observando-se relação oposta entre vazão volumétrica de polpa e concentração mássica.

Para os dados obtidos com os ensaios com o material na faixa granulométrica entre 0,150 mm e 0,106 mm também foram construídos gráficos, apresentados na Figura 2, cujos dados são apresentados na Tabela 2, de acordo com a concentração mássica nominal.

Tabela 2. Dados obtidos com concentração mássica de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % (-0,150 mm +0,106 mm).

Concentração mássica [%]	Concentração volumétrica [%]	Vazão volumétrica de polpa [m³/s]	Vazão volumétrica de sólidos [m³/s]
4,99	2,18	0,002372	0,000059
9,98	4,49	0,002530	0,000167
14,97	6,95	0,002639	0,000254
19,97	9,57	0,002394	0,000311

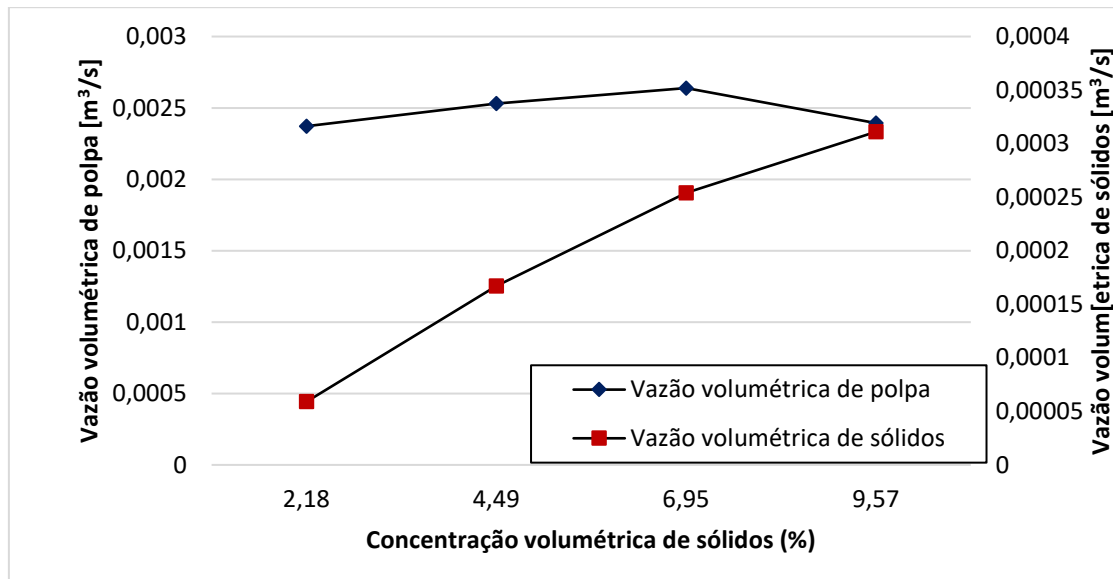


Figura 2. Vazão volumétrica de polpa e de sólidos (-0,150 +0,106 mm).

Diferentemente dos casos anteriores, a vazão volumétrica de polpa desta faixa granulométrica apresentou aumento entre 5 % e 15 % de concentração mássica nominal. Em 20 % de concentração, a vazão exibiu valor semelhante ao das outras faixas, de 0,024 m³/s, com queda de pouco mais de 9 % em relação à vazão verificada com 15 % de concentração mássica. A vazão volumétrica de sólidos manteve o comportamento observado anteriormente, monotonicamente crescente com a concentração mássica.

A menor faixa granulométrica com a qual foi possível realizar ensaios, devido à falta de material (esfêrulas de vidro), foi a que compreendia partículas entre 0,106 mm e 0,075 mm. Com os dados obtidos nestes ensaios, apresentados de acordo com as concentrações mássicas nominais de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % na Tabela 3. Foi possível construir os gráficos a seguir, que representam a vazão volumétrica de polpa e a vazão volumétrica de sólidos (Figura 3).

Tabela 3. Dados obtidos com concentração mássica de 5 %, 10 %, 15 % e 20 % (-0,106 mm +0,075 mm).

Concentração mássica [%]	Concentração volumétrica [%]	Vazão volumétrica de polpa [m ³ /s]	Vazão volumétrica de sólidos [m ³ /s]
4,99	2,10	0,002376	0,000062
9,98	4,33	0,002349	0,000121
14,97	6,70	0,002420	0,000213
19,97	9,24	0,002637	0,000300

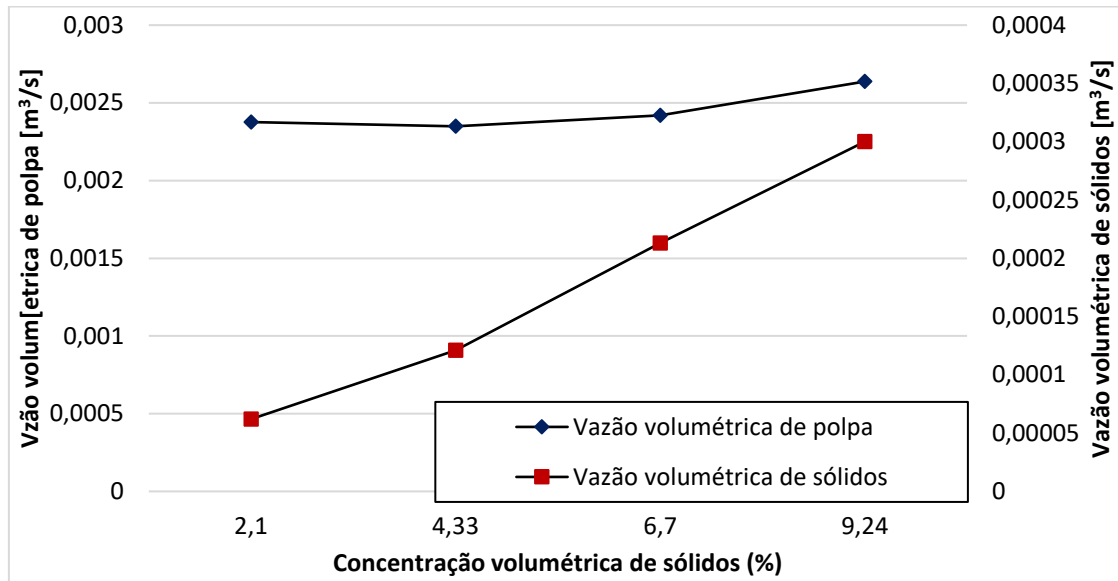


Figura 3. Vazão volumétrica de polpa e de sólidos (-0,106 +0,075 mm).

A vazão volumétrica desta faixa granulométrica apresentou comportamento inverso ao da faixa anterior: diminuição do valor entre 5 % e 15 % de concentração mássica nominal e aumento entre 15 % e 20 % de concentração. Isto pode indicar que, para partículas grossas, os efeitos deletérios do aumento de viscosidade dinâmica do suspensoide com o aumento da concentração são prevalentes. Porém, ao ser comparados os valores de 20 % e 5 %, nota-se que a variação foi pequena com um aumento de apenas 1,3 %. A vazão volumétrica de sólidos, entretanto, manteve o comportamento com relação às faixas anteriores. Numa abordagem expedita, utilizando-se o pacote computacional *EasyPlot*, a vazão volumétrica de sólidos pode ser descrita pela equação (4), a seguir e mostrada na Figura 4 (expressa em m³/s e dada em função do diâmetro médio geométrico e da concentração volumétrica de sólidos, esta última dada em valores percentuais).

$$Q_{vs} = 4,891 \times 10^{-5} \times c_v^{0,4796} + 1,0936 \times 10^{-4} \times c_v^{0,2461} \times d_{50}^{0,220} - 3,836 \times 10^{-4} \quad (4)$$

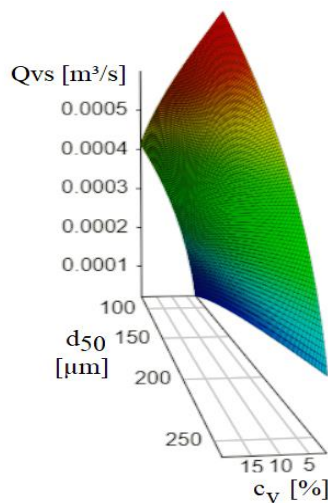


Figura 4. Vazão volumétrica de sólidos em função do tamanho de partícula e da concentração volumétrica.

4. CONCLUSÕES

A vazão volumétrica de polpa nas faixas de concentração estudadas diminui com valores acima de aproximadamente 8 % de concentração volumétrica, ao menos nas três maiores faixas granulométricas. Porém, para partículas entre 0,106 mm e 0,075 mm houve aumento da vazão com a concentração de sólidos, apesar de pouco expressivo. A vazão volumétrica de sólidos manteve seu comportamento de monotonicidade do crescimento com relação à concentração mássica em todos os ensaios. A variação ocorrida foi uma diminuição dos valores observados na faixa granulométrica de 0,297 mm a 0,212 mm para as demais faixas estudadas. Tal variação chegou 40 % ao comparar-se as concentrações mássicas de 5 % e a 21 % ao serem comparadas as concentrações mássicas de 20 %.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro para a realização deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Dörr A, Sadiki A, Mehdizadeh A. A discrete model for the apparent viscosity of polydisperse suspensions including maximum packing fraction. *Journal of Rheology* 2013; 57 (743).
- Prado D.R. Porosidade de sistemas polidispersos. [Dissertação de Mestrado]. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2015.
- Rocha F.A.T. Bombeamento de polpa e o fator de atrito. [Monografia de Especialização]. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2010.
- Luz, J.A.M. Conversibilidade entre distribuições probabilísticas usadas em modelos de hidrocicones. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 58, p. 89-93, 2005.