

FLOTAÇÃO NA PRESENÇA DE POLIACRILAMIDAS

H. D. G. Turrer; A. C. Araujo; R. M. Papini; A. E. C. Peres

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais – R.
Espírito Santo, 35/206 – Centro – CEP 30.160-030 – Belo Horizonte – MG.

E-mail: hturrer@ufmg.br; armando@demin.ufmg.br; rsiamagriotis@yahoo.com.br; accperes@demet.ufmg.br

RESUMO

A flotação é um importante processo de concentração de minérios de ferro. Um dos grandes problemas encontrados nas instalações que o utilizam é a baixa recuperação metalúrgica associada principalmente à fração de menor granulometria. Neste trabalho, investigou-se a utilização de floculantes sintéticos na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Os floculantes utilizados foram poliacrilamidas de alto peso molecular e diferentes graus iônicos. Foram feitos testes de flotação em bancada com o intuito de comparar o desempenho da flotação com e sem adição de poliacrilamidas. Constatou-se que poliacrilamidas catiônicas e não-iônicas causam um aumento significativo na recuperação metalúrgica do processo. As aniônicas não ocasionaram melhora na performance da flotação. Esse aumento na recuperação metalúrgica foi acompanhado de uma pequena piora na qualidade do concentrado. A flotação na presença de poliacrilamidas foi muito influenciada pelas condições hidrodinâmicas da polpa, como agitação e porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação.

PALAVRAS-CHAVE: flotação, minério de ferro, poliacrilamida

1. INTRODUÇÃO

O desempenho do agente depressor dos minerais de ferro é o principal regulador da recuperação metalúrgica na flotação reversa de minérios de ferro. A recuperação é a porcentagem de metal contido na alimentação que é recuperada no concentrado (Wills, 1997).

A menor recuperação do elemento útil está normalmente associada à presença de partículas de menor granulometria no sistema de flotação. Pode ter várias causas como alta energia de superfície específica das partículas finas, que causa um aumento da tendência de ocorrência de adsorção não específica do coletor (Fuerstenau, 1980), baixa massa e momento das partículas finas, que causam arraste em líquidos ou aprisionamento em partículas flotadas (Fuerstenau, 1980; Mathur *et al.*, 2000) e tendência por parte das partículas finas de se adsorverem na interface líquido-ar (Hemmings, 1974).

A utilização de um floculante seletivo juntamente com o amido pode melhorar o desempenho da flotação pela formação de flocos maiores, nos quais os fenômenos citados anteriormente seriam minimizados. Além disso, Shimabayashi *et al.* (1992) e Somasundaran e Yu (1994) afirmaram que em alguns sistemas o uso de uma mistura de dois floculantes é mais efetivo do que o uso de cada um individualmente. A ordem de adição dos componentes da mistura tem efeito no resultado final (Pearse *et al.*, 2001; Yan *et al.*, 2004).

O uso de poliacrilamidas como agente depressor em alguns sistemas de flotação já se mostrou como uma interessante alternativa. Yuehue *et al.* (2004) estudaram o uso de poliacrilamida na flotação direta de caulinita. Eles concluíram que a poliacrilamida aniônica aumentou a recuperação do processo através da adsorção por ligações de hidrogênio desse reagente em planos da superfície mineral que exibiam baixa interação com o coletor. Desse modo, flocos eram formados onde somente os planos de maior interação com o coletor ficavam expostos para adsorção do mesmo. Boulton *et al.* (2001) pesquisaram a utilização de poliacrilamidas de baixos pesos moleculares e diferentes grupos funcionais na separação por flotação da esfalerita e pirita com isobutil xantato. Concluíram que poliacrilamidas melhoram a depressão da pirita sem alterar significativamente a recuperação no flotado da esfalerita. Uma maior depressão da pirita foi obtida quando o coletor era adicionado à polpa após condicionamento da poliacrilamida e para partículas de maior granulometria. A seletividade obtida deveu-se à interações específicas desses polímeros com os íons e hidróxidos de ferro da superfície mineral.

2. OBJETIVOS

Investigar o aumento da recuperação metalúrgica na flotação reversa de minérios de ferro, sem perda da qualidade do concentrado, através do uso de floculantes sintéticos nestes sistemas de flotação.

3. METODOLOGIA

A amostra utilizada foi coletada na mina do Pico, localizada no município de Itabirito-MG. Ela foi classificada, visualmente, em itabirito pobre, constituído basicamente de hematita e quartzo. A amostragem foi realizada através de canaletas feitas nas frentes de lavra com o auxílio de uma retro-escavadeira. Em seguida a amostra foi peneirada em 150µm e a fração passante foi deslamada em ciclone de 2". O *underflow* foi secado em estufa a 100°C, homogeneizado e quarteadado em alíquotas menores.

Foi feita a análise granulométrica da amostra em peneiras com aberturas de 150µm, 105µm, 75µm, 53µm, 44µm e 37µm. Alíquotas das frações menores que 44µm foram analisadas no granulômetro Sympatec Helos Vectra.

Os teores em ferro foram determinados por dicromatometria e os da sílica, alumina, fósforo, e manganês por espectrometria de plasma, em equipamento Spectro CIROS[®](1) M SOP. Os valores de perda ao fogo (PPC) foram obtidos por calcinação em mufla, a 1100°C.

As determinações da mineralogia foram por difração de raios-X, realizadas em difratômetro marca Phillips, modelo PW-1400. Utilizou-se radiação K_α do cobre, monocromatizada entre ângulos 2θ de 0° e 80°. As amostras analisadas por difração de raios-X foram pulverizadas até granulometria menor que 0,037mm. Essas análises foram conduzidas para

verificar a possível presença de outros óxidos de ferro, que não da hematita, além daqueles minerais comumente encontrados nos minérios de ferro da região.

Os testes de flotação foram feitos em célula de laboratório Denver, modelo 5202, com cubas de 2,5 litros. A coleta do flotado se deu até exaustão da espuma. Utilizaram-se, respectivamente, como depressor, coletor e floculante soluções de amido a 1%, gelatinizado na proporção amido/soda de 5:1, amina a 1% e poliacrilamidas catiônica, aniônica e não iônica a 0,01%. Os tempos de condicionamento foram de 1 minuto para a coletor (amina), 5 minutos para o depressor (amido) e 3 minutos para a poliacrilamida. A ordem de adição dos reagentes foi poliacrilamida, amido e amina. Em todos os testes, inclusive aqueles com poliacrilamidas, adicionou-se o amido Itafloc, proveniente da Moinhos Cauê Indústria & Comércio Ltda. A amina foi a Flotigam EDA-B. Os floculantes foram as poliacrilamidas Magnifloc 796C (catiônico), Superfloc A-130 HMW (mediamente aniônico) e Superfloc N-300 (não-iônico) da Cytec do Brasil Ltda. Todas as poliacrilamidas eram de alto peso molecular. Para modular o pH utilizaram-se soluções de NaOH a 3% e HCl a 1%. Todas preparadas com água destilada.

A complexidade dos processos de flotação, custos de laboratório e tempo conduzem à necessidade de reduzir o número de variáveis a ser investigadas. Para minimizar o número de testes, assegurar e validar numericamente os resultados, o procedimento experimental utilizado foi através do projeto de experimentos fatoriais *screening* (2^k). O critério proposto para a realização dos testes exploratórios de flotação foi o fatorial de Plackett-Burman. Os fatores estudados nesses experimentos foram dosagem de coletor, dosagem de depressor, dosagem de floculante, pH de condicionamento do floculante, pH de flotação, agitação do condicionamento, agitação na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e porcentagem de sólidos em peso na flotação. Para efeito de comparação, um outro experimento foi realizado, em que floculantes sintéticos não foram utilizados. Para isso utilizou-se um fatorial completo *screening* (2^k). Os fatores estudados foram dosagem de coletor, dosagem de depressor e pH de flotação. Esse experimento não foi com o mesmo número de fatores dos experimentos com poliacrilamida, pois, por se tratar de uma técnica amplamente estudada, possui a maioria dos fatores já otimizados. As variáveis dependentes analisadas foram o teor de sílica no concentrado e a recuperação metalúrgica. O grau de confiança adotado foi de 95%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise granulométrica mostram que a amostra é constituída por uma alta fração de material fino, cerca de 60% passante na peneira com abertura de 0,044mm possui baixa porcentagem de lamas, ou seja, material abaixo de 10µm, que representa cerca de 2,5% da amostra.

As análises químicas, apresentadas na tabela I, mostram que ferro e sílica são os teores predominantes nas amostras. Os demais constituintes possuem teores muito menores.

Tabela I – Análise química da amostra por faixa de tamanho

%Fe	%SiO ₂	%P	%Al ₂ O ₃	%MnO ₂	PCC
38,16	44,97	0,018	0,21	0,01	0,21

O estudo da mineralogia da amostra foi feito na amostra cabeça e na fração menor que 0,037mm. Foi observada uma alta concentração de quartzo e hematita em ambas amostras e traços de goethita na fração menor que 0,037mm. Isso aliado aos baixos valores de PPC encontrados na amostra levam a concluir que a amostra é quase isenta de outros óxidos de ferro, além da hematita.

Como mencionado anteriormente, a metodologia adotada permitiu a avaliação de um grande número de variáveis com a execução de um número relativamente pequeno de testes. Os níveis dos fatores foram dosagem de coletor (60 e 120g/t), dosagem de depressor (250 e 500g/t), dosagem de floculante (2 e 10g/t), pH de condicionamento do floculante (6,0 e 10,0), pH de flotação (9,0 e 10,5), agitação do condicionamento (1000 e 1300rpm), agitação na flotação (1300 e 1500rpm), porcentagem de sólidos em peso no condicionamento (50 e 70%), porcentagem de sólidos em peso na flotação (30 e 50%). No caso dos experimentos sem uso de poliacrilamidas, os fatores pH de condicionamento, agitação do condicionamento e na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação foram fixados em, respectivamente, 6,0 (pH natural da polpa), 1500rpm, 60% e 40%. Os resultados dos experimentos estão apresentados nas tabelas II e III.

Os resultados mostram que, nas condições praticadas nos ensaios, o quartzo foi facilmente flotado, pois todos os testes apresentaram reduzido teor de sílica no concentrado quando comparados ao teor da alimentação. Isso deve ser atribuído às altas dosagens de coletor, baixas dosagens de depressor, características do mineral portador de sílica na amostra e da polpa. A recuperação metalúrgica, por sua vez, variou mais amplamente.

Tabela II - Experimentos sem poliacrilamidas

Fatores			Respostas	
Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	pH de flotação	Recuperação metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)
90	375	9,75	26,80	1,76
60	250	9,00	22,02	2,27
120	250	9,00	20,64	4,44
60	500	9,00	33,35	1,66
120	500	9,00	24,11	1,48
60	250	10,50	21,39	1,76
120	250	10,50	15,94	1,61
60	500	10,50	43,51	0,97
120	500	10,50	32,63	1,84
90	375	9,75	29,21	1,61

Tabela III - Experimento com poliacrilamida

Fatores								Respostas						
Coletor (g/t)	Depressor (g/t)	Floculante (g/t)	pH de condicionamento do floculante	pH de flotação	Agitação no condicionamento (rpm)	Agitação na flotação (rpm)	%Sol. no condicionamento	%Sol. na flotação	catiônica		não-iônica		aniônica	
									Rec. metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)	Rec. metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)	Rec. metalúrgica (%)	SiO ₂ no concentrado (%)
90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	35,69	2,72	31,66	1,62	28,47	1,41
120	500	2	10,00	9,00	1000	1300	70	50	33,39	3,10	26,74	2,81	22,53	1,20
120	500	2	10,00	10,50	1000	1500	50	30	49,05	2,55	51,33	1,09	40,41	1,74
120	250	10	6,00	9,00	1000	1500	70	50	6,59	4,04	8,96	4,81	4,30	4,56
60	500	10	10,00	9,00	1300	1500	50	50	27,70	2,24	20,26	4,01	25,29	1,76
60	500	2	6,00	9,00	1300	1500	70	30	28,97	2,95	35,18	2,60	34,07	2,06
60	250	2	10,00	10,50	1300	1300	70	50	18,44	1,93	30,03	1,74	22,06	1,56
60	500	10	6,00	10,50	1000	1300	50	50	44,12	1,16	41,01	1,56	33,72	0,96
60	250	2	6,00	9,00	1000	1300	50	30	43,18	2,31	37,15	2,98	37,83	1,50
60	250	10	10,00	10,50	1000	1500	70	30	34,64	1,61	46,47	3,52	29,32	1,51
120	250	10	10,00	9,00	1300	1300	50	30	27,42	1,61	29,41	5,26	27,38	1,86
120	250	2	6,00	10,50	1300	1500	50	50	17,90	1,94	21,19	2,47	21,14	2,83
120	500	10	6,00	10,50	1300	1300	70	30	20,51	3,45	31,31	4,38	17,63	1,23
90	375	6	8,00	9,75	1150	1400	60	40	32,92	2,49	35,69	1,94	26,98	1,06

Os resultados foram analisados utilizando-se o software estatístico Statgraphics Plus for Windows 3.0. Nesse estudo foram determinadas as magnitudes das influências dos fatores nas respostas, assim como os níveis dos fatores (codificados em -1, nível inferior do fator, e +1, nível superior do fator) que apresentaram os melhores resultados. O resumo dos resultados é apresentado na tabela IV.

Os experimentos realizados com as poliacrilamidas catiônica e não-iônica apresentaram melhores resultados de recuperações metalúrgicas. Em todos os experimentos, foi possível observar concentrados de boa qualidade. Os menores valores foram obtidos nos experimentos sem utilização de poliacrilamidas e com a poliacrilamida aniônica. A dosagem de floculante não figurou entre os quatro fatores mais influentes nos experimentos com poliacrilamida catiônica, porém, nos demais, ela mostrou grande influência. Nesses casos, os melhores resultados foram obtidos para baixas dosagens de floculantes. Isso porque altas dosagens prejudicam o desempenho da flotação pela formação de

flocos maiores. Eles apresentam maior facilidade de arraste e/ou por recobrimento excessivo da superfície mineral que resulta em inibição da ação dos outros reagentes. No experimento com poliacrilamida não-iônica, a maior recuperação e melhor qualidade do concentrado foi obtida para os mesmos níveis dos fatores.

Tabela IV Análise dos experimentos

		Experimentos com poliacrilamidas						Experimentos sem poliacrilamida	
		catiônica		não-iônica		aniônica		SiO ₂	RFe
		SiO ₂	RFe	SiO ₂	RFe	SiO ₂	RFe		
Fatores mais influentes	1 ^o	%sol. cond. (-1)	ag. cond. (-1)	floculante (-1)	%sol. flot. (-1)	ag. flot. (-1)	%sol. flot. (-1)	interação coletor/ pH flot.	depressor (+1)
	2 ^o	coletor (-1)	%sol. cond. (-1)	pH flot. (+1)	pH flot. (+1)	depressor (+1)	%sol. cond. (-1)	interação coletor/ depressor	coletor (-1)
	3 ^o	pH flot. (+1)	%sol. flot. (-1)	coletor (-1)	ag. cond. (-1)	coletor (-1)	coletor (-1)	depressor (-1)	interação pH flot./ depressor
	4 ^o	pH cond. (+1)	depressor (+1)	depressor (+1)	coletor (-1)	pH cond. (+1)	floculante (-1)	pH flot. (-1)	pH flot. (+1)
	5 ^o	depressor (-1)	coletor (-1)	ag. cond. (-1)	depressor (+1)	pH flot. (+1)	depressor (+1)	coletor (-1)	interação coletor/ depressor
	6 ^o	ag. flot. (-1)	floculante (-1)	%sol. cond. (-1)	pH cond. (+1)	%sol. flot. (-1)	ag. cond. (-1)	interação pH flot./ depressor	interação coletor/ pH flot.
	7 ^o	floculante (+1)	pH cond. (+1)	%sol. flot. (+1)	floculante (-1)	%sol. cond. (-1)	pH cond. (+1)	-	-
	8 ^o	ag. cond. (+1)	ag. flot. (-1)	pH cond. (+1)	%sol. cond. (-1)	floculante (-1)	pH flot. (+1)	-	-
	9 ^o	%sol. flot. (+1)	pH flot. (+1)	ag. flot. (+1)	ag. flot. (-1)	ag. cond. (+1)	ag. flot. (-1)	-	-
Melhores resultados	1,16	49,05	1,09	51,33	0,96	40,41	0,97	43,51	

Ao agrupar os fatores quanto à química do processo (dosagem de coletor, de depressor e de floculante, pH de condicionamento e de flotação), e quanto às condições hidrodinâmicas da polpa (agitação do condicionamento e na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e na flotação), observa-se que as respostas dos experimentos com as poliacrilamidas iônicas foram mais influenciadas pelos fatores relativos às condições hidrodinâmicas da polpa, sendo o catiônico mais sensível às condições no condicionamento e o aniônico às condições na flotação.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que a utilização de poliacrilamidas catiônicas e não-iônicas de alto peso molecular, na flotação catiônica reversa da amostra de minério de ferro, causam um aumento significativo na

recuperação metalúrgica do processo, de 43,5% para 49,1% e 51,33%, respectivamente. Em compensação, há um efeito negativo de pequeno porte, ilustrado na figura 1, que é a perda na qualidade final do concentrado, aumentando o teor de sílica em torno de 1,58% e 0,12%, respectivamente. Esses aumentos estão expressos em termos absolutos.

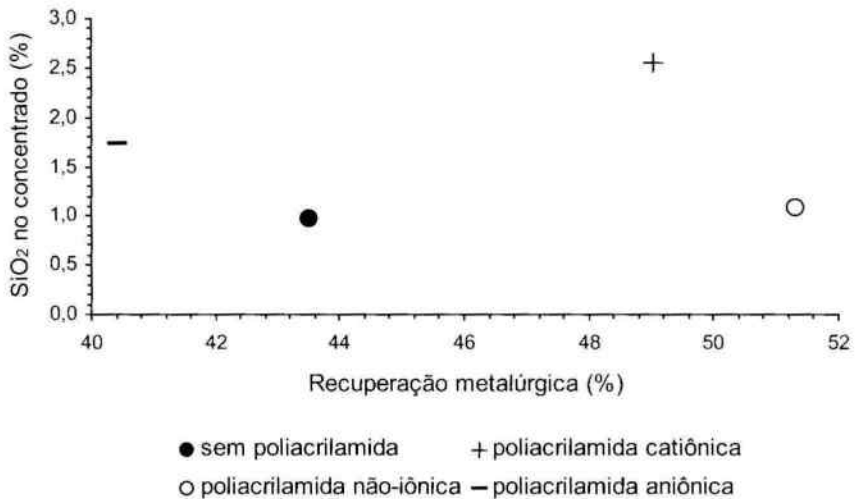


Figura 1 – Testes que apresentaram melhores recuperações metalúrgicas e seus respectivos teores de sílica no concentrado

Poliacrilamidas aniônicas foram inócuas para o desempenho da flotação.

Comparativamente à flotação convencional, a flotação na presença de poliacrilamida não-iônica se mostrou como a alternativa mais promissora.

A flotação reversa de minério de ferro deve ser conduzida com baixas dosagens de poliacrilamidas, por volta de 2g/t.

A ordem de influência dos fatores estudados (dosagem de coletor, dosagem de depressor, dosagem de floculante, pH de condicionamento do floculante, pH de flotação, agitação do condicionamento, agitação na flotação, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e porcentagem de sólidos em peso na flotação) alterou significativamente com a mudança do caráter iônico da poliacrilamida.

A flotação na presença de poliacrilamidas exibiu melhores performances para baixa porcentagem de sólidos em peso no condicionamento (50%), alta dosagem de amido (500g/t) e alto pH de condicionamento (10,0) e flotação (10,5).

Em todos os experimentos com poliacrilamidas, porcentagem de sólidos em peso no condicionamento e dosagem de coletor se mostraram fatores de grande importância na recuperação metalúrgica e no teor de sílica no concentrado, respectivamente.

As condições hidrodinâmicas do condicionamento e da flotação têm forte influência no desempenho da flotação na presença de flocos formados por poliacrilamidas, conforme evidenciado pela melhoria na performance ocasionada pela manipulação desses parâmetros, principalmente na recuperação metalúrgica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boulton, A., Fornasiero, D., Ralston, J. Selective depression of pyrite with polyacrylamide polymers. International Journal of Mineral Processing, v.61, p.13-22, 2001.

- Fuerstenau, D. W. Fine particles flotation. In: Fine particles processing. Somasundaran, P. (editor), AIME, Nova Iorque, v.I, c.35, p.669-705, 1980.
- Mathur, S., Singh, P., Moudgil, B.M. Advances in selective flocculation technology for solid-solid separations. *International Journal of Mineral Processing*, v.58, p.201-222, 2000.
- Hemmings, C E. 1974. Flotation rate interdependence of different size particles. *Australian Mining* 66:62 apud Fuerstenau, D. W. Fine particles flotation. In: Fine particles processing. Somasundaran, P. (editor), AIME, Nova Iorque, v.I, c.35, p.675, 1980.
- Pearse, M. J., Weir, S., Adkins, S. J., Moody, G. M. Advances in mineral flocculation. *Minerals Engineering*, v.14, p.1505-1511, 2001.
- Shimbayashi, S., Nishino, K., Nakagaki, M. *Colloids Surfaces*, 63, 121, 1992 apud Dispersions – characterization, testing, and measurement Kissa, E. (editor) Marcel Dekker Inc., Nova Iorque, c.8, p.282-344, 1999.
- Somasundaran, P., Yu, X. *Colloid Interface Science*, 53, 33, 1994 apud Dispersions – characterization, testing, and measurement Kissa, E. (editor) Marcel Dekker Inc., Nova Iorque, c.8, p.282-344, 1999.
- Wills, B A. *Mineral Processing Technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. pp 18, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- Yan, Y. D., Glover, S. M. Jameson, G. J., Biggs, S. The flocculation efficiency of polydisperse polymer flocculants. *International Journal of Mineral Processing*, v.73, p.161-175, 2004.
- Yuehue, H., Wei, S., Haipu, L., Xu, Z. Role of macromolecules in kaolinite flotation. *Minerals Engineering*, v.17, p.1017-1022, 2004.