

# RECUPERAÇÃO DAS LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO EM PEQUENAS MINERAÇÕES POR FLOTAÇÃO EM COLUNA<sup>1</sup>

Plínio E. Praes<sup>2</sup>  
José A. de Aquino<sup>2</sup>  
Rodrigo O. Albuquerque<sup>2</sup>  
Antônio F. O. Luz<sup>3</sup>

## Resumo

Na exploração de minério de ferro, normalmente há um grande volume de material fino não aproveitado, especialmente em pequenas mineradoras, que chega a representar 35% da massa total de minério extraído da mina. Milhões de toneladas de rejeitos com alto teor de ferro têm sido depositados em barragens, gerando custos operacionais, perdas de produção e impactos ambientais, pois além do grande descarte desse material, milhões de toneladas ainda encontram-se estocadas em barragens. O CDTN, a partir de uma amostra dessas lamas, realizou um estudo de processo em unidade piloto de flotação em coluna, instalada na mineração, para recuperação dessas lamas, a partir da técnica de flotação reversa, e o objetivo foi obter um concentrado final com teor de Fe da ordem de 66%, com teor SiO<sub>2</sub> abaixo de 0,8%, de P menor do que 0,03% e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abaixo de 0,8%. Os resultados mostraram que a flotação de ultrafinos é uma alternativa econômica para o aumento das recuperações nos empreendimentos mineiros. A flotação de ultrafinos também pode ser avaliada para a redução ou tratamento de efluentes descartados no meio ambiente.

**Palavras-chave:** Flotação; Minério de ferro; Lamas.

## RECOVERY OF IRON ORE SLIMES FROM SMALL MINE OPERATIONS BY COLUMN FLOTATION

### Abstract

In the exploitation of iron ore in small mining companies there is usually a large amount of fine material not recovered which can represent up to 35% of the total mass of ore from the mine. Millions of tons of useful minerals are discarded every year into tailings ponds, generating operating costs, production losses and environmental impacts. In addition to disposal of 300 t / h of this material, millions of ton are already stored in tailing points. The CDTN carried out a study of process in pilot plant flotation column, installed in the mining, to recovery these slimes from the reverse flotation technique, and the goal was to obtain a final concentrate with Fe content of 66% with SiO<sub>2</sub> content below 0.8%, P less than 0.03% and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lower than 0,8% too. The ultrafines flotation is an economic alternative for increasing the recovery in mineral processing operations. The results showed the flotation of ultrafines may also be evaluated for decreasing or treating effluents disposed to the environment. The results were promising, indicating the methods used as appropriate for the recovery of sludge in mines.

**Key words:** Flotation; Iron ore; Slimes.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> M.Sc - Setor de Tecnologia Mineral - CDTN-CNEN - Belo Horizonte - MG

<sup>3</sup> Técnico de Mineração - CDTN-CNEN - Belo Horizonte - MG

## 1 INTRODUÇÃO

A concentração de minérios de ferro por flotação é uma técnica já mundialmente consolidada para partículas minerais na faixa de 10 a 250µm, de acordo com Houot.<sup>(1)</sup>

No Brasil, todas as grandes unidades produtoras de *pellet-feed* utilizam a flotação reversa, sendo o rejeito constituído predominantemente de quartzo e o concentrado de óxidos e hidróxidos de ferro. Os reagentes mais utilizados são amina e amido de milho, que atuam, respectivamente, como coletor/espumante e depressor, segundo Houot,<sup>(1)</sup> Flint *et al.*,<sup>(2)</sup> Araújo e Peres,<sup>(3)</sup> e Monte e Peres.<sup>(4)</sup> Segundo Araújo e Viana,<sup>(5)</sup> colunas de flotação podem ser empregadas em combinação com células convencionais ou de forma isolada.

Iwasaki<sup>(6)</sup> cita três fatores para o sucesso da flotação na concentração de minérios de ferro: apresenta melhor desempenho na concentração de minérios oxidados de baixos teores; possibilita a redução dos teores em sílica de concentrados magnetíticos obtidos por separação magnética; é o processo mais indicado para a produção de concentrados destinados aos processos metalúrgicos de redução direta. Rabelo<sup>(7)</sup> aponta ainda o forte impacto positivo da flotação nas questões ambientais, ao possibilitar a recuperação de grandes massas de frações finas de minérios de baixos teores em ferro, rejeitadas por processos destinados somente à produção de granulados e *sinter-feed*, ao longo dos anos.

Os processos de flotação de minérios de ferro, seja através de células mecânicas ou de colunas, são alimentados por partículas com tamanhos entre 10 e 150 µm, sendo removidas as partículas ultrafinas (lamas) por meio de cicloneamento, por afetarem negativamente o processo, e o *top size* limitado entre 5% a 10% acima de 150 µm

A forte demanda mundial por minério de ferro verificada nos últimos anos tem contribuído para a ampliação da capacidade de produção das minas em operação, para o desenvolvimento de novas minas nos distritos tradicionais de produção e o interesse pelo aproveitamento de materiais até então tido como rejeitos e não aproveitados.

Algumas mineradoras do quadrilátero ferrífero ainda operam basicamente com etapas de lavra, britagem e classificação por peneiras, o que leva ao aproveitamento do material com tamanho granulométrico superior a ¼", que representa aproximadamente 30% do material lavrado ou *run of mine*. O material restante, que representa 70% da massa total desmontada, e com tamanho granulométrico inferior a ¼", é separado novamente por meio de classificador tipo espiral, gerando duas frações: o *sinter feed*, com tamanho menor do que ¼" e maior do que 0,15 mm, e o *pellet feed*, menor do que 0,15 mm. No entanto, a grande maioria das pequenas minerações, visando maximizar a produção e o melhor aproveitamento das suas jazidas, vem incorporando ao seu parque produtivo processos de concentração densitária, utilizando espirais, e por separação magnética de tambor de média intensidade.

No caso específico deste trabalho, no início, a alimentação na unidade industrial era de 800 t/h, sendo que cerca de 35% desse material, constituídos pelo rejeito do processo de separação magnética, com teor de Fe da ordem de 35% e de SiO<sub>2</sub> em geral superior a 40%, não eram recuperados, sendo estocados em bacias de rejeito, com prejuízo tanto financeiro quanto ambiental, por constituir-se num passivo sujeito a monitoramento contínuo. A unidade industrial é constituída das etapas de britagem, classificação em peneiras e concentração em espiral e

separação magnética. Deve-se ressaltar que os teores de Fe e SiO<sub>2</sub> citados acima são variáveis, dependendo da origem do minério, isto é, da frente de lavra em operação num dado momento. Neste trabalho são apresentados os resultados do estudo de concentração por flotação realizado com a fração de minério de ferro constituída pelo rejeito de separação magnética. O estudo para recuperação desse material, realizado em escala de unidade piloto, teve como objetivo principal obter um concentrado de ferro com a especificação requerida para comercialização, ou seja, teor de Fe e SiO<sub>2</sub> da ordem de 66% e 1,0%, respectivamente, e recuperação na flotação a mais elevada possível. Além disso, os teores de P e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> devem ser inferiores a 0,04 e 0,8%, respectivamente.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais e Métodos

O material utilizado nos testes de flotação era proveniente do rejeito do separador magnético da unidade industrial, material que alimenta as bacias de rejeito, como as mostradas nas fotografias contidas na Figura 1. Inicialmente, a amostra passava por circuito de classificação, composto de um classificador espiral de 9 polegadas, marca Denver, e um ciclone Krebs de 40 mm, operando a uma pressão de 60 psi, com diâmetro de *apex* de 2,0 mm e *vórtex* de 13,0 mm. A vazão de polpa foi de aproximadamente 200 L/h e a de sólidos, 50 kg/h. Ao final do processo, o *overflow* do ciclone era descartado e o *underflow* constituía a alimentação das colunas de flotação.

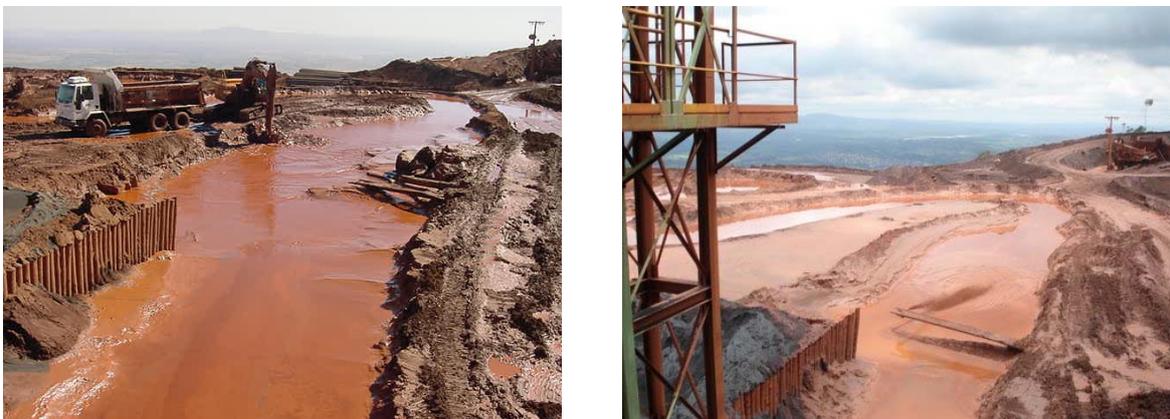


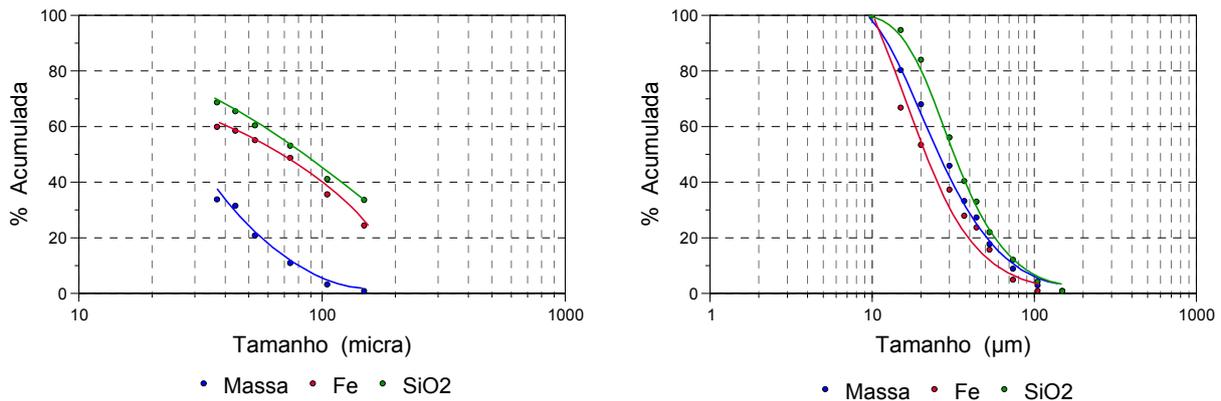
Figura 1 - Vista dos tanques com os finos do rejeito de minério de ferro.

Na Tabela 1 e Figura 2 é mostrada a distribuição granuloquímica de Fe e SiO<sub>2</sub> da lama e do *underflow* do ciclone. De acordo com os resultados, o minério tem granulometria fina, com 66,2% da massa e 40,1% do Fe contidos nas frações abaixo de 400 malhas (37 µm).

A análise química completa da amostra de minério estudada, apresentada na Tabela 2228.

**Tabela 1.** Distribuição granulométrica das lamas e do *underflow* do ciclone

Tamanho		Distribuição					
Malhas	Micra	Lamas			Underflow		
		Massa	Fe	SiO <sub>2</sub>	Massa	Fe	SiO <sub>2</sub>
100	149	0,8	24,4	33,6	0,8	0,2	0,8
150	105	3,2	35,6	41,1	2,9	0,9	4,2
200	74	10,9	48,7	53,1	8,9	4,9	12,1
270	53	20,8	55,1	60,4	17,7	15,7	22,0
325	44	31,5	58,5	65,5	27,3	23,7	33,0
400	37	33,8	59,9	68,7	33,2	27,9	40,4
-400	-37	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total			-	-	-	-	-



**Figura 2.** Distribuição granulométrica das lamas e do *underflow* do ciclone

**Tabela 2.** - Composição química das lamas

Composto	Teor (%)
Fe	35,90
P	0,12
SiO <sub>2</sub>	42,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,80
MnO <sub>2</sub>	0,007
P.F.	3,1

## 2.2 Testes de Flotação em Coluna em Unidade Piloto

Nos testes de flotação *rougher* utilizou-se uma coluna de 5,1 cm de diâmetro e altura total de 6,0 m, cujo controle do nível da interface polpa-espuma era feito por meio do ajuste da vazão de polpa da fração não flotada, como está mostrado na Figura 3. Esse ajuste era realizado por meio de sinais provenientes de dois sensores de pressão instalados na coluna e processados em um controlador digital CD 600. O ar comprimido, antes de ser introduzido na coluna, passava por um filtro, um regulador de pressão e, finalmente, por um medidor de vazão e uma válvula reguladora. A água de lavagem era medida e controlada por meio de um medidor de fluxo volumétrico e de uma válvula de controle.

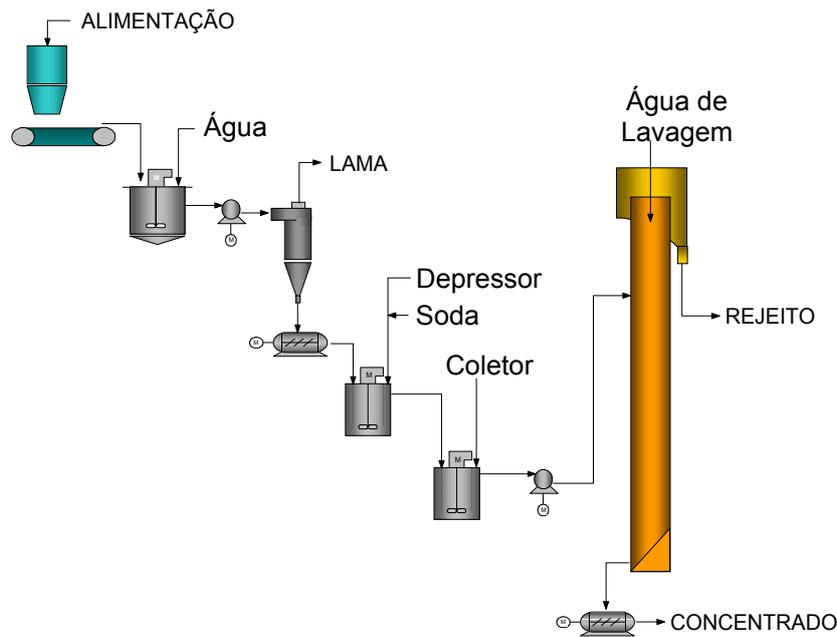


Figura 3. Fluxograma esquemático da flotação em coluna.

Baseando-se em trabalhos anteriores, realizados com minérios de ferro de características similares, e em testes de laboratório, foram estudadas as seguintes variáveis: tipo e dosagens de coletores amina, tipo e dosagem de depressor, valor de pH, taxa de alimentação de sólidos, e velocidade superficial de ar. As concentrações de sólidos na etapa de condicionamento e na alimentação da coluna foram mantidas em aproximadamente 35% e 25%, respectivamente. O ajuste do pH foi feito com solução de hidróxido de sódio.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são analisados os principais resultados obtidos no estudo. A função de um coletor no processo de flotação é tornar hidrofóbica a superfície dos minerais a serem flotados, promovendo, assim, a sua separação dos minerais hidrofílicos. Os testes iniciais de flotação em coluna foram realizados para avaliar-se o efeito de seis diferentes coletores do tipo amina primária e amina secundária, cujos resultados são representados na Figura 4. Verifica-se que, de um modo geral, todos os coletores testados apresentaram um desempenho satisfatório na flotação dos finos de minério de ferro da amostra, sendo que o aumento da dosagem de coletor propiciou uma elevação no teor de ferro e uma redução importante no teor de SiO<sub>2</sub> do concentrado de ferro, enquanto as recuperações de massa e de Fe foram decrescentes.

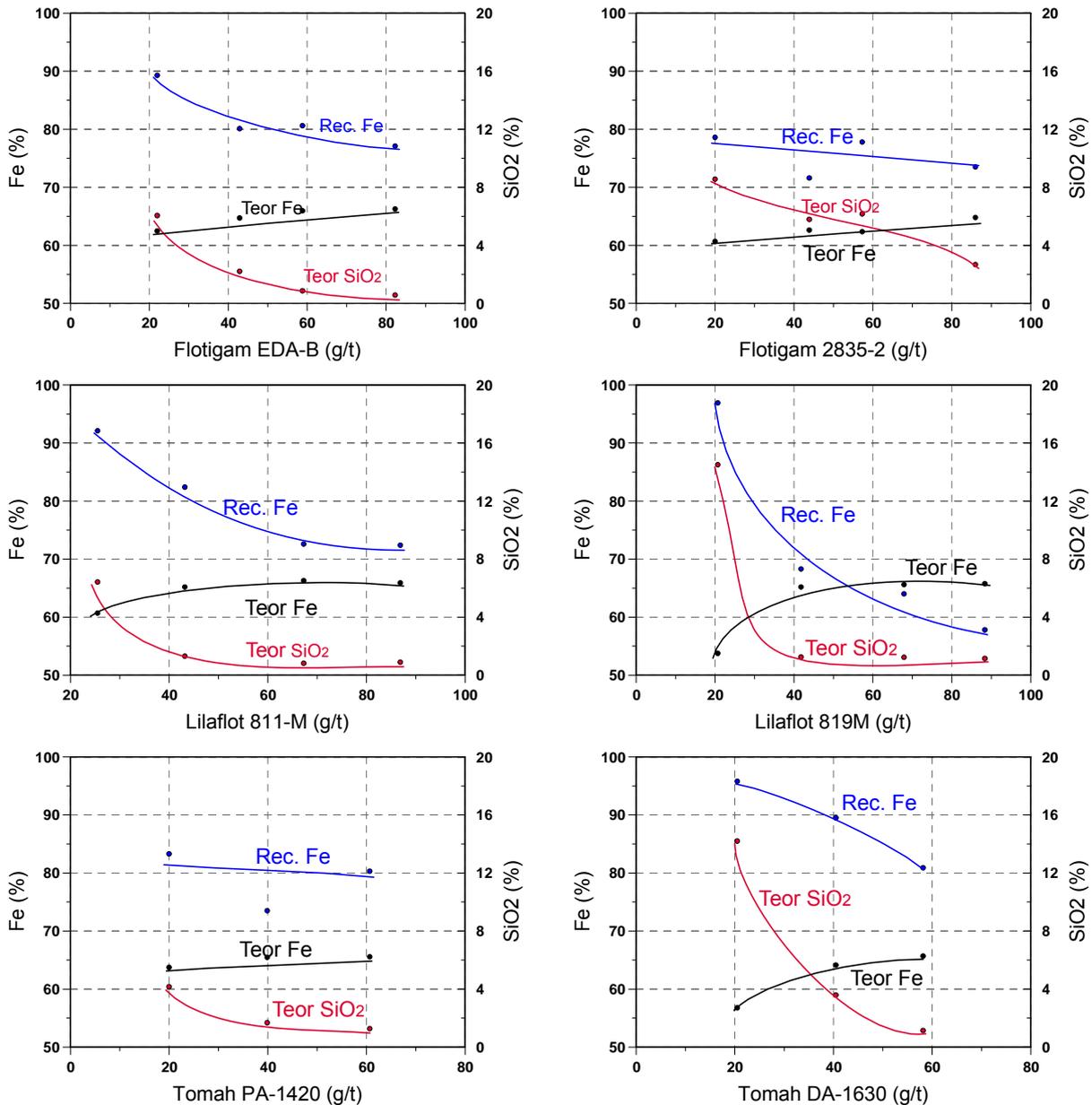


Figura 4. Efeito dos coletores testados na flotação das lamaz.

Na flotação reversa de minério de ferro, é importante a adição de um agente depressor para os minerais de ferro. Neste trabalho, foram testados o amido de milho e um novo depressor, denominado DLM-GT. Os resultados, representados na 5Figura 5, mostram que nas condições estudadas o aumento da dosagem de depressor proporcionou um aumento nas recuperações de massa e de ferro e redução do teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado, sendo que o DLM GT apresentou uma seletividade na separação entre os minerais de ferro e silicatados ligeiramente superior ao amido de milho; porém, tem um custo significativamente mais alto.

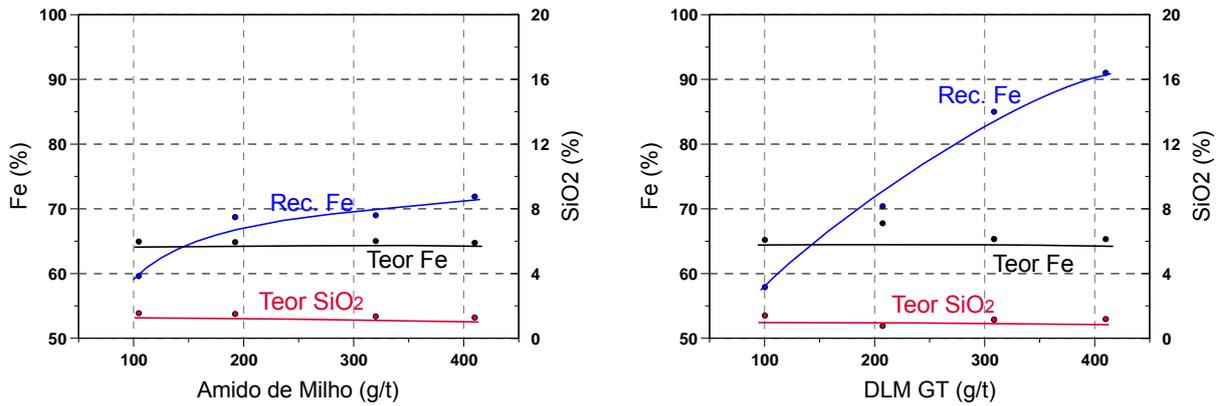


Figura 5. Efeito da dosagem de depressor na flotação das lamas.

No processo de flotação, o pH é uma variável importante porque altera as características da polpa por meio da variação da concentração dos íons presentes. Isto permite alterar a adsorção dos reagentes coletores e/ou depressores sobre a superfície das partículas minerais. Neste trabalho com o rejeito contendo finos de minério de ferro, foram realizados testes variando os valores de pH nos níveis usualmente praticados na flotação reversa de minério de ferro, ou seja, entre 8,9 e 11,0. Os resultados apresentados na 19Figura 6 mostram que o aumento do pH proporcionou uma significativa elevação da recuperação de Fe no concentrado. O teor de SiO<sub>2</sub> foi decrescente para valores de pH até 10,5 e o teor de Fe se manteve praticamente constante em toda a faixa estudada.

A vazão de ar exerce, normalmente, influência importante sobre o processo de flotação em coluna, principalmente sobre a recuperação do mineral de interesse na fração flotada. Os valores de vazão de ar utilizados nesse trabalho foram transformados em velocidade superficial do ar, que é definida como sendo a relação entre a vazão de ar, nas condições normais de temperatura (21°C) e pressão (14,7 psi), e a área da seção transversal da coluna. Neste trabalho foram realizados testes variando a velocidade superficial do ar de 1,25 a 2,0 cm/s, conforme mostrados na Figura 7, com taxa média de alimentação de sólidos de 24,7 kg/h. Observa-se que, nos níveis estudados, o aumento da velocidade superficial de ar acarretou uma redução na recuperação de Fe, com aumento no teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado.

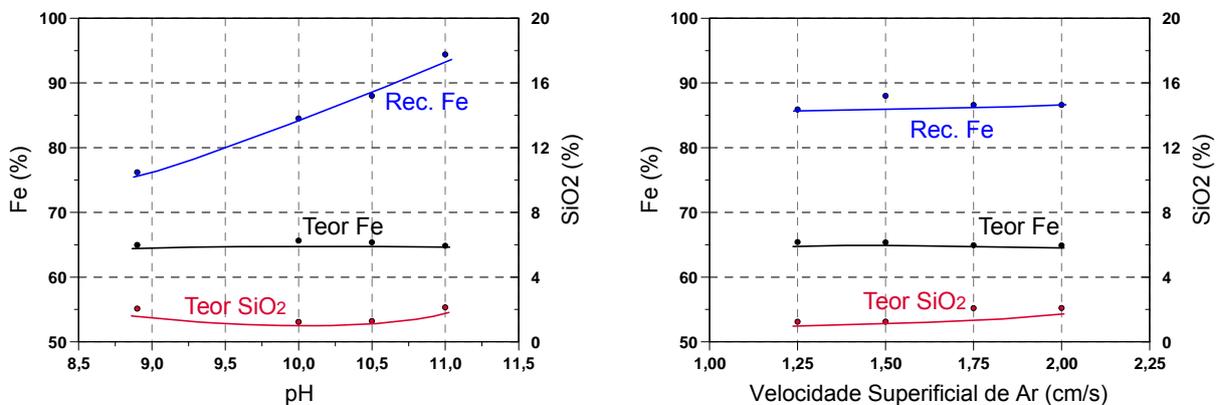


Figura 7. Efeito do pH e da velocidade superficial de ar na flotação das lamas.

## 4 CONCLUSÕES

O rejeito de minério de ferro provenientes das etapas de classificação e pré-concentração de pequenas minerações do quadrilátero ferrífero apresentam um grande potencial de aproveitamento por flotação em coluna.

De uma maneira geral, todos os coletores testados apresentaram desempenhos satisfatórios na coleta dos minerais silicatados; considerando, no entanto, o menor custo e ser a amina mais comumente utilizada para flotação de minerais silicatados em minérios de ferro, definiu-se a Flotigam EDA como o coletor mais adequado;

O DLM-GT, um reagente relativamente novo, apresentou uma boa seletividade na separação entre os minerais de ferro e silicatados, ligeiramente superior ao amido de milho; no entanto, em função da relação custo/benefício, o amido de milho é o mais indicado que o amido de milho o que deve inviabilizar, pelo menos enquanto essa relação de custo se mantiver, sua utilização na concentração de minério de ferro;

O tempo necessário para condicionamento do agente depressor com a polpa na flotação *rougher* em escala piloto foi da ordem de 8 minutos; e para condicionamento da amina, o tempo foi de o condicionamento da amina com a polpa é importante no processo, pois normalmente contribui para aumentar o índice de seletividade e a recuperação de ferro e reduzir o teor de sílica no concentrado. 7,0 minutos;

As velocidades superficiais de ar de 1,25 cm/s e 1,5 cm/s apresentaram desempenhos satisfatórios na flotação da amostra estudada;

Embora tenham sido realizados testes em unidade *rougher-cleaner* e *rougher-scavenger*, os melhores resultados foram obtidos com um circuito de apenas uma coluna de flotação *rougher*, no qual obteve-se um concentrado com teores de Fe e SiO<sub>2</sub> de 65,19% e 0,78%, respectivamente. As recuperações de massa e de Fe foram de 45,9 e 82,2%, nessa ordem. Nesse estágio, o concentrado obtido apresentou 0,78% de SiO<sub>2</sub>, 1,80% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,031 de MnO, 0,18% de P, com 3,2% de P.F; deve-se ressaltar que esse teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está acima da especificação, e é proveniente da presença de ultrafinos no minério, que podem ser minimizados numa etapa de deslamagem mais .

## Agradecimentos

Os autores agradecem à *Fapemig*, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Brasil, pelo apoio recebido na forma de recursos financeiros, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## REFERÊNCIAS

- 1 HOUOT, R. (1983). Beneficiation of iron ore by flotation – review of industrial and potential applications. International Journal of Mineral Processing, v.10, p.183-204.
- 2 FLINT, I. M., WYSLOUZIL, H. E., ANDRADE, V. L. L., MURDOCK, D. J. (1992) Column flotation of iron ore. Minerals Engineering, v.5, p.1185-1194.
- 3 ARAUJO, A. C., PERES, A. E. C. (1995) Froth flotation: relevant facts and the Brazilian case. Série Tecnologia Mineral, 70. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq.
- 4 MONTE, M. B. M., PERES, A. E. C. (2002) Química de superfície na flotação. In: LUZ, A. B., et al. Tratamento de minérios, 3a edição, c.9, p.339-407, Rio de Janeiro,
- 5 CETEM/MCT.



- 6 ARAUJO, A. C., VIANA, P. R. M. (2003) Minérios de ferro e seus métodos de concentração In: IV Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. p.750-758.
- 7 IWASAKI, I. (1983) Iron ore flotation, theory and practice. Mining Engineering, p.622-63 apud MAPA, P. S. (2006). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- 8 RABELO, P. J. B. (1994) Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.