

COMPORTAMENTO DE COLETORES PARA O TRATAMENTO DOS MINÉRIOS DE FERRO ATRAVÉS DA FLOTAÇÃO REVERSA

Monica Speck Cassola ¹
Nilson Mar Bartalini ²

Resumo

O setor mineral foi um dos pioneiros da industrialização brasileira e viveu recentemente um dos seus melhores momentos com extraordinária demanda internacional de *commodities* minerais, em especial os concentrados de minério de ferro. As características comuns a todas as empresas são: grandes instalações, uso intensivo de insumos químicos, água, energia e recursos naturais. Um dos desafios da sustentabilidade é a otimização dos insumos químicos de toda a cadeia da produção. O objetivo do trabalho é estudar o comportamento de diferentes minérios de ferro frente a inovações nos coletores utilizados na etapa da flotação reversa. As amostras de minérios eram provenientes do processamento industrial. Os estudos compreenderam a avaliação de diferentes coletores padrão em uso e os *taylor made* para cada mina. O procedimento experimental adotado considerou a padronizada por cada mineração.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Reagente químico; Mineração; Minério de ferro.

BEHAVIOR OF COLLECTORS FOR THE TREATMENT OF IRON ORE THROUGH REVERSE FLOTATION

Abstract

The mineral industry was one of the pioneers of Brazilian industrialization and presents live one of its better moments with high international demand of mineral commodities, in special the iron ore concentrates. The usual characteristic to all companies are: great installations, large use of chemicals, water, energy and natural resources. One of the challenges of the support is the optimization of the chemical's products of all the stages of the production. The objective of the study is to examine the iron ore behavior front to different innovations in the collectors used in the stage of the reverse cationic flotation. The ore samples were obtained from the industrial processing plant. The studies had understood the evaluation of collecting different standard in use and the "taylor made" for each mine. The adopted experimental procedure considered standardized it for each mining.

Key words: Sustainability; Chemical reagents; Mining; Iron ore.

I INTRODUÇÃO

O setor mineral foi um dos pioneiros da industrialização brasileira e viveu recentemente um dos seus melhores momentos com extraordinária demanda internacional de *commodities* minerais, em especial os concentrados de minério de ferro. As características comuns a todas as empresas são: grandes instalações, uso intensivo de insumos químicos, água, energia e recursos naturais. Um dos desafios da sustentabilidade é a otimização dos insumos químicos de toda a cadeia da produção. Entende-se por desenvolvimento sustentável aquele que satisfaz às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem suas próprias necessidades.⁽¹⁾

Entende-se por sustentabilidade ações para atingir-se o Equilíbrio Social x Econômico x Ambiental. Para o equilíbrio social, tem-se que atuar na conscientização da cidadania, a geração de emprego, o engajamento das partes interessadas, melhores práticas trabalhistas e ações sociais.

Dentre o equilíbrio ambiental as ações estendem-se para a preservação dos recursos naturais: energia, água, materiais, emissões e resíduos, biodiversidade, a Eco-Eficiência, uso de Energia Renovável, ações junto aos fornecedores, produtos, serviços e transporte e processos e operações.

¹Doutor, Engenharia de Minas, Chefe do Laboratório de Aplicação Mineração da Clariant S/A. Av. das Nações Unidas, 18.001, Cep 04795-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: monica.cassola@clariant.com

²M.Sc. Engenharia de Minas, Departamento de Marketing e Assistência Técnica da Clariant S/A. Av. das Nações Unidas, 18.001, Cep 04795-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: nilson.bartalini@clariant.com

Até a década de 1970, poluentes eram vistos como “resultados inevitáveis dos processos” e os controles de poluição eram *controles corretivos*, baseados na legislação que estabelecia padrões de qualidade e emissão, utilizando equipamentos de controle de poluição, e os instrumentos para avaliar a aplicação eram os licenciamentos e a fiscalização com ação coercitiva do Estado.

As ações levaram a importantes resultados até hoje, mas ainda com diversos limites quais sejam: custos, necessidade de disposição final de lodos e outros resíduos. Busca-se atender apenas aos padrões legais e consideram-se apenas as atividades “dentro dos muros” da empresa.

Para superar estes limites ações de *controle preventivo* vêm sendo implementadas, em sua maioria baseadas na Gestão Ambiental, com o estabelecimento de indicadores e metas de desempenho, foco em eficiência de produtos e processos, aplicação de conhecimentos para melhorar o desempenho ambiental. Passaram-se a considerar os poluentes, como desperdícios de recursos não aproveitados e as ações ambientais passaram a ser o foco de novos negócios, ou seja, na prática todas estas ações são uma ampliação do conceito de Produção mais Limpa (P + L) e a inserção conjunta de um consumo sustentável. Nesta nova ótica considera-se também o conceito de ciclo de vida, o qual inclui os impactos desde a extração das matérias-primas, passando pelo beneficiamento, a manufatura, o uso e o descarte.

Os desafios para um desenvolvimento sustentável permeiam:

- *desafio econômico*: competitividade;
- *desafio tecnológico*: inovação;
- *desafio ambiental*: proteção da natureza;
- *desafio social*: desenvolvimento humano; e
- *desafio cultural*: empreendedorismo.

Considerando-se estes desafios para a Mineração, verifica-se que, para atendimento aos desafios econômicos e tecnológicos nos processos industriais, pode-se atuar na otimização da etapa de extração do minério, melhorar desempenho ambiental das operações utilizando tecnologias mais eficientes, conceitos P + L, controle de emissões e efluentes, fazer uma atualização tecnológica das plantas, por exemplo, modernizando os equipamentos, substituindo e/ou reduzindo a emissão de substâncias tóxicas e uso de substâncias não biodegradáveis, redução do nível de consumo específico, recuperar e/ou dar destinação mais adequada aos resíduos e recuperar as áreas degradadas.

Entende-se por desafio um conjunto de ações para se atingir o equilíbrio e não somente o preço, mas também tipo das matérias-primas, sua toxicidade, sua degradabilidade dentre outros fatores. Daí a busca por insumos químicos ditos verdes.

As reservas mundiais são estimadas em 800 bilhões de toneladas de minério, contendo mais de 230 bilhões de toneladas de ferro contido. A produção mundial de minério de ferro ocorre em cerca de 50 países. As cinco produções de maior expressão são China, Brasil, Austrália, Índia e Rússia.⁽²⁾

Na Tecnologia Mineral, a flotação é um processo de separação dos minerais que é conduzido em meio aquoso e na presença de bolhas de ar. Para que seja possível separar as espécies presentes, o processo faz uso de diferenças entre as energias livres das interfaces envolvidas: sólido/líquido, líquido/gás, sólido/gás. Nos sistemas de flotação a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído basicamente por moléculas apolares.

A seletividade do processo de flotação baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. Este conceito está associado à umectabilidade ou “molhabilidade de uma partícula” pela água. Por outro lado, partículas hidrofóbicas são menos ávidas por água, ou seja, uma partícula hidrofóbica caracteriza-se como aquela superfície essencialmente não polar, tendo mais afinidade com ar do que com água.

Em geral, a mera introdução de um fluxo de ar não é suficiente para carrear as partículas hidrofóbicas. Faz-se necessária a formação de uma espuma estável, que é obtida através da ação de reagentes conhecidos como espumantes, os quais diminuem a tensão superficial na interface líquido/ar dentre outras características.⁽³⁾

Dentre os processos de concentração no Brasil, estima-se que somente para o minério de ferro mais de 60 milhões de toneladas de concentrados são produzidos pelo processo de flotação, ou seja, pelo processo de flotação reversa, no qual as partículas de minério de ferro são hidrofilizadas e as dos minerais de sílica, hidrofobizadas. Considerando-se o consumo de coletor na flotação de minério de ferro da ordem de 50 g/t, uma otimização nas matérias-primas de produção é de suma importância.⁽³⁾

Uma vez que o quartzo é a ganga silicatada mais frequentemente presente nos minérios de ferro brasileiros, e as granulometrias são finas, ou seja inferiores a 150 μm , o método de concentração mais amplamente utilizado é a flotação. A rota de flotação catiônica reversa é o método mais empregado.

É estabelecido que, para óxidos e silicatos, H^+ e OH^- , são os íons determinantes de potencial e sua adsorção controla as cargas de superfície, que por sua vez controla a seletividade.

As aminas em meio aquoso sofrem ionização por protonação, e considera-se que o intervalo de pH de flotação utilizado para coletar a sílica dos minérios de ferro brasileiros situa-se entre 9,5 e 10,5.⁽⁴⁾

O principal mecanismo de adsorção na flotação reversa de minério de ferro ocorre pela ação das macromoléculas hidrofílicas do depressor utilizado, amido cáustico, sobre as partículas de minerais de ferro através dos grupos carboxílicos e são na teoria associados a uma adsorção química.

A ação dos coletores é sobre os minerais de ganga, essencialmente constituídos por silicatos, sendo o principal deles o quartzo e a sua recuperação é dependente da concentração do coletor em solução.

As principais características dos coletores para silicatos fornecidos pela Clariant S/A são sumarizados na Tabela I.

Tabela 1. Características dos coletores Clariant para flotação de silicatos*

Coletor (etermonoamina)	Característica da cadeia	Grau de neutralização (%)	Comentários
Flotigam EDA	Média – ramificada	50	<ul style="list-style-type: none"> • Coletor de silicatos como quartzo, micas e feldspatos. • A definição é função dos teores e granulometria de alimentação. • Flotigam Eda e Eda C são empregados na concentração de minérios hematíticos.
Flotigam EDA-3	Média – ramificada	30	
Flotigam EDA-C	Média – ramificada	50	
Flotigam EDA-3C	Média – ramificada	30	
Flotigam 5499	Curta – ramificada	50	
Flotigam 5436	Média – ramificada	50	
Coletor (eterdiaminas)	Característica da cadeia	Grau de neutralização (%)	Comentários
Flotigam 2835	Longa – ramificada	50	<ul style="list-style-type: none"> • Coletor de silicatos para minérios magnetíticos. • Podese usado em conjunto com etermonoamina para otimização da recuperação metalúrgica em minérios hematíticos.
Flotigam 2835 -2	Longa – ramificada	20	
Flotigam 2835 -2L	Longa – linear	20	
Flotigam 3135	Média – ramificada	35	
Flotigam LDD-2	Longa – linear – ramificada	50	

* CLARIANT. *Relatório de pesquisa: reagentes alternativos*. São Paulo, 2008. [acesso restrito].

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostras

Quatro amostras de minério de ferro de diferentes minas brasileiras foram utilizadas na investigação. As amostras encaminhadas pelas mineradoras doravante denominadas A, B, C e D foram obtidas a partir da alimentação da flotação da unidade industrial de cada uma delas. As principais características químicas estão sumarizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características das amostras de minério de ferro

Mina	Teor Fe (%)	Teor SiO ₂ (%)
A	62,04	11,17
B	58,55	15,58
C	51,10	25,11
D	62,51	6,27

2.2 Reagentes Químicos

Os insumos químicos utilizados na etapa de flotação foram o amido cáustico (solução 2%), o hidróxido de sódio (solução 7%) e o coletor de silicatos (eteraminas). Os ensaios foram realizados para avaliar o efeito da modificação do coletor de minerais de sílica na recuperação de ferro, sendo utilizados por coletor as eteraminas EDA, EDA C, EDA 3 e EDA 3C.

2.3 Procedimento Experimental

Para os desenvolvimentos dos trabalhos experimentais, os testes de flotação foram realizados em célula Denver, com cuba de flotação de 1,5 L na qual adicionou-se um padrão de minério (~1,400 kg). Acrescentam-se 933 mL de água na cuba obtendo-se

uma percentual de sólidos de cerca de 60%; liga-se o rotor da célula de flotação a uma velocidade de 1.400 rpm; condiciona-se a polpa durante 1 minuto e mede-se o pH inicial. Na sequência, adiciona-se o amido cáustico na proporção amido: soda de 5:1 ou 4:1, dependendo da mina em solução 2%, na dosagem de 450 g/t, e condiciona-se a polpa durante 5 minutos. Ajusta-se o pH para 10,5 com NaOH (7%), depois acrescenta-se o coletor na dosagem de 50 g/t, e o tempo de condicionamento do coletor é de 1 minuto. Abre-se o ar para que se forme a camada de espuma e faz-se a coleta da espuma durante 3 minutos.

A massa flotada e afundada é secada em estufa a 100°C, durante 12 horas. Após a completa secagem, faz-se a pesagem do flotado e do afundado para se determinar a recuperação em massa. Alíquotas dos produtos de flotação são retiradas para análise química, via úmida, para dosagem de sílica e ferro.

Os balanços de massa e metalúrgicos foram calculados conforme as Equações 1 e 2:

$$\text{Recuperação mássica:} \\ \text{Rec}_{\text{massa concentrado}} = \frac{\text{massa concentrado}}{\text{massa alimentação}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Recuperação metalúrgica:} \\ \text{Rec}_{\text{met. concentrado}} = \frac{\% \text{Fe concentrado}}{\% \text{Fe alimentação}} \times \text{Rec}_{\text{massa concentrado}} \quad (2)$$

Os resultados de flotação dos ensaios de flotação realizados no Laboratório de Aplicação da Clariant, segundo procedimento descrito anteriormente, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Ensaio de flotação em escala de bancada para as Minas A, B, C, D

Mina	Coletor	Dosagem (g/t)	Teor SiO ₂ (%)	Recup. Fe ₂ O ₃ (%)
A	EDA	30	1,02	92,77
	EDA 3	30	0,87	91,78
	EDA 3	50	0,35	88,27
	EDA C	30	0,76	91,14
	EDA C	50	0,38	88,15
B	EDA	30	1,94	87,61
	EDA	50	1,18	82,67
	EDA 3	30	2,19	88,19
	EDA 3	50	1,30	82,62
	EDA C	50	1,26	82,10
	EDA C	50	1,06	80,91
C	EDA	50	1,00	73,10
	EDA 3	30	5,90	81,90
	EDA 3	50	1,10	75,92
	EDA C	30	3,93	81,59
	EDA C	50	1,38	75,03
D	EDA	30	1,83	87,33
	EDA	50	1,58	81,63
	EDA 3	50	1,72	84,25
	EDA C	30	1,73	85,75
	EDA C	50	1,18	76,07

Nas Figuras 1 a 4 tem-se a representação gráfica dos resultados.

Conforme observado na Tabela 3 e nas Figuras 1 a 4, é importante ressaltar:

- para a Mina A, o coletor Flotigam EDA 3 seria uma alternativa ao padrão atualmente em uso que é o EDA C;
- para a Mina B, o coletor Flotigam EDA pode substituir o EDA C com um consumo maior mas com uma recuperação metalúrgica melhor;
- para a Mina C, o coletor Flotigam EDA 3 padrão atualmente em uso não deverá ser substituído; e
- para a Mina D, o coletor Flotigam EDA pode ser substituído pelo EDA C com variações significativas nos teores de sílica e na recuperação de ferro e com dosagens menores.

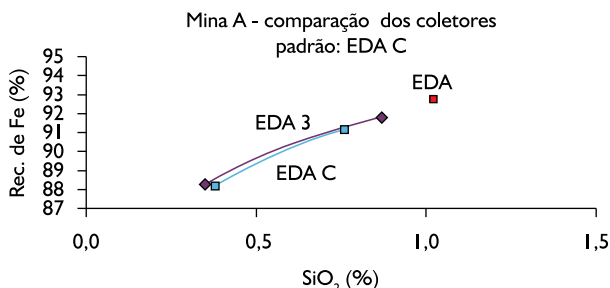


Figura 1. Comparação dos coletores para os minérios da mina A**.

** CLARIANT. Relatório de pesquisa: reagentes alternativos. São Paulo, 2008. [acesso restrito].

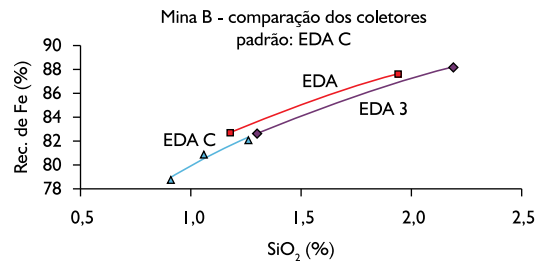


Figura 2. Comparação dos coletores para os minérios da mina B.⁽⁵⁾

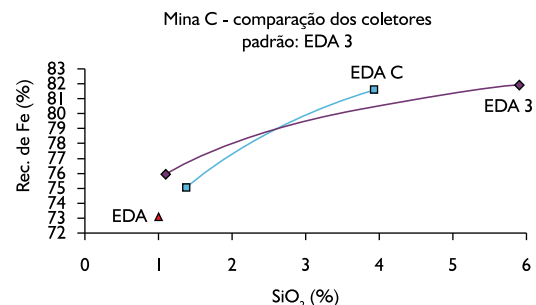


Figura 3. Comparação dos coletores para os minérios da mina C.⁽⁵⁾

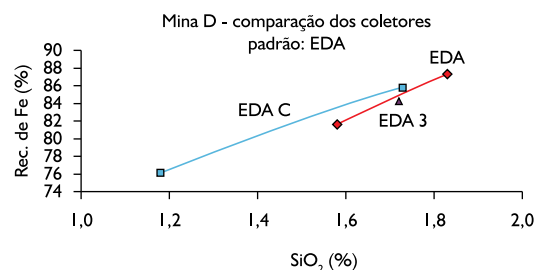


Figura 4. Comparação dos coletores para os minérios da mina D.

3 CONCLUSÕES

O desempenho dos coletores avaliados para as diferentes minas A, B, C, e D apresentaram para três delas a possibilidade de aumentar a recuperação metalúrgica, mantendo a qualidade do concentrado com relação ao teor de sílica. Os resultados obtidos apontam para uma redução das matérias-primas, por exemplo, o ácido acético utilizado na neutralização das eteraminas, lembrando que se está aumentando o teor de eteramina.

Recomenda-se avaliar outras fontes de matéria-prima utilizada para a produção dos coletores visando a redução do consumo.

Recomenda-se também avaliar a possibilidade de otimização dos outros insumos utilizados na flotação de minério de ferro. Por exemplo, seriam o depressor dos minerais de ferro: amido cáustico com consumo médio da ordem de 450 g/t (4:1) e o NaOH para regulagem do pH. O ideal a ser buscado seria a utilização de depressores que não necessitem de gelatinização com NaOH e coletores que pudessem fazer a flotação em pH menores.

No desenvolvimento desta pesquisa aborda-se somente um dos insumos químicos da cadeia de produção do ferro; no entanto, podem-se citar outros insumos químicos utilizados em toda a cadeia, quais sejam:

- auxiliares de filtração: mix de surfactantes;
- tratamento de água: polyacrylamide, inibidores corrosão;
- aglomerantes de pelotização: homo ou copolímeros acrilatos e CMC; e

- *antidust*: pelotas e transporte: copolímeros.

As dimensões atuais da economia mundial e as projeções de seu crescimento envolvem desafios jamais enfrentados. A meta proposta é enfrentar as adversidades do setor minero-metalúrgico para o desenvolvimento sustentável do Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem às mineradoras pelo fornecimento das matérias-primas para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 BRUNDTLAND, G. H. *Relatório Brundtland: nosso futuro comum*. [S.l.]: Comissão Brundtland/ ONU, 1987.
- 2 U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral commodity summaries: iron ore*. [S.l.], 2009.
- 3 ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. (org.) *Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação: o estado-da-arte no brasil*. São Paulo: Signus, 2006. v. 4, p. 1-29.
- 4 ARAUJO, A. C. et al. A flotação de minérios de ferro. In: CHAVES, A. P. (org.) *Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação: o estado-da-arte no brasil*. São Paulo: Signus, 2006. v. 4, p. 317-29.

Recebido em: 29/10/2009

Aceito em: 30/06/2010