

# CARACTERIZAÇÃO E FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO ANFIBOLÍTICOS

Dayane F. Santos<sup>1</sup>, Paulo R.M. Viana<sup>2</sup>, Armando C. Araujo<sup>3</sup> & Sônia D.F. Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas/Universidade Federal de Minas Gerais  
Rua Espírito Santo 35. Centro. Belo Horizonte/MG. CEP 30.160-030.  
Tel. 31 34091876, fax 31 34091815  
E-mail: dayanesantoseq@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Minas/Universidade Federal de Minas Gerais  
Rua Espírito Santo 35. Centro. Belo Horizonte/MG. CEP 30.160-030.  
Tel. 31 34091860, fax 31 34091866  
E-mail: pviana@demin.ufmg.br, sdrocha@demin.ufmg.br

<sup>3</sup> Mining and Mineral Processing Research Center, ARCELOR MITTAL BP 30320, F-57283 Maizières-lès-Metz Cedex France  
Telephone: +33(0) 3 87 70 40 72  
E-mail: armando.correa@arcelormittal.com

## RESUMO

O quartzo é o principal silicato presente em minérios de ferro brasileiros, porém anfibólios eventualmente ocorrem associados aos minérios de ferro itabiríticos em proporções variadas e em regiões específicas dentro das formações ferríferas do Brasil. No quadrilátero ferrífero encontra-se o itabirito anfibolítico que é caracterizado pela presença de pseudomorfos de anfibólios (goethita/limonita) e que frequentemente leva à baixa seletividade na flotação com grande dificuldade em se atingir teores adequados de sílica no concentrado o que gera perdas significativas nos índices de recuperação em massa e ferro. No sudoeste baiano são comuns intercalações de formação ferrífera bandada, fácies silicato (quartzo/grunerita/cummingtonita) e óxido (magnetita/hematita). O presente trabalho apresenta resultados de testes de caracterização mineralógica, flotação e separação magnética de amostras de minério de ferro provenientes da região norte. Os resultados revelaram a presença de vários minerais do grupo dos anfibólios. Os testes de flotação para essas amostras, realizados conforme teste padrão para minério de ferro, não foram capazes de produzir teor de sílica adequado no concentrado. Foram realizadas tentativas de super-dosagem do coletor e também de atrição prévia à deslamagem, porém os resultados continuaram demonstrando pouca ou nenhuma seletividade do processo. Com base em estudo anterior com minério de ferro portador de minerais de carbonato, foram realizados testes com o uso de ácido oxálico observando-se uma melhora significativa nos resultados em termos de teores de ferro e sílica no concentrado. Atribui-se tal fato à eventual formação de compostos de cálcio e magnésio com o ácido oxálico reduzindo a ação nociva dos anfibólios. Embora os teores de ferro e sílica, alcançados com o uso de ácido oxálico na flotação, ainda não sejam adequados para o mercado, os testes indicaram que existe grande potencial para a otimização dos resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** flotação de minério de ferro, anfibólios, separação magnética.

## ABSTRACT

Quartz is the main silicate occurring in the most iron ores, but minerals from the amphibole group eventually comes along with the ores in varying proportions and in specific regions within the Brazilian iron ore formations. In the Iron Ore Quadrangle the amphibolitic itabirite is characterized by the presence of some pseudomorphs of amphiboles (goethite/ limonite) which frequently leads to a low selectivity during the flotation process. These pseudomorphs represent an enormous barrier for achieving adequate levels of silica in the concentrate and also produce significant losses in the weight and iron recoveries. Banded iron formations consisting of silicate (quartz / grunerite / cummingtonite) and oxide (magnetite/hematite) facies can be often found in the southwest of Bahia State. The present study shows the results of flotation and magnetic separation tests and also a mineralogical characterization of an amphibolitic iron ore from the north of Brazil. The mineralogical analysis revealed the presence of various minerals from the amphibole group. Flotation tests carried out using a standardized procedure for reverse cationic flotation were unable to produce an adequate content of iron and silica in the concentrate. Attempts of using high collector dosages and scrubbing prior to the desliming did not improve the flotation selectivity. Considering previous studies, the use of oxalic acid was also tested for the current ore. A significant improvement could be achieved in the iron and silica contents in the concentrate. This fact is attributed to an eventual formation of complex products of calcium and magnesium with the oxalic acid resulting in the reduction of the adverse action of amphiboles. Although the iron and silica levels in the concentrate, achieved with the use of the oxalic acid during flotation, are still not adequate for the market, the tests showed that there is a great potential for optimization.

**KEY WORDS:** iron ore flotation, amphiboles, magnetic separation.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Mundial do Aço o ano passado foi o quarto ano consecutivo em que a produção mundial de aço bruto superou a marca de um bilhão de toneladas. Esse quadro deve permanecer este ano, apesar dos impactos da crise financeira sobre a economia. Grande parte da produção de aço bruto é derivada de produtos da indústria de mineração de ferro. O Brasil é um dos países que têm se destacado nesse setor e é atualmente o principal exportador de matéria-prima contendo ferro. As grandes reservas brasileiras de minério de ferro estão concentradas em Minas Gerais, principalmente no Quadrilátero Ferrífero; na Serra dos Carajás, no Pará; e em Urucum, no Mato Grosso do Sul. Recentemente, pesquisas de campo e mapeamentos geológicos comprovaram a existência de grandes reservas de minério de ferro na região de Caetité, no sudoeste da Bahia. Segundo informações da Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração do Estado (SICM), devido ao grande potencial da jazida de ferro a Bahia poderá se tornar um dos maiores produtores do país.

Dentre os minerais presentes em minérios de ferro estão os silicatos, os quais constituem a maior e mais importante classe de minerais da crosta terrestre. A unidade básica dos silicatos, o íon  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , caracteriza-se pelo seu arranjo tetraédrico. Os tetraedros se juntam em cadeias simples, cadeias duplas, folhas ou em estruturas tridimensionais, dividindo os silicatos em subgrupos. O subgrupo dos inossilicatos corresponde aos silicatos constituídos por tetraedros compartilhando dois ou três oxigênios. Eles podem ser de cadeia simples (piroxênios) ou de cadeia dupla (anfíbólios). Os principais minerais do grupo dos anfíbólios são: antofilita, cummingtonita, grunerita, tremolita, actinolita, hornblenda, glaucofânio e riebeckita. Os anfíbólios eventualmente ocorrem associados à minérios de ferro itabiríticos em proporções variadas e em regiões específicas dentro das formações ferríferas do Brasil. O Quadrilátero Ferrífero apresenta formações ferríferas bandadas (BIF) proterozóicas. O grau metamórfico das rochas é do fácies xisto verde e atinge o fácies anfíbolito nas porções leste, sudeste e nordeste do Quadrilátero. Na Formação Cauê, por exemplo, encontramos o itabirito anfíbolítico, o qual é caracterizado pela presença de pseudomorfos de anfibólio (goethita/limonita) (Santos, 2002). A mina de Fe-Mn de Miguel Congo, localizada no sudeste do Quadrilátero, perto da Formação Cauê, situa-se acima de um nível de itabirito dolomítico e anfíbolítico (actinolita-tremolita), numa região que vai de Mariana até Timbopeba (Dardenne, 2001). No estado da Bahia, na região da serra de Jacobina pertencente ao paleoproterozóico, ocorrem vários fragmentos de anfíbolitos, rochas ultramáficas, calcissilicáticas e formações ferríferas (Mascarenhas e Silva, 1994). No complexo Licínio de Almeida, onde há depósitos de ferro e manganês, no sudoeste baiano, o protominério de manganês forma lentes e camadas intercaladas na formação ferrífera de tipo itabirito e é composto de óxidos, carbonatos e silicatos (entre eles alguns anfíbólios) (Dardenne, 2001). No complexo arqueano Ibitira-Ubiraçaba, também no sudoeste baiano, ocorrem gnaisses quartzo-feldspáticos e anfíbolitos, níveis alternados de biotita/hornblendagnaisse e são comuns intercalações de formação ferrífera bandada, fácies silicato (grunerita/cummingtonita) e óxido (magnetita/hematita) (Arcanjo *et al.* 2005).

No processamento mineral um dos métodos mais importantes para concentrar minério de ferro é a flotação. Esse método é excelente para recuperação de grandes massas de minérios finos e com baixos teores. Alguns minérios de ferro podem ser problemáticos e não produzir resultados satisfatórios na flotação. Isso pode acontecer, por exemplo, com minérios contendo anfíbólios. A presença desses silicatos prejudica a flotação, interferindo na ação do coletor e na ação do depressor, resultando numa baixa seletividade no processo. Os minérios anfíbolíticos do Quadrilátero Ferrífero frequentemente mostram baixo desempenho na flotação (Silva e Brandão, 1998).

Estudos de Viana e Araujo (2007), sobre caracterização mineralógica de amostras de minério de ferro da região nordeste, revelaram a presença de alguns minerais do grupo dos anfíbólios, como grunerita, hornblenda e cummingtonita. Os testes de flotação para essas amostras, realizados conforme teste padrão para minério de ferro, não foram capazes de produzir teor de sílica adequado no concentrado. Os resultados obtidos foram ruins para a grande maioria das amostras. Amostras de minério de ferro, associadas a pesquisas realizadas na região norte, apresentaram anfíbólios do grupo da tremolita. Os testes realizados com tais amostras não mostraram seletividade no processo de flotação. Durante os testes, tentativas de super-dosagem do coletor e também de deslamagem agressiva com maior retirada de lamas foram realizadas com o objetivo de se obter melhores resultados. Porém, os resultados continuaram demonstrando pouca ou nenhuma seletividade do processo. Em alguns testes adicionou-se ácido oxálico e observou-se uma melhora significativa nos resultados. O ácido oxálico parece formar produtos complexos de cálcio e magnésio, levando a neutralização da ação nociva dos anfíbólios. O presente trabalho apresenta resultados de caracterização mineralógica de uma amostra de minério de ferro anfíbolítico proveniente da região norte do Brasil. Apresenta também resultados de testes de separação magnética e testes de flotação com e sem ácido oxálico.

## 2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Para a caracterização mineralógica do material foram utilizadas as seguintes técnicas: difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de varredura e microanálise. A análise por difração de raios-X revelou que a amostra é consti-

tuida essencialmente por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e anfíbólios. Os anfíbólios encontram-se em duas fases distintas. Uma das fases é rica em Mg e Ca e a outra em Na, Ca, Mg, Al e Fe indicando constituírem-se de anfíbólios do grupo da tremolita. A análise química global da amostra estudada é apresentada na tabela I.

Tabela I – Análise química global

Teores (%)							
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PF
40,5	39,1	0,31	0,01	0,01	0,22	0,40	0,8

A figura 1 mostra uma imagem de MEV e o resultado da análise geral da amostra via EDS. Pode-se observar que a maioria das partículas de quartzo estão liberadas. A análise via EDS mostra um baixo teor de ferro e um alto teor de sílica. A figura 2 é uma imagem de MEV que ratifica a presença dos minerais identificados na difração de raios-X. Nesta imagem o anfíbólio encontra-se como uma partícula livre.

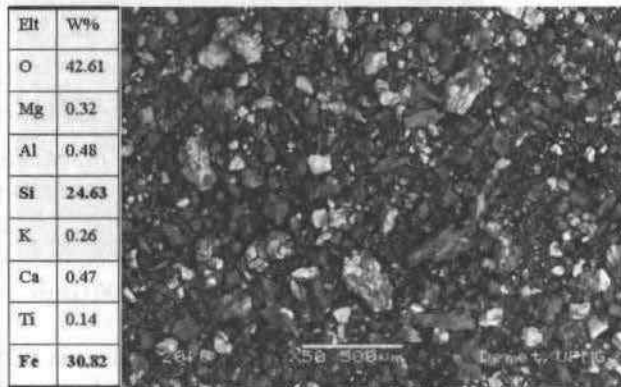


Figura 1 – Imagem de MEV e análise geral da amostra via EDS.

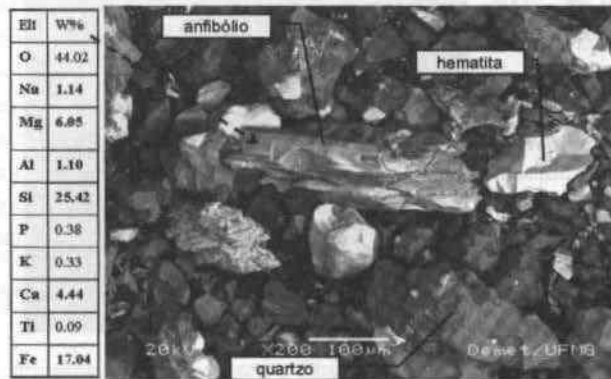


Figura 2 – Imagem de MEV mostrando partículas dos minerais que compõem a amostra.

### 3. TESTES DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Os testes de separação magnética foram realizados variando-se a intensidade de campo magnético e pressão de água de lavagem. Foi usado separador CARPCO 3X4L com matriz de placas dentadas tipo Jones com 1,5mm de espaçamento. A tabela II apresenta os melhores resultados obtidos e as condições dos testes.

Tabela II – Resultados dos testes de separação magnética

Intensidade de campo magnético	Água de lavagem (kg/cm <sup>2</sup> )	Recuperação em massa (%)	Recuperação de ferro (%)	Teores no concentrado (%)		
				Fe	SiO <sub>2</sub>	P
2000 Gauss	0,5	45,2	70	63,3	8,8	0,059
	1,0	36,5	57	63,6	8,2	0,058
	1,5	26,9	42	63,8	8,3	0,049

Os melhores resultados foram alcançados com a menor intensidade de campo utilizada (2000 Gauss). A recuperação mássica e a recuperação metalúrgica obtiveram melhores resultados com a pressão da água de lavagem igual a  $0,5 \text{ kg/cm}^2$ . Os teores de ferro e sílica estão dentro do esperado considerando-se que os testes foram realizados em apenas um estágio de concentração (rougher) e que a limpeza deste tipo de concentrado na indústria é com frequência realizada em várias etapas.

Produtos da separação magnética foram analisados via MEV/EDS com o objetivo de examinar a presença dos anfibólios. A figura 3 mostra uma imagem do concentrado magnético com intensidade de campo de 10.900 Gauss e pressão de água de lavagem de  $1,5 \text{ kg/cm}^2$ . Verifica-se que houve a concentração dos óxidos de ferro, porém em uma proporção menor que a concentração obtida utilizando-se intensidade de campo de 2000 Gauss provavelmente devido à captura física de partículas livres dos silicatos entre as partículas de óxido de ferro.

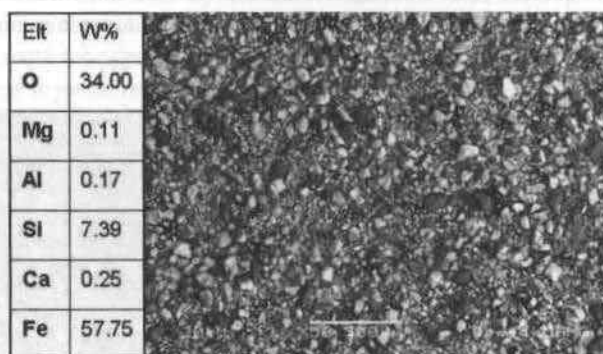


Figura 3 - Imagem do concentrado magnético 10.900 Gauss.

Na figura 4 uma imagem do rejeito é mostrada juntamente com a análise via EDS. Verifica-se que os teores de Mg, Al e Ca estão mais altos do que no concentrado o que demonstra que houve seletividade na separação dos anfibólios.

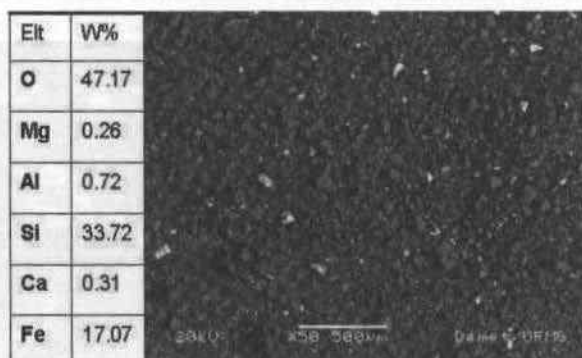


Figura 4 - Imagem do rejeito magnético 10.900 Gauss.

#### 4. TESTES DE FLOTAÇÃO

O minério de ferro em estudo foi submetido também a ensaios exploratórios de flotação em bancada. Os testes foram realizados utilizando a flotação catiônica reversa, de acordo com teste padrão para minério de ferro. A flotação catiônica reversa é o tipo de flotação mais utilizado na indústria mundial para concentrar minério de ferro.

Inicialmente o minério foi submetido à deslamagem para retirada das lamas ( $-10\mu\text{m}$ ) e também para eliminar parte dos contaminantes antes da flotação. Os testes de flotação foram realizados em célula Denver D12 operando a 1200 rpm, 40% sólidos e em pH 10,5. Os reagentes usados foram amido de milho convencional como depressor e eteramina primária como coletor. Os tempos de condicionamento foram de 5 minutos e 1 minuto para o depressor e o coletor respectivamente. O tempo de flotação foi de 5 minutos. Em teste específico foi usado ácido oxálico como agente modificador. Foram realizados vários testes de flotação padrão que não produziram resultados satisfatórios. Mesmo aumentando a dosagem do coletor e intensificando a deslamagem, o que levou à diminuição severa dos índices de recuperação, os testes padrão continuaram apresentando teores de sílica inadequados no concentrado. A tabela III mostra o melhor resultado obtido nos ensaios padrão de flotação.

**Tabela III** – Resultados obtidos nos testes de flotação

Teores no concentrado (%)							Recuperação em massa (%)	Recuperação de ferro (%)
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO		
55,2	20,1	0,10	0,10	0,10	0,14	0,20	60,8	80

A ausência de seletividade no processo de flotação é atribuída à presença dos anfíbios, que disponibilizam íons cálcio em solução os quais adsorvem na superfície do quartzo e inibem a sua flotação (Iwasaki *et al.*, 1980; Heerema e Iwasaki, 1980). Na tentativa de se obter melhores resultados foi realizado teste preliminar onde se adicionou ácido oxálico como agente modificador no processo de flotação. Os resultados em termos de qualidade química do concentrado apresentaram melhora significativa, como é mostrado na tabela IV, indicando um grande potencial para desenvolvimento do uso do ácido oxálico.

**Tabela IV** – Resultados obtidos nos testes de flotação com ácido oxálico

Teores no concentrado (%)							Recuperação em massa (%)	Recuperação de ferro (%)
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO		
61,2	11,2	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	51,0	72

O teor de sílica no concentrado teve uma redução de aproximadamente 55% em relação ao teste sem ácido oxálico. Este reagente, como indicado por outros trabalhos (Viana e Araújo, 2005) neutraliza a ação nociva dos anfíbios no processo, através da formação de complexos de cálcio e magnésio ao mesmo tempo em que reage com eventuais lamas compostas por óxidos de ferro removendo-as da superfície do quartzo (Tarasova *et al.* 2001).

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi constatado um grande potencial para uso do ácido oxálico na flotação de minérios de ferro anfíbolíticos.

Os resultados da separação magnética variando-se a intensidade de campo e água de lavagem indicaram que é possível produzir somente com a separação magnética especificações adequadas de ferro e sílica para a amostra estudada. Os melhores resultados ocorreram nas seguintes condições: intensidade de campo magnético de 2000 Gauss e pressão de água de lavagem de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Os resultados dos testes padrão de flotação mostraram baixa seletividade. Este fato é atribuído à presença dos anfíbios na amostra levando à inibição da flotação do quartzo. A adição de ácido oxálico contribuiu para uma melhora significativa nos resultados da flotação. Atribui-se este fato à formação de compostos do ácido oxálico com os íons disponibilizados pelos anfíbios e a ação de remoção de eventuais lamas de óxidos de ferro da superfície das partículas de quartzo permitindo a melhor ação do coletor.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sinceros agradecimentos a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcanjo, J. B. A. et al. Vale do Paramirim, Bahia: geologia e recursos minerais. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2005. 82p. Série Arquivos Abertos; 22.
- Dardenne, M. A. & Schobbenhaus, C. Metalogênese do Brasil. Brasília: Universidade de Brasília, 2001. 392 p.
- Heerema, R. H. & Iwasaki, I. Chemical precipitation of alkaline earth cations and its effect on flocculation and flotation of quartz. *Mining Engineering*, cidade. Vol. 32, No. 10, p. 1510-1516, 1980.
- Iwasaki, I. et al. Effect of calcium and magnesium ions on selective desliming and cationic flotation of quartz from iron ores. *Fine Particles Process*, P. Somasundaran, AIME, p.1057-1082, 1980.
- Mascarenhas, J. F. & Silva, E. F. A. Greenstone Belt de Mundo Novo: caracterização e implicações metalogênicas e geotectônicas no Cráton de São Francisco. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 1994.32 p. Série Arquivos Abertos; 5.
- Santos, L. D. Caracterização microestrutural de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero - MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

- Silva, C. C & Brandão, P. R. G. Itabirito anfibolítico de Timbopeba: sua caracterização mineralógica e tecnológica. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia, 17, 1998, Águas de São Pedro, SP. v.1. p.389-403.
- Tarasova Q., Dudene A.W.L. & Pilurzu S. Glass sand processing by oxalic acid leaching and photocatalytic effluent treatment. Minerals Engineering, Cape Town. Vol. 14, No. 6, p. 639-646, 2001.
- Viana, P. R. M. & Araujo, A. C. Relatório interno: Concentration of Mikhailovsky magnetic separation tailings. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- Viana, P. R. M. & Araujo, A. C. 2007. Relatório interno associado a pesquisas da região nordeste. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Otoni, 2007.