

FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO ANFIBOLÍTICOS – UMA REVISÃO¹

Dayane Ferreira Santos²
Paulo Roberto de Magalhães Viana³
Armando Corrêa de Araujo⁴
Janaína Gonçalves Santos⁵
Henrique Gonçalves Teixeira⁶

Resumo

Os depósitos de minério de ferro estão amplamente distribuídos pelo mundo e podem ser encontrados em épocas geológicas diferentes, principalmente no pré-cambriano. Em regiões específicas das formações ferríferas são encontrados minérios de ferro associados a anfibólios, inossilicatos que dificultam o processo de flotação. O Quadrilátero Ferrífero, por exemplo, apresenta formações ferríferas bandadas (BIF) proterozóicas e pode ser dividido em quatro zonas metamórficas em relação aos anfibólios (grunerita, cummingtonita, actinolita e tremolita e antofilita). A presença desses silicatos prejudica a flotação, interferindo na ação do coletor e na ação do depressor, resultando numa baixa seletividade no processo. Este trabalho apresenta estudos que descrevem os tipos de anfibólios associados aos minérios estudados e o impacto dos mesmos na flotação. Apesar de alguns testes apresentarem resultados potencialmente bons não há ainda uma rota de processo efetivamente seletiva para a flotação dos minérios de ferro anfibolíticos.

Palavras-chave: Minérios de ferro; Flotação; Anfibólios.

FLOTATION OF AMPHIBOLITIC IRON ORES – A REVIEW

Abstract

Iron ore deposits are widely distributed around the world and can be found in different geological periods, especially in the pre-Cambrian. In specific regions of iron ore formations one can find iron ores associated with amphiboles. The proterozoic banded iron formations in the Brazilian Iron Ore Quadrangle can be divided into four metamorphic zones according to the amphibole (grunerite, cummingtonite, actinolite and tremolite/anthophyllite). The presence of these silicates in the flotation process generates an interference with the collector and depressant action which results in a low selectivity in the process. This paper presents studies that describe the amphiboles types associated with iron ores and analyzes the behavior of these minerals during the flotation. Some special lab flotation tests produced significantly better results if compared with the usual standard flotation test. However, until now, there is not an effective process route for achieving a selective flotation for the amphibolitic iron ores.

Key-words: Iron ore; Flotation; Amphiboles.

¹ *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.*

² *Mestrando, Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - UFMG.*

³ *Professor adjunto do Departamento de Engenharia de Minas.*

⁴ *Phd, Mining and Mineral Processing Research Center, ARCELOR MITTAL*

⁵ *Graduando, Engenharia de Minas – UFMG*

⁶ *Graduando, Engenharia de Minas – UFMG*

1 INTRODUÇÃO

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 fundamental da estrutura dos silicatos é o grupo aniônico $(\text{SiO}_4)^{4-}$, no qual quatro átomos de oxigênio circundam um átomo de silício em um arranjo tetraédrico. Cada átomo de oxigênio pode se ligar a outro átomo de silício unindo-se a outros grupos tetraédricos. Assim, o compartilhamento de oxigênios pode ocorrer de diversas formas possíveis resultando em diferentes arranjos estruturais e, portanto, em diferentes grupos de silicatos.

O grupo 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 a 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 anfíbólio (goethita/limonita) de acordo com Santos.⁽¹⁾ 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, segundo Dardenne e Schobbenhaus.⁽²⁾

No tratamento de minérios 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 acontece, via de regra, 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, como descrito por Silva e Brandão.⁽³⁾

Este trabalho tem como objetivo geral uma revisão de literatura sobre o desempenho da flotação de minérios de ferro contendo anfíbólios, visando ampliar conhecimentos referentes ao comportamento desse tipo de minério. O trabalho tem como objetivo também discutir o potencial de uso de novos reagentes para flotação de minérios de ferro anfíbolíticos.

2 OS ANFIBÓLIOS

O grupo dos inossilicatos engloba silicatos nos quais os SiO_4 tetraédricos se unem para formar infinitas cadeias, simples ou duplas. Nos inossilicatos de cadeia simples, os piroxênios, cada tetraedro compartilha dois oxigênios e nos de cadeia dupla, os anfíbólios, dois ou três oxigênios são compartilhados por cada tetraedro (Figura 1).

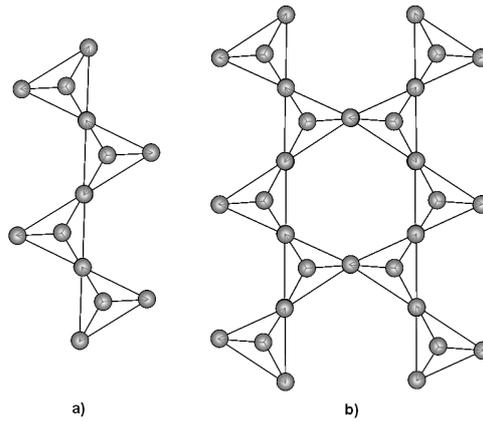


Figura 1. Esquema estrutural dos inossilicatos: a) cadeia simples (piroxênios) e b) cadeia dupla (anfibólios).⁽⁴⁾

Apesar das diferenças nas estruturas entre as cadeias dos piroxênios e anfibólios existem muitas semelhanças entre suas propriedades cristalográficas, físicas e químicas. Em relação à composição da estrutura cristalina os dois grupos apresentam os mesmos cátions, tais como, Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , os quais podem agir como elementos de ligação entre os tetraedros ou como substituintes do silício. Porém, uma característica exclusiva dos anfibólios é a presença de hidroxilas, as quais são responsáveis pelos índices refrativos mais baixos nos anfibólios. A unidade básica dos anfibólios é $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$ (Figura 2). Os anfibólios mais comuns podem ser divididos em séries como mostrado na Tabela 1. A composição química dos minerais do grupo dos anfibólios pode ser expressa pela seguinte fórmula geral: $(\text{Na}, \text{K})_{0-1}(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$.

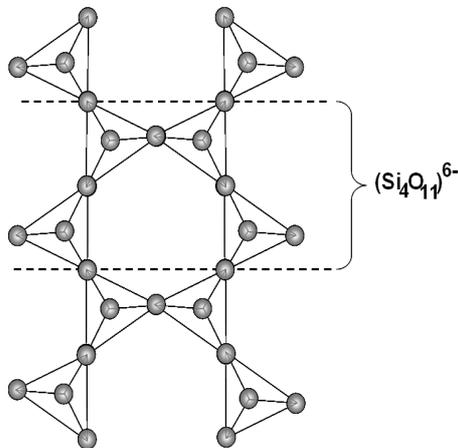


Figura 2. Estrutura da unidade básica dos anfibólios.⁽⁴⁾

Tabela 1. Série de anfibólios⁽⁵⁾

Anfibólios		Fórmula
	Antofilita	$(\text{Mg, Fe})_7\text{SiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Série da cummingtonita	Cummingtonita	$\text{Fe}_2\text{Mg}_5\text{SiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Grunerita	$\text{Fe}_7\text{SiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Série da tremolita	Tremolita	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{SiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{SiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Hornblenda	$(\text{Ca, Na})_{2-3}(\text{Mg, Fe, Al})_5\text{Si}_6(\text{Si, Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Grupo dos anfibólios de sódio	Glaucofânio	$\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Riebeckita	$\text{Na}_2\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

3 NOVAS RESERVAS DE MINÉRIO DE FERRO

Santos⁽¹⁾ comenta que os depósitos de minério de ferro estão amplamente distribuídos pelo mundo e podem ser encontrados em épocas geológicas diferentes, principalmente no pré-cambriano, período no qual são encontradas as reservas de ferro de maior importância para a economia mundial.

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 assim como em diversos outros estados das regiões norte e nordeste. Em quase todas estas reservas verifica-se a presença de anfibólios em proporções variadas.

4 DOMÍNIOS ESTRUTURAIS E METAMÓRFICOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Supergrupo Minas, sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica, é composto por quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. O grau metamórfico das rochas é do fácies xisto verde e atinge o fácies anfibolito nas porções leste, sudeste e nordeste do Quadrilátero, como dito em Santos.⁽¹⁾ O arranjo de texturas e estruturas apresentado pelos itabiritos e corpos de minério do Supergrupo Minas é resultado de processos sedimentares e tectono-metamórficos.

Considerando-se o estudo de Rosiere⁽⁶⁾ é possível dividir o Quadrilátero Ferrífero em dois domínios estruturais principais: domínio de baixa deformação (oeste) e domínio de alta deformação (leste) e em quatro zonas metamórficas de acordo com o tipo anfibólio predominante: ZG (zona da grunerita); ZC (zona da cummingtonita); ZA (zona da actinolita) e ZTA (zona da tremolita e antofilita) (Figura 3).

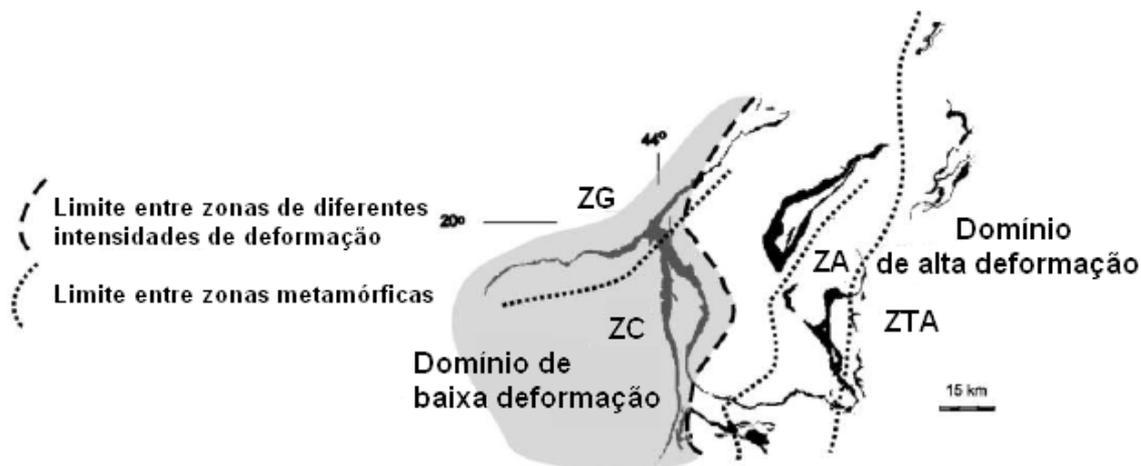


Figura 3. Domínios estruturais e metamórficos no Quadrilátero Ferrífero. A área sombreada mostra o domínio de baixa deformação. Zonas metamórficas: ZG (zona da grunerita); ZC (zona da cummingtonita); ZA (zona da actinolita) e ZTA (zona da tremolita e antofilita).⁽⁶⁾

5 O PROCESSO DE FLOTAÇÃO

No tratamento de minérios vários métodos são aplicados para concentração de minério de ferro. No Brasil, os principais ou mais importantes processos utilizados incluem a flotação separação magnética e separação gravimétrica.

Entre esses métodos de concentração, a flotação ou flotação em espuma se destaca. A flotação constitui-se em um método que se baseia na química de superfície e é largamente utilizado pela indústria para separar materiais sólidos finamente divididos. O processo envolve a captura de partículas pequenas por bolhas de ar em uma suspensão aquosa. As partículas-bolhas são então coletadas em uma camada de espuma. Para se alcançar o sucesso da separação das partículas é necessário controlar os seguintes fatores: a umectabilidade das superfícies sólidas pela água, a química e eletroquímica da solução, a dispersão e agregação das partículas sólidas e a geração e estabilidade da espuma. Para realizar esse controle uma grande variedade de reagentes químicos orgânicos e inorgânicos são adicionados ao sistema de flotação. Urbina⁽⁷⁾ afirma que nas últimas décadas pesquisas têm feito uma abordagem mais científica para o desenvolvimento de formulações químicas especificamente para utilização como reagentes de flotação, combinando modelos de estrutura molecular com estudos detalhados de química de superfície. Os resultados das investigações contribuem enormemente para a compreensão da química de flotação, particularmente da interação entre partículas minerais e reagentes.

5.1 Flotação de Minério de Ferro

Quando se trata de flotação de minério de ferro o processo mais utilizado é o de flotação catiônica reversa. Nesse processo as gangas (quartzo e silicatos) são flotadas com um coletor catiônico e os óxidos e hidróxidos de ferro são deprimidos. Os coletores mais comuns são as aminas (monoaminas, diaminas, eteraminas). A adsorção das aminas nas partículas minerais ocorre basicamente através da atração eletrostática entre o íon positivo da amina e a superfície da partícula mineral carregada negativamente e, apesar da flotação reversa de minério de ferro com

aminas ser realizada em uma faixa restrita de pH, a adsorção das aminas ocorre em faixa ampla de pH.⁽⁸⁾

Os coletores catiônicos podem agir também sobre os óxidos e hidróxidos de ferro levando-os para o flotado juntamente com os minerais de ganga, não ocorrendo a separação desejada. Para garantir a seletividade do processo e, portanto, a devida separação dos minerais, reagentes depressores são adicionados à polpa para deprimir os óxidos e hidróxidos de ferro. Os depressores comumente utilizados são os amidos, macromoléculas de glicose. O amido pode ser extraído de várias espécies vegetais: milho, mandioca, tomate, trigo, arroz, batata etc.

A necessidade de se processar minérios de ferro de baixo teor e complexos como os minérios anfíbolíticos tem se tornado cada vez maior. O tratamento efetivo desses minérios exigem novos reagentes de flotação mais seletivos, quimicamente estáveis, capazes de interagir com íons específicos e ambientalmente corretos.

5.2 Flotação de Minérios de Ferro Anfíbolíticos

O aproveitamento de minérios de ferro anfíbolíticos, tanto pobres quanto ricos em ferro, muitas vezes não é considerado pela indústria. Isso pode acontecer por alguns motivos, dentre eles: alguns minérios são relativamente pobres em relação ao teor de ferro o que naturalmente dificulta a flotação; a literatura sobre flotação de minérios anfíbolíticos é bastante escassa e não há uma rota de processo padrão para concentrar esse tipo de minério.

A natureza da superfície dos anfíbólios depende diretamente da química de seu cristal e é relevante no desempenho na flotação devido a influência dos vários cátions da estrutura cristalina do anfíbólio na química associada à polpa. Se a superfície de um anfíbólio contém cátions insolúveis, estes permanecem na superfície e podem participar das adsorções. Quando o anfíbólio é imerso em água, uma dupla camada elétrica é formada na interface entre a superfície do anfíbólio e o meio aquoso. Essa dupla camada elétrica é controlada por ligações $-Si-O$ e $-M-O$ na superfície do mineral. Assim, a superfície do anfíbólio pode se comportar como a de um óxido constituído de SiO_2 e M_xO_y . No caso de cátions solúveis, as ligações quebradas de $-Si-O$ é que irão controlar a carga de superfície do anfíbólio quando o mineral for imerso em água. Entretanto, os cátions poderão ser readsorvidos caso a solubilização seja parcial e sujeita à hidrólise. Logo, cada complexo positivo readsorvido irá representar um sítio de carga positiva na superfície, como descrito em Silva.⁽⁸⁾

Muitos estudos têm sido feitos com o objetivo de avaliar o desempenho na flotação de minérios de ferro anfíbolíticos. Como por exemplo, Silva⁽⁸⁾ realizou estudos de flotação com amostras de itabiritos anfíbolíticos provenientes da região de Timbopeba. Os reagentes utilizados foram amido (depressor) e amina (coletor). A polpa apresentou concentração inicial de sólidos de 60% em massa e pH 10. Esses estudos tiveram como objetivo avaliar a possibilidade de flotação do anfíbólio. As análises em microsonda eletrônica e difratometria de raios x nestes estudos identificaram a variedade cummingtonita nas amostras. O anfíbólio apresentou massa inferior a 1% e mostrou-se preservado em quantidades menores e frequentemente incluso em quartzo. A Tabela 2 mostra a análise química do anfíbólio encontrado.

Tabela 2. Análise química do anfibólio⁽⁸⁾

Anfibólio	Teores (%)								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Cummingtonita	51,34	0,03	0,11	35,49	0,11	11,28	0,25	0,03
Cummingtonita (furo de sonda)	53,30	0,01	0,07	31,67	0,26	13,50	0,03

Uma avaliação visual de lupa estereoscopia indicou grande contaminação de quartzo no concentrado nos primeiros ensaios. Os resultados indicaram alto teor de sílica no concentrado. Mesmo otimizando as condições dos ensaios o teor desejado de sílica de 0,8% não foi alcançado. A presença da cummingtonita pode ser uma das razões para a obtenção do resultado não satisfatório nos testes. Mesmo apresentando-se em pequena quantidade o anfibólio parece prejudicar a flotação, interferindo na ação do coletor e/ou do depressor.

Estudos de Viana e Araujo,⁽⁹⁾ sobre caracterização mineralógica de amostras de minério de ferro, revelaram a presença de alguns minerais do grupo da tremolita. Os anfibólios apresentaram-se em duas fases distintas, uma fase rica em Mg e Ca e a outra rica em Na, Ca, Mg, Al e Fe (Hornblenda). A análise química global da amostra estudada está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Análise química global⁽⁹⁾

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

Ensaio exploratório de flotação em bancada foram executados com o minério anfibolítico. Os testes foram realizados utilizando a flotação catiônica reversa, de acordo com teste padrão para minério de ferro. Antes dos ensaios de flotação o minério foi submetido à deslamagem para retirada das lamas (-10µm) e também para eliminar parte dos contaminantes. A concentração de sólidos utilizada foi de 40% em pH 10,5. Os reagentes usados foram amido de milho convencional como depressor e eteramina primária como coletor.

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 4 mostra o melhor resultado obtido nos ensaios padrão de flotação.

Tabela 4. Resultados obtidos nos testes de flotação⁽⁹⁾

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

Iwasaki⁽¹⁰⁾ e Heerema e Iwasaki⁽¹¹⁾ explicam que os anfibólios disponibilizam íons cálcio em solução. Esses íons adsorvem na superfície do quartzo e inibem a sua flotação, o que explica a ausência de seletividade no processo.

Com o objetivo de obter melhores resultados, Viana e Araújo⁽⁹⁾ realizaram um teste preliminar utilizando ácido oxálico como agente modificador no processo de flotação. Em termos de qualidade química do concentrado, os resultados apresentaram uma melhora significativa, o que está mostrado na Tabela 5. Este ensaio preliminar foi muito importante, pois revelou o grande potencial do uso de ácido oxálico na flotação do minério de ferro anfíbolítico. O teor de sílica no concentrado teve uma melhora significativa em relação ao teste sem ácido oxálico.

Tabela 5. Resultados obtidos nos testes de flotação com ácido oxálico⁽⁹⁾

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

De acordo com Tarasova⁽¹²⁾ o ácido oxálico neutraliza a ação nociva dos anfíbolios no processo, através da formação de complexos de cálcio e magnésio. Ele atua também reagindo com eventuais lamas compostas por óxidos de ferro, removendo-as da superfície do quartzo e liberando as partículas de quartzo para serem capturadas pelas bolhas de ar.

Um exemplo de sucesso no uso de ácido oxálico na flotação está relacionado à principal região de produção de minério de ferro da Rússia que é a Kursk Magnetic Anomaly. Os depósitos da Kursk são caracterizados por jaspilitos finamente disseminados com uma composição mineral bastante complexa. O ferro apresenta-se na maior parte intercristalizado com os seguintes minerais de gangas: mica, anfíbolios (cummingtonita), piroxênios e carbonatos. O método de concentração utilizado no beneficiamento desse minério, a separação magnética, permite apenas o processamento de quartzitos magnetíticos. Devido à complexa mineralogia do minério, as perdas de ferro na forma de hematita chegam a ser de 2 milhões de toneladas por ano.

Em 2007, Filippova⁽¹³⁾ realizou estudos com rejeitos de separação magnética do tratamento de minérios de ferro na usina de beneficiamento Mikhailovsky MGOK, na região de Kursk. A separação magnética não é suficiente para concentrar o minério de ferro e, assim, outros métodos são necessários para realizar a separação dos minerais. O objetivo do estudo foi investigar possibilidades de se obter concentrado de hematita com teor de Fe acima de 63% e teor de sílica menor que 6% a partir dos rejeitos da separação magnética utilizando flotação catiônica reversa. O material foi, então, submetido a um ensaio de flotação, a fim de remover toda sílica possível. Os teores de Fe e SiO₂ do material antes e após a flotação estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Teor de ferro e sílica⁽¹³⁾

Produtos	Teores (%)	
	Fe	SiO ₂
Rejeito magnético	25	54
Concentrado da flotação	<60	4,9

A sílica foi quase totalmente removida utilizando-se alquileteramina como coletor. Entretanto, o teor de Fe atingido foi menor que 60%, não alcançando o valor desejado. Esse resultado mostra que uma quantidade significativa de silicatos e carbonatos de ferro está presente no concentrado de flotação. Os carbonatos não foram para o rejeito provavelmente porque têm baixa flotabilidade com coletores

catiônicos. No caso dos silicatos, como a cummingtonita que contem ferro em sua composição, as partículas minerais são deprimidas pelo amido juntamente com a hematita e, dessa forma, não são capturadas pela espuma.

O efeito de misturas de aminas sobre o potencial zeta da hornblenda, anfibólio da série da tremolita, também foi investigado (Figura 4). Foi observado que a adsorção foi melhor com misturas de coletores o que gerou uma maior seletividade entre hematita e hornblenda no processo de flotação.

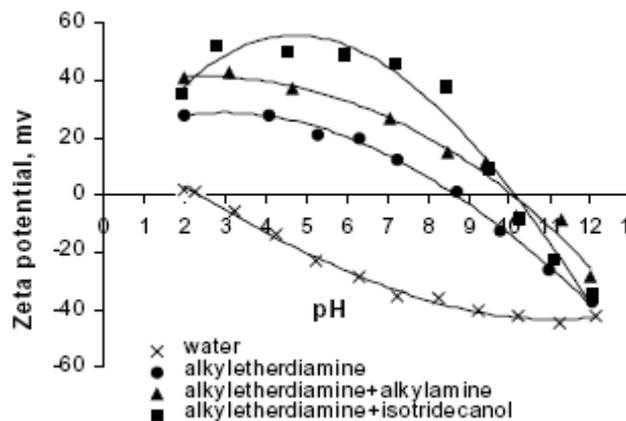


Figura 4. Efeito de misturas de coletores sobre o potencial zeta da hornblenda.⁽¹³⁾

Estudos realizados por Viana, Araujo e Pereira⁽¹⁴⁾ também com rejeitos da separação magnética da usina de Mikhailovsky, usando-se ácido oxálico como agente complexante para os minerais de carbonato e anfibólios, atingiram com sucesso as especificações desejadas para os teores de ferro e sílica no concentrado.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Os testes usuais de flotação existentes para minério de ferro não possibilitam a obtenção de resultados adequados na flotação, ou seja, não geram concentrados de minério de ferro com especificações adequadas ao mercado, quando anfibólios estão presentes no minério. Esses minerais prejudicam o processo de flotação devido à química de suas superfícies e a disponibilização de íons na polpa, principalmente íons cálcio e magnésio, os quais adormecem na superfície dos outros minerais, impedindo a ação seletiva do coletor.

A introdução de ácido oxálico nos testes de flotação, a mistura de reagentes e a combinação de métodos de concentração demonstram um grande potencial para uma melhora significativa na seletividade do processo. Assim, estudos mais detalhados são necessários para o entendimento do comportamento dos anfibólios, a compreensão exata do mecanismo de ação de novos reagentes, objetivando-se o estabelecimento de uma rota de flotação efetivamente seletiva para os minérios anfibolíticos.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 SANTOS, L. D. *Caracterização microestrutural de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero - MG*. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- 2 DARDENNE, M. A. e SCHOBENHAUS, C. *Metalogênese do Brasil*. Brasília: Universidade de Brasília, 2001. 392 p.
- 3 SILVA, C. C e BRANDÃO, P. R. G. Itabirito anfíbolítico de Timbopeba: sua caracterização mineralógica e tecnológica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 17, 1998, Águas de São Pedro, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
- 4 VIANA, P. R. M. *Flotação de Espodumênio, Microclina, Muscovita e Quartzo com Coletores Aniônicos, Catiônicos, Anfotéricos e Mistura de Coletores*. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- 5 KLEIN K. *Mineral Science*. 22. ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 641 p.
- 6 Rosiere C.A.; Siemes H.; Quade H.; Brokmeier H.-G.; Jansen E.M. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, Amsterdam, volume 23, n. 9, p. 1429-1440, set. 2001.
- 7 URBINA, R. H. Recent developments and advances in formulations and applications of chemical reagents used in froth flotation. *Mineral Processing & Extractive Metall. Review*, Estados Unidos, n. 24, p. 139-182, 2003.
- 8 SILVA, Camilo Carlos. *Itabirito Anfíbolítico de Timbopeba (Ouro Preto, MG): Sua Caracterização Mineralógica e Tecnológica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.
- 9 Viana, P. R. M. e Araujo, A. C. 2007. Relatório interno associado a pesquisas da região nordeste. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Otoni, 2007.
- 10 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*, Australia, p.1057-1082, 1980.
- 11 HEEREMA, R. H, e IWASAKI, I. Chemical precipitation of alkaline earth cations and its effect on flocculation and flotation of quartz. *Mining Engineering*, Estados Unidos, vol. 32, n. 10, p. 1510-1516, 1980.
- 12 TARASOVA, Q.; DUDENE, A.W.L. e PILURZU, S. Glass sand processing by oxalic acid leaching and photocatalytic effluent treatment. *Minerals Engineering*, Cape Town, vol. 14, n. 6, p. 639-646, 2001.
- 13 FILIPPOVA, I. V.; FILIPPOV, L. O. e SEVEROV, V. V. Flotation of silicates gangue from hematite containing products. *Names 2007, 3rd France-Russia Seminar*, p. 123-126, 2007.
- 14 VIANA, Paulo Roberto de Magalhães; ARAUJO, Armando Correa de; França S. A. A. Pereira A. G. Flotação do Rejeito da Separação Magnética de um Minério Europeu. In: 60º Congresso Anual, 2005, Belo Horizonte. *Anais do 60º Congresso Anual da ABM. São Paulo: ABM, 2005*, vol. único. p. 2916-2925, 2005.