

# ESTUDO COMPARATIVO DA FLOTAÇÃO REVERSA E DIRETA DE MINÉRIO DE FERRO <sup>1</sup>

Gilmara Mendonça Lopes<sup>2</sup>  
Rosa Malena Fernandes Lima<sup>3</sup>

## Resumo

No Brasil a única rota de concentração de minérios de ferro é a flotação reversa usando o sistema amido/amina. Com a exaustão das reservas com maior teor de ferro, torna-se necessária a busca por novas rotas de concentração por flotação direta usando reagentes aniônicos, o que já é prática comum na China. Nesse trabalho foram realizados ensaios de flotação em escala de bancada com uma amostra de minério de ferro (teores de Fe 35,4% e teor de SiO<sub>2</sub> 48,02%) fornecida pela Vale, de modo a comparar o desempenho das mesmas. Nos ensaios de flotação inversa foi aplicada a condição padrão: polpa com 45% sólidos, pH 10,5, amido de milho como depressor dos minerais de ferro e acetato de eteramina a 50% de grau de neutralização como coletor da ganga silicosa. A flotação direta foi realizada usando AERO 6493 (hidroxamato) como coletor e silicato de sódio como dispersante/depressor dos minerais de ganga, em pH 7. Para a flotação inversa desse minério, o melhor resultado foi aquele no qual foram usados 200 g/t de amido de milho, 150 g/t de amina, fornecendo um concentrado com 66,4% de Fe e recuperação metalúrgica de Fe de 75,8%. Na flotação direta, o melhor resultado foi obtido com 1500 g/t de silicato de sódio e 1200 g/t de AERO 6493 (hidroxamato) o que forneceu um concentrado com teor de Fe de 61,5%, recuperação metalúrgica de Fe de 77,91% e teor de SiO<sub>2</sub> de 9,78%.

**Palavras-chave:** Flotação; Minério de ferro; Flotação direta; flotação inversa.

## COMPARATIVE STUDY OF REVERSE FLOTATION AND DIRECT FLOTATION

### Abstract

In Brazil, the only route used in the concentration of iron ore by froth flotation is the inverse flotation by using the traditional reagent system starch/amine. However, with the depletion of the richest iron ore deposits its necessary to search for new routes to concentrate the poorest iron ore by direct froth flotation which is a common practice in China when anionic collector of iron minerals is used. In this work, tests were performed in bench-scale flotation in order to compare the performance of the direct with the inverse flotation of one iron ore sample with low iron content (Fe and SiO<sub>2</sub> contents of 35.4 and 48.02%) provided by the Vale Company. The inverse flotation tests were performed in the standard condition: pulp with 45% solids w/w, pH 10.5, starch as depressant of iron minerals and etheramine acetate with 50% neutralization degree as collector for silica gangue. The direct froth flotation was performed by using AERO 6493 (hydroxamate), sodium silicate as dispersant / depressant of gangue mineral at pH 7. For the inverse flotation of the ore, the best result was that in which they were used 200 g/ton of starch, 150 g/ton of amine what provided a concentrate with 66.4% of Fe and metallurgical recovery of Fe of 75.8%. In the direct flotation, the best result was obtained using 1500 g / ton of sodium silicate and 1200 g/ton of AERO 6493 (hydroxamate) which gave a concentrate with Fe content of 61.5%, 77.9% of Fe metallurgical recovery and SiO<sub>2</sub> content of 9.78%.

**Key words:** flotation; Iron ore; Reverse flotation; Direct flotation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> Mestre, Universidade Federal de Minas Gerais.

<sup>3</sup> Doutora, Universidade Federal de Ouro Preto.

# 1 INTRODUÇÃO

Embora os minérios de ferro brasileiros contenham alto teor de ferro, as reservas não poderão suprir a grande demanda de produção, conduzindo a uma rápida exaustão das reservas destes minérios ricos. Diante deste cenário, torna-se necessário o estudo de aproveitamento de minérios anteriormente considerados como estéreis e o (re)processamento de rejeitos descartados nas plantas onde são beneficiados minérios ricos.

A crescente demanda por produtos que atendam as especificações da indústria siderúrgica fez necessária a aplicação de etapas de concentração (concentração gravítica, magnética e flotação) de minérios de baixos teores como é o caso dos itabiritos. A Samarco Mineração S./A., nos anos 70, foi a pioneira na aplicação de flotação inversa de itabiritos, usando amido como depressor dos minerais de ferro e amina como coletor da ganga silicosa em pH alcalino (em torno de 10 a 10,5), que é a única rota de flotação utilizada pelas diversas mineradoras de ferro no Brasil.

Lima<sup>(1)</sup> realizou estudos fundamentais de flotação inversa de minério de ferro, usando acetato de eteramina (50% de grau de neutralização) e amido de milho, que englobaram ensaios de microflotação em célula EMDEE e estudos de adsorção desses reagentes sobre a superfície dos minerais hematita e quartzo por espectroscopia infravermelha. Posteriormente, foram efetuados ensaios de flotação em escala de bancada com uma amostra artificial de minério de ferro, constituída por 50% de hematita compacta e 50% de quartzo, polpa com 45% de sólidos em peso e rotação da célula de 1.200 RPM. Verificou-se que o pH de maior seletividade para separação da hematita do quartzo era pH 10,5. Embora o mecanismo de adsorção da amina sobre a superfície dos dois minerais ocorra por atração eletrostática específica e adsorção química do amido, a separação seletiva entre os mesmos é possível pelo fato do amido ter alta afinidade com a superfície da hematita, o que diminui drasticamente a posterior adsorção dos cátions eteramônio presentes na polpa de flotação, ocorrendo o inverso para o quartzo.

Houot<sup>(2)</sup> descreve as possíveis rotas de flotação direta dos minérios de ferro e cita o uso de hidroxamato como coletor dos minerais de ferro. O hidroxamato adsorve-se quimicamente na superfície dos oximinerais que são coletados na espuma de flotação. Rao<sup>(3)</sup> define os agentes quelantes como uma classe especial de compostos que têm suas propriedades relacionadas a ligações específicas com certos átomos metálicos resultando na formação de um composto complexo. Muito antes da compreensão de toda a sua química, os quelatos formados pelos coletores foram mencionados como agentes de flotação. Nos últimos anos, a importância dos agentes quelantes para flotação tem sido reconhecida devido a sua especificidade e seletividade em relação aos íons metálicos. A principal característica dos hidroxamatos é sua habilidade em formar compostos de coordenação. O íon hidroxamato age como um ligante bidentado, formando um composto de coordenação com íons metálicos como Fe.

Como depressor da ganga silicatada, Rao<sup>(3)</sup> cita o silicato de sódio. As espécies altamente hidrofílicas formadas pela dissolução do silicato de sódio em água são responsáveis pela depressão da ganga silicatada.

Lopes<sup>(4)</sup> em ensaios de microflotação, usando tubo de Hallimond modificado, usando amostras minerais puras de hematita e quartzo determinou o pH de maior flotabilidade dos dois minerais, que foi de 7 e 10, respectivamente com o AERO

6493 (hidroxamato) como coletor. Nesses estudos verificou-se também que o metassilicato de sódio deprime os dois minerais.

Nesse trabalho são apresentados os resultados de ensaios de flotação inversa e direta em escala de bancada com uma amostra de minério de ferro, visando à comparação da performance das duas rotas para concentração de minério de ferro brasileiro.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A composição química da amostra de minério de ferro utilizada nos ensaios de flotação em bancada era: Fe – 35,34, SiO<sub>2</sub> – 48,02, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,95; P – 0,02 e PPC – 0,61 %, respectivamente. Os minerais identificados por difratometria de raios X (método do pó total) foram: hematita, goethita, quartzo, caulinita e moscovita.

Os reagentes utilizados nos ensaios de flotação em bancada foram: acetato de eteramina a 50% de grau de neutralização (amina EDA – Clariant), amido de milho da marca Milhena, AERO 6493 (hidroxamato) (Cyttec) e metassilicato de sódio de grau analítico (Cromoline-Química Fina), NaOH e HCl. As metodologias para preparo dos reagentes e ensaios de flotação em escala de bancada foram descritas por Lopes.<sup>(4)</sup>

Os ensaios de flotação em bancada foram planejados e executados usando análise fatorial com réplica. Na Tabela 1 estão apresentadas as variáveis e seus respectivos níveis testados tanto para a flotação inversa quanto para a flotação direta com a amostra de minério de ferro. As variáveis-resposta analisadas foram: recuperação metalúrgica de Fe (X), teores de Fe (Y) e SiO<sub>2</sub> (Z) no concentrado.

**Tabela 1** – Planejamento fatorial dos ensaios de flotação em bancada com a amostra de minério de ferro, 2009

Flotação inversa – planejamento 2 <sup>2</sup>			Flotação direta – planejamento 2 <sup>3</sup>		
Variáveis/Codificação	Nível		Variáveis/Codificação	Nível	
	(-)	(+)		(-)	(+)
Amido (g/t) - (A)	200	400	Metassilicato de sódio (g/t) - (A)	600	1200
Amina (g/t) - (B)	75	150	AERO 6493 (hidroxamato) (g/t) - (B)	600	1200
-			Porcentagem de sólidos - (C)	30	60

Todos os ensaios de flotação inversa foram efetuados em pH 10,5; polpa com 45% de sólidos em peso, 1.200 RPM, tempo de condicionamento com amido e com amina de 5 min e 3 min, respectivamente.<sup>(1)</sup> Para os ensaios de flotação direta, fixou-se o pH em 7, rotação da célula em 1.200 RPM, tempo de condicionamento com metassilicato de sódio de 4 minutos e AERO 6493 (hidroxamato) de 4 minutos.<sup>(4)</sup>

### 3 RESULTADOS

Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os parâmetros dos algoritmos de Yates para os ensaios de flotação reversa e direta, respectivamente.

As equações que descrevem a influência das variáveis estudadas sobre a flotação reversa e direta estão apresentadas a seguir.

Tabela 2– Análise de significância - planejamento fatorial 2<sup>2</sup> com réplica dos ensaios de flotação reversa em bancada com a amostra de minério de ferro, 2009

Variável X - Recuperação metalúrgica de Fe									
N. Ensaio	Matriz		Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	84,7	85,86	85,28	82,403	0	Média	
2	(+)	(-)	84,03	86,6	85,315	0,934	0,305	A	não
3	(-)	(+)	79,31	77,88	78,595	-5,786	0,002	B	
4	(+)	(+)	80,59	80,26	80,425	0,896	0,323	AB	não
Variável Y - Teor de Fe									
N. Ensaio	Matriz		Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	59,52	62,48	61	63,5438	0	Média	
2	(+)	(-)	61,5	60,51	61,01	-0,3225	0,704	A	não
3	(-)	(+)	66,62	66,2	66,41	5,0825	0,003	B	
4	(+)	(+)	65,64	65,88	65,76	-0,3275	0,7	AB	não
Variável Z - teor de SiO <sub>2</sub>									
N. Ensaio	Matriz		Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	13,97	9,32	11,65	8,015	0	Média	
2	(+)	(-)	10,87	12,19	11,53	0,505	0,704	A	não
3	(-)	(+)	3,38	4,38	3,88	-7,145	0,004	B	
4	(+)	(+)	5,23	4,78	5,01	0,62	0,643	AB	não

i-Flotação reversa:

$$X=82,04 - 5,78B \quad (1)$$

$$Y= 63,54 + 5,08B \quad (2)$$

$$Z= 8,02 - 7,14B \quad (3)$$

ii - Flotação direta

$$X= 88,92-6,42A+8,15B+7,54C-6,85BC-4,80ABC \quad (4)$$

$$Y= 49,22 + 4,95A-1,96B+16,62C \quad (5)$$

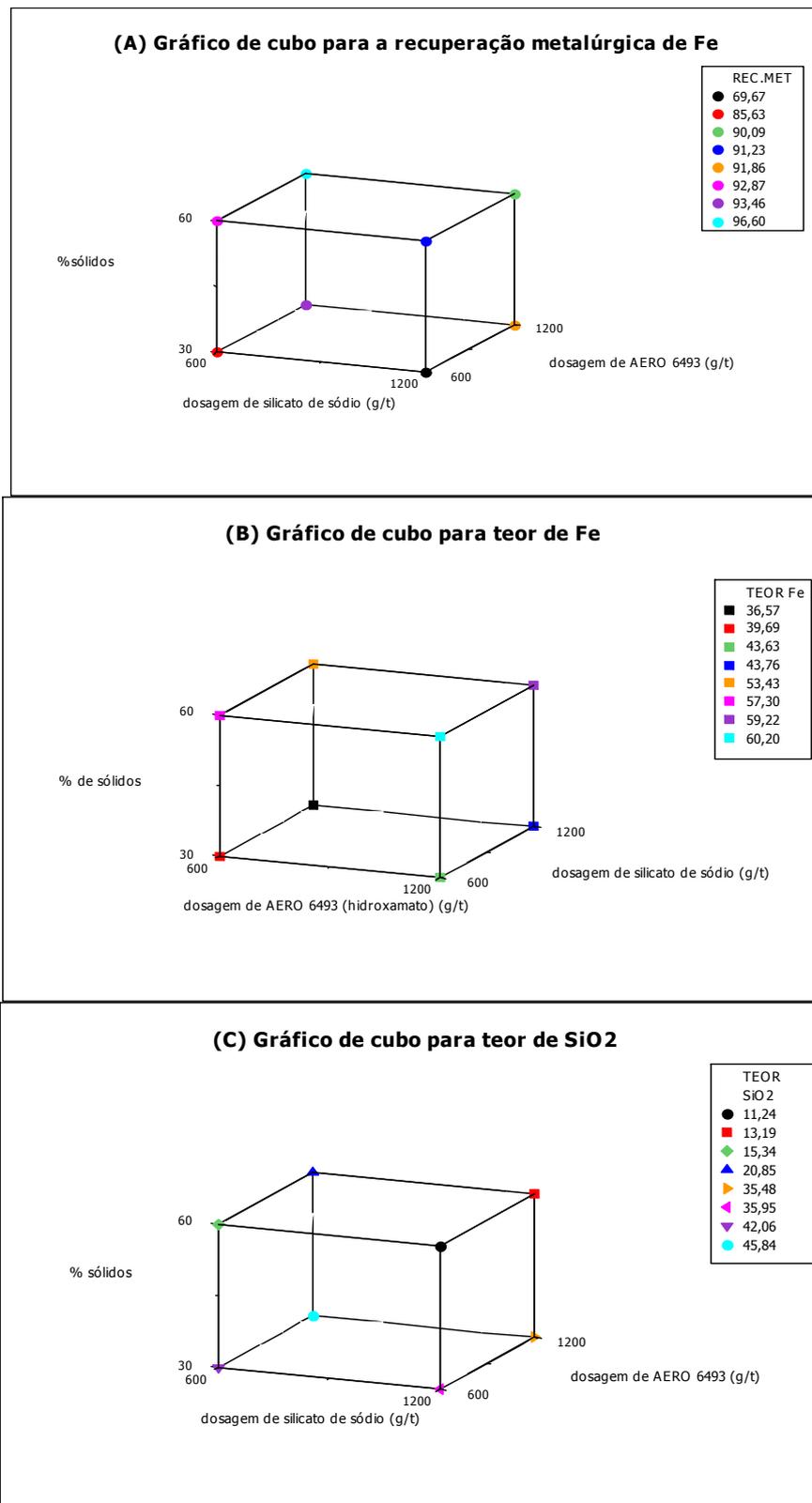
$$Z= 27,49-7,06A-24,68C \quad (6)$$

Tabela 2 – Análise de significância - planejamento fatorial 2<sup>3</sup> com réplica dos ensaios de flotação direta em bancada com a amostra de minério de ferro, 2009

<b>Variável X - Recuperação metalúrgica de Fe</b>										
N. Ensaio	Matriz			Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	(-)	85,06	86,19	85,63	88,925	0	Média	
2	(+)	(-)	(-)	76,94	62,39	69,67	-6,428	0,011	A	
3	(-)	(+)	(-)	94,32	92,61	93,46	8,155	0,003	B	
4	(+)	(+)	(-)	90,87	92,85	91,86	7,543	0,005	AB	
5	(-)	(-)	(+)	92,43	93,3	92,87	2,371	0,255	C	não
6	(+)	(-)	(+)	92,26	90,2	91,23	2,356	0,258	AC	não
7	(-)	(+)	(+)	96,65	96,54	96,6	-6,858	0,008	BC	
8	(+)	(+)	(+)	88,15	92,03	90,09	-4,805	0,038	ABC	
<b>Variável Y - Teor de Fe</b>										
N. Ensaio	Matriz			Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	(-)	39,85	39,53	39,69	49,2246	0	Média	
2	(+)	(-)	(-)	45,52	41,75	43,63	4,9521	0	A	
3	(-)	(+)	(-)	38,22	34,92	36,57	-1,9624	0,048	B	
4	(+)	(+)	(-)	45,54	41,97	43,76	16,6254	0	AB	
5	(-)	(-)	(+)	57,74	56,86	57,3	1,5341	0,105	C	não
6	(+)	(-)	(+)	61,26	59,14	60,2	-0,6106	0,488	AC	não
7	(-)	(+)	(+)	54,06	52,8	53,43	-0,4626	0,597	BC	não
8	(+)	(+)	(+)	58,93	59,51	59,22	-0,0901	0,917	ABC	não
<b>Variável Z - teor de SiO<sub>2</sub></b>										
N. Ensaio	Matriz			Réplica 1	Réplica 2	Média	Divisor	P	Identificação	Significância
1	(-)	(-)	(-)	41,74	42,39	42,06	27,49	0	Média	
2	(+)	(-)	(-)	33,25	38,64	35,95	-7,06	0	A	
3	(-)	(+)	(-)	43,78	47,91	45,84	2,69	0,058	B	não
4	(+)	(+)	(-)	32,89	38,07	35,48	-24,68	0	AB	
5	(-)	(-)	(+)	14,5	16,19	15,34	-1,95	0,146	C	não
6	(+)	(-)	(+)	9,4	13,09	11,24	1,18	0,36	AC	não
7	(-)	(+)	(+)	19,82	21,89	20,85	1,04	0,418	BC	não
8	(+)	(+)	(+)	13,52	12,85	13,19	0,17	0,892	ABC	não

No caso da flotação reversa, nota-se a partir das equações (1), (2) e (3) que apenas a dosagem de amina (B) exerceu influência sobre as variáveis-resposta estudadas: recuperação metalúrgica de Fe (X), teor de Fe (Y) e teor de SiO<sub>2</sub> (Z) no concentrado. A partir disso, a dosagem de amido foi fixada em 200 g/t e variou-se a dosagem de amina na flotação reversa. Os resultados estão mostrados na Figura 2. No caso da flotação direta, observa-se pelas equações (4), (5) e (6) que todas três variáveis estudadas tiveram influência sobre as variáveis-resposta analisadas. Logo, após a construção e análise dos diagramas de cubo para os níveis das variáveis estudadas, apresentados na Figura 1, decidiu-se por fixar a porcentagem de sólidos da polpa em 60% sólidos em peso e 1200 g/t de AERO 6493 (hidroxamato) e variar

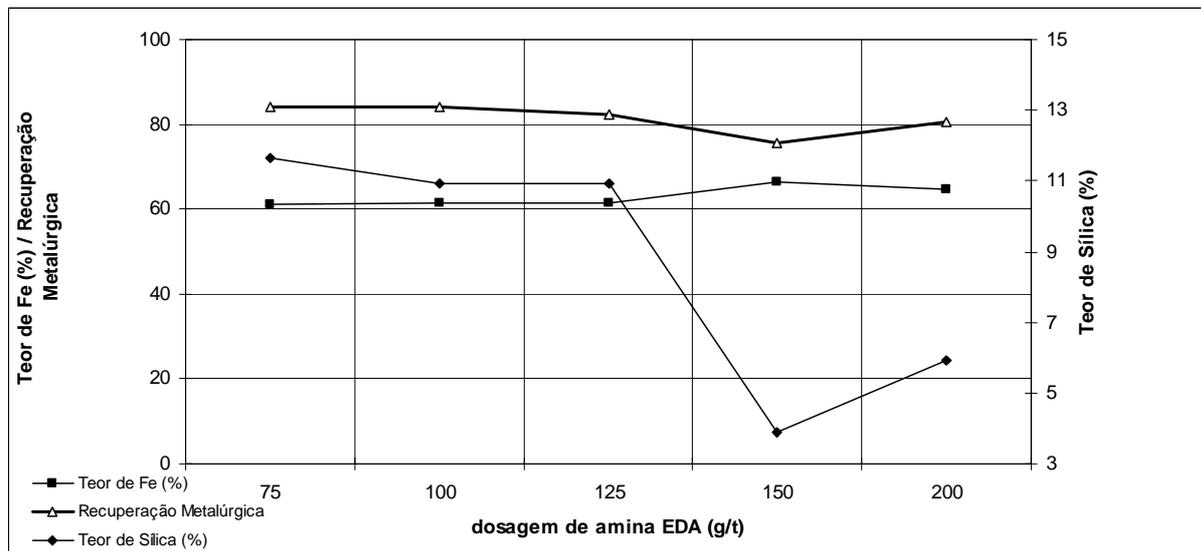
a dosagem de silicato de sódio. Os resultados desses ensaios estão apresentados na Figura 3.



**Figura 1:** Gráfico de cubo para (A) recuperação metalúrgica de Fe, (B) teor de Fe e (C) teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado da flotação direta de minério de ferro.<sup>(4)</sup>

## 4 DISCUSSÃO

Como pode ser observado pela Figura 2, o teor de Fe no concentrado da flotação inversa aumentou com o aumento da dosagem de coletor enquanto que a recuperação metalúrgica diminuiu ligeiramente. O teor de SiO<sub>2</sub> diminuiu à medida que a dosagem de coletor aumentou, que foi um comportamento previsível.

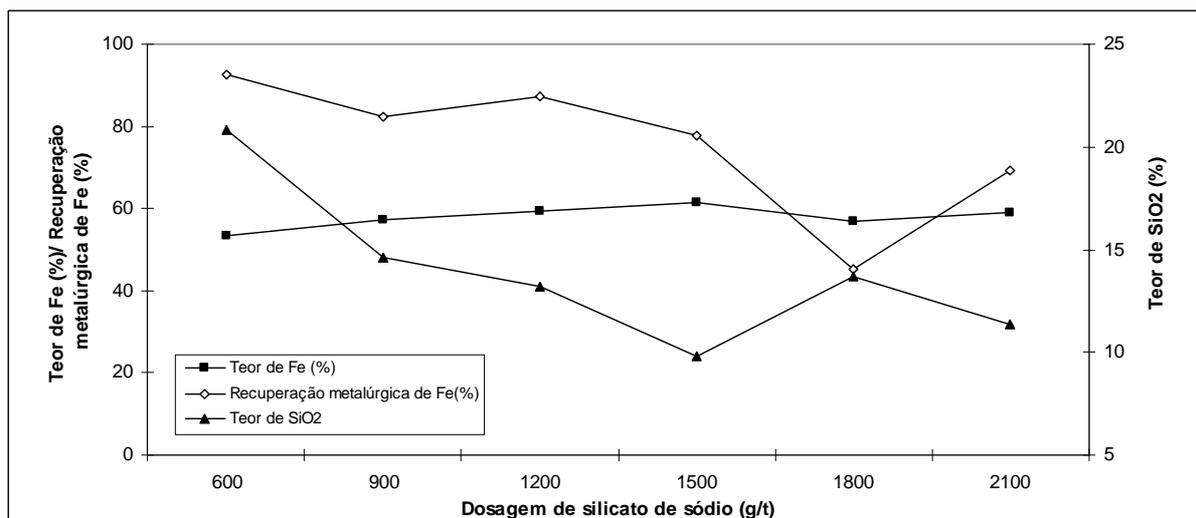


**Figura 2:** Influência da dosagem de amina sobre a recuperação metalúrgica de Fe, teor de Fe e SiO<sub>2</sub> no concentrado da flotação reversa.<sup>(4)</sup>

Para esse minério, que apresenta um baixo teor de ferro (35,34%) verifica-se que a flotação *rougher* obteve os melhores resultados com dosagem de amina de 150 g/t e dosagem de amido de 200 g/t. Nestas condições, obtiveram-se os seguintes valores para as variáveis respostas: teor de Fe no concentrado de 66,41%, recuperação metalúrgica de Fe de 75,8% e teor de sílica de 3,88%.

Como pode ser observado na Figura 3, o aumento na dosagem de silicato de sódio conduz a um pequeno aumento no teor de Fe do concentrado de flotação. Concomitantemente, a recuperação metalúrgica de Fe e o teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado da flotação direta diminuem. O melhor resultado da flotação direta do minério Serra da Serpentina usando AERO 6493 (hidroxamato) e silicato de sódio foi obtido quando usou-se 1200 g/t de coletor (AERO 6493 – hidroxamato) e 1500 g/t de depressor (silicato de sódio) cujo concentrado apresentou os seguintes índices: recuperação metalúrgica de Fe 77,91%, teor de Fe 61,5% e teor de SiO<sub>2</sub> 9,78%.

Ao comparar os resultados obtidos pela flotação inversa do minério de ferro estudado com os resultados da flotação direta, fica claro a melhor performance obtida com o sistema tradicional amido/amina na concentração de minério de ferro, pois os concentrados obtidos na flotação inversa tiveram maiores teores de Fe e menores teores de SiO<sub>2</sub>.



**Figura 3:** Influência da dosagem de silicato de sódio sobre a recuperação metalúrgica de Fe, teor de Fe e teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado da flotação direta usando AERO 6493 (hidroxamato) como coletor.<sup>(4)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

O melhor resultado alcançado, 61,05% de Fe, 9,78% de SiO<sub>2</sub> no concentrado e recuperação metalúrgica de Fe de 77,91% na flotação direta de minério de ferro da amostra estudada (teor de Fe de 35,34%) foi obtido para as seguintes condições de ensaios: pH de flotação 7, porcentagem de sólidos da polpa 60% em peso, rotação da célula de 1.200 RPM, dosagem de silicato de sódio de 1.500 g/t e de AERO 6493 (hidroxamato) de 1.200 g/t.

Observou-se melhor performance da flotação inversa, usando o sistema tradicional de reagentes (amido/amina) na flotação do minério de ferro testado em relação à flotação direta, usando o sistema de reagentes (metassilicato de sódio/AERO 6493-hidroxamato), pois os teores de SiO<sub>2</sub> foram menores na flotação reversa.

## Agradecimentos

As autoras agradecem a Capes pela concessão da bolsa de mestrado e a Vale pela concessão de amostras, e realização das análises químicas em seus laboratórios além do financiamento do projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 Lima, R.M.F. Adsorção de amido e amina na superfície da hematita e do quartzo e sua influência na flotação. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. 238p. 1997.
- 2 Houot, R. Beneficiation of iron ore by flotation-review of industrial and potential applications. International Journal of Mineral Processing, vol. 10, p. 183-204, 1982.
- 3 Rao, S.R. Surface Chemistry of Froth Flotation. 2<sup>sc</sup> Edition. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 744 p. 2004.
- 4 Lopes, G.M. Flotação direta de minério de ferro. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto. 175p. 2009.