

ROTA DE PROCESSO PARA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO HIDRATADOS

LIPPER, G.C.¹, PERES, A.E.C.²

¹Universidade Federal de Minas Gerais. gunter_lipper@hotmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais. aecperes@demet.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma rota de processo para reduzir a influência negativa dos minérios hidratados, principalmente os goethíticos, na qualidade do concentrado de minério de ferro de alto teor. Foi comprovado que o circuito convencional de flotação deve ser dividido em grossos e finos, com esta divisão espera-se um ganho de 2% na recuperação mássica no concentrado final sem perda de qualidade. Além da amostra de concentrado da primeira etapa de obtenção de pellet feed, foram testadas outras amostras com níveis diferentes de hidratação em pH 7, utilizando-se sulfato de sódio como ativador de superfície da hematita, aquecimento da polpa em 85°C para diminuir a tensão superficial e melhorar a estabilidade de bolhas e também foi testada a utilização de ultrassom para expulsão das partículas ultrafinas dos interstícios das partículas maiores porosas. Foi então demonstrado que é possível flotar hematita e aumentar o teor de ferro no concentrado final em 0,5%.

PALAVRAS-CHAVE: minérios hidratados; goethita; flotação catiônica; sulfato de sódio; aquecimento da polpa; ultrassom.

ABSTRACT

This study aims to develop a process route to reduce the negative influence of hydrated ores, mainly goethite bearing, in the quality of a high grade iron ore concentrate. It was suggested that the conventional flotation should be divided in coarse and fine circuits; with this division one expects a gain of 2% in the mass recovery of the final concentrate without quality losses. Beyond the sample taken from the first pellet feed generation stage, experiments with other samples with different levels of hydration were carried out using pH 7, sodium sulfate as activator of the hematite surface, heating the slurry at 85°C to reduce the surface tension and improve the bubbles stability and ultrasound was also tested in order to expulse ultrafine particles from the porous interstices of larger particles. So it was demonstrated that it is possible to float hematite and increase the Fe content in the final concentrate by 0.5%.

KEYWORDS: hydrated minerals; goethite; cationic flotation; sodium sulfate; pulp heating; ultrasound.

1. INTRODUÇÃO

Algumas minas em fase de operação ou ainda em fase de estudos possuem litotipos com características peculiares as quais influenciam a qualidade do concentrado final de minério de ferro. Essas características, observadas principalmente nos minérios goethíticos, são alta porosidade (que pode em alguns casos ser correlacionada ao teor de PPC) e altos teores dos contaminantes como Al_2O_3 , P, Mn, PPC etc.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma rota de processo para reduzir a influência negativa dos minérios hidratados, principalmente os goethíticos, na qualidade do concentrado de minério de ferro de alto teor. A experiência mostra que a tensão superficial decresce com a temperatura. Na tabela I (RABOCKAI, 1979) é apresentada a tensão superficial da água em diversas temperaturas.

Tabela I. Variação da tensão superficial da água com a temperatura, interface água-ar (RABOCKAI, 1979).

T°C	$10^3 \times \gamma$ (N.m ⁻²)
0	75,60
20	72,75
40	69,56
60	66,18
80	62,60

A redução da tensão superficial com o aumento da temperatura é um fato previsível com base no princípio de Le Chatelier. Com o aumento da temperatura as espécies ficam mais disponíveis para interagir com o sistema e se concentrar na interface, logo a tensão superficial diminui.

Iwasaki *et al.* (1960) investigaram as características da flotação de goethita com reagentes aniônicos, entre os quais o dodecil sulfonato de sódio. Os autores realizaram testes de microflotação em tubo de Hallimond modificado e testes de flotação em bancada usando uma mistura artificial de quartzo e goethita. O ponto de carga zero da goethita foi determinado através de medidas de potencial de escoamento e o valor encontrado foi 6,7. Na Figura 1 é apresentada a recuperação de goethita em função do pH quando a dosagem de coletor (dodecil sulfato de sódio, dodecil sulfonato de sódio e cloreto de dodecilamônio) usada foi de 10^{-4} M.

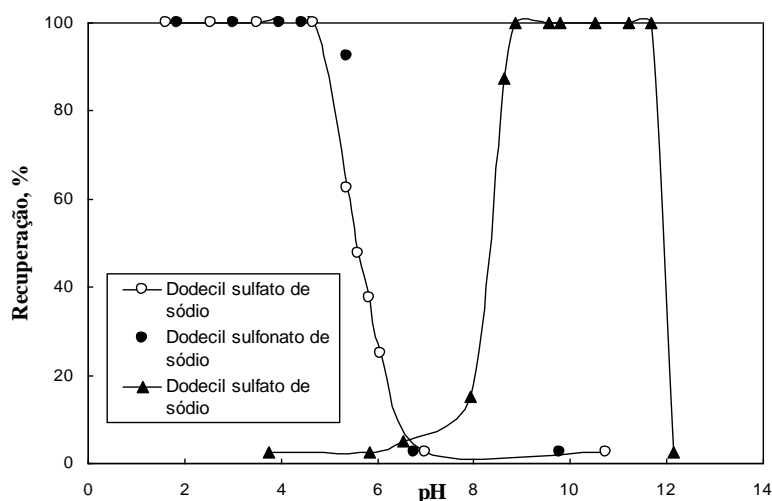


Figura 1. Recuperação de goethita em função do pH para diferentes coletores aniônicos e catiônico (IWASAKI, 1960).

De acordo com Lima (2010), os atuais sistemas de flotação são alimentados por polpas contendo uma grande variedade de tamanhos de partículas minerais. Na flotação de óxidos e silicatos, a presença de partículas ultrafinas influencia negativamente o processo. Castro e Cruz (2003) comentaram que o tratamento separado de faixas de tamanho será necessário para minérios mais complexos ou mesmo para melhorar as recuperações e seletividade do processo. Frações de diferentes faixas de tamanho poderão ser condicionadas separadamente em meios mais adequados a elas. Tal procedimento tem mostrado várias vantagens, incluindo o aumento na taxa de flotação de grossos, o aumento na seletividade e redução do consumo de reagentes.

Cilek e Ozgen (2009) descreveram que ondas ultrassônicas podem ser usadas para melhorar a eficiência e/ou seletividade em processos de flotação. A maioria de seus estudos examinou o efeito do uso do ultrassom antes da flotação como, por exemplo, a remoção de camadas adsorvidas de reagentes em minerais e a emulsificação de reagentes de flotação.

Henriques (2012) sugeriu a partir dos resultados apresentados nas tabelas II e III que existe a possibilidade de separar a goethita de minerais hematíticos, efetuando-se a flotação da goethita em $\text{pH} = 7$, no qual a goethita apresenta o potencial zeta positivo (em torno de 10mV) e as hematitas, com exceção da hematita mista Carajás, apresentam potencial zeta negativo (em torno de -10mV).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma rota de processo para reduzir a influência negativa dos minérios hidratados, principalmente os goethíticos, na qualidade do concentrado de minério de ferro de alto teor.

Tabela II. Resultados de PIE das hematitas da goethita e da magnetita, na presença de KNO_3 , por microeletroforese (HENRIQUES, 2012).

Amostra	pH PIE
Hematita compacta	6,2
Hematita especular	5,3
Hematita martítica	6,0
Hematita Carajás	7,3
Goethita	8,5
Magnetita	2,9

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As primeiras amostras testadas foram coletadas na região do Projeto Apolo da Vale, as quais foram definidas como: ROM rico, goethítico e *blending*. Essas amostras formaram a bateria 1 de testes. Em caráter complementar, foram efetuados mais dois testes denominados baterias 2 e 3 com duas amostras de pellet feed goethítico da Mina de Alegria com alto e médio níveis de hidratação denominadas amostra 4 e 2 respectivamente.

Os testes de flotação foram divididos em duas etapas:

- Etapa A – flotação catiônica reversa de minério de ferro (separação de silicatos de minerais de ferro) com e sem separação no tamanho 0,045mm;
- Etapa B – flotação aniônica direta de minério de ferro (separação de óxidos de ferro de hidróxidos de ferro).

Os testes de flotação catiônica reversa de minério de ferro, denominada etapa A, visaram a remoção de silicatos com a depressão de minério de ferro em pH = 10,5 como é feito atualmente na indústria. A tabela III apresenta a programação de testes desta etapa.

Tabela III. Programação da Etapa A de testes de flotação.

Testes de flotação fracionada					
Teste	Fração	Reagentes			
		Amina (g/tSiO ₂)	Amido (g/talim)	Hexametafosfato de Na (g/talim)	pH
3	<0,15mm >0,45mm	500	1000	-	10,5
4		500	1500	-	10,5
5		700	1000	-	10,5
6		700	1500	-	10,5
7		700	1000	60	10,5
8	<0,45mm	700	1000	-	10,5
9		700	1500	-	10,5
10		1200	1000	-	10,5
11		1200	1500	-	10,5
12		1200	1000	60	10,5

Após efetuar a primeira etapa de testes de flotação (etapa A), foram coletados os concentrados do melhor teste de grossos e finos e reunidos proporcionalmente para efetuar o teste de flotação aniônica direta de minério de ferro visando a separação de óxidos de ferro (hematita e magnetita) de hidróxidos de ferro (goethitas) com intuito de diminuir o teor de PPC e consequentemente aumentar o ponto metálico de Fe no concentrado final. Esta etapa denominada B foi acrescida de algumas variáveis as quais foram fundamentadas em alguns princípios conforme descrição a seguir:

- pH de flotação em 7: a partir de dados de Henriques (2012);
- Aquecimento da polpa a temperatura de 85°C: princípio de Le Chatelier (RABOCKAI, 1976);
- Teste com ultrassom: teoria de Cilek e Ozgen (2009).

A tabela IV apresenta a programação de testes.

Tabela IV. Programação da Etapa B de testes de flotação, dosagem de amido 1000 g/talim, pH=7.

Etapa 2B flotação aniônica direta						
Teste	Condições					
	Temperatura °C	Uso ultrassom	Coletor		amina g/talim	HMFNa g/talim
			tipo	g/talim		
1	ambiente	-	sulfato de sódio	50	50	-
2	ambiente	-	ácido oleico	50	-	-
3	ambiente	-	sulfato de sódio	50	50	60
4	ambiente	-	ácido oleico	50	-	60
5	85	-	sulfato de sódio	50	-	-
6	85	-	ácido oleico	50	-	-
7	ambiente	sim	ácido oleico	50	-	-

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efetuiu-se a soma ponderada dos resultados nas frações acima e abaixo de 0,045mm para então obter o resultado final para comparação com os testes de flotação sem separação. A tabela V apresenta a soma das referidas tabelas, bem como a qualidade projetada pelo documento de processo do Projeto Apolo para comparação.

Tabela V. Resultado da soma dos testes de flotação catiônica reversa de minério de ferro em < 0,15mm e > 0,045mm com < 0,045mm.

PF* < 0,15mm	Química global					Rec. Massa %	% ROM	Rec. Met. %
	Fe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	PPC %			
rico (R)	67,60	0,66	0,78	0,03	1,26	96,00	33,2	99,49
goethítico (G)	66,61	0,73	1,27	0,04	2,21	94,33	22,1	98,48
R + G	67,10	0,69	1,02	0,03	1,74	95,17	27,6	99,24
Projeto Apolo	65,55	1,08	1,81	0,17	2,57	87,91	25,5	96,22

*atrição + deslamagem (soma)

A tabela VI apresenta os resultados dos testes de flotação sem separação em 0,045mm para comparação dos resultados.

Tabela VI. Resultado dos testes de flotação catiônica reversa de minério de ferro sem separação em 0,045mm.

PF* < 0,15mm	Química global					Rec. Massa %	% ROM	Rec. Met. %
	Fe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	PPC %			
rico (R)	67,74	0,48	0,77	0,03	1,39	94,06	32,6	97,71
goethítico (G)	66,90	0,34	1,06	0,04	2,06	82,59	19,3	88,29
R + G	67,32	0,41	0,91	0,03	1,72	88,33	25,6	93,00
Projeto Apolo	65,55	1,08	1,81	0,17	2,57	87,91	25,5	96,22

Comparando-se as duas tabelas, pode ser afirmado que:

- Não há comprometimento da qualidade com a separação em 0,045mm;
- A separação em 0,045mm promoveu um aumento de 2% na recuperação mássica da flotação, que correspondeu a 6% de aumento em recuperação metalúrgica.

A separação da flotação em 0,045mm traz benefício para a flotação catiônica reversa de minério de ferro. Os testes da etapa B foram realizados primeiramente com as amostras de concentrado da etapa A – bateria 1. Os resultados são apresentados na tabela VII.

Tabela VII. Resultado da etapa B – bateria 1.

Conc. Teste 5 Etapa 2B Bateria 1	Química global					Rec. Massa %	Rec. Met. %	Grau Enri- quec.	Índice seleti- vidade
	Fe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	PPC %				
rico (R)	68,39	0,53	0,74	0,03	1,00	96,50	96,69	1,00	2,23
goethítico (G)	67,60	0,51	0,53	0,04	1,51	85,45	86,29	1,01	3,06
R + G	67,57	1,27	0,65	0,04	1,22	72,19	72,66	1,01	1,84

Dos resultados obtidos, pode ser afirmado que:

- A utilização de ácido oleico não apresentou qualquer benefício à flotação;
- Das amostras de ROM rico e ROM *blending* não foi possível enxergar ganhos como previsto pela análise da alimentação, contudo pelos resultados da amostra de ROM goethítico pode-se concluir que quanto maior o nível de hidratação da amostra, maior é o efeito do sulfato de sódio associado ao aumento de temperatura.

Dando prosseguimento aos testes da etapa B, decidiu-se por efetuar testes complementares com uma amostra do pellet feed goethítico da Mina de Alegria da Vale com alto nível de hidratação denominada amostra 4. Esta etapa foi então denominada etapa B – bateria 2. Foram obtidos os seguintes resultados:

- Os testes realizados com a amostra 4 não se apresentaram promissores devido ao fato que mais de 70% dos minerais de Fe presentes nessa amostra são goethitas, portanto para amostras com níveis extremos de hidratação, a flotação aniônica direta não funciona devendo ser adotada estratégia diferente de concentração, ou seja tratamento térmico;
- O sulfato de sódio em $\text{pH} = 7$ se comporta como ativador de superfície para separar partículas de goethitas das hematitas, pois ele individualmente no sistema não atua como coletor; portanto a utilização de amina é necessária como agente coletor;
- O aumento da temperatura melhora a ação do sulfato de sódio.

Para então dirimir as dúvidas finais desta etapa B de testes causadas pelo alto grau de hidratação da amostra 4 do pellet feed da Mina de Alegria, foi então escolhida a amostra 2 do pellet feed também da Mina de Alegria com um menor nível de hidratação para os ensaios denominados etapa B – bateria 3.

Os resultados foram:

- Os teores de Fe nos concentrados de todos os testes ficaram iguais do ponto de vista de performance, ou seja em média = 64,60 % Fe, aumentando em 0,4% Fe em relação à alimentação;
- O aumento da dosagem de sulfato de sódio de 50g/t para 100g/t de alimentação melhorou a flotação de hematita;
- O aumento de dosagem de amina de 50g/t para 100g/t de alimentação prejudica a seletividade da flotação.

4. CONCLUSÕES

Na flotação catiônica reversa de minério de ferro, a separação em 0,045mm aumenta a recuperação mássica da flotação sem comprometer a qualidade a utilização de ácido oleico e o uso de ultrassom não apresentaram benefício à flotação.

Quanto maior o nível de hidratação da amostra, maior é o efeito do sulfato de sódio.

O sulfato de sódio em $\text{pH} = 7$ se comporta como ativador de superfície para separar partículas de goethitas das hematitas, pois ele individualmente no sistema não atua como coletor devendo ser utilizada amina.

O aumento da temperatura melhora a ação do sulfato de sódio atuando como ativador de superfície da hematita.

5. REFERÊNCIAS

CILEK E.C., OZGEN S. Effect of ultrasound on separation selectivity and efficiency of flotation, *Minerals Engineering*, v. 22, n. 14, p. 1209-1217, 2009.

CASTRO, E.B., CRUZ, M.R. Modificação do circuito de flotação da planta de beneficiamento de Vargem Grande. *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e XXXIII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas da ABM*, p.580-588, Ouro Preto, Brasil, , 2003.

HENRIQUES, A.B. Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 223 p., 2012.

IWASAKI, I., COOKE S.R.B., COLOMBO, A.F. U.S. Bureau of Mines, Report of investigations (RI 5593) p.1- 23, 1960.

LIMA, N.P. Avaliação do processo de flotação para diferentes frações granulométricas. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 160 p., 2010.

RABOCKAI, T. *Físico-química de Superfícies*, OEA, Washington, Cap.2, p. 10., 1979.

