

# **Estudos de caracterização tecnológica e de concentração de minério de ferro**

## **Technological characterization and concentration studies of iron ore**

**Danielle Andrade Pimentel**  
Bolsista PCI, Eng. Ambiental, M.Sc.

**Marisa Bezerra de Melo Monte**  
Supervisora, Eng. Química, D.Sc.

### **Resumo**

No processamento industrial de minério de ferro, a flotação catiônica de quartzo tem sido empregada com sucesso para partículas abaixo de 150  $\mu\text{m}$ , após a remoção de ultrafinos por ciclonagem. O amido é utilizado na polpa de minério para deprimir seletivamente a hematita e, uma mistura de coletores catiônicos é adotada como agente coletor de quartzo. Este trabalho teve por objetivo caracterizar uma amostra de minério de ferro, avaliando o efeito da granulometria no processo de flotação e a dosagem da mistura de duas aminas, na proporção de 25% de monoamina e 75% de diamina, na recuperação de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na espuma. Os resultados experimentais apresentaram que para o material com  $P_{80}$  de 75 e 53  $\mu\text{m}$  apesar de apresentarem alta recuperação de ferro no concentrado (95 % e 97,8%, respectivamente), resultaram em baixos teores de ferro (44,7 % e 37,10%) quando comparados aos obtidos para as partículas de  $P_{80}$  de 106  $\mu\text{m}$  (teor de Fe = 65 %).

**Palavras chave:** minério de ferro, flotação, distribuição granulométrica, dosagem de amina.

### **Abstract**

The cationic reverse flotation has been successfully used in mineral processing of iron ore for particles size below 150  $\mu\text{m}$ , after ultrafine removal by desliming. The starch is used to selectively depress hematite and a mixture of cationic collectors is adopted as quartz collecting agent. The objective of this work was to characterize an iron ore sample, evaluating the effect of particle size on the flotation process and the dosage of two amines mixture (25% monoamine and 75% diamine) on silica recovery ( $\text{SiO}_2$ ). Experimental results for the particles with  $P_{80} = 75$  and 53  $\mu\text{m}$  presented high iron recovery in the concentrate (95% and 97.8%, respectively), however, the iron ore contents is low (44.7% and 37.10%, respectively) when compared to the results obtained for the particles with  $P_{80} = 106$   $\mu\text{m}$  (Fe content = 65%).

**Key words:** iron ore, flotation, particle size distribution, amine dosage.

## 1. Introdução

Os principais tipos industriais de minerais contendo ferro incluem óxidos e hidróxidos, tais como a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \times n\text{H}_2\text{O}$ ) e, em menor grau, carbonatos como a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). A escolha do processo de concentração do minério de ferro deve levar em consideração sua composição química e mineralógica, propriedades físicas, grau de liberação dos minerais portadores de ferro e da ganga, tamanho dos grãos, teor do minério e teor do concentrado que deseja obter, além de fatores econômicos e os efeitos sobre a pelotização (FILIPPOV et al, 2014 e HOUT, 1983). No processamento industrial de minério de ferro, a flotação catiônica de quartzo tem sido empregada com sucesso para partículas abaixo de  $150 \mu\text{m}$ , após a remoção de ultrafinos por ciclonagem. O amido é utilizado na polpa de minério para deprimir seletivamente a hematita e, uma mistura de coletores catiônicos é adotada como agente coletor de quartzo.

Estudos têm sido desenvolvidos visando avaliar os efeitos da granulometria das partículas no processo de flotação. Rubio et al (2003) descrevem que a flotação de partículas finas ( $-38 +13 \mu\text{m}$ ) e ultrafinas ( $-13 \mu\text{m}$ ) tem sido o grande desafio no processamento mineral, no qual a dificuldade em concentrar estas partículas se deve à baixa massa e alta energia livre interfacial. Deste modo, as principais desvantagens da flotação destas partículas estão relacionadas à baixa probabilidade de colisão e adesão do sistema partícula-bolha, arraste e aprisionamento mecânico, "*slime coating*", maior adsorção de reagente, formação de espuma densa e baixa cinética do processo. Segundo Mietzeine et al (2010), para que ocorra o aumento na eficiência de colisão do sistema partícula-bolha é necessário diminuir o tamanho da bolha e proporcionar a agregação das partículas finas a um tamanho ideal para serem coletadas na espuma. Lima e Valadão (2008) relatam que ocorre um rápido e desproporcional consumo de coletor pelas partículas finas, devido a sua maior área superficial específica, ocasionando uma menor cobertura hidrofóbica na superfície das partículas grossas, demandando assim uma maior concentração de reagente para coletar estas partículas na espuma.

Neste trabalho é apresentada a caracterização mineralógica e química de um minério de ferro proveniente do Mina de Alegria, localizado no Quadrilátero Ferrífero-MG, que não responde satisfatoriamente à flotação catiônica de quartzo convencional, conduzida na presença dos reagentes usualmente empregados no beneficiamento de itabiritos. Foram realizados ensaios preliminares de flotação com o objetivo de investigar o efeito da granulometria de alimentação e da dosagem de amina na flotação, utilizando amido de mandioca como depressor dos minerais de ferro, seguida de uma mistura de coletores (monoamina e diamina), em  $\text{pH}=10,5$ .

## 2. Objetivo

Caracterizar uma amostra de minério de ferro e avaliar o efeito da granulometria no processo de flotação e a dosagem da mistura de duas aminas (Monoamina e Diamina) na recuperação de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na espuma.

### 3. Material e Métodos

Foi utilizada uma amostra de minério de ferro proveniente da Mina de Alegria composta por hematita, magnetita, goethita, quartzo e caulinita. O material foi britado e classificado para se atingir 100% granulometria abaixo de 3,36 mm. O material foi homogeneizado, quartado e submetido à moagem para obtenção de amostras com diferentes distribuições granulométricas e  $P_{80}$  específicos (106, 75 e 53  $\mu\text{m}$ ). Os ensaios foram realizados em célula de flotação Denver, modelo D12, com controle de vazão de ar. Como agente depressor de hematita foi utilizado amido de mandioca gelatinizado com solução de hidróxido de sódio a uma concentração de 50% p/v. Como coletor de quartzo foi utilizada uma mistura de monoamina e diamina, adicionadas simultaneamente durante o condicionamento, na proporção de dosagem de 25% de monoamina e 75% de diamina. As soluções de NaOH 1M (um molar) e HCl 1M (um molar) foram utilizadas como reguladores de pH.

### 4. Resultados e Discussão

#### 4.1. Caracterização tecnológica

A tabela 1 apresenta a composição mineralógica quantitativa da amostra analisada por faixa granulométrica, os resultados foram obtidos a partir Difractometria por Raios-X e os cálculos pelo Método de Rietveld. A composição mineralógica da amostra de cabeça (AC) apresenta 31,2% de hematita, 17,1% de magnetita, 5,5% de goethita, 43,1% e quartzo e 3,2% de caulinita. A hematita é o mineral de ferro mais importante, predominando principalmente na fração fina (-38  $\mu\text{m}$ ). A análise por fluorescência de raios-X para a amostra de cabeça apresentou teores de óxidos de ferro e de silício de 53,4% e 44,6%, respectivamente. Os teores de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de fosfato ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e PPC apresentaram-se em menor proporção (1,4, 0,1 e 0,47%, respectivamente), demonstrando baixa contaminação desses compostos. A Figura 1 mostra a influência do tamanho das partículas nos teores de alumina, óxido de ferro e sílica. Os teores de óxidos de ferro diminuem com a redução da granulometria, atingindo-se um valor mínimo de 33,5% na faixa -150 +106  $\mu\text{m}$ . Nas faixas de tamanho, entre -212+150  $\mu\text{m}$  e -300+212  $\mu\text{m}$ , ocorreu um aumento pronunciado do teor de óxido de ferro, com teores de 56,6 e 73,2% respectivamente. Os maiores teores de quartzo ocorrem nas faixas mais intermediárias (-150+106  $\mu\text{m}$ ) e (-75+53  $\mu\text{m}$ ), 64,6% e 56,6%, respectivamente.

Tabela 1. Composição Mineralógica obtida pelo Método de Rietveld (% massa).

Mineral	% Massa							AC
	(-300 +212) $\mu\text{m}$	(-212 +150) $\mu\text{m}$	(-150 +106) $\mu\text{m}$	(-106 +75) $\mu\text{m}$	(-75 +53) $\mu\text{m}$	(-53 +38) $\mu\text{m}$	(-38) $\mu\text{m}$	
Quartzo	22,7	40,5	63,3	66,8	59,1	41,2	15,0	43,1
Magnetita	30,3	23,8	14,8	13,2	15,7	20,9	15,0	17,1
Goethita	15,6	9,3	3,8	3,1	3,0	3,6	8,1	5,5
Hematita	28,2	23,9	16,1	15,8	21,1	32,6	54,7	31,2
Caolinita	3,2	2,5	2,0	1,1	1,1	1,7	7,2	3,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,1

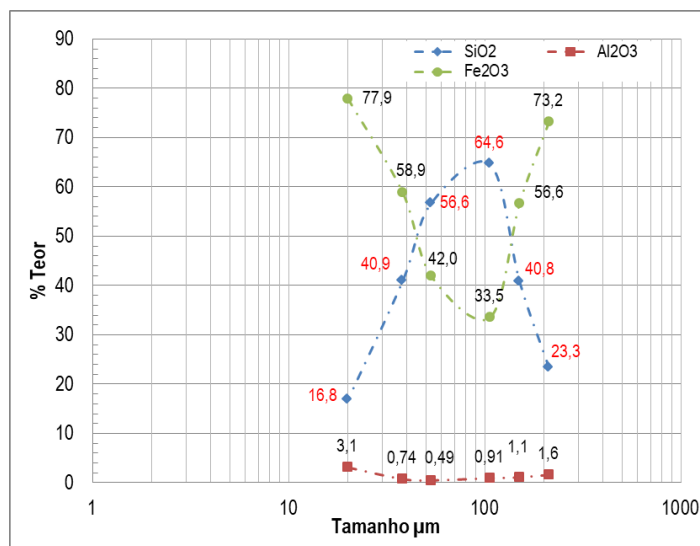


Figura 1. Influência do tamanho das partículas nos teores de alumina, óxido de ferro e sílica.

O espectro de liberação condicional por tamanho dos minerais de ferro em relação aos minerais de ganga, considerando a composição das partículas em porcentagem de massa na faixa granulométrica analisada está apresentado na Figura 2. Na faixa granulométrica mais grossa (-420+300 μm), 7% das partículas não se apresentam associadas aos minerais de ferro, são compostas apenas pelos minerais da ganga silicática e, 82% das partículas nesta mesma faixa granulométrica apresentam-se 100% liberadas, sendo constituídas somente pelos minerais de ferro. Para a fração mais fina da amostra (-53+38 μm), observa-se uma diminuição da população de partículas que não contém associação com os minerais de ferro (60% das partículas apresentam apenas minerais de ganga).

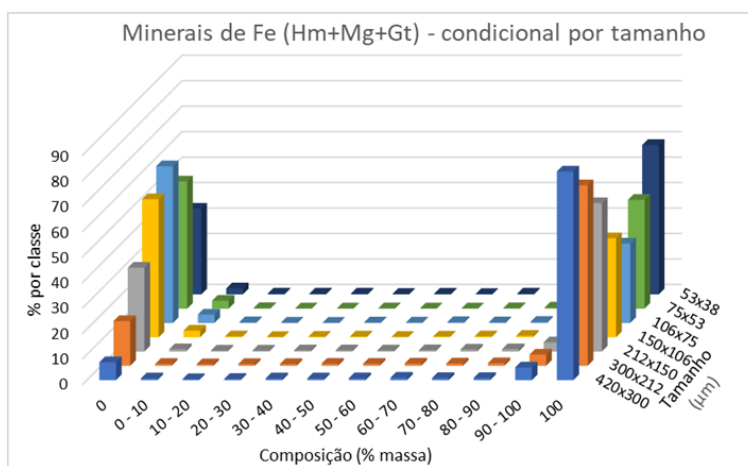


Figura 2. Espectro de liberação condicional por tamanho dos minerais de ferro (Hm = hematita, Mg = magnetita e Gt = goethita) em relação aos minerais de ganga.

## 4.2. Ensaios de flotação

Os ensaios de flotação foram realizados com uma dosagem de amido de 1.000 g/t, combinada com concentrações da mistura de monoamina e diamina para 3 (três) alimentações em  $P_{80}$  distintos (53, 75 e 106  $\mu\text{m}$ ).

A Tabela 2 apresenta os resultados de recuperação mássica, de ferro e sílica para o ensaio de flotação com material em  $P_{80} = 106 \mu\text{m}$ , com dosagem distinta de mistura de aminas (160, 180, 200 e 220 g/t). Os ensaios considerando as dosagens de 200 e 220 g/t de amina apresentaram os menores teores de  $\text{SiO}_2$ , 5,4 e 5,8 %, com recuperações de quartzo na espuma de 95,4 e 94,7%, respectivamente. O aumento da dosagem de 180 para 200 g/t reduz de 33% para 4% a sílica no concentrado, além de diminuir, também, a recuperação de Fe, de 93% para 86%, respectivamente. O aumento no consumo de coletor, de 160 g/t para 200 g/t, proporcionou o aumento no teor de ferro e redução do teor de sílica no concentrado (65,4% e 5,4% respectivamente).

Tabela 2. Recuperação em massa e metalúrgica dos ensaios de flotação em bancada para  $P_{80} = 106 \mu\text{m}$ .

Descrição	Fluxo	% Rec Massa	% Rec Met Fe	% Rec Met $\text{SiO}_2$	Teores		
					Fe	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Amido = 1.000g/t Amina = 160 g/t	Alimentação	100,0	100,0	100,0	34,4	50,0	0,5
	Afundado	61,4	93,4	30,0	52,2	24,4	0,6
	Flotado	38,6	6,6	70,0	5,9	90,7	0,4
Amido = 1.000g/t Amina = 180 g/t	Alimentação	100,0	100,0	100,0	36,1	47,1	0,6
	Afundado	62,8	89,8	33,0	51,7	24,8	0,7
	Flotado	37,2	10,2	67,0	9,9	84,8	0,4
Amido = 1.000g/t Amina = 200 g/t	Alimentação	100,0	100,0	100,0	33,2	51,4	0,5
	Afundado	44,0	86,6	4,6	65,4	5,4	0,7
	Flotado	56,0	13,4	95,4	7,9	87,5	0,4
Amido = 1.000g/t Amina = 220 g/t	Alimentação	100,0	100,0	100,0	34,3	49,6	0,6
	Afundado	45,6	86,1	5,3	64,8	5,8	0,7
	Flotado	54,4	13,9	94,7	8,8	86,4	0,5

Nos ensaios de flotação para o material com  $P_{80} = 75 \mu\text{m}$ , variou-se a dosagem da mistura de aminas em 180, 200 e 220 g/t. Os ensaios considerando as dosagens de 200 e 220 g/t de amina apresentaram os mesmos teores de  $\text{SiO}_2$  no concentrado, 25,7 %, com recuperações de quartzo na espuma de 27,9 % e 35,7 %, respectivamente. A dosagem de 200 g/t da mistura de aminas proporcionou um maior teor de Fe no concentrado, 51,6 %, com recuperação de 94,8 % de ferro. O aumento da dosagem de amina de 180 para 220 g/t promove um aumento significativo da sílica no concentrado de minério de ferro, que passa de 27,9 % para 57,5 %. Com a elevação do quartzo no concentrado, ocorre também o crescimento na recuperação de Fe, de 85,7 % para 95 %, com teores de 51,4 % e 44,7 % respectivamente (Tabela 3). O aumento da dosagem de amina pode propiciar a interação entre as moléculas de amido e da amina, com a consequente depressão das

partículas de quartzo. Lima; Valadão e Peres (2013) observaram este mesmo efeito de redução da flotabilidade de quartzo com o aumento da concentração de amina, para uma concentração de amido de 1.000 g/t.

Nos ensaios considerando  $P_{80} = 53 \mu\text{m}$ , a variação da dosagem da mistura de aminas foi de 200, 220 e 250 g/t (Tabela 4). Para a dosagem de 200 g/t de amina, a recuperação de ferro no concentrado foi de 96,2 %, com teores de 41,37 % ferro e 40 % de sílica. O aumento da dosagem de 220 para 250 g/t resulta em uma significativa redução na recuperação de sílica no concentrado, de 88,9 % para 67,1 %. Sob esta mesma condição de dosagem, há expressiva perda de ferro para o rejeito, passando de 3,7 % para 6,1%.

Tabela 3. Recuperação em massa e metalúrgica dos ensaios de flotação em bancada para  $P_{80} = 75 \mu\text{m}$ .

Descrição	Fluxo	% Rec Massa	% Rec Met Fe	% Rec Met SiO <sub>2</sub>	Teores		
					Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Amido = 1.000g/t Amina = 180 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	33,4	51,3	0,36
	Afundado	55,7	85,72	27,91	51,4	25,7	0,36
	Flotado	44,3	14,28	72,09	10,7	83,5	0,37
Amido = 1.000g/t Amina = 200 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	36,2	47,7	0,28
	Afundado	66,5	94,81	35,79	51,6	25,7	0,33
	Flotado	33,5	5,19	64,21	5,6	91,4	0,17
Amido = 1.000g/t Amina = 220 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	36,2	47,5	0,30
	Afundado	77,2	95,19	57,56	44,7	35,4	0,32
	Flotado	22,8	4,81	42,44	7,6	88,3	0,25

Tabela 4. Recuperação em massa e metalúrgica dos ensaios de flotação em bancada para  $P_{80} = 53 \mu\text{m}$ .

Descrição	Fluxo	% Rec Massa	% Rec Met Fe	% Rec Met SiO <sub>2</sub>	Teores		
					Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Amido = 1.000g/t Amina = 200 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	40,2	41,7	0,22
	Afundado	93,5	96,23	89,63	41,3	40,0	0,21
	Flotado	6,5	3,77	10,37	23,2	66,4	0,38
Amido = 1.000g/t Amina = 220 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	35,4	48,7	0,26
	Afundado	93,5	97,89	88,98	37,1	46,3	0,26
	Flotado	6,5	2,11	11,02	11,5	83,0	0,22
Amido = 1.000g/t Amina = 250 g/t	Alimentação	100,0	100,00	100,00	35,4	48,8	0,25
	Afundado	80,7	93,89	67,10	41,2	40,6	0,26
	Flotado	19,3	6,11	32,90	11,2	83,1	0,21

No que diz respeito aos teores de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para o material em  $P_{80}$  de 106  $\mu\text{m}$ , seus valores estiveram um pouco acima em relação aos materiais de  $P_{80}$  de 75 e 53  $\mu\text{m}$ , porém não ocorreram grandes variações de teores seja para o concentrado quanto para o rejeito, apresentando valores abaixo de 1,0%.

## 5. Conclusão

Os ensaios de flotação para o material com  $P_{80}$  de 75 e 53  $\mu\text{m}$  apesar de apresentarem alta recuperação de ferro no concentrado (95 % e 97,8%, respectivamente), resultaram em baixos teores de ferro (44,7 % e 37,10%) quando comparados aos obtidos para as partículas de  $P_{80}$  de 106  $\mu\text{m}$  (teor de Fe = 65 %), estes teores não estão adequados dentro do limite especificado que atualmente é adotado para a produção de pellet feed, entre 65 e 66% de teor de Fe e, aproximadamente, 3% de teor de sílica.

## 6. Agradecimento

Ao MCTIC pela concessão da bolsa de pesquisa, aos pesquisadores Marisa Monte, Cláudio Schneider e Reiner Neumann, juntamente com seus respectivos grupos de trabalho e, ao CETEM por toda a infraestrutura para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 7. Referências Bibliográficas

FILIPPOV, L.O.; SEVEROV, V.V.; FILIPPOVA, I.V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International Journal of Mineral Processing*, v. 127, p. 62-69, 2014.

HOUOT, R. Beneficiation of iron ore by flotation - Review of industrial and potential applications, *International Journal of Mineral Processing*, v.10, p.183-204, 1983.

LIMA, N.P.; VALADAO, G.E. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. *Rem: Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 61, n. 4, p. 473-477, 2008.

LIMA, N.P.; VALADAO, G.E., PERES, E.C. Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic flotation of iron ore. *Minerals Engineering*, v. 45, p. 180-184, 2008.

MIETTINEN, T., RALSTON, J., FORNASIERO, D. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*, v. 23, p. 420-437, 2010.

PERES, A.E.C. e ARAUJO, A.C. A flotação como Operação Unitária no Tratamento de Minérios. In: CHAVES, Arthur Pinto (Org). *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: A Flotação no Brasil*. 3° ed. São Paulo: Signus Editora, pp.09-39, 2013.

RUBIO, J., CAPPONI, F., MATIOLO, E., NUNES, G.N., 2003. Advances in flotation of mineral fines. In: XXII *International Mineral Processing Congress*, pp. 1014–1022.

WILLS, B.A., FINCH, J.A. Froth Flotation. Chapter 12. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th Ed. USA: Elsevier Ltda, pp. 265-380, 2016.