

INVESTIGAÇÃO DAS FORMAS DE OCORRÊNCIA DO FÓSFORO EM MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO/MG¹

Aline Pereira Leite Nunes²
Paulo Roberto Gomes Brandão³
Marcos Vinícius Ribeiro⁴
George Eduardo Sales Valadão⁵

Resumo

A presença do fósforo pode inviabilizar a aplicação posterior do concentrado de minério de ferro na siderurgia, uma vez que este elemento reduz a dureza do aço. O presente trabalho apresenta uma caracterização de uma amostra de minério de ferro com alto teor de fósforo da Mina Jangada, Brumadinho/MG. As técnicas utilizadas para a caracterização foram ASE por BET, DRX, FRX, TG, FTIR e MEV-EDS. Os minerais wavellita, senegalita e turquesa foram os fosfatos identificados por DRX, em regiões porosas da amostra. A hematita, a magnetita e a goethita foram as fases majoritárias na amostra, que apresentou 62% Fe, 1,28% SiO₂ e 0,82% P. O grau de liberação do minério foi analisado para quatro frações granulométricas através da análise de imagens por elétrons retroespalhados obtidas por MEV de seções polidas, pelo LibMin[®]. Com base nos resultados de caracterização e na análise de liberação, foi possível concluir que o fósforo na amostra estudada ocorre tanto na forma de fosfatos secundários como também associado à goethita e, possivelmente, a outros minerais de ferro. A associação do fósforo com outros minerais pode-se dar na forma de inclusões nanométricas de fosfatos ou como substituições nas redes cristalinas de óxidos e hidróxidos de ferro.

Palavras-chave: Minério de ferro; Fósforo; Goethita; Caracterização.

INVESTIGATION OF PHOSPHORUS OCCURRENCE IN IRON ORE FROM THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO/MG

Abstract

The presence of phosphorus can make unviable the subsequent use of the iron ore concentrate in the steel industry, since the phosphorus reduces the hardness of steel. This paper presents a characterization of an iron ore sample with high phosphorus content, from the Jangada Mine, Brumadinho, MG. The techniques used for characterization were SSA by the BET method, XRD, XRF, TG, FTIR and SEM-EDS. The minerals wavellite, senegalite and turquoise were the phosphates identified by XRD, in porous region of the sample. Hematite, magnetite and goethite were the major phases present in the sample, which has 62% Fe, 1.28% SiO₂ and 0.82% P. The degree of liberation was evaluated for four fractions in polished sections by SEM and LibMin[®] software. According to characterization results and liberation analyses, it was possible to conclude that the phosphorus occurs as secondary phosphate and also associated with goethite and another iron minerals. This phosphorus association can be in the form of nanometric inclusions or as replacements in the crystal structures of iron oxides and hydroxides.

Key words: Iron ore; phosphorus; goethite; characterization.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), MG, Brasil.

³ Ph.D., Professor Emérito, Depto. de Engenharia de Minas, UFMG, MG, Brasil.

⁴ Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, MG, Brasil.

⁵ Doutor, Prof. Associado, Depto. de Engenharia de Minas, UFMG, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos minérios de ferro o fósforo é um elemento extremamente nocivo, pois sua presença pode inviabilizar a aplicação posterior dos concentrados na siderurgia, uma vez que este elemento reduz a dureza do aço, principalmente o de alto carbono.⁽¹⁾

O fósforo pode ocorrer nos depósitos de ferro na forma de fosfatos de origem primária (apatita), secundária ou em substituições nas redes cristalinas de óxidos e hidróxidos de ferro, principalmente na goethita. O fosfato secundário mais comum em minérios de ferro é a wavellita, que é um fosfato de alumínio. Outros fosfatos secundários comuns são vivianita, senegalita, gorceixita, variscita, crandalita e turquesa.

Minérios de origem magmática que contêm apatita como fonte de fósforo, como em Kiruna na Suécia, podem ser beneficiados através da flotação reversa com ácidos graxos, além da separação magnética.^(2,3) Porém, essas mesmas tecnologias não têm sido aplicadas com sucesso no beneficiamento de minérios de origem sedimentar, como no Quadrilátero Ferrífero. Além dos métodos de separação física, processos hidrometalúrgicos como a lixiviação ácida podem ser aplicados para a redução do teor de fósforo. No entanto, esses métodos apresentam custos elevados e que são diretamente proporcionais aos teores de fósforo contido nos minérios, o que inviabiliza a aplicação destes métodos em determinadas situações.

Vários estudos sobre a gênese e caracterização de minérios com alto teor de fósforo da região do Quadrilátero Ferrífero têm sido desenvolvidos há várias décadas.⁽⁴⁻⁹⁾

Em vários destes estudos foi possível concluir que a fonte do fósforo pode estar relacionada tanto a substituições deste elemento nas redes cristalinas de óxidos e hidróxidos de ferro quanto à presença de fosfatos secundários em escala micrométrica, sendo que a apatita raramente é encontrada como fonte de fósforo nestes minérios.

Sendo assim, pode-se afirmar que o sucesso da aplicação de determinado método de concentração para redução dos teores de fósforo dependerá da forma de ocorrência deste elemento nos minérios.

Com o objetivo de iniciar um estudo de caracterização sobre os fosfatos secundários que ocorrem na mina Jangada, localizada no Quadrilátero Ferrífero, foram realizadas diversas análises em uma amostra de minério de uma frente de lavra desta mina. Não foi objetivo da pesquisa a caracterização da jazida como um todo, e sim apenas a caracterização dos fosfatos presentes na amostra para uma avaliação preliminar. Este estudo juntamente com outras pesquisas mais detalhadas poderão indicar se é possível a separação destes fosfatos dos minerais de ferro, possibilitando o aproveitamento econômico de vários depósitos e minimizando o descarte de minérios no meio ambiente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção e Preparação da Amostra

A amostra utilizada neste estudo foi retirada de uma frente de lavra da mina Jangada, localizada a 30 km de Belo Horizonte no município de Brumadinho.

A amostra foi fragmentada primeiramente em um britador primário de mandíbulas. Da amostra global foram separados e reservados três fragmentos que conservaram alguns geodos com cristais claros e bem formados, que provavelmente seriam

fosfatos. Os fragmentos reservados foram submetidos à raspagem dos cristais dos geodos com o objetivo de se concentrar essas fases para análises por DRX, MEV-EDS, FTIR e TG. Após a raspagem os três fragmentos foram reintegrados à amostra global e esta foi submetida a mais duas etapas de fragmentação, seguindo para homogeneização e quarteamento. Algumas alíquotas obtidas seguiram para um moinho de panela até se obter uma granulometria abaixo de $106\mu\text{m}$ para realização de análise quantitativa por FRX da amostra global.

A morfologia das partículas e suas respectivas composições químicas foram analisadas através da microscopia eletrônica de varredura/microsondagem eletrônica de seções polidas em diferentes frações granulométricas (-212, -150, -106, $-53\mu\text{m}$). As amostras foram embutidas em resina acrílica, lixadas e polidas em pasta de diamante de 9, 3 e $1\mu\text{m}$. Em seguida, foram recobertas por uma película delgada condutora de ouro (Au) e então colocadas no equipamento. As imagens foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca FEI, modelo INSPECT S50. As análises químicas semiquantitativas de microrregiões foram realizadas no espectrômetro dispersivo em energia de raios X (EDS) marca EDAX-GENESIS.

As imagens geradas pelo MEV foram analisadas também pelo programa Lib Min[®], com o objetivo de avaliar o grau de liberação da amostra. LibMin[®] é um programa de análise digital de imagens que possibilita a realização de análises modais e estudos de liberação, dentre outros. O programa foi desenvolvido em linguagem de programação C++, pela sua robustez em operações matemáticas e gráficas.⁽¹⁰⁾

2.2 Identificação de Fases por DRX e Análise Quantitativa por FRX

A amostra foi submetida a análises qualitativas por difratometria de raios X (DRX) no equipamento Philips PW 1710, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. As análises por fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas no espectrômetro PHILIPS PW 2400 e possibilitaram a determinação dos elementos químicos constituintes da amostra.

Caracterização morfológica e análise standardless por MEV-EDS

A amostra de minério de ferro foi examinada e fotografada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Jeol JSM 6360LV e analisadas no espectrômetro de raios X dispersivo em energia (EDS) Thermo Noran com software Quest. A composição química de partículas de microestruturas distintas foi analisada neste instrumento.

2.3 Espectrometria no Infravermelho

As análises de espectrometria no infravermelho foram executadas pela técnica de transmissão, com pastilhas de KBr em um espectrômetro Perkin-Elmer 1760-X (FTIR). Os espectros foram obtidos com a resolução de 2cm^{-1} com média de 16 varreduras.

2.4 Análise Termogravimétrica (TG)

As análises termogravimétricas foram feitas no instrumento Shimadzu TGA-50 em atmosfera inerte de N_2 , com razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

2.5 Determinação da Massa Específica e Área Superficial Específica

A massa específica foi determinada através de picnômetro de hélio, obtendo-se o valor de $4,13 \text{ g/cm}^3$. As isotermas de adsorção foram obtidas utilizando o analisador de área superficial Quantachrome Nova-1000, através de adsorção de gás N_2 . A área superficial específica obtida foi de $8,58 \text{ m}^2/\text{g}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são mostrados os resultados das análises químicas da amostra. O alto teor de ferro do minério superior a 60% é devido ao predomínio de hematita compacta na frente de lavra onde foram recolhidas as amostras de ROM, tratando-se de uma zona de alto teor.

Tabela 1. Análise química por FRX

%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	%Mn	%CaO	%MgO	%TiO ₂	%PPC
61,92	1,28	3,30	0,82	0,024	0,039	0,068	0,060	3,12

A mina de Jangada, pertencente à Vale, está localizada no município de Brumadinho, a 30km de Belo Horizonte. Os depósitos de minério de ferro dessa região são pertencentes à Formação Cauê, como citado anteriormente. Na mina de Jangada, corpos de minério hematíticos compactos apresentam-se intercalados com minérios macios, com uma espessura máxima de 200m e 1000m de extensão. Itabiritos dolomíticos são comuns na parte inferior do depósito.⁽¹¹⁾ Couto⁽⁸⁾ relata que a hematita fosforosa, devido à presença do mineral wavellita, e o itabirito goethítico rico são dois dos principais materiais ricos em ferro da mina, porém apresentam altos teores de fósforo. A goethita também é um mineral que aparece frequentemente neste horizonte.

Os fragmentos obtidos após a britagem primária apresentavam mineralizações distintas (supostamente fosfatos) em geodos presentes no fragmento. Algumas partes apresentavam brilho adamantino e aspecto maciço, características essas típicas da goethita. O resultado da análise por DRX dos cristais raspados pode se observado na Figura 1.

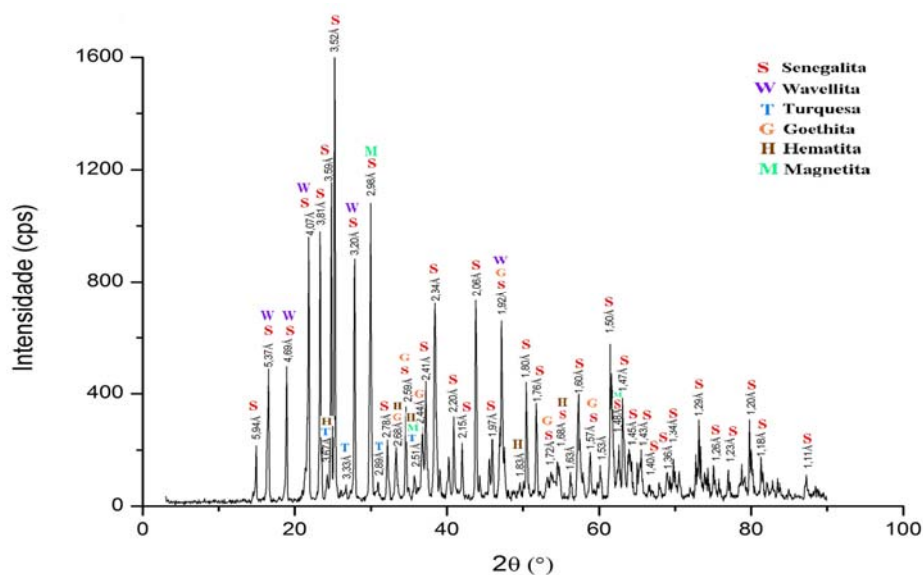


Figura 1. Análise por DRX dos cristais raspados.

A fase majoritária na amostra analisada foi o mineral senegalita, que, assim como a wavellita, é um fosfato de alumínio hidratado. A hematita, a goethita e a magnetita são os principais minerais de ferro constituintes do minério.

Na Figura 2 é apresentada uma imagem de elétrons retroespalhados (IER) da fração retida em 150µm. Os cristais claros são óxidos de ferro e as partícula marcadas com a letra F tratam-se de fosfatos de alumínio, conforme os dados obtidos por EDS. Partículas de óxidos de ferro muito próximas das partículas de fosfato interferem parcialmente na análise semiquantitativa por EDS, justificando os valores obtidos para os elementos Fe (principalmente) e Si. A partícula marcada com a letra Q trata-se de uma partícula de quartzo. Pode-se observar também um elevado grau de liberação nesta fração.

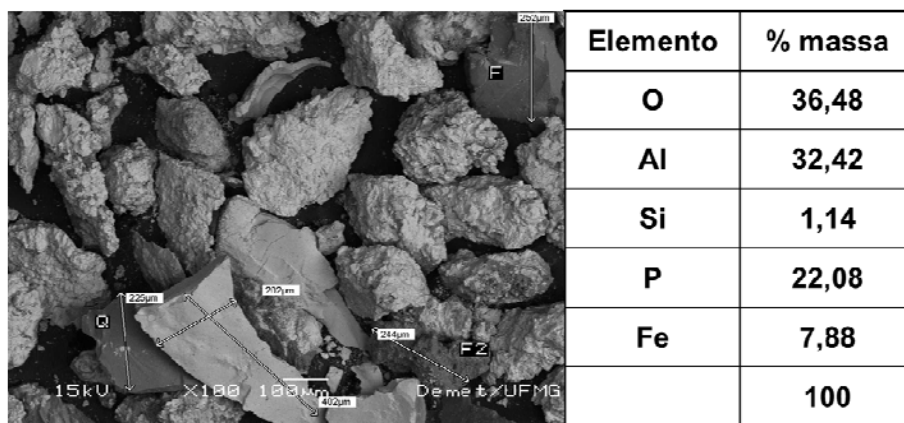


Figura 2. Imagem por elétrons retroespalhados da fração retida em 150 µm com aumento de 100x e análise semiquantitativa.

Na Figura 3 é apresentado o fragmento que foi preservado na preparação da amostra global. Para análise por MEV/EDS, a área contendo cristais claros foi raspada e permitiu a identificação de fosfatos secundários. Com base nos resultados por DRX, foi possível concluir que estes cristais são de senegalita, uma vez que o hábito dos cristais apresentados na imagem por elétrons retroespalhados é concordante com os hábitos possíveis desse mineral.⁽¹²⁾

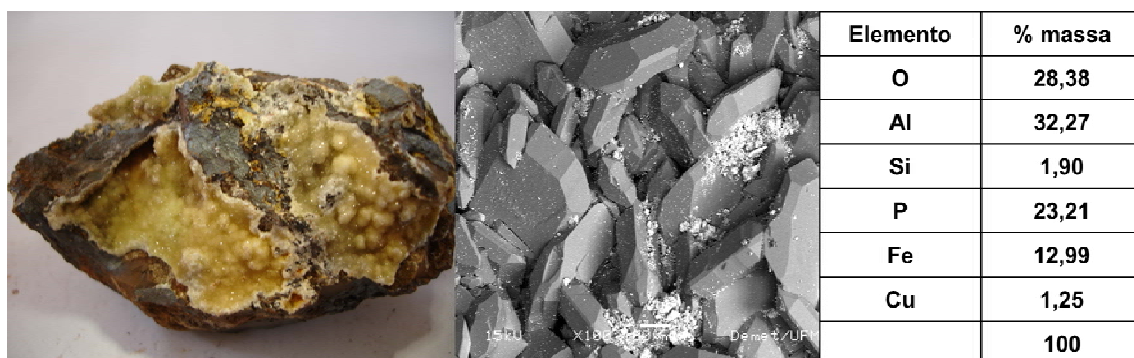


Figura 3. Esquerda: foto em microscópio óptico estereoscópico; direita: MEV, imagem por elétrons retroespalhados dos cristais amarelos e análise semiquantitativa.

A senegalita é o fosfato mais comum em Kouroudiako, no vale do Falemé no Senegal. Os fosfatos secundários são abundantes nesse depósito, sendo encontrados principalmente em zonas muito alteradas, formando grandes geodos juntamente com a goethita.⁽¹²⁾

O espectro de infravermelho apresentado na Figura 4 indicou a presença de goethita e fosfatos. A goethita tem absorção intensa em números de onda aproximados de 890 cm^{-1} e 790 cm^{-1} (deformação angular) e em 3.140 cm^{-1} (deformação axial da hidroxila). Já o fosfato apresenta frequências espectrais na região de 1.000 cm^{-1} a 1.100 cm^{-1} devido às deformações axiais das ligações P-O. As bandas proveniente da hidratação do KBr são a deformação axial da água, como a banda larga centrada em aproximadamente 3.420 cm^{-1} , e a correspondente deformação angular em 1.633 cm^{-1} .

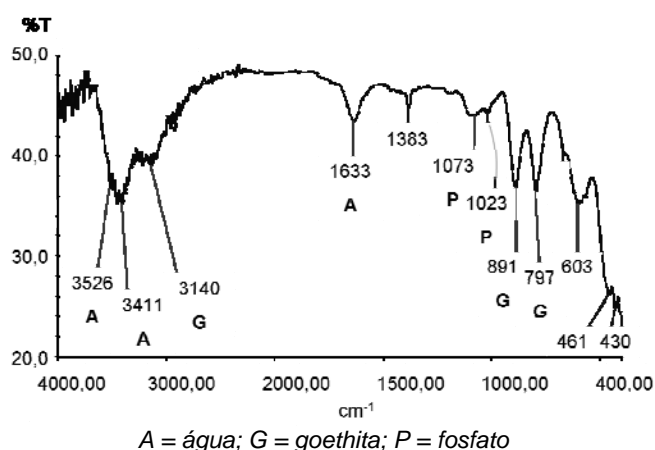


Figura 4. Espectro de infravermelho da amostra, pastilha de KBr.

O resultado da análise termogravimétrica pode ser observado na curva da Figura 5. A variação da temperatura foi aproximadamente de 25°C a 950°C . A primeira perda de massa observada no gráfico da Figura 5 pode ser atribuída à umidade residual que foi eliminada. A segunda perda tem início em aproximadamente 290°C , e pode ser atribuída à saída da hidroxila estrutural da goethita, que apresenta perda máxima de massa entre 290°C e 330°C , mas que certamente já terminou em 360°C ⁽¹³⁾. A perda de moléculas de água presentes na estrutura cristalina da senegalita pode ter sido iniciada juntamente com a perda da hidroxila estrutural da goethita, além de ser provavelmente o fator responsável pela perda de massa da amostra até cerca de 425°C .

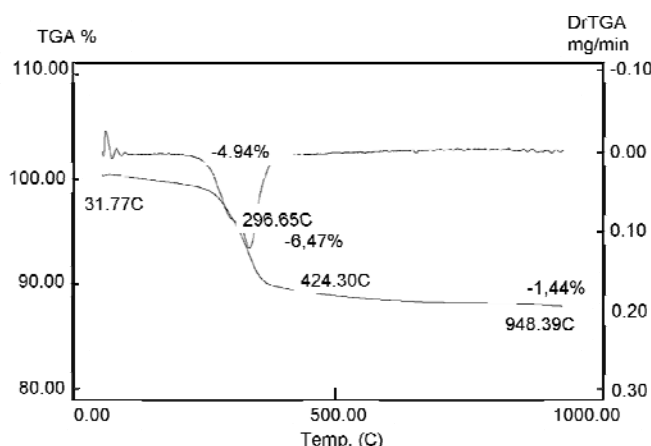


Figura 5. Curvas termogravimétrica (TG) e TG diferencial (DTG).

Na análise por MEV/EDS de seções polidas de quatro frações granulométricas da amostra foi possível verificar tanto a presença de fosfatos secundários liberados como partículas de goethita contendo elevados teores e fósforo. Na Figura 6 podem

ser observadas imagens de elétrons retroespalhados da fração granulométrica -150+106 μ m. Pode-se observar a ocorrência de várias partículas mistas nessa faixa granulométrica. A partícula 1, de acordo com a análise por EDS apresentada na Tabela 2, é uma partícula de óxido de ferro. Na partícula mista onde são numeradas as regiões 2 e 3 são detectadas maiores distribuições de alumínio e fósforo na região 2. A tonalidade mais intensa da região 4 e a análise por EDS indicam que esta é uma partícula mista de goethita e hematita, com possível contaminação por fosfato e silicato. Na Figura 7 é apresentada uma imagem desta partícula com aumento de 1500x. Observa-se que ocorre cimentação da hematita pela goethita.

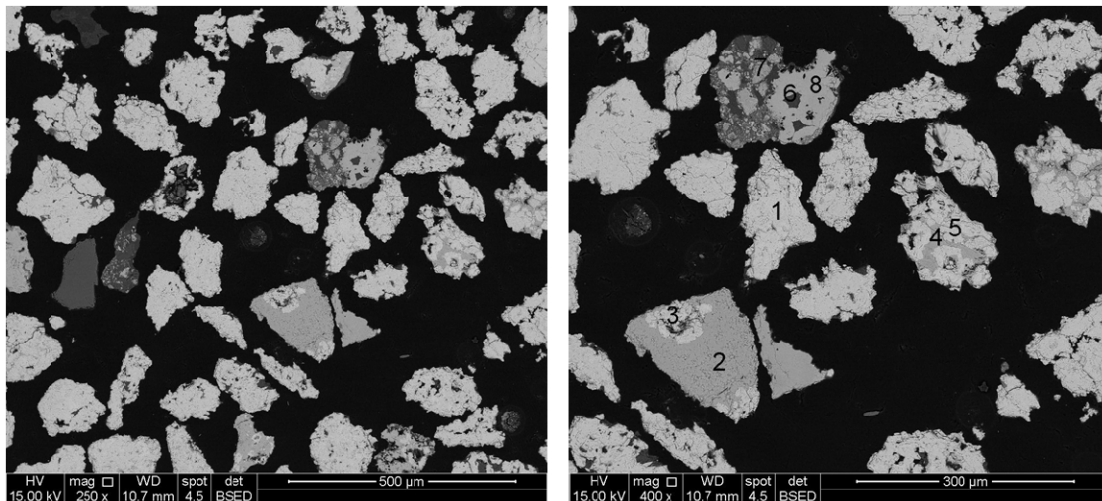


Figura 6. Imagens de elétrons retroespalhados da fração granulométrica -150+106 μ m.

Tabela 2. Análise por EDS das partículas numeradas da fração -150+106 μ m

Elemento	% Massa							
	1	2	3	4	5	6	7	8
O	18,96	29,38	19,15	29,46	18,23	40,85	20,98	28,13
Al	0,21	2,87	0,39	2,62	0,00	28,23	2,48	0,57
Si	0,43	1,78	0,30	2,12	0,31	29,65	0,78	1,60
P	0,18	1,04	0,19	0,82	0,11	0,08	0,94	0,65
Fe	80,22	64,93	79,97	64,98	81,35	1,19	74,82	69,05
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

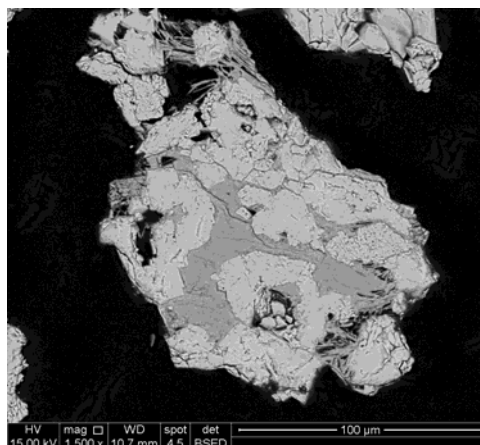


Figura 7. Imagens de elétrons retroespalhados das regiões 4 e 5, com aumento de 1500x.

Na Figura 8 podem ser observadas imagens de elétrons retroespalhados da fração granulométrica -106+75 μ m. A presença de partículas mistas pode ser observada nas regiões numeradas como 2 e 3, e a partícula 5. As análises por EDS são apresentadas na Tabela 3.

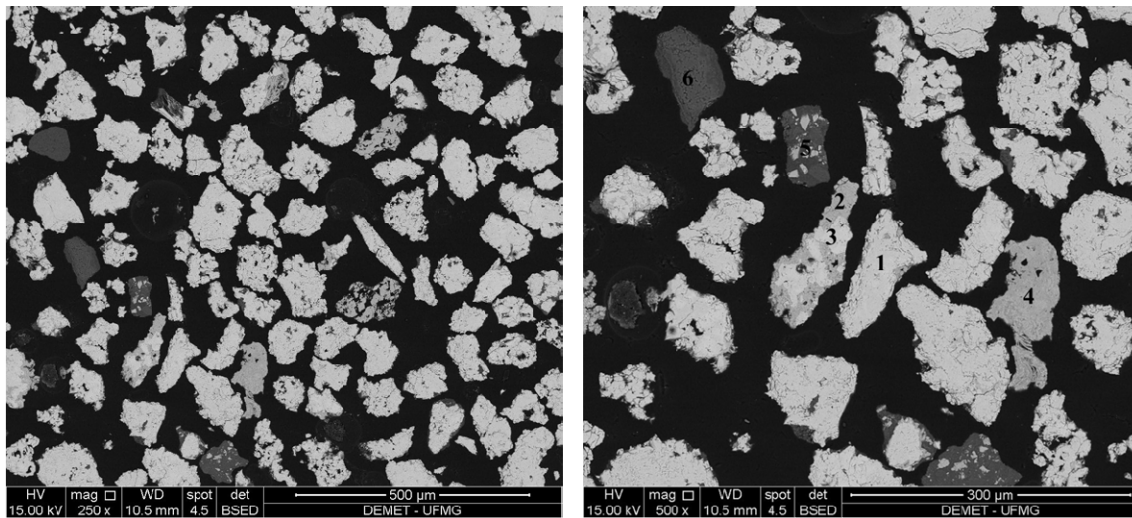


Figura 8. Imagens de elétrons retroespalhados da fração granulométrica -106+75 μ m.

Tabela 3. Análise por EDS das partículas numeradas da fração -106+75 μ m

Elemento	% Massa					
	1	2	3	4	5	6
O	19,51	26,88	19,74	25,58	39,18	44,76
Al	0,21	0,84	0,38	2,41	28,10	35,82
Si	0,26	1,31	0,23	1,88	30,44	2,62
P	0,29	1,41	0,00	0,74	0,00	7,47
Fe	79,73	69,56	79,65	69,39	2,28	9,33
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

O grau de liberação da amostra foi analisado para quatro frações granulométricas através da análise de imagens por elétrons retroespalhados obtidas por MEV de seções polidas, pelo software LibMin[®]. Na Figura 9 são apresentadas as imagens das últimas seções analisadas no LibMin[®] para cada fração granulométrica. As partículas de cor azul são os minerais de ferro e as partículas de cor vermelha são os minerais de ganga. Pela análise das imagens pode-se observar que a amostra apresenta elevado grau de liberação a partir da fração -150 μ m. No entanto, pequenos pontos vermelhos podem ser notados em todas as frações, inclusive na fração -53 μ m.

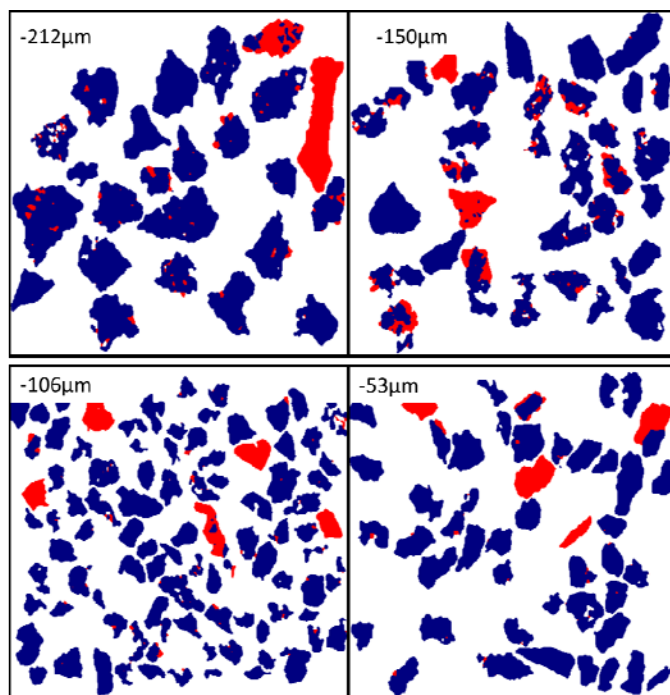


Figura 9. Análise de liberação do minério no LibMin[®] para quatro frações granulométricas distintas.

Os resultados das porcentagens liberadas fornecidos pelo programa para cada fração granulométrica são apresentados no gráfico da Figura 10. Os dados são plotados em função da granulometria passante na abertura “x”, aqui denominada como diâmetro de partícula (μm).

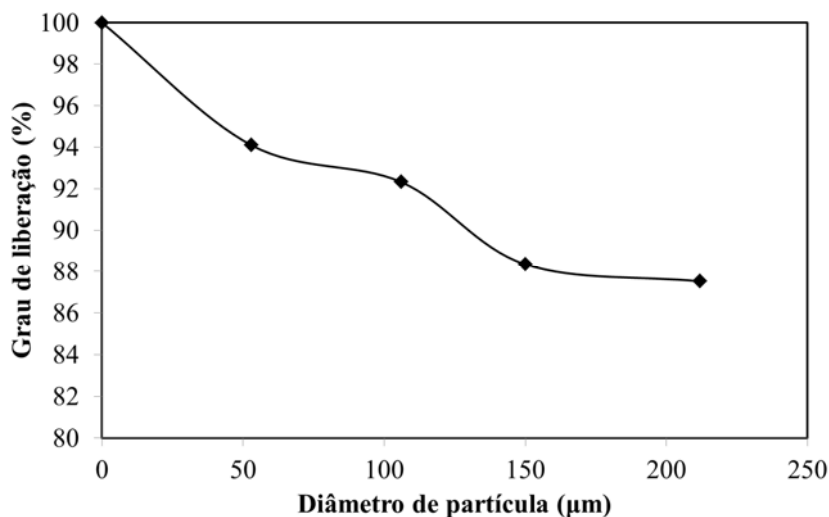


Figura 10. Grau de liberação para diferentes frações granulométricas.

O programa LibMin[®] utilizado no cálculo do grau de liberação não diferencia os óxidos e hidróxidos de ferro, considerando todos como minerais úteis. Assim, a goethita mesmo associada a contaminantes como fosfatos e aluminossilicatos é considerada como mineral útil. Mesmo considerando este fato, nota-se que a amostra apresenta excelente grau de liberação, sendo que para a fração $<106\mu\text{m}$ o grau de liberação é maior que 92%.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados por DRX conclui-se que os principais fosfatos detectados na amostra foram senegalita, wavellita e turquesa. A hematita é o principal mineral de ferro da amostra, sendo que as demais fases como goethita, wavellita e senegalita são minoritárias e necessitaram ser “concentradas” para serem detectadas na DRX. A FRX confirmou que o minério analisado é de alto teor com mais de 60% de ferro e com baixo teor em SiO₂ (1,28%).

A análise por FTIR do fragmento raspado indicou a presença de goethita na amostra e fosfatos. A área superficial específica de 8,58 m²/g obtida para a amostra pode ser considerada elevada para minério de ferro, o que sugere alta porosidade do minério.⁽¹⁴⁾ Na análise por MEV/EDS de seções polidas de quatro frações granulométricas da amostra foi possível verificar tanto a presença de fosfatos secundários liberados como partículas de goethita contendo elevados teores e fósforo. Foi possível concluir também que a amostra apresenta excelente grau de liberação, sendo que para a fração <106µm o grau de liberação é maior que 92%.

Como base nos resultados de caracterização e na análise de liberação, pode-se concluir que o fósforo no minério estudado ocorre tanto na forma de fosfatos secundários como também associado à goethita e, possivelmente, a outros minerais de ferro. A associação do fósforo com outros minerais pode se dar na forma cristais nanométricos de fosfatos ou como substituições nas redes cristalinas de óxidos e hidróxidos de ferro. Estas possíveis formas de associação são, portanto, os principais fatores que afetam diretamente na eficiência da flotação como método de separação do fósforo do minério estudado.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, Capes e Fapemig.

REFERÊNCIAS

- 1 Chiaverini, V. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7ª edição. São Paulo: ABM, 2008. cap. IX, p. 177-178.
- 2 Ranjbar, M. Dephosphorization of Iranian Iron Oxide Fines By Flotation. *Erzmetall*, v.55, nº11, p.612, 2002.
- 3 Subramanian, S.; Rao, K. H.; Forssberg, K. S. E. Dispersion Characteristics of Apatite and Magnetite Fines in the Presence of Inorganic and Organic Reagents and its Influence on the Dephosphorization of Magnetite Ore. In: Patrick Zhang, Hassan El-Shall, Ponisseril Somasundaran, Regis Stana. *Proceedings of Beneficiation of Phosphates III - Fundamentals and Technology*. Littleton: SME, 2002, Section 1 - Fundamentals I, chapter 3, p.21-31.
- 4 Coutinho, J.M.V; Barbour, A.P. Fosfatos Secundários no Minério de Ferro da Mina de Cauê, Itabira, e Casa de Pedra, Congonhas do Campo, MG. In: XXIII Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador. Anais. p. 187-189, 1969.
- 5 Rabelo, P.J.B. Estudos de Caracterização e Redução do Teor de Fósforo do Minério de Ferro da Mina de Alegria, Mariana, MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. Volumes 1 e 2. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2004.
- 6 Curi, A.; Araujo, A.C. Processos de Fixação do Fósforo em Minérios de Ferro Intemperizados e em Solos. *REM: Revista de Minas, Ouro Preto*, v. 41, nº 1 e nº 2, p.131-132, jan.- jun. 1992.

- 7 Coelho, L.H.; Fonseca, L.; Kaneko, K.M.; Melo, J.C. A Origem do Fósforo e sua Localização Espacial nos Minérios de Ferro Enriquecidos Supergenicamente. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto. Anais do II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro. Editora ABM, 1999. p.44-52, 1999.
- 8 Couto, M. L. F. Caracterização de alumínio e fósforo em minério de ferro. Ouro Preto: Escola de Minas - UFOP, 121p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral), 2009.
- 9 Nunes, A.P.L. Flotação de Fosfatos Presentes em Minérios de Ferro Brasileiros. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 184p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2009.
- 10 Delbem, I.D.; Galery, R.; LIBMIN: manual prático de instalação e utilização. Belo Horizonte: DeMin/UFMG. 45p., 2009.
- 11 Fernandes, E. Z. Caracterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minério de Ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 329p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2008.
- 12 Gineste, C. Sénégalite et phosphates associés de Kouroudiako, Falémé, Sénégal. Le Règne Minéral, v.65, p.13-24, 2005.
- 13 Rocha, J.M.P., Brandão, P.R.G. Goethitas da Mina de Alegria, MG: Ênfase na Cristalinidade e na Hidroxilação. I Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização, Ouro Preto. Assoc. Bras. Metalurgia e Materiais (ABM), p.383-402, 1996.
- 14 Almeida, A. P.; Brandão, P. R. G. Analytical methods to determine porosity in Samarco iron ore samples. In: 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 2009, Ouro Preto MG. Anais. São Paulo, SP: Assoc. Bras. Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2009, v.1, p.1-12.