

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E IMPLICAÇÕES NA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE ITABIRITOS*

Ligia Mara Gonzaga¹

Reiner Neumann²

Luís Marcelo Marques Tavares³

Resumo

A separação magnética ocupa uma posição importante na concentração de minérios de ferro e há grande interesse em avaliar a sua aplicabilidade na etapa de projeto. Isso pode ser realizado por meio de uma caracterização adequada do minério e do uso de ensaios em bancada. O presente trabalho aplicou uma metodologia baseada na caracterização para avaliação do potencial de aplicação da separação magnética de baixa intensidade no WDRE, bem como o separador magnético de alto gradiente (HGMS) Rapid para dois minérios de ferro itabiríticos. Estudos detalhados de caracterização granulométrica, química e mineralógica das amostras, britadas abaixo de 1,18 mm, foram realizados. As análises demonstraram as diferentes composições mineralógicas dos minérios, sobretudo no tocante aos teores de magnetita e hematita. A fim de caracterizar a distribuição dos componentes magnéticos das diferentes amostras preparadas foi realizado o seu fracionamento utilizando o separador magnético Isodinâmico Frantz, que permitiu estabelecer os intervalos de intensidade de corrente preferencial de ocorrência das principais fases presentes nas amostras, sendo os resultados aplicados com sucesso na previsão da separação magnética.

Palavras-chave: Separação magnética; Isodinâmico Frantz; Itabiritos; Rapid; WDRE.

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION AND IMPLICATIONS IN THE MAGNETIC SEPARATION OF ITABIRITES

Abstract

Magnetic separation has an important role in the concentration of iron ores and there is great interest in assessing its applicability in the design stage of a circuit. This may be carried out by a combination of appropriate ore characterization and bench-scale testing. The present study applied a methodology that is based on the use of characterization for evaluating the potential of applying low intensity magnetic separation in the WDRE and high intensity magnetic separator (HGMS) Rapid to two itabirite iron ores. Detailed analyzes of the texture and of the chemical and mineralogical composition were carried out of the samples crushed to minus 1.18 mm. The analyzes showed the different mineralogical compositions of the ores, especially regarding magnetite and hematite contents. The aim of this work was to characterize the distribution of magnetic components of different samples using the Frantz isodynamic magnetic separator, by the determination of the preferential current intensity of the main phases present in the samples. This was successfully applied to the prediction of magnetic separation.

Keywords: Magnetic separation; isodynamic Frantz; Itabirite; Rapid; WDRE.

¹ Engenheira de Minas, M.Sc., Bolsista DTI, Programa de Ciências e Tecnologia Mineral, CETEM, Rio de Janeiro, RJ.

² Geólogo, M.Sc., D.Sc., Pesquisador Titular, Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, Rio de Janeiro, RJ.

³ Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D, Professor Titular, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

1 INTRODUÇÃO

A separação magnética é bastante utilizada na área de processamento de minérios para a concentração e purificação de substâncias minerais, sendo amplamente empregada na concentração de minerais ferrosos. Esta técnica permite uma separação seletiva dos minerais por meio do controle do campo magnético aplicado [1,2].

Ela se baseia nas diferenças de susceptibilidade magnética das várias espécies minerais. A susceptibilidade magnética é uma propriedade de um mineral que determina seu comportamento quando submetido a um campo magnético, ou seja, seu grau de magnetização em resposta ao campo magnético aplicado [3]. Com base nessa característica diversas referências, como livros clássicos de mineralogia [4], de processamento mineral [5-3] e de metalurgia [6-7] classificam os minerais em ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

As diferenças de susceptibilidade dos minerais são exploradas na separação magnética, de maneira que partículas com susceptibilidade alta respondem prontamente ao campo magnético. Como o campo magnético influencia na separação magnética dos diferentes minerais, o controle da intensidade de campo magnético permite uma separação seletiva das partículas minerais com diferentes valores de susceptibilidade magnética. Baixas intensidades de campo magnético são capazes de separar minerais com elevada susceptibilidade, enquanto altas intensidades são necessárias para separar minerais com valores de susceptibilidade baixo. O controle da intensidade do campo pode ser efetuado pelo emprego de eletroímãs, fazendo variar a intensidade da corrente elétrica [8].

Portanto, a susceptibilidade magnética pode ser utilizada como um parâmetro diferencial para o beneficiamento de minérios, cuja eficiência de separação dependerá principalmente das propriedades magnéticas dos minerais e da granulometria da amostra, exercendo influência ainda o tempo de residência do material no campo magnético, a liberação dos minerais presentes e as forças de gravidade e de atrito [9-10].

Existe no mercado uma variedade de tipos de separadores magnéticos, sendo classificados de acordo com o uso, podendo ser a úmido ou a seco, ou de acordo com as características do campo de indução, os separadores são subdivididos em separadores de alta e baixa intensidade. Qualquer separador magnético opera aplicando uma força sobre as partículas de maior susceptibilidade magnética a fim de separá-las das partículas com menor susceptibilidade magnética. A escolha da classe ou tipo de um separador é ditada por inúmeras considerações, tais como, a distribuição do tamanho das partículas e, as propriedades magnéticas das partículas a serem separadas, entre outras.

A avaliação da aplicabilidade da separação magnética no projeto de uma usina de beneficiamento demanda a realização de ensaios em escala de bancada e piloto, o que nem sempre é possível, devido ao volume limitado de amostra disponível, sobretudo no caso de projetos *greenfield*. Nesse contexto, a combinação do uso de métodos de caracterização mineralógica e ensaios dedicados visando avaliar a pertinência da aplicação da separação magnética é relevante.

O presente trabalho trata da caracterização de amostras de dois minérios de ferro itabiríticos, demonstrando ainda a aplicação potencial da separação magnética a partir de ensaios de bancada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de dois minérios de ferro itabiríticos da região do Quadrilátero Ferrífero, denominadas B e C, foram coletadas para análises. A Figura 1 apresenta o fluxograma com etapas envolvidas na preparação de cada amostra para ensaios e análises. As amostras de minério ROM foram britadas em laboratório usando britadores de mandíbulas e cônicos de forma estagiada a fim de minimizar a geração de finos.

A primeira etapa do trabalho incluiu a caracterização detalhada das amostras, que tornou possível determinar curvas de separabilidade para o material estudado, as quais auxiliaram na avaliação da eficiência da separação. Análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios-X foram realizadas no equipamento da Shimadzu (EDX-720). Análises por difratometria de raios-X foram realizadas usando o método do pó no equipamento Bruker-D4 Endeavor.

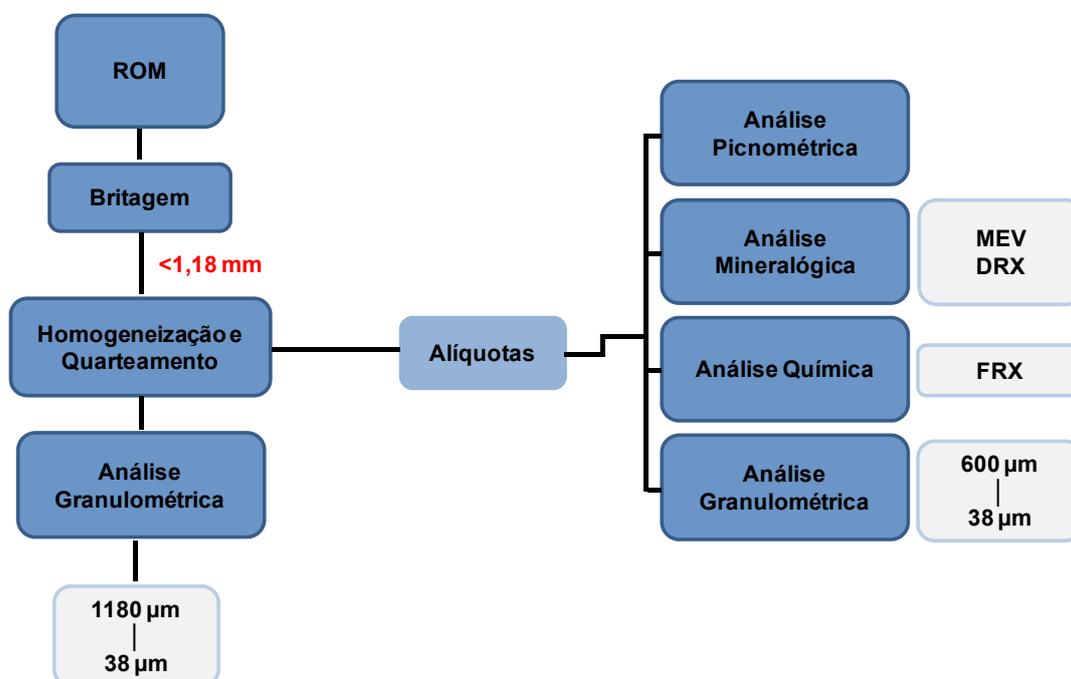


Figura 1. Fluxograma do processamento das amostras.

A fim de caracterizar a distribuição dos componentes magnéticos das diferentes amostras preparadas, foi realizado o seu fracionamento utilizando o separador magnético Isodinâmico Frantz. Ele é um equipamento de bancada que realiza separações a seco, o qual consiste basicamente de uma calha vibratória, com inclinação longitudinal e lateral variável (0 a 90°), situada entre os polos de um eletroímã gerador de campo magnético. O separador Franz (Figura 2) pode gerar campos magnéticos com densidade de fluxo magnético de 0 até 20,000 Gauss, sendo o limite superior equivalente à intensidade máxima de corrente atingida pelo equipamento, que é de 1,8 A.



Figura 2. Separador magnético Frantz. Separação magnética (A), e descarga do material magnético e não magnético (B).

O Separador Isodinâmico Frantz permitiu realizar separações a diferentes intensidades de corrente e observar o comportamento das amostras quando submetidas a um campo magnético. Conseqüentemente foi possível separar o material magnético do não magnético, viabilizando a separação de amostras em diferentes níveis de suscetibilidade magnética. O procedimento adotado nos ensaios constituiu, inicialmente, no fracionamento das amostras por peneiramento usando as peneiras de aberturas de 0,6, 0,3, 0,15, 0,075 e 0,038 mm, sendo as análises realizadas separadamente para cada uma dessas alíquotas.

Tabela 1. Relação entre as intensidades de corrente, as intensidades de campo estimadas e a suscetibilidade magnética das partículas separadas [5,11,12]

Intensidade de corrente (A)	Intensidade do campo magnético (G)	Suscetibilidade magnética (kg/m ³)
0,1	1.500	6,5x10 ⁻⁶
0,3	4.500	7,2x10 ⁻⁷
0,5	6.500	2,6x10 ⁻⁷
0,7	9.500	1,3x10 ⁻⁷
1,0	13.000	6,5x10 ⁻⁸

Os ensaios de concentração magnética em escala piloto envolveram duas rotas: concentração magnética utilizando o separador magnético de tambor de média intensidade WDRE (Figura 3A) fabricado pela INBRAS-Eriez e concentração magnética utilizando um separador magnético de alto gradiente (HGMS) Boxmag Rapid de laboratório (Figura 3B). Os ensaios de separação consistiram de um primeiro estágio de separação no WDRE, após o qual o produto não magnético foi separado no Rapid. Para os ensaios de concentração no separador de tambor WDRE foram utilizadas as seguintes condições: 32,5% de sólidos (peso); frequência de rotações do tambor de 30 RPM; taxa horária de alimentação de 1180 g/min e distância do tambor ao fundo da bacia de 12,5 mm. Para os ensaios de concentração no separador RAPID foram utilizadas as seguintes condições: 32,5% de sólidos (peso); intensidade de corrente 10 A; taxa horária de alimentação de 1000g/min, abertura do gap das matrizes de separação de 1,5 x 3 mm e tempo de lavagem de 12,5 segundos.



Figura 3. Separador magnético WDRE (A) e Separador magnético RAPID (B).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises Granulométricas e Massa Específica

Os resultados de medida da distribuição granulométrica da amostra global para os minérios estudados são apresentados na Figura 4. Esses resultados mostram que há uma porção significativa de massa de tamanho menor que 0,150 mm para os dois minérios. A Figura também destaca que o minério “C” apresentou elevada proporção de finos (<0,038 mm) presentes, enquanto que o minério “B” se destaca pela distribuição granulométrica comparativamente mais grossa.

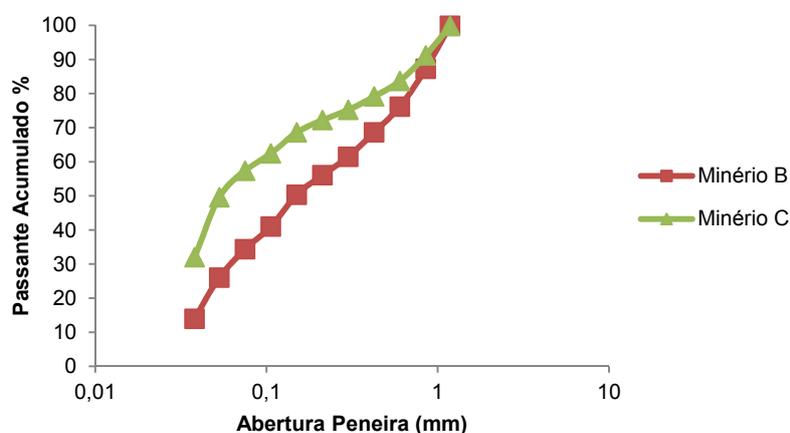


Figura 4. Distribuições granulométricas das amostras ensaiadas.

3.2 Análises Químicas

Análises granuloquímicas das amostras são apresentadas nas Figuras 5 e 6. Nos dois casos é evidente que as faixas compreendidas entre 0,150 e 0,038 mm apresentam os maiores teores de sílica e os menores teores de ferro. Esse efeito é mais evidente para o minério “C”. Os teores de ferro total das amostras foram 41,5 % para a amostra “B” e 45,9% para a amostra “C”.

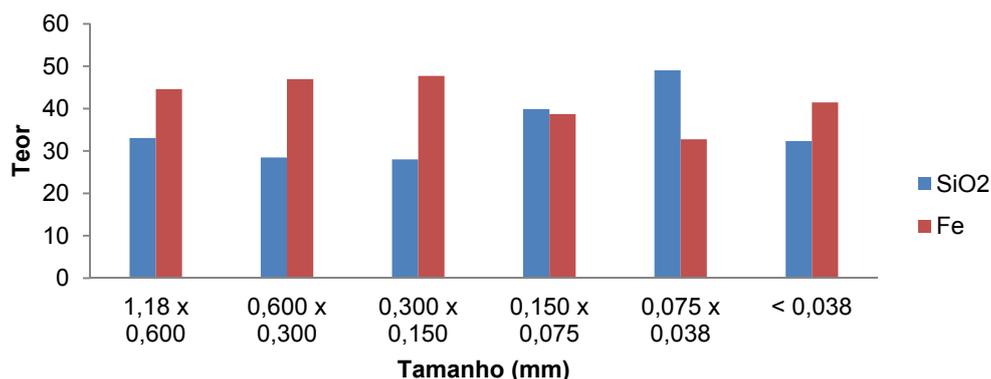


Figura 5. Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “B”.

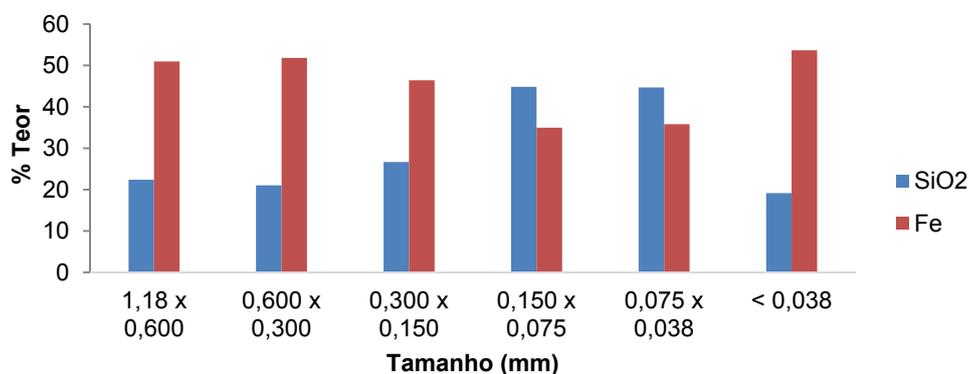


Figura 6. Teores dos principais constituintes por fração granulométrica para o minério “C”.

3.3 Identificação dos Minerais: Difractometria de Raios-X

A difratometria de raios-X (DRX) permitiu a identificação das espécies minerais presentes nas amostras estudadas. As principais fases minerais presentes foram hematita, magnetita e goethita, como esperado para esse tipo de minério. As Figuras 7 e 8 sintetizam os resultados das análises quantitativas, realizadas utilizando o método de *Rietveld*. Para o caso do minério “B” observa-se que a hematita apresenta uma maior concentração na fração 0,300 x 0,150mm, enquanto a goethita e a caulinita distribuíram-se em tamanhos de partículas tipicamente mais finos, de forma análoga ao quartzo. Neste caso, entretanto, as diferenças entre as diferentes classes não foram tão significativas. No caso do minério “C” observa-se que a hematita e a goethita encontram-se em maior quantidade nas frações mais grossas. Observou-se a presença de gibbsita nas frações mais grossas e uma pequena quantidade de talco na fração mais fina. O quartzo, assim como os demais contaminantes, também se concentrou nas frações mais finas.

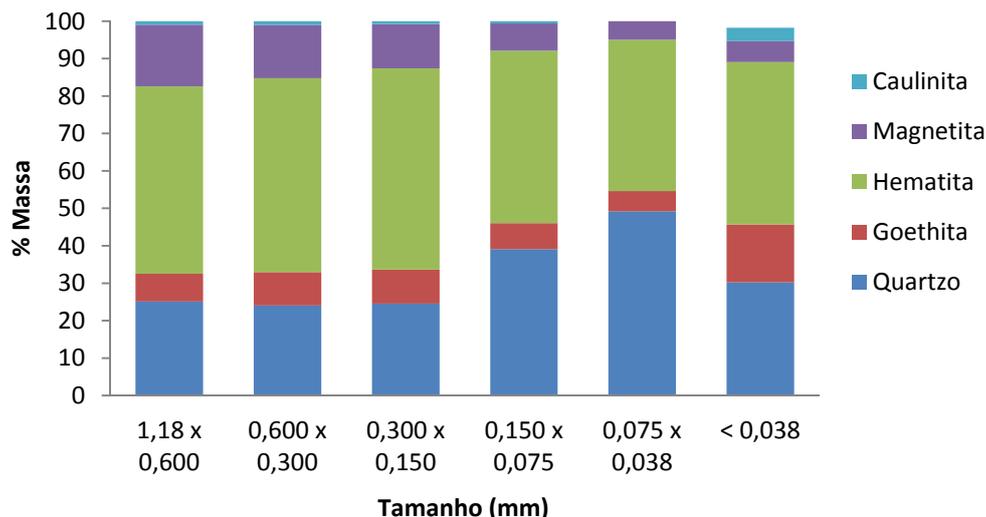


Figura 7. Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes às várias frações analisadas para o minério "B".

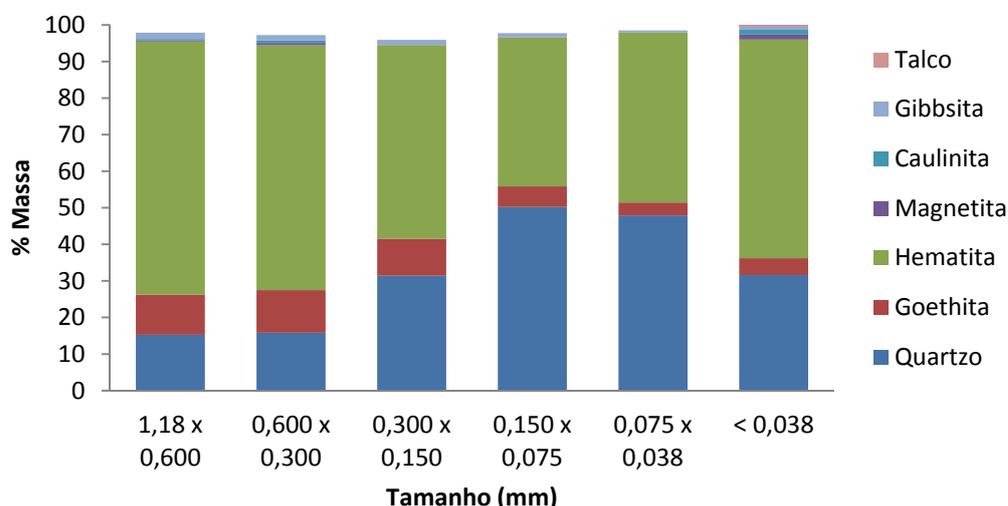


Figura 8. Análise quantitativa das fases presentes nas alíquotas referentes às várias frações analisadas para o minério "C".

3.4 Análises no Separador Isodinâmico Frantz

Os ensaios realizados no Separador Isodinâmico Frantz permitiram estabelecer os intervalos de intensidade de corrente preferencial de ocorrência das principais fases presentes nas amostras estudadas (Figura 9).

Minerais	Intensidade de corrente no Isodinâmico Frantz (A)						
	Inclinação longitudinal: 25°; Inclinação lateral: 15°						
	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	Ñ Mag.
Magnetita	[Thick line from 0,0 to 0,1]						
Hematita/Goethita	[Dashed line from 0,1 to 0,7]						
Quartzo	[Thick line from 0,7 to 1,0]						

Nota: As linhas mais grossas representam intervalos de ocorrência mais frequentes.

Figura 9. Comportamento das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas no separador isodinâmico Frantz (compilado de Partenoff et al.[4]).

Os resultados da separação utilizando o separador isodinâmico Frantz, juntamente com os teores dos principais constituintes permitiram avaliar a distribuição dos minerais em função dos intervalos de separação magnética associado às análises químicas. As curvas de separabilidade para cada amostra estudada podem ser visualizadas nas Figuras 10 e 11, nas quais são apresentadas as recuperações mássicas e do ferro contido cumulativas no produto magnético. Pode-se observar que à medida que a corrente é incrementada a percentagem de massa reportada para o concentrado cresce. De maneira análoga, pode-se observar que a percentagem de ferro que reporta ao concentrado aumenta de forma ainda mais significativa à medida que aumenta a intensidade de corrente. Isso é observado para todas as faixas analisadas, bem como para os dois materiais estudados. Conforme visto na Figura 9 a magnetita é passível de separação em correntes inferiores a 0,1A.

Comparando-se os resultados das Figuras 10 e 11 com os dados da mineralogia quantitativa (Figuras 7 e 8) torna-se evidente a coerência entre os dados. No caso do minério B na corrente de 0,1 A, praticamente toda a magnetita presente foi recuperada, tendo em vista a grande quantidade de magnetita na faixa mais grossa, e decrescendo nas faixas mais finas (Figura 7). Analogamente, o minério C, para a corrente de 0,1 A recuperou-se praticamente toda a magnetita, o que também é coerente com as análises mineralógicas. Analisando os resultados obtidos com as intensidades de correntes mais altas, observa-se que, para o minério B, à medida que a corrente incrementa possivelmente a hematita e a goethita presentes são recuperadas até um ponto no qual ocorre a saturação no qual todos os minerais ferrosos são recuperados.

Uma análise mais detalhada desses resultados pode ser encontrada em outra publicação [12].

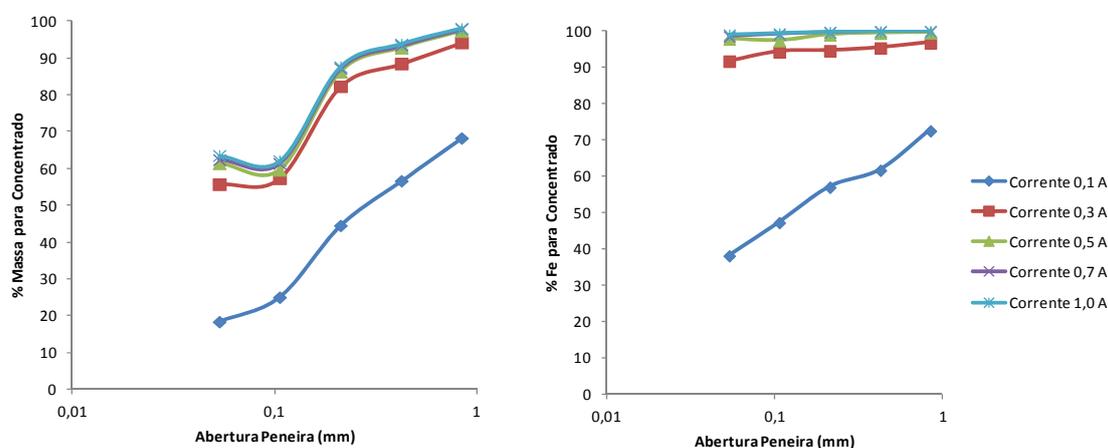


Figura 10.Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério "B".

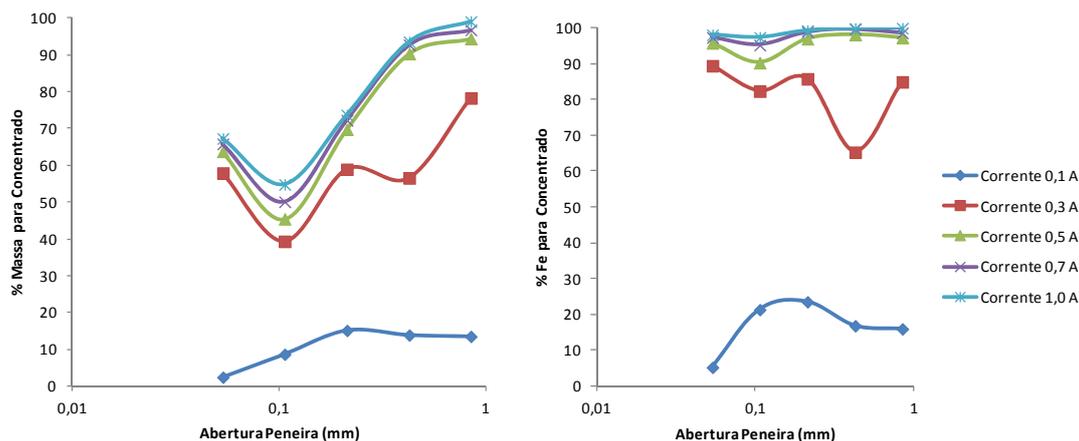


Figura 11. Relação entre os valores da separação Magnética no Frantz considerando a percentagem de massa e Fe reportados para o concentrado para o minério "C".

3.5 Ensaios de Separação Magnética

De acordo com a Figura 9, a magnetita presente nas amostras é passível de recuperação a baixas intensidades de campo magnético, ou seja, no primeiro estágio de concentração de baixa intensidade no WDRE (Figura 12). Os demais minerais ferrosos, ou seja, hematita e a goethita com suas diferentes texturas serão recuperados no segundo estágio de concentração magnética de alta intensidade utilizando o concentrador HGMS Rapid (Figura 13). É importante destacar que a recuperação de ferro na separação com o Rapid foi superior a, aproximadamente, 90% em todas as faixas analisadas para as duas amostras estudadas.

Ainda é possível observar que as análises de separabilidade magnética obtidas no separador isodinâmico Frantz poderiam ser aplicadas com sucesso na previsão da separação magnética nos dois estágios de separação.

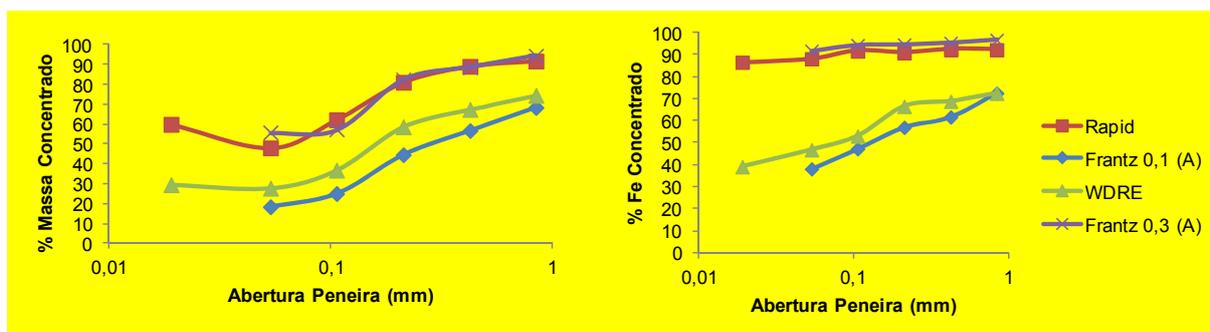


Figura 12. Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério "B".

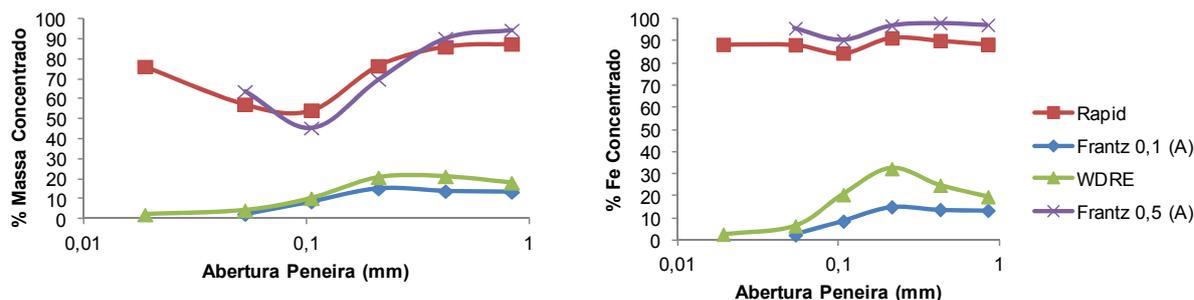


Figura 13. Comparação dos resultados de concentração de média e alta intensidade para o minério "C".

4 CONCLUSÃO

As amostras de minério de ferro itabiríticos em estudo apresentaram mineralogia simples, sendo compostas basicamente de quartzo, hematita, goethita e magnetita, identificados por difração de raios-X. Os resultados da separação magnética utilizando o Separador Magnético Isodinâmico Frantz, juntamente com a distribuição dos principais teores, permitiram avaliar a distribuição dos minerais em função dos intervalos de separação magnética associado às análises químicas. Observou-se ainda que ensaios com o Separador Frantz podem servir como base para a previsão de resultados de separação magnética de baixa e alta intensidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro, à VALE por ceder as amostras para o desenvolvimento da pesquisa, ao CETEM pelo uso de equipamentos do laboratório e ao projeto P9P da AMIRA pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Neumann, R., Schneider, C.L., Neto, A.A. Caracterização Mineralógica de Minérios Parte II. p.92-93. Tratamento de Minérios, 5 ed. Rio de Janeiro, 2010.
- 2 Rosière, C.A., ChemaleJR., F., Guimarães, M.L.V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I: Estruturas e Recristalização. Geonomos, v.1, n.1, p. 65-84, 1993.
- 3 Svoboda, J. Magnetic methods of material treatment: technology at crossroads. In: Proc. 4th Int. Conf. Mater. Eng. Res. ICMR2001, Akita, Japan, p.131.
- 4 Parfenoff, A., Pomerol, C., Tourenq, J. Les minéraux em grains: methods d'étude et détermination. Paris: Masson, 1970.
- 5 Hopstock, D.M. Magnetic properties of minerals. In: WEISS, N.L. SME Mineral Processing Handbook. New York: Society of Mining Engineers, 1985. p. 6-10
- 6 Hayes, P.C. Process selection in extractive metallurgy. Brisbane: Hayes Publishing Co., 1985.
- 7 Chen, C.W. Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials. New York Dover Publications, 1986.
- 8 King, R.P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. 1st Edition. Butterworth, 2001.
- 9 Dahlin, D.C., Rule, A.R. Magnetic susceptibility of minerals in high magnetic fields. Pittsburgh: U. S. Bureau of Mines, 1993. 13 p. (Report of Investigations n° 9449).

- 10 Augusto, P.A., Castelo, G. Magnetic Classification. Minerals Engineering, Oxford, v.15, n.1-2, p.35-43, 2002.
- 11 Hess H.H. (1959) "Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator" Pamphlet published by S. G Frantz Co., Inc., 87p.
- 12 Gonzaga, L.M. Separação magnética a úmido de minérios de ferro itabiríticos. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.