

Estudo de diferentes espumantes no tamanho de bolhas e na eficiência do processo de flotação de sulfetos de chumbo e zinco

Study of different frothers on bubble size and on the efficiency of the flotation process of lead and zinc sulphides

Paloma Serra Casagrande
Bolsista PCI, Eng. De Materiais, UFRJ.

Hudson Couto
Supervisor, Eng. Químico, D. Sc.

Resumo

A eficiência da flotação depende de um conjunto de variáveis que afetam as propriedades físico-químicas e as condições hidrodinâmicas. Espumantes têm um papel significativo nesse processo, influenciando na distribuição de tamanho de bolha e contribuindo para a estabilização da espuma. Nesse trabalho foram analisadas as recuperações mássicas e metalúrgicas da flotação de um minério contendo sulfetos de chumbo e zinco em uma célula *Magotteaux*. As variáveis escolhidas foram os tipos de espumantes (AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC) e as concentrações dos reagentes. Um modelo matemático adaptado da equação de Laskowski foi usado no ajuste dos dados experimentais de recuperação mássica e metalúrgica do processo. O espumante AeroFroth 65 apresentou o melhor desempenho para a recuperação de chumbo (81% com um teor de 28%).

Palavras-chave: célula *magotteaux*, recuperação, sistema trifásico, espumante, tamanho de bolha.

Abstract

Flotation efficiency depends on a set of variables that affect the physicochemical properties and the hydrodynamic conditions in a three-phase system. Frothers play a significant role in this process, influencing the bubble size distribution and contributing to foam stabilization. In this work, mass and metallurgical recoveries of the flotation of a sulphide ore containing lead and zinc metals in a *Magotteaux* cell were analyzed. The variables chosen were the types of frothers (AeroFroth 65, Flotanol D14 and MIBC) and the concentrations of the reagents. A mathematical model adapted from the Laskowski equation was used to fit the experimental data for both mass and metallurgical recoveries. AeroFroth 65 showed the best performance for lead recovery (81% with a grade of 28%).

Key words: *magotteaux* cell, recovery, three-phase system, frother, bubble size.

1. Introdução

Ao longo dos anos, o esgotamento progressivo de jazidas minerais, aliado à necessidade de recuperação de minerais complexos de baixo teor têm impulsionado o setor mineral a investir no desenvolvimento de processos eficazes de beneficiamento. O progresso feito pela ciência nos últimos 100 anos, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de reagentes, fez da flotação uma das técnicas de separação mais competitivas do ponto de vista econômico e uma das mais utilizadas no beneficiamento mineral (FUERSTENAU et al., 2007). Hoje, bilhões de toneladas de minérios são recuperados anualmente e cerca de 95% dos metais produzidos são beneficiados pela flotação (MATIS & ZOUBOULIS, 1995).

A eficiência da flotação depende de um conjunto de fatores químicos e físicos que afetam as propriedades físico-químicas e as condições hidrodinâmicas em um sistema trifásico (sólido-líquido-gás) (TUCKER et al., 1994). Uma das variáveis mais importantes em sistemas de flotação aerados é o tamanho de bolha, devido à sua ação na eficiência de coleta e de transporte de partículas minerais. Os espumantes são tensoativos utilizados no aprimoramento da dispersão de bolhas de ar em máquinas de flotação, além de auxiliarem na estabilização da espuma (BULATOVIC, 2007). Outra importante contribuição é o seu efeito na redução do tamanho de bolha, o qual pode ser entendido pela sua capacidade de retardar a coalescência de bolhas (CHO & LASKOWSKI, 2002).

2. Objetivos

Este estudo tem como propósito analisar os dados experimentais de recuperação mássica e metalúrgica de um mineral sulfetado para diferentes espumantes testados, assim como relacioná-los ao tamanho médio de bolhas dos ensaios de flotação. Além disso, verifica-se a aplicação de um modelo matemático adaptado da equação de Laskowski para descrever o ajuste dos dados experimentais de recuperação por concentração de espumantes.

3. Material e Métodos

2.1. Reagentes

Durante o processo de flotação foram utilizados os reagentes espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC, os dois primeiros fornecidos pela Cytec Solvay Group e o último, pela Clariant. Além disso, foram usados metabissulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) e sulfato de zinco (ZnSO_4) como depressores, FloMin C-3330 (um isopropil xantato de sódio) como coletor e uma solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como regulador de pH.

2.2. Amostra mineral

Nos estudos foram empregadas amostras de minério sulfetado provenientes de um depósito em Caçapava do Sul (RS, Brasil). A amostra mineral foi submetida às etapas de homogeneização, quarteamento, britagem e moagem até a obtenção de uma granulometria característica de $P_{80} = 125 \mu\text{m}$. A análise química por fluorescência de raios X (Tabela 1) mostrou que o minério possui como principais metais de interesse o chumbo (Pb) e o zinco (Zn), apresentando teores de 1,3% para ZnO (1,1% de Zn) e 2,2% de PbO (2,0% de Pb).

A análise por difração de raios X evidenciou a presença de galena e esfarelita como minerais portadores de Pb e Zn, respectivamente.

Tabela 1. Teores da amostra de minério sulfetado usada nos ensaios de flotação.

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	PbO	S	PPC*
0,47	10,86	66,83	0,22	7,26	1,43	0,58	4,37	1,31	2,16	1,9	2,1

*Perda por calcinação

2.3. Célula de flotação

Os testes de flotação foram desenvolvidos em uma célula mecânica Magotteaux modelo FM001 equipada com uma cuba de 5L. As condições operacionais de rotação mecânica, vazão de entrada de ar e percentual de sólidos foram mantidas em 1000 rpm, 3 L.min⁻¹ e 25%, respectivamente, a concentração do espumante variou de 2 até 50 mg.L⁻¹ (2; 5; 10; 20; 50 mg.L⁻¹) para os três espumantes testados (AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC). A Tabela 2 apresenta os parâmetros de flotação empregados nos ensaios.

Tabela 2. Parâmetros da flotação de galena (PbS) utilizados nos ensaios.

Reagentes	Na ₂ S ₂ O ₅	ZnSO ₄	C-3330	Espumante
Concentração de solução	10%	10%	0,2%	1%
Dosagem de reagente (g/t)	400	300	7	3 - 67
Tempo de condicionamento (min)	3	3	2	2
pH	8,5	8,5	8,5	8,5

A determinação do tamanho médio de bolhas foi realizada por meio do uso do equipamento Anglo Platinum Bubble Sizer com uma câmera digital Canon Power Shot S95 acoplada para captura e visualização das bolhas e do software ImageJ® para análise e processamento das imagens digitais. A Equação 1 define o diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$), que foi empregado como cálculo do diâmetro médio das bolhas, onde d_b e n são o diâmetro de bolha e o número de bolhas para classe de tamanho "i", respectivamente. (ALMEIDA et al., 2019).

$$D_{3,2} = \frac{\sum n_i \cdot d_{bi}^3}{\sum n_i \cdot d_{bi}^2} \quad (1)$$

As Equações 2 e 3 representam modelos matemáticos (LASKOWSKI, 2003; BRAGA et al, 2015) de curvas de melhor ajuste aos dados experimentais de diâmetro médio de Sauter ($D_{3,2}$) e de recuperação mássica e metalúrgica (R) em função da concentração de espumante (C_f), respectivamente. O software Statistica, versão 13.1, foi usado para estimar os parâmetros d_L (indicativo do diâmetro da bolha limite), A (fator pré-exponencial), B (constante de decaimento) e RM_L (indicativo da recuperação limite obtida no processo).

$$D_{3,2} = d_L + A \cdot e^{(-B \cdot C_f)} \quad (2)$$

$$R = 100 - [(100 - RM_L) + A \cdot e^{(-B \cdot C_f)}] \quad (3)$$

4. Resultados e Discussão

As figuras abaixo reúnem dados experimentais de recuperação metalúrgica obtidos para os ensaios de flotação Rougher realizados com a amostra de minério sulfetado de estudo, utilizando os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC. A Figura 1 apresenta um perfil de crescimento para a recuperação dos metais chumbo (Pb) e zinco (Zn) em função da concentração dos espumantes estudados, até alcançar um patamar em torno de 10 - 20 mg.L⁻¹ (valores próximos a CCC dos espumantes), onde é observada pouca variação dos dados de recuperação metalúrgica. O AeroFroth 65 se mostrou mais o espumante mais efetivo alcançando um patamar de 81% de recuperação de Pb em 50 mg.L⁻¹ e cerca de 70% de recuperação de Pb com apenas 5 mg.L⁻¹ do espumante. Os patamares finais de recuperação de Pb para o Flotanol D14 e o MIBC ficaram em torno de 70% e 65%, respectivamente. A recuperação de Zn final para todos os espumantes ficou em aproximadamente 40%.

A Figura 2 reúne dados experimentais de recuperação metalúrgica (RM) do metal chumbo em função do seu teor no concentrado de flotação Rougher (RG), para cada um dos espumantes em estudo. Os dados experimentais revelam que o espumante AeroFroth 65 apresentou melhor desempenho na recuperação metalúrgica de chumbo, chegando a recuperar 81% do mineral considerando um teor de 27,6%. Por outro lado, os espumantes Flotanol D14 e MIBC apresentaram desempenhos comparáveis na recuperação de chumbo.

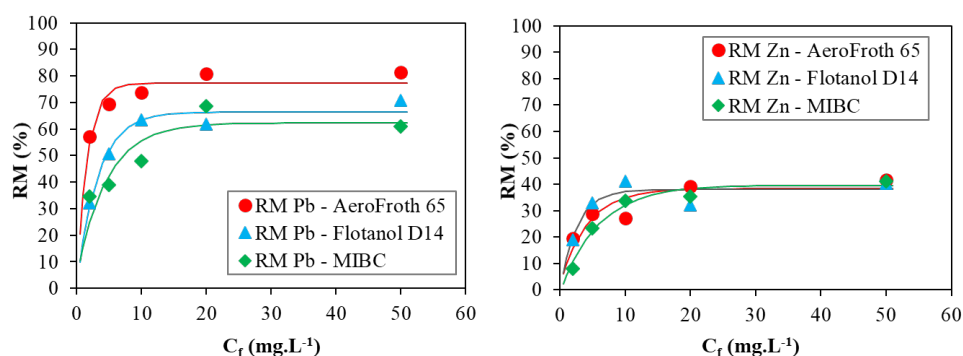


Figura 1. Dados experimentais de recuperação metalúrgica (RM, em %) dos metais chumbo (à esquerda) e zinco (à direita) obtidos para a amostra em função da concentração (C_f, em mg.L⁻¹) de cada espumante.

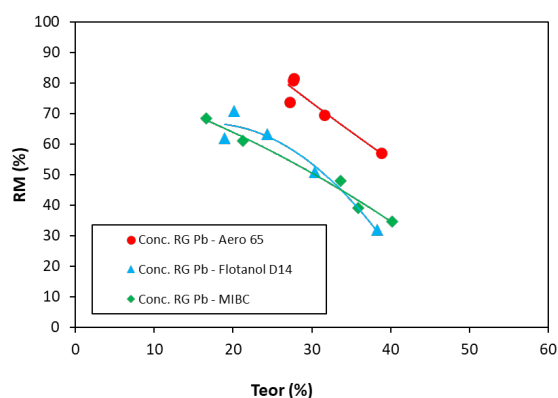


Figura 2. Recuperação metalúrgica (RM, em %) do metal chumbo em função do seu teor no concentrado de flotação Rougher para os espumantes.

A Figura 3 mostra o aumento da recuperação metalúrgica de Pb do processo de flotação junto ao aumento da concentração de espuma e associado à regressão do diâmetro das bolhas até atingir a concentração crítica de coalescência dos espumantes (entre 10 – 20 mg.L-1). A redução do tamanho das bolhas geradas causa o aumento da área interfacial de contato bolha-partícula, e assim, aumentam a probabilidade de colisão das partículas hidrofóbicas, favorecendo a adesão de partículas às bolhas e contribuindo para o aumento da recuperação da flotação (REIS, 2015). Além disso, a diminuição do diâmetro médio das bolhas pode ser explicada pela redução da tensão superficial da solução de espuma, levando a uma minimização da coalescência de bolhas em função da orientação das moléculas do espuma na superfície destas bolhas (interface gás- líquido), em conformidade com diversos trabalhos da literatura (CHO e LASKOWSKI, 2002; COUTO et al., 2009; FINCH e DOBBY, 1990).

Para concentrações de espuma acima da CCC, na faixa de 20 – 50 mg.L-1, o tamanho de bolha e a recuperação metalúrgica de Pb variam de forma pouco significativa, atingindo valores mínimos e máximos iguais a 437 µm, 478 µm e 517 µm e 82%, 71% e 69% para os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC, respectivamente. Para concentrações de espuma abaixo da CCC, em torno de 10 mg.L-1 para o AeroFroth 65 e Flotanol D14 e em torno de 15 mg.L-1 para o MIBC, a recuperação metalúrgica cresce à medida que a concentração de espuma aumenta e o tamanho de bolha diminui. Para valores de concentração acima da CCC de cada espuma, o perfil de recuperação metalúrgica atinge seus valores máximos para tamanhos de bolha mínimos e se estabiliza.

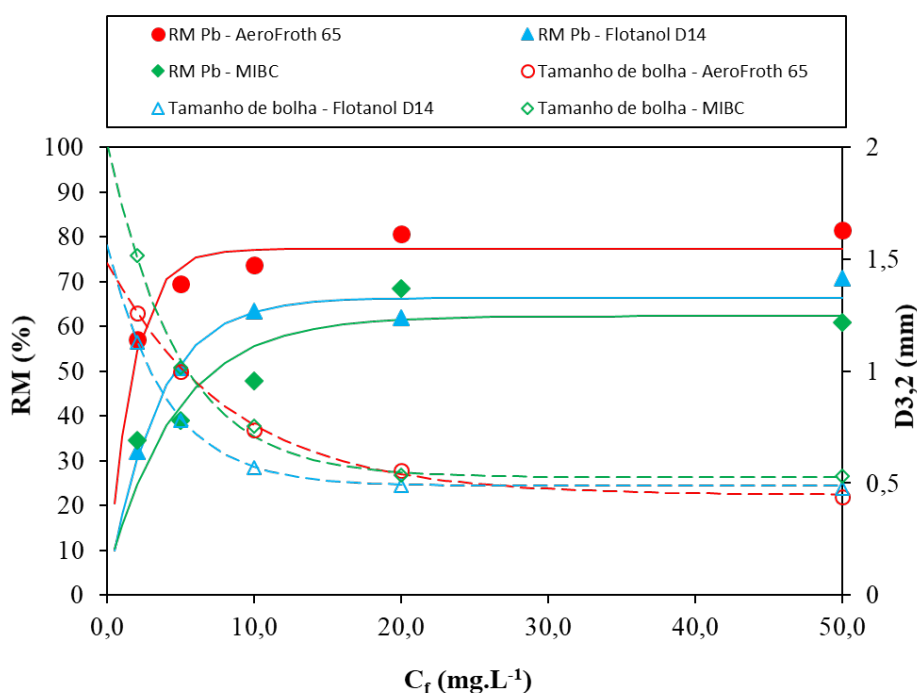


Figura 3. Efeito da concentração dos espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 MIBC no tamanho de bolha e na recuperação metalúrgica do chumbo.

Os modelos matemáticos encontrados nas Equações 2 (chamado de modelo de Laskowski) e 3 (adaptado do primeiro) serviram como poderosas ferramentas estatísticas capazes de descrever o comportamento experimental observado para o tamanho médio de bolha ($D_{3,2}$) em função da concentração de espumante (C_f) e também para a recuperação mássica e metalúrgica (RM) em termos da concentração de espumantes, na faixa de 2 – 50 mg.L⁻¹. Os parâmetros dos modelos obtidos por meio do software Statistica, apresentados nas Tabelas 3 e 4 para cada espumante, foram utilizados com sucesso nos ajustes dos pontos experimentais de recuperação mássica, metalúrgica (Pb e Zn) e diâmetro médio de bolha ($D_{3,2}$) encontrados nos gráficos das Figuras 1, 2 e 3, respectivamente, com grande precisão (fator de correlação R acima de 0,99 para a grande maioria dos casos).

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Laskowski (2003) utilizado para os dados de tamanho médio de bolha em função da concentração de espumante.

Espumantes	dL	Parâmetros	
		A	B
AeroFroth 65	0,4465	1,0386	0,12
Flotanol D14	0,4881	1,0774	0,2546
MIBC	0,5258	1,493	0,21

Tabela 4. Parâmetros do modelo adaptado de Laskowski (2003) utilizado para os dados de recuperação mássica e metalúrgica em função da concentração de espumante.

Espumantes	Recuperação	RML	Parâmetros	
			A	B
AeroFroth 65	Mássica	6,2	4,5	0,16
	RM. Pb	77,3	77,4	0,62
	RM. Zn	38,3	36,3	0,24
Flotanol D14	Mássica	6,4	6,0	0,13
	RM. Pb	66,4	65,9	0,306
	RM. Zn	38,0	38,5	0,386
MIBC	Mássica	5,8	5,0	0,07
	RM. Pb	62,3	57,8	0,215
	RM. Zn	39,6	40,7	0,17

5. Conclusões

Neste estudo, foram avaliados dados experimentais de recuperações mássicas e metalúrgicas, assim como um modelo matemático adaptado da equação de Laskowski, para a flotação de uma amostra mineral com os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC. Os resultados mostraram que a recuperação mássica da amostra mineral foi crescente com o aumento da concentração dos espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC; assim como a recuperação metalúrgica dos minerais sulfetados de chumbo (PbS) e zinco (ZnS) até que se alcançasse um patamar em torno de 10 - 20 mg.L⁻¹ (valores próximos a CCC), onde foi observada pouca

variação desses dados. Observou-se também que o espumante AeroFroth 65 apresentou melhor desempenho na recuperação metalúrgica de chumbo, chegando a recuperar 81% do mineral considerando um teor de 27,6%.

Além disso, foi possível concluir que para concentrações de espumante abaixo da Concentração Crítica de Coalescência (CCC), o tamanho de bolha diminui acentuadamente com o aumento na concentração de espumante, enquanto que as recuperações mássica e metalúrgica de chumbo e de zinco tendem a aumentar, atingindo os valores limites de 6,1%, 6,5%, 5,6% (Recuperação mássica), 82%, 71%, 61% (Recuperação metalúrgica de chumbo) e 41% (Recuperação metalúrgica de zinco) para os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC em 50 mg.L⁻¹. Para concentrações de espumante acima da CCC, na faixa de 20-50 mg.L⁻¹, o tamanho de bolha variou de forma pouco significativa, atingindo valores mínimos iguais a 437 µm, 478 µm e 517 µm para os espumantes AeroFroth 65, Flotanol D14 e MIBC. Assim, pode-se dizer que presença de bolhas de menor tamanho leva a um melhor desempenho no processo de flotação, tanto na recuperação mássica quanto metalúrgica (dos metais chumbo e zinco) e para tanto, é fundamental a presença de espumantes acima de determinada concentração (CCC) (entre 10 - 15 mg.L⁻¹ para os espumantes estudados em sistema trifásico).

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo financiamento das bolsas de estudo e ao CETEM/MCTIC pelo estágio do Pedro e pela infraestrutura.

7. Referências Bibliográficas

ALMEIDA, R.N.; ALVES, J.L.S.; BARRETO, E.G.C.; COUTO, H.J.B. Avaliação do tamanho de bolha em sistema trifásico de uma célula de flotação Magotteaux. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2019, Nov. 04-08; Belo Horizonte, Brasil.

BRAGA, A.S.; SOUZA, P.T.C.; MATAI, P.; LEAL, F.L.S. Concentração micelar crítica e concentração crítica de coalescência de reagentes de flotação. *Holos* 2015; 7;140-7.

BULATOVIC, S.M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores. 1a ed. Amsterdam: Elsevier; 2007.

CHO, Y.; LASKOWSKI, J.S. Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing* 2002; 64(2-3);69-80.

COUTO, H.J.B.; NUNES, D.G.; NEUMANN, R.; FRANÇA, S.C.A. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. *Minerals Engineering* 2009; 22; 330-5.

FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. Column flotation. 1a ed. New York: Pergamon Press; 1990.

FUERSTENAU, M.C.; JAMESON, G.J.; YOON, R. editores. Froth flotation: a century of innovation. Colorado: SME; 2007.

LASKOWSKI, J.S. Fundamental properties of flotation frothers. In: Lorenzen L., Bradshaw D. J. Proceedings 22nd Int. Mineral Processing Congress; 2003; Cape Town, África do Sul. p. 788-97.

MATIS, K.A.; ZOUBOULIS, A.I. Flotation Science and Engineering. 1a ed. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1995. Chapter 1, An overview of the process, p. 1-44.

REIS, A.S. Estudo da geração de bolhas de diversos tamanhos em coluna de flotação. [Tese de Mestrado]. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia; 2015.

TUCKER, J.P.; DEGLON, D.A.; FRANZIDIS, J.P.; HARRIS, M.C.; O'CONNOR, C.T. An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell. Minerals Engineering 1994; 7(5-6);667-80.