

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE MINÉRIOS DE FERRO ITABIRÍTICOS PRINCIPALMENTE POR MINERAL LIBERATION ANALYZER (MLA)

Ana Cláudia Carioca ¹
Paulo Roberto Gomes Brandão ²

Resumo

Devido à complexidade dos minérios itabiríticos, sua caracterização é necessária, com ênfase em microestrutura. Muito usado é o microscópio eletrônico de varredura (MEV), com microanalisador químico por dispersão de energia (EDS). Um sistema analítico computadorizado é o MLA (Mineral Liberation Analyzer), que usa análise de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) e espectros de raios-X (EDS) na identificação dos minerais, em secções polidas de partículas de minérios. Assim, geram-se mapas de composição microestrutural, com informações importantíssimas como liberação, associações minerais e análises modais. Há grande significado estatístico, pois vários milhares de partículas podem ser analisados. Estudaram-se 4 amostras de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG, com graus diferentes de complexidade microestrutural. As faixas granulométricas (-0,500+0,300 mm e -0,300+0,212 mm) foram estudadas por difração de raios X, espectrometria Mössbauer e MLA. Pelos métodos instrumentais, os minerais abundantes foram quartzo e hematita, obviamente; também foram identificados goethita, gibbsita e magnetita, minoritários. Em geral, os dados do MLA corroboram com os encontrados nas demais técnicas, sendo consistentes com os mesmos. Algumas pequenas inconsistências entre a análise química global e os dados quantitativos microestruturais se devem à amostragem analítica localizada e ao grau de homogeneização diferentes. O quartzo se encontra liberado acima de 90% em 3 amostras; a exceção é a amostra APV4 com liberação de 60%, onde o quartzo está associado a hematita (principalmente) e goethita.

Palavras-chave: Caracterização mineralógica; Minério de ferro; MLA; Liberação.

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF ITABIRITIC IRON ORES MAINLY BY MINERAL LIBERATION ANALYSER (MLA)

Abstract

Due to the complexity of itabirite ores, their characterization is required, with emphasis on microstructure. Widely used is the scanning electron microscope (SEM) with the chemical energy-dispersive microanalyzer (EDS). An efficient computerized analytical system is MLA (Mineral Liberation Analyzer) which uses backscattered electrons images (BSE) and X-ray spectra (EDS) to identify the minerals in polished sections of ore particles. Thus, microstructural composition maps are generated, with very important information such as liberation, mineral associations and modal analysis. There is excellent statistical significance because several thousand particles are analyzed. Four samples of iron ores from the Iron Quadrangle, Minas Gerais, with different degrees of microstructural complexity have been studied. The particle sizes (-0.500 +0.300 mm and -0.300 +0.212 mm) were analyzed by X-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy and MLA. By the instrumental methods, abundant minerals were quartz and hematite, obviously; also identified were goethite, and minor gibbsite and magnetite. In general, these data were consistent with MLA's. Some minor inconsistencies between the global chemical analyses and the quantitative microstructure data are due to the different localized analytical sampling and the degree of homogenization. Quartz liberation was above 90% in three samples; the exception was the APV4 sample with only 60% quartz liberation, where quartz is associated with hematite (mainly) and goethite.

Keywords: Mineralogical characterization; Iron ore; MLA; Liberation.

¹Faculdade Adjetivo CETEP, Mariana, MG, Brasil. E-mail: aclaudiacarioca@yahoo.com.br

²Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.



I INTRODUÇÃO

O minério de ferro é uma commodity muito importante para a economia mundial. Então, a sua caracterização tornou-se uma área de pesquisa que incorporou muitos avanços para definir e otimizar uma melhor rota de processamento e, por fim, obter um concentrado com teores de impurezas cada vez menores.

A grande variedade de microestruturas e de tramas encontradas nos minérios de ferro tipo itabirito do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais gera uma ampla diversidade de propriedades físicas com grandes implicações para o seu beneficiamento [1].

Um melhor aproveitamento de recursos minerais tem como etapa primordial a caracterização mineralógica, onde utilizam-se vários métodos integrados e específicos. A finalidade é ter uma identificação e quantificação dos minerais de interesse e de ganga, análise química elementar da assembleia mineralógica, estudo microestrutural da rocha, definir os tamanhos dos grãos, liberação dos minerais de interesse, bem como definir diversas propriedades físicas e químicas destes minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento [2-4].

A microscopia digital vem ganhando espaço na microscopia óptica e na microscopia eletrônica de varredura (MEV), por se tratar de técnicas que utilizam instrumentos controlados por software e que permitem realizar varreduras completas nas amostras. Um exemplo de sistema de aquisição e análise de imagens é o MLA (Mineral Liberation Analyzer). Esse sistema de caracterização microestrutural utiliza o MEV com EDS (espectrometria de raios X por dispersão de energia) e fornece informações importantes e específicas, como composição química, identificação e quantificação dos minerais, grau de liberação, associações mineralógicas, tamanho de partículas e de grão, em uma análise relativamente rápida e eficaz [5,6]. A identificação das fases é feita inicialmente pelas imagens de elétrons retroespalhados (BSE), onde, o tom de cinza de uma fase mineral é proporcional ao seu número atômico médio e depois pela microanálise EDS. A aquisição das imagens BSE deve ser cuidadosa, pois algumas partículas podem estar em contato com outras, o que pode levar à obtenção de resultados tendenciosos para a liberação. Então, são realizadas correções, como a desaglomeração de partículas (separação). A parte mais importante é a segmentação (identificação de todas as fases minerais distintas (ou grãos)) pelos diferentes tons de cinzas e composições químicas pelo EDS [7,8].

Uma grande vantagem do MLA é o significado estatístico, pois milhares de partículas podem ser analisadas. Assim, numa sessão de análise, até 14 seções polidas podem ser medidas. A demora da análise, nestas condições, pode ser de várias horas. A principal dificuldade do MLA é distinguir fases minerais que possuam número atômico médios e composições químicas semelhantes, como, por exemplo, hematita e magnetita.

O objetivo do trabalho foi analisar, consolidar e comparar resultados obtidos em várias técnicas de caracterização: difração de raios X, espectroscopia Mössbauer, análise química (ICP e via úmida) e MLA, dando mais ênfase a este último, para 4 amostras de minério de ferro com complexidade microestrutural crescente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Estudaram-se 4 amostras de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG, com graus diferentes de complexidade microestrutural. As faixas granulométricas escolhidas foram -0,500+0,300 mm e -0,300+0,212 mm, por serem estas as malhas de liberação prováveis para as amostras pesquisadas.

2.1 Análises Químicas

Foi usada análise via úmida (dicromatometria) para a determinação do Fe total e espectrômetro de emissão atômica a plasma (ICP) modelo Cirrus CCD da Spectro Instruments, para a determinação de Al_2O_3 , MnO_2 , P. A SiO_2 foi calculada por diferença. A perda por calcinação (PPC) foi efetuada por gravimetria. As análises foram realizadas pelas empresas Samarco e Vale.

2.2 Difração de Raios X – DRX

Os difratogramas foram coletados em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, equipado com tubo de Fe, com comprimento de onda (λ) 0,1937nm, e monocromador de grafita. As varreduras foram feitas entre 7-70° (2-theta) com velocidade do goniômetro de 2° por minuto. Foi utilizado o software JADE para a identificação das fases nas amostras. A análise foi realizada no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

2.3 Espectroscopia Mössbauer – EMO

Os espectros foram coletados à temperatura ambiente (RT) com um espectrômetro operando no modo de aceleração constante e a acumulação dos dados foi feita com um analisador multicanal com 1024 canais e intervalo de velocidade -11 a +11 mm/s. Os absorvedores foram preparados misturando-se cerca de 30 a 40 mg da amostra com glicose, a fim de se obter cerca de 10 a 20 mg de Fe por centímetro quadrado. Os ajustes foram realizados computacionalmente com sextetos e/ou dubletos simétricos ou com um modelo independente de distribuição do campo hiperfino. Os desvios isoméricos foram dados em referência ao ferro metálico (α -Fe) [9]. A partir dos sextetos e dubletos obtidos foram determinadas as áreas relativas de cada componente mineral contendo ferro em sua estrutura.

Esta análise foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Mössbauer do Departamento de Química da UFOP.

2.4 Mineral Liberation Analyzer – MLA

Foram preparadas secções polidas (pastilhas) das amostras das faixas granulométricas retidas em 0,300 mm e 0,212 mm. As amostras foram impregnadas em resina epóxi e curadas; em seguida, foi realizado o polimento e, posteriormente, o recobrimento por película de carbono.

As aquisições dos dados foram feitas no equipamento MLA 650F System, MEV-FEG FEI Quanta 650F, espectrômetros Bruker Quantax com software Esprit, do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Todas as análises realizadas pelo MLA foram feitas em condições comparativas para os modos de aquisição de dados XBSE e GXMAP, que se distinguem pelos critérios de medição e o tempo de análise. O XBSE tem seu fundamento na obtenção de um único espectro de raios X (EDS) para cada região de tom de cinza distinto (ou grão/fase) das imagens BSE da amostra. Já para o GXMAP, é feito um mapeamento por espectros de raios X para cada grão que se enquadra dentro de uma faixa de tons de cinza pré-definida pelo operador do sistema. O intervalo ou passo entre as coletas de espectros no grão é dado pelo número de pixels pré-estabelecido, seguindo uma malha definida. Evidentemente, para a mesma amostra, a análise por GXMAP é mais demorada, mas a confiabilidade na fase detalhada pode ser melhor do que no modo XBSE, se

ocorrem minerais com níveis de cinza similares, desde que suficientemente distintos quimicamente.

O sistema MLA calcula a liberação de duas maneiras: a) a liberação por composição, onde se leva em conta a composição mineralógica mássica da partícula e não se o mineral de interesse está livre na borda da partícula; b) a liberação por superfície livre, que só leva em conta as áreas de cada grão mineral expostas na superfície da partícula.

A análise modal é o resultado da determinação da porcentagem da área (% area) ocupada por um determinado mineral nas secções polidas analisadas, que é equivalente à porcentagem em volume. A partir daí, pode-se calcular a porcentagem em massa (%M) de cada um dos minerais componentes da amostra. Na abordagem pelo MLA, esta composição de fases pode ser determinada tanto por XBSE como GXMAP.

Os parâmetros estabelecidos para este trabalho estão relatados na Tabela 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química quantitativa (ICP e via úmida) (Tabela 2) das amostras não apresentou resultados discrepantes em relação aos componentes mais importantes e rotineiros (Fe_T , SiO_2 , Al_2O_3 , P, MnO_2 e PPC) analisados, em se tratando de minério de ferro.

A amostra APV3 destaca-se por ter um teor de Al_2O_3 em torno de 3%; este teor elevado é indicativo da presença de minerais contendo alumínio, como gibbsita

Tabela 1. Parâmetros de aquisição para análise no MLA

| Parâmetros MEV | | Parâmetros MLA | |
|----------------------------|--------|--|-----------|
| Voltagem (KV) | 25 | Velocidade de varredura ($\mu s/px$) | 16 |
| Distância de Trabalho (mm) | 12 | Resolução (px) | 500 x 500 |
| Corrente do feixe (nA) | 20 | Tamanho do pixel ($\mu m/px$) | 0,9947 |
| Diâmetro do feixe | 5,5 | Tempo de aquisição (ms) | 33 |
| Brilho | 79,6* | GXMAP (Goethita) | 101-150** |
| Contraste | 24,7* | Tamanho mínimo da partícula (px) | 100 |
| Resina | 0-20** | Intervalo de raios-X GXMAP (px) | 6 |

*Padrão de cobre; **Faixa de tom de cinza.

Tabela 2. Análises químicas quantitativas das amostras (% em massa)

| ANÁLISES QUÍMICAS | | | | | | | |
|-------------------|--------------|--------|---------|-----------|-------|---------|------|
| Nº | Amostra | Fe_T | SiO_2 | Al_2O_3 | P | MnO_2 | PPC |
| 1 | APV1 +0,300 | 42,71 | 36,84 | 0,30 | 0,036 | 0,06 | 1,66 |
| 2 | APV1 +0,212 | 29,88 | 55,81 | 0,21 | 0,024 | 0,04 | 1,17 |
| 3 | APV2 +0,300 | 42,52 | 35,11 | 0,47 | 0,065 | 0,07 | 3,41 |
| 4 | APV2 +0,212 | 35,05 | 47,39 | 0,15 | 0,021 | 0,03 | 2,27 |
| 5 | APV3 +0,300 | 59,41 | 6,83 | 3,28 | 0,082 | 0,105 | 4,47 |
| 6 | APV3 +0,212 | 36,48 | 41,91 | 1,99 | 0,051 | 0,061 | 2,84 |
| 7 | APV4 +0,300 | 40,92 | 39,27 | 0,68 | 0,028 | 0,032 | 0,65 |
| 8 | APV4 +0,212* | 30,15 | 53,45 | 0,65 | 0,025 | 0,034 | ---- |

*Massa insuficiente para a determinação da PPC.

(Al(OH)₃). A mesma amostra também apresentou o maior valor de P, alcançando 0,082%. Valores elevados de P são uma característica de minérios goethíticos. Outro aspecto relevante de itabiritos goethíticos é o valor elevado de PPC, o que foi observado nas amostras APS2 (2,3 e 3,4%) e APV3 (2,8 e 4,5%).

3.1 Difração de Raios X – DRX

Em todas as amostras estudadas por DRX, o quartzo é abundante, seguido de hematita. Foi também identificada nas amostras APS1, APS2 e APV3, goethita, na proporção de média-baixa, o que está coerente com a análise química, pois foram observados valores elevados para a PPC. Na amostra APV3, foi comprovada a existência de gibbsita entre os minerais principais, confirmando os resultados da análise química da amostra. Traços de magnetita foram encontrados nesta amostra.

Os difratogramas da amostra APV3 estão mostrados na Figura 1.

3.2 Espectroscopia Mössbauer – EMO

Em todas as amostras, nas faixas granulométricas estudadas, a ocorrência dominante é da hematita, seguida da goethita (sexteto e/ou dubletos) em quase todas as amostras, e magnetita como mineral minoritário somente na amostra APV3.

Como mostrado na Figura 2, é possível distinguir a coexistência de goethita (sexteto e dubleto) e magnetita (sextetos), além da hematita. Nos espectros pode-se notar

que o sexteto da hematita mostra-se bem simétrico, com valores bem definidos para o seu campo magnético, o que ressalta a existência de hematita bem cristalizada. Os espectros da amostra APV3 tanto para a goethita e a magnetita foram ajustados através de distribuição de campo hiperfino.

Pela análise espectral Mössbauer, e sabendo-se a análise química para a % de ferro, pode-se calcular as quantidades relativas de todos os minerais portadores de ferro na amostra. Devido à especificidade da análise de Mössbauer para o elemento Fe, pode-se identificar a magnetita, que mesmo com um teor de 4,5%, não pôde ser identificada na difratometria de raios-X devido às limitações instrumentais, por exemplo, background elevado. Na Tabela 3, estão apresentados os valores obtidos para tal quantificação dos minerais, hematita, goethita e magnetita para a amostra APV3; também mostram-se os minerais não portadores de ferro, cujas quantidades foram calculadas pela composição química.

3.3 MLA – MEV/EDS

A imagem não processada da amostra APV3 +0,212 mm está mostrada na Figura 3, em escala de cinza, onde as partículas claras são predominantemente hematita e as escuras quartzo, na maioria.

Na Figura 4 apresenta-se uma partícula mista selecionada, com a imagem BSE, mostrando os minerais detectados e mapeados. Na área da resina de impregnação, pode-se notar pintas brancas, devido ao acúmulo de carga incidida sobre a mesma; dependendo da magnificação utilizada, a resina carrega um pouco, o que não prejudica o resultado.

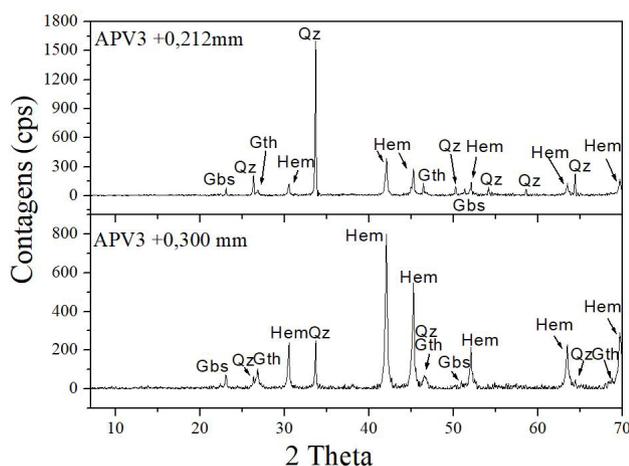


Figura 1. Difratogramas da amostra APV3. Hematita: Hem; Goethita: Gth; Quartzo: Qz; Gibbsita: Gbs [10].

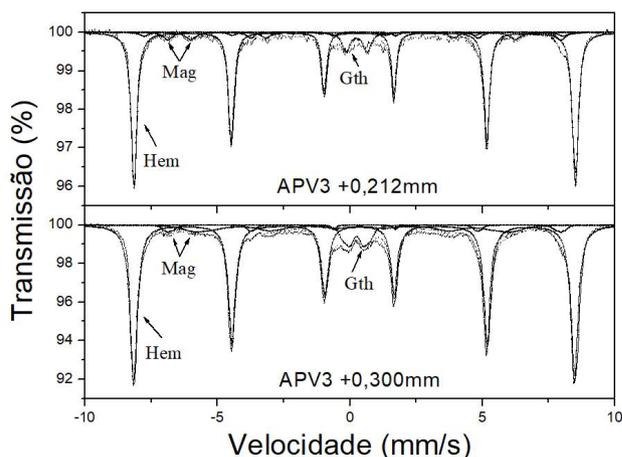


Figura 2. Espectro Mössbauer para a amostra APV3: hematita (Hem); magnetita (Mag); goethita (Gth).

Tabela 3. Composição quantitativa das amostras APV3 (% em massa)

| Fração | Hematita (%) | Magnetita (%) | Goethita (%) | Quartzo (%) | Gibbsita (%) |
|----------|--------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| +0,300mm | 65,7 | 3,4 | 17,5 | 8,4 | 5,0 |
| +0,212mm | 40,5 | 4,5 | 7,8 | 44,2 | 3,0 |

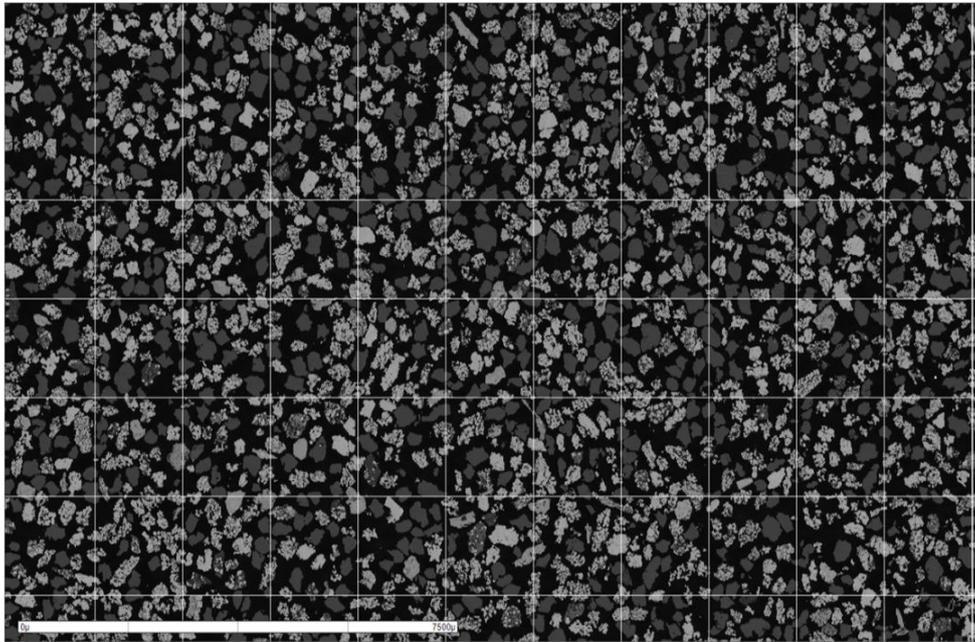


Figura 3. Imagem para a amostra APV3+0,212 mm.

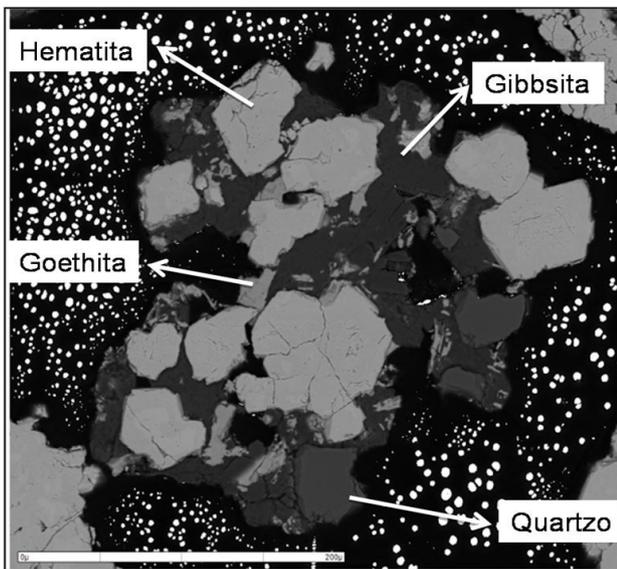


Figura 4. Imagem BSE para uma partícula da amostra APV3+0,212 mm.

3.3.1 Liberação por composição versus liberação por superfície

O estudo da liberação foi realizado nos contextos de liberação por composição (LC) e liberação por superfície (LS) A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para a análise de liberação em relação ao quartzo.

Esperava-se que a liberação medida pela distribuição de composição de partículas seja igual à medida pela distribuição de perímetro, o que foi o caso. Apenas quando a fratura não

é randômica os números apresentariam valores distintos, o que não ocorreu com estes minérios.

No estudo de liberação, o sistema MLA leva em conta o número de partículas analisadas; no caso, esse critério depende do número de quadros (frames) analisados. Notou-se durante o processo de análise que estes números são diferentes para XBSE e GXMAP. Assim, mesmo tendo sido seguido o procedimento geral, o número de partículas analisadas foi superior a 4000 para GXMAP e maior que 5000 partículas para o XBSE. O número de partículas por XBSE é superior ao analisado por GXMAP, devido ao fato do modo GXMAP analisar por EDS mais detalhadamente (mapeamento) uma fase específica, no caso a goethita; isto demandou tempo mais longo na aquisição, assim analisando um número menor de partículas.

Usou-se o modo GXMAP para a goethita porque este mineral é o que apresentou maior heterogeneidade em termos de microanálise em estudos preliminares. Para compensar a variação de composição da goethita em trabalhos futuros, pode-se arquivar diversos padrões para o mineral, antes (na mineral list) ou depois da aquisição, agrupando-os como goethita. O modo GXMAP, além de muito mais lento, também reduz fortemente a resolução espacial da análise de liberação, já que o pixel size na imagem de elétrons retroespalhados é de $1 \times 1 \mu\text{m} = 1 \mu\text{m}^2$, e a do EDS é pior, por causa do volume de excitação, além do espaçamento de $6 \times 6 \mu\text{m} = 36 \mu\text{m}^2$. Apesar dessas limitações, o método é extremamente valioso, principalmente para fases minerais heterogêneas.

Tabela 4. Resultados para a liberação por composição (%), liberação por superfície livre (%) para as amostras nas análises de XBSE e GXMAP

| Amostras | Quartzo (LC) | | Quartzo (LS) | |
|------------|--------------|------|--------------|------|
| | GXMAP | XBSE | GXMAP | XBSE |
| APR1+0,300 | 98 | 98 | 97 | 97 |
| APR1+0,212 | 98 | 98 | 97 | 97 |
| APSI+0,300 | 83 | 84 | 84 | 84 |
| APSI+0,212 | 94 | 92 | 90 | 89 |
| APS2+0,300 | 71 | 72 | 70 | 71 |
| APS2+0,212 | 86 | 86 | 84 | 69 |
| APV3+0,300 | 95 | 93 | 86 | 80 |
| APV3+0,212 | 99 | 99 | 98 | 95 |
| APV4+0,300 | 10 | 9 | 14 | 12 |
| APV4+0,212 | 59 | 56 | 60 | 56 |

Tabela 5. Análise modal para as amostras nas duas faixas granulométricas (% em peso)

| Amostra | Quartzo | | Hematita | | Goethita | |
|------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| | XBSE (%) | GXMAP (%) | XBSE (%) | GXMAP (%) | XBSE (%) | GXMAP (%) |
| APSI+300mm | 18,64 | 18,16 | 66,88 | 68,69 | 14,39 | 13,07 |
| APSI+212mm | 35,81 | 34,79 | 55,12 | 58,23 | 8,18 | 6,86 |
| APS2+300mm | 20,96 | 21,19 | 59,32 | 46,50 | 19,25 | 31,77 |
| APS2+212mm | 32,13 | 28,18 | 45,35 | 52,08 | 22,09 | 19,65 |
| APV3+300mm | 3,05 | 3,53 | 64,94 | 67,21 | 29,84 | 27,34 |
| APV3+212mm | 24,69 | 25,19 | 61,66 | 60,37 | 12,23 | 13,22 |
| APV4+300mm | 32,70 | 32,25 | 63,97 | 62,67 | 2,71 | 3,38 |
| APV4+212mm | 40,91 | 40,37 | 55,13 | 54,85 | 3,55 | 4,00 |

3.3.2 Análise modal

O resultado para a análise modal está detalhado na Tabela 4. Em todas as amostras e nas faixas estudadas, foi notado que sua composição mineralógica é basicamente hematita e quartzo, totalizando mais de 70% da amostra, o que já era esperado tratando-se de minério de ferro tipo itabirito. O terceiro mineral em abundância foi a goethita. Para a amostra APV3, além dos minerais listados, encontrou-se também gibbsita, mas em quantidade muito pequena.

Os resultados das análises modais por MLA (Tabela 5) confirmaram os dados obtidos nas outras análises.

A discrepância entre a análise química real (AQ) e aquela calculada a partir da análise modal por MLA, ou outro método microscópico, pode ser explicada. Deve-se a que a AQ é feita com amostra em granulometria finíssima ou mesmo solubilizada; então, a homogeneidade é excelente. Já na secção polida, especialmente nas granulometrias focadas neste trabalho, os minerais seccionados e apresentados aos feixes de elétrons no MEV, certamente têm distribuição bem mais heterogênea, com predominância da hematita, neste caso. Então, esta conciliação dos dados de AQ e de análise microscópica raramente resulta perfeita.

4 CONCLUSÃO

Resultados valiosos foram obtidos pela análise MLA, como análise modal, liberação mineral e associação mineral. As análises pelos critérios bem diferentes XBSE e GXMAP forneceram resultados semelhantes. Isto foi importante, pois mostrou a consistência dos resultados das análises para essas amostras, para trabalhos futuros, refinamentos nos parâmetros serão realizados para aprimorar e obter resultados com mais consistências, principalmente para a quantificação.

Nas 4 amostras estudadas, se comparadas as técnicas de liberação por composição e área superficial e os critérios de aquisição de dados XBSE e GXMAP, não houve valores discrepantes. Contudo, foi observado que a liberação por composição gerou valores um pouco maiores. As duas técnicas de liberação comprovaram que o quartzo está praticamente livre, mesmo para a fração mais grossa, retida em 0,300 mm, para 3 das amostras, exceto para APV4.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos que colaboraram na realização deste trabalho, especialmente aos técnicos: Alberto, Isabel, Andréia, Roberto e Paola. A.C.Carioca agrade à CAPES/PROEX, pelo apoio acadêmico e financeiro. P.R.G. Brandão também agradece ao CNPq por uma bolsa e recursos de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Brandão PRG, Vianna SMSM. Mineralogical and chemical characterization of a Brazilian iron ore: influences on processing. In: Proceedings of the 5th International Congress on Applied Mineralogy - ICAM '96; 1996 June; Varsóvia (Warsaw), Polónia (Poland). 1996. p. 173-177.
- 2 Neumann R, Schneider CL, Alcover A No. Caracterização tecnológica de minérios. In Luz ABD, Sampaio JA, França SCA, editores. Tratamento de minérios. Vol. I. Rio de Janeiro: CETEM; 2010. p. 85-139.
- 3 Brandão PRG, Rocha JMP, Caçado RZL. Minérios de ferro goethíticos do Quadrilátero Ferrífero (Brasil) – caracterização com ênfase nas impurezas principais. In: Lopes FC, Andrade AI, Henriques MH, Quinta-Ferreira M, Reis Pena, Barata MT, coordenadores. Para conhecer a Terra: memórias e notícias de geociências no espaço lusófono. Vol. I. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra; 2012. p. 299-308.
- 4 Carioca AC. Caracterização microestrutural e mineralógica de minérios de ferro itabiríticos com graus diferentes de complexidade [tese]. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
- 5 King RP, Schneider CL. An effective SEM-based image analysis system for quantitative mineralogy. KONA. 1993;11:166-177.
- 6 Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis - an Introduction to JKMRC/FEI mineral liberation analyser. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2003;2(1):33-41.
- 7 Gu Y, Napier-Munn T. JK/ Philips mineral liberation analyzer – an introduction. In: Minerals Processing '97 Conf. Cape Town, AS; 1997; Cidade do Cabo (Cape Town), África do Sul (South Africa); 1997. p. 2.
- 8 Fandrich R, Gu Y, Burrows D, Moeller K. Modern SEM-based mineral liberation analysis. International Journal of Mineral Processing. 2007;84:310-320.
- 9 Bancroft GM. Mössbauer spectroscopy: an introduction for inorganic chemists and geochemists. New York: John Wiley & Sons; 1973.
- 10 Whitney DL, Evans BW. Abbreviations for names of rock-forming minerals. The American Mineralogist. 2010;95(1):185-187.

Recebido em: 13 Set. 2017

Aceito em: 14 Jun. 2018