



CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

CASTRO, G.M.F.¹, VIEIRA, B.A.¹, LAVARINI, J.G.¹, SILVA, J.J.¹,
HENRIQUES, A.B.², VIANA, P.R.M.²

¹ Graduandos em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas.

RESUMO

Na indústria da mineração, assim como em todas as outras, é imprescindível que para efeito de obter melhores resultados, tenha-se sempre ao alcance o conhecimento mais profundo e melhor fundamentado sobre o material chave, a matéria-prima. Portanto, com o propósito de compreender melhor as características da alimentação da flotação de minério do quadrilátero ferrífero MG, foram realizados no material em questão análise granulométrica, determinação da densidade e do grau de liberação, difratometria e fluorescência de raios-X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanálise por energia dispersiva (EDS). Para a densidade do minério, obteve-se o valor de 3,6 g/cm³. O estudo óptico determinou que as partículas acima de 0,4mm apresentam grau de liberação de 70%, e as demais, 100%. A difração de raios X permitiu identificar os minerais que contêm ferro: goethita e hematita, bem como os minerais ganga: caulinita, gibbsita, mica e quartzo. Os elementos presentes nas amostras foram identificados utilizando-se a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) forneceu imagens de alta resolução da superfície do material, e a microanálise por energia dispersiva (EDS) possibilitou identificar a composição química da subsuperfície de partículas, permitindo a inferência das fases minerais hematita e quartzo.

PALAVRAS-CHAVE: minério de ferro, caracterização tecnológica.

ABSTRACT

In the mining industry, as in any other, it is most necessary that for the purpose of obtaining better results one should always have at hand the most profound and solid knowledge about the cornerstone material, the raw material. Therefore, as the goal of this work was to better understand the flotation feed of an iron ore from the "Quadrilátero Ferrífero, MG, the following tests were made: sieve analysis, density determination and degree of liberation, x-ray fluorescence and diffractometry and scanning electron microscopy (SEM) associated with EDS microanalysis. The density found was 3,6 g/cm³. Through optical analysis the particle above 0,4mm presented a liberation degree of 70% and the remaining particles showed a liberation degree of 100%. X-ray diffractometry allowed the identification of the iron minerals: goethite and hematite and the gangue minerals: kaolinite, gibbsite, mica and quartz. The chemical elements were determined through x-ray fluorescence spectrometry. Scanning electron microscopy (SEM) technique provided high resolution images of the material surface, and the dispersive energy microanalysis (EDS) made it possible to identify the chemical composition of particles subsurface, allowing the inference of the hematite and quartz mineral phases.

KEYWORDS: iron ore, technological characterization.

1. INTRODUÇÃO

Visando o aproveitamento dos recursos minerais de forma otimizada, a caracterização tecnológica se apresenta como uma etapa indispensável para o conhecimento de suas principais propriedades. Esse estudo é composto de vários estágios, os quais requerem amostras rigorosamente representativas do material sob análise e aplicação das técnicas de amostragem, que permitem avaliar a possibilidade de aplicações industriais, estabelecer uma sequência lógica de operações visando ao processamento industrial, dimensionar corretamente a rota de processo ou ainda tornar processos existentes mais eficazes através da identificação de perdas e ineficiências (BRANDÃO et al., 2006).

A caracterização mineralógica de um minério define propriedades físico-químicas potencialmente úteis na definição das rotas de processamento, como a identificação e quantificação de todas as espécies minerais de interesse e de ganga e o estudo da textura das rochas, definindo o tamanho de partícula necessário para se obter um grau de liberação satisfatório. A rota de estudo de uma amostra de minério varia muito com a própria mineralogia e as propriedades inerentes ao minério, bem como com os objetivos e a abrangência da caracterização, com as possíveis rotas de processamento, e com a disponibilidade de tempo, capacidade analítica e recursos financeiros (NEUMANN et al., 2010).

Além dos estágios descritos, para um completo estudo de caracterização, faz-se necessário o conhecimento da gênese do ambiente geológico do minério, no caso deste trabalho o minério de ferro usado pertence a uma Formação Ferrífera Bandada comum do quadrilátero ferrífero. Em 2017, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira comercializada. Dentre essas substâncias, onze destacaram-se por corresponderem a 99,6% do valor da produção comercializada da classe, quais sejam: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção comercializada dessas onze substâncias totalizou 88,5 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro, representando 71,1% do valor total da produção nesse montante, cuja produção é concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais e Pará, os quais respondem por 90% do valor da produção.

Neste trabalho, com o propósito de caracterizar física, química e mineralogicamente uma amostra de alimentação de flotação de minério de ferro, determinou-se a densidade, o grau de liberação por meio do microscópio óptico, identificaram-se minerais de interesse e de ganga e seus elementos químicos por meio da difração de raios X e fluorescência de raios-X, respectivamente, e, por fim, observou-se a morfologia e inferiu-se algumas fases minerais com base na composição química da subsuperfície analisada através da microscopia eletrônica de varredura com microanálise por energia dispersiva.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi estudada uma amostra de alimentação de flotação de minério de ferro proveniente do quadrilátero ferrífero, MG e o desenvolvimento do mesmo foi subdividido em etapas com o intuito de distribuir as tarefas ao longo do tempo, e assim tornar mais fluídas sua realização e a conseqüente análise dos resultados de cada etapa.

2.1 Peneiramento combinado e grau de liberação

Uma massa representativa da amostra inicial foi submetida ao método de peneiramento combinado, e as faixas granulométricas separadas foram analisadas com lupa para determinar o grau de liberação dos minerais.

2.2 Separação magnética

Amostras de faixas granulométricas pré-determinadas e da amostra inicial foram submetidas ao método de separação magnética em um equipamento do tipo WHIMS, malha com abertura de 1,0 cm, 60% de fração de sólidos na polpa, campo magnético de 3000 Gauss e 10L litros de água de lavagem.

2.3 Determinação da densidade

A densidade do material inicial foi determinada em triplicata por meio do método da picnometria.

2.4 Caracterização

Amostras de faixas granulométricas pré-determinadas e da amostra inicial foram submetidas a análises por difratometria de raios-x, identificação de elementos por espectrometria de fluorescência de raios-x e análise em microscópio eletrônico de varredura. Neste foram utilizadas técnicas de elétrons secundários, retroespalhados e análise pontual por microsonda eletrônica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa foi definida pela análise granulométrica do material, por meio do peneiramento combinado. Em laboratório, com o auxílio de uma balança analítica, foi determinada a massa de nossa amostra cabeça e usando o tradicional método de determinação de capacidade de peneiras de Gaudin. Separamos 150 g desta amostra por meio do uso de um quarteador para submeter à peneira de 38 μ m. Ao usar repetidamente o quarteador também obtivemos uma amostra homogênea e representativa da massa inicial.

O material passante na peneira de 38 μ m, aqui referido como -38 μ m, foi posto para decantar com o auxílio de CH₃COOH para acelerar o processo. Todo o material retido nesta peneira foi coletado, secado e submetido ao peneiramento a seco. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1.

Em posse do resultado apresentado na Tab. 1, foi definida e iniciada a segunda etapa, a análise do grau de liberação. Dentre os métodos existentes para a determinação do grau de liberação optou-se pelo método óptico, devido à sua simplicidade, precisão e pelo fato do mineral de interesse apresentar cor distinta dos outros que compõem o minério em estudo.

Amostras representativas de todas as faixas granulométricas apresentadas na Tab. 1 foram examinadas com auxílio de lupa.

Tabela 1: Resultados do peneiramento combinado

Abertura (μm)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Material Retido Acomulado (%)	Material Passante Acomulado (%)
425	0,0241	0,017	0,017	99,983
300	0,0507	0,036	0,053	99,947
212	1,7858	1,267	1,321	98,679
150	8,3384	5,918	7,239	92,761
106	30,4344	21,601	28,839	71,161
75	20,897	14,831	43,671	56,329
53	29,2262	20,743	64,414	35,586
45	26,9174	19,104	83,518	16,482
38	21,138	15,003	98,521	1,479
-38	2,0842	1,479	100,000	0,000
Total	140,8962	100	100	0

O método consiste em dividir cada partícula mista da amostra em quatro quadrantes, e a estes atribuir números de 0 a 5 com base no grau de contaminação do mineral de interesse. Quanto maior o número total de cada partícula, menor o grau de liberação. Realizado esse procedimento verificou-se que as partículas $+425\mu\text{m}$ apresentam grau de liberação de 70%, e todas as outras de 100%.

A etapa conseguinte avaliou o comportamento do minério em um procedimento de separação magnética. Para tanto, da amostra cabeça, obteve-se quatro amostras representativas e homogêneas de massas próximas a 100g que foram submetidas separadamente a campos magnéticos de intensidades diferentes. Essa massa é tal que, feita uma polpa com 60% de sólidos, não causasse o entupimento da malha de 1,0cm do separador.

A penúltima etapa realizada refere-se à investigação da densidade do minério por meio do método da picnometria. Aqui, para obtenção de resultados dentro de um intervalo de confiança, realizou-se o método em triplicata. Os resultados da picnometria estão na Tabela 2, onde usou-se uma balança analítica para determinação das massas.

Tabela 2: Resultados da picnometria

Nº	M _b (g)	M _{b + Min} (g)	M _{b + Min + Ag} (g)	M _{b + Ag} (g)	d (g/cm ³)
1	62,386	90,415	182,025	161,751	3,614
2	63,635	94,621	185,602	163,213	3,604
3	61,736	88,891	181,106	161,512	3,591

A média dos resultados da picnometria é 3,603 g/cm³. Ao comparar este resultado com os valores de densidade dos minerais constituintes do minério, hematita que apresenta peso específico 5,26 g/cm³ e quartzo, de densidade 2,65 g/cm³, observa-se que o valor encontrado é plausível, por estar no intervalo de densidade entre a dos dois minerais constituintes, e porque à primeira vista o minério tem uma porcentagem maior de quartzo do que hematita pelo valor de sua densidade estar mais próxima daquele do que deste.

A última etapa realizada foi a difração e fluorescência de raios-x e análise em MEV de amostras específicas do minério. As amostras submetidas a esses testes são massas homogêneas e representativas do material da cabeça, das faixas granulométricas +45µm e +106µm, e do material passante e retido no campo magnético gerado pela corrente de 3,5A, e seus respectivos difratogramas são apresentados nas fig. 1 e 2 abaixo. Estas foram as amostras selecionadas pois geram informações do material como um todo; no caso da primeira amostra, a cabeça, por ser o material com faixa granulométrica mais adequada para o método de flotação empregado, e as duas últimas amostras por terem sido o material com melhor relação entre a taxa de recuperação e a quantidade de quartzo na parcela retida.

Os minerais identificados em cada fase foram apresentados na tabela 3 abaixo. As fichas utilizadas são do banco de dados PDF-2 do ICDD. Observou-se que os minerais desse minério que contém ferro são a goethita (nº 81-0464) e hematita (nº 89-0599), identificados na amostra magnética. Nota-se também a presença dos minerais de ganga, como caulinita (nº 80-0886), gibbsita (nº 76-1782) e quartzo (nº 88-2302), que foram visíveis e passíveis de identificação na amostra não magnética.

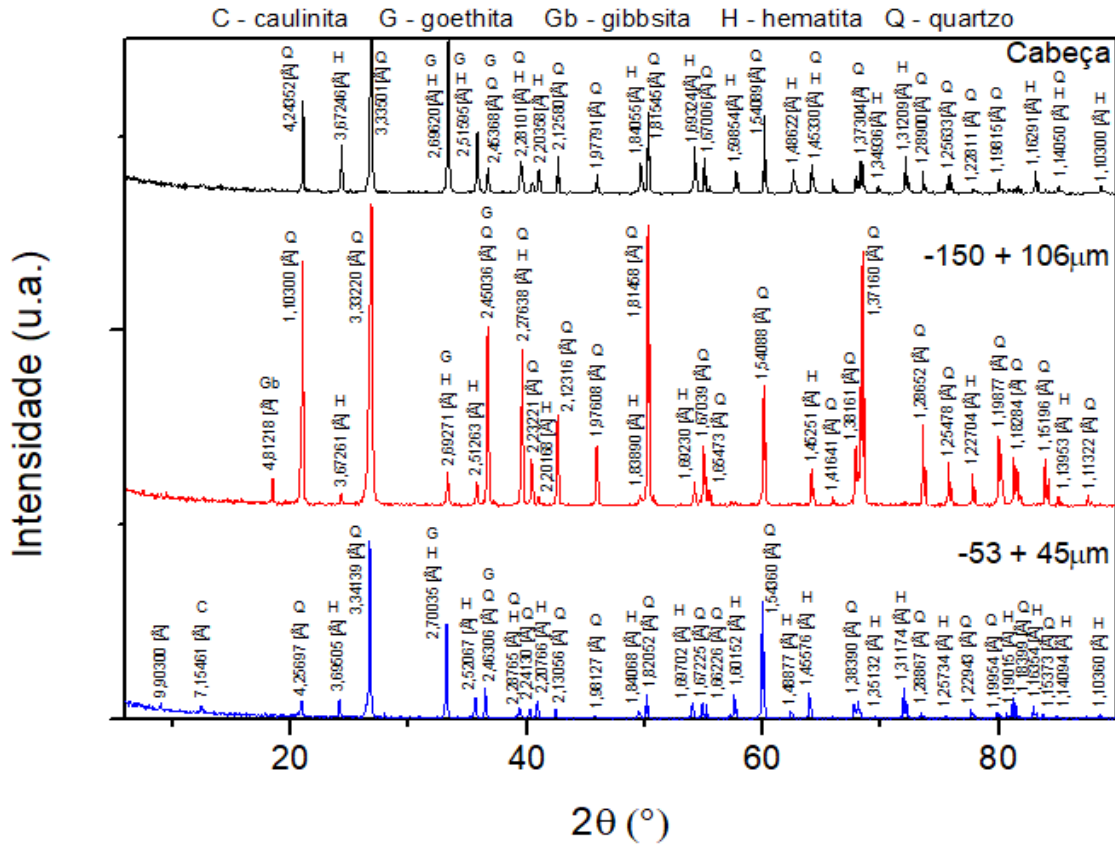


Figura 1: Difratogramas das amostras cabeça, -150+106 e -53+45µm.

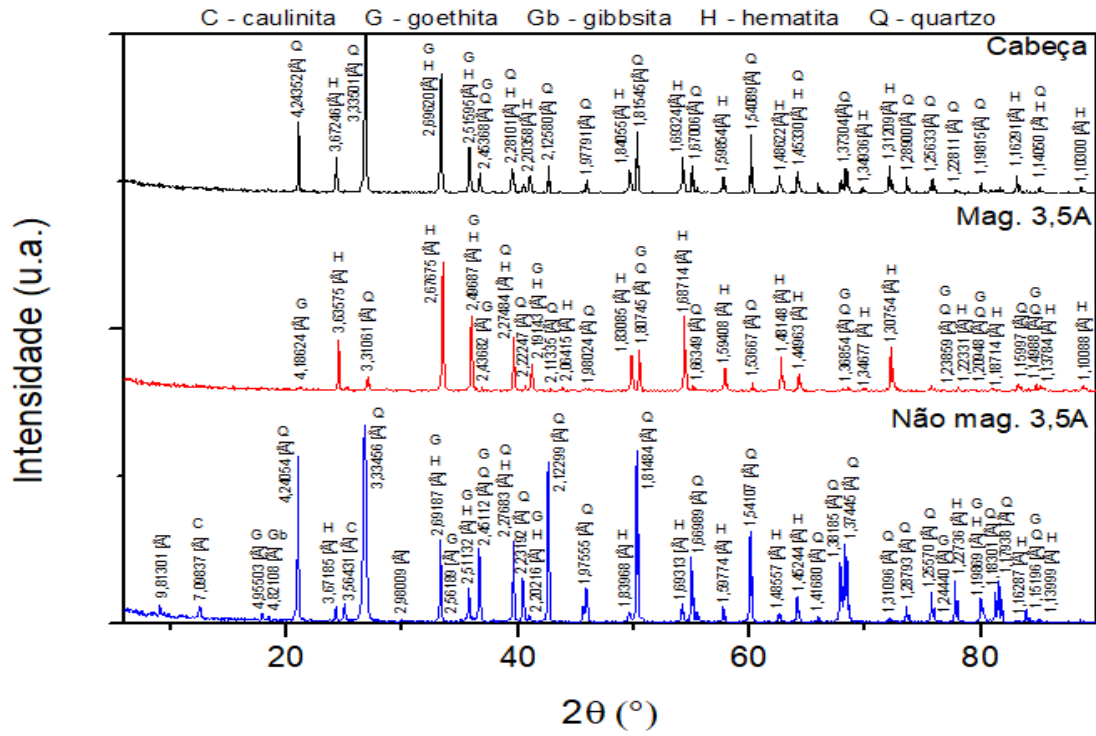


Figura 2: Difratogramas das amostras cabeça, magnético 3,5A e não magnético 3,5A.

A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados obtidos pelo método da fluorescência de raios-x para todas as amostras. Nota-se que apesar da presença majoritária de elementos como ferro, oxigênio e silício temos também porções mínimas de outros elementos, como o alumínio.

Tabela 3: Elementos detectados por fluorescência de raios-x e seus graus de presença

Ocorrência / Amostra	Majoritário	Médio	Baixo	Traço
Cabeça	O, Fe, Si	-	Al	Mg
Magnético 3,5A	O, Fe	-	Si, Al	-
Não magnético 3,5A	O, Si	Fe	Al	-
+45 μ m	O, Fe, Si	-	-	Mg, Al
+106 μ m	O, Fe, Si	-	-	Cr

A presença irrisória de alguns elementos, citados na Tab. 3 como de ocorrência baixa ou traço, indicam que o minério de ferro aqui estudado contém pequenas porcentagens de outros minerais além da hematita e do quartzo, corroborando os dados apresentados na Fig. 3.

As imagens obtidas pela microscopia eletrônica (fig. 4 (a) e (b) abaixo) confirmaram os resultados observados após a análise na lupa das várias faixas granulométricas obtidas no peneiramento combinado do minério. Com o auxílio do microscópio óptico, observou-se uma quantidade maior de hematita nas frações de menor granulometria, enquanto as faixas de maior granulometria apresentavam uma quantidade de quartzo mais elevada. Ao submeter a amostra da cabeça para análise no MEV, pode-se observar nas duas imagens, em geral, duas faixas de tamanhos de grãos. Com a análise por microsonda eletrônica (EDS), feita em um grão maior contornado em vermelho e em um grão menor contornado em azul, conforme a fig. 4 (b), detectou-se a presença exclusiva de silício no primeiro e ferro no segundo, indicando que as maiores partículas eram de quartzo e as menores constituíam-se de óxido de ferro.

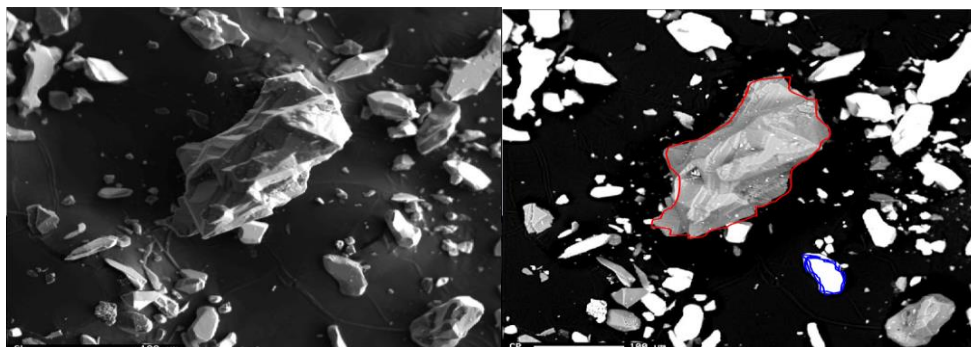


Fig. 4: (a) Imagem de elétrons secundários; (b) Imagem de elétrons retroespalhados.

4. CONCLUSÕES

Por meio da técnica de picnometria foi obtido o valor de densidade de $3,6 \text{ g/cm}^3$, o qual se encontra dentro da faixa de densidade regida pelos maiores constituintes do minério de ferro: hematita e quartzo. A partir do estudo óptico, observou-se que as partículas $+425\mu\text{m}$ apresentam grau de liberação de 70%, enquanto as partículas de tamanho menor que $475\mu\text{m}$ apresentaram grau de liberação de 100%. A difração de raios X permitiu identificar os minerais que contém ferro: goethita e hematita, bem como os minerais ganga: caulinita, gibbsita, mica e quartzo. Estes, minerais de canga, em sua maioria silicatos, foram detectados na amostra não magnética, enquanto aqueles minerais contendo ferro foram detectados na amostra magnética. A fluorescência de raios X indicou os elementos ferro, silício e oxigênio como majoritários e como de baixa ocorrência o alumínio, o que corrobora com os resultados de difração que indicaram a presença de minerais constituídos de óxidos de ferro e alguns silicatos. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microanálise por energia dispersiva (EDS) forneceu imagens e dados morfológicos semi-quantitativos, os quais proporcionaram a identificação dos minerais hematita e quartzo.

5. REFERÊNCIAS

- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO [http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf]. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas 2018; Brasília: 2019.
- BRANDÃO, P. R. G.; CANÇADO, R. Z. L.; SANTOS, L. D.; VASCONCELOS, O. R. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. In: VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAUJO, Armando Corrêa (org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 27-60.
- COUTO J.V. 1801. Memória sobre a Capitania de Minas Gerais: seu território, clima e produções metálicas. Belo Horizonte, Fundação João Pinheiro, 1994.
- NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.: ALCOVER NETO, A. Caracterização Tecnológica de Minérios. In: Tratamento de minérios, 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.3. p.85-137.
- ROLIM V.K. As formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro – MG: Posicionamento estratigráfico, evolução tectônica, geocronologia, características geoquímicas e gênese do minério. [Tese de doutorado]. Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte; 2016. Vieira M. G. Produção de um Pellet Feed a partir da Concentração do Rejeito da Flotação Mecânica da Samarco. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2008.