

RELAÇÃO ENTRE GRAU DE METAMORFISMO E MALHA DE LIBERAÇÃO DE ITABIRITOS COMPACTOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Rodrigo Fina Ferreira ¹
Regisvander Gomes da Silva ²
Michelle Lacerda Sales Marques ²

Resumo

O minério de ferro lavrado no Brasil pode ser classificado em diversas litologias com características distintas. O avanço da mineração ao longo do tempo leva à escassez dos minérios ricos, fazendo com que litologias mais pobres, contaminadas e compactas passem a ser lavradas. Há uma crescente tendência de aplicação de rotas de processo envolvendo moagem para promover a liberação mineral, condição primordial para os processos de concentração. Diversos autores correlacionaram os processos de metamorfismo das formações ferríferas às características mineralógicas observadas nos itabiritos do Quadrilátero Ferrífero, notadamente o tamanho dos cristais. O presente trabalho avalia as implicações desta variação na definição da malha de moagem. Realizou-se caracterização mineralógica e ensaios de moagem, deslamagem e flotação com amostras provenientes de duas regiões do Quadrilátero Ferrífero submetidas a diferentes graus de metamorfismo. Constatou-se uma tendência de obtenção de grau de liberação satisfatório em malha granulométrica mais grossa para o itabirito de maior grau metamórfico, cujos cristais são maiores. Os ensaios de flotação comprovaram as constatações mineralógicas.

Palavras-chave: Itabirito; Caracterização mineralógica; Liberação; Moagem.

RELATIONSHIP BETWEEN METAMORPHISM DEGREE AND LIBERATION SIZE OF COMPACT ITABIRITES FROM THE IRON QUADRANGLE

Abstract

Iron ore exploited in Brazil can be classified into several lithological types which have distinct features. The progress of mining over time leads to scarcity of high grade iron ores, leading to the exploitation of poor, contaminated and compact ores. There is a growing trend of application of process flowsheets involving grinding to promote mineral liberation, essential condition for concentration processes. Several authors have correlated metamorphism processes of banded iron formations to mineralogical features observed on itabirites from the Iron Quadrangle, mainly the crystals size. This paper presents the implications of such variation in defining the mesh of grinding. Mineralogical characterization and grinding, desliming and flotation tests have been carried out with samples from two regions of the Iron Quadrangle subjected to different degrees of metamorphism. It was found a trend of reaching satisfactory liberation degree in coarser size for the itabirite of higher metamorphic degree, which has larger crystals. The flotation tests have confirmed the mineralogical findings.

Keywords: Itabirite; Mineralogical characterization; Liberation; Grinding.

I INTRODUÇÃO

1.1 Itabiritos: Gênese e Alterações

As maiores fontes de minério de ferro atualmente conhecidas são provenientes das formações ferríferas bandadas (*banded iron formations* - BIFs), principalmente da fácies óxido. Tais rochas, de acordo com as teorias mais aceitas, tiveram gênese relacionada a processos sedimentares

químicos que deram origem inicialmente a uma rocha laminada, composta por variação rítmica entre lâminas predominantemente compostas por minerais ferrosos (hematita e/ou magnetita) e lâminas predominantemente compostas por sílica criptocristalina (chert/jaspe). O metamorfismo das formações ferríferas sedimentares deu origem aos itabiritos [1], ocorrendo a cristalização das fases amorfas, assim como alterações texturais e morfológicas nos minerais. Os itabiritos podem ser subdivididos de

¹Vale, Mariana, MG, Brasil. E-mail: rodrigo.fina@vale.com

²Vale, Belo Horizonte, MG, Brasil.

acordo com diversos parâmetros, como composição mineralógica (itabirito silicoso, carbonático, anfibolítico, manganífero etc.) e características granulométricas (itabiritos friáveis, semcompactos e compactos). Processos naturais de enriquecimento (tema ainda debatido entre os geólogos, tendo sido propostos diversos modelos que não serão aqui discutidos) concentraram naturalmente as formações ferríferas, originando os minérios de alto teor compostos essencialmente por óxidos de ferro e apresentando teores acima de 64% Fe.

Os protominérios do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, são itabiritos da Formação Cauê, Supergrupo Minas, formados pelo metamorfismo de uma “rocha laminada constituída de chert e óxido de ferro” [1]. A mineração inicialmente explotava apenas os minérios naturalmente ricos, porém a exaustão das reservas ao longo do tempo levou à necessidade de aproveitamento dos itabiritos, rochas mais pobres em Fe, com maior participação de SiO_2 . Atualmente são lavrados principalmente os itabiritos friáveis, que provêm do itabirito compacto através de processos intempéricos [1], ou seja, sofreram abrandamento natural devido a processos superficiais. Diversos autores, como Dorr [1] e Biondi [2] acreditam que o principal processo responsável por tal abrandamento seria a lixiviação do quartzo a partir da rocha sã. Na Mina de Conceição, em Itabira, já são explotados itabiritos compactos e estudos tecnológicos estão sendo conduzidos visando o aproveitamento deste litotipo em outras localidades.

1.2 Grau de Metamorfismo das Formações Ferríferas

Segundo Chemale et al. [3], o Quadrilátero Ferrífero foi submetido a pelo menos dois eventos principais de deformação e metamorfismo que alteraram significativamente as características estruturais e texturais das rochas. Foram estes eventos os responsáveis pela transformação das formações ferríferas sedimentares em itabiritos, porém, a intensidade de metamorfismo não foi uniforme em toda a área do Quadrilátero, variando de acordo com as diferenças nos processos tectônicos e de acordo com o comportamento reológico das rochas. Rosière et al. [4] afirmaram que a intensidade do tectonismo diminui de leste para oeste, e dividiram a região em dois domínios principais: um domínio de alta deformação (no qual as estruturas associadas ao segundo evento de deformação são predominantes), e um domínio de baixa deformação, no qual ainda se pode ter acesso a estruturas diagenéticas. Pires [5] propôs a subdivisão do Quadrilátero Ferrífero em quatro zonas metamórficas: Zona da Grunerita (ZG), Zona da Cummingtonita (ZC), Zona da Actinolita (ZA) e Zona da Tremolita-Antofilita (ZTA), sendo que o grau metamórfico aumenta da primeira para a última. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do Quadrilátero Ferrífero dividido nos domínios citados acima. Conforme concluíram Rosière

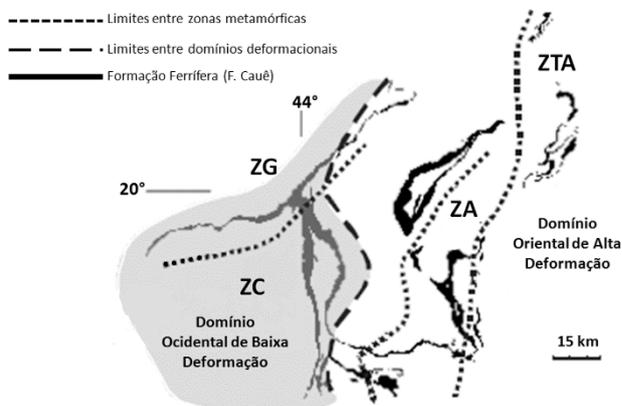


Figura 1. Domínios de deformacionais e zonas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero [6].

e Chemale [6], observa-se que o gradiente deformacional acompanha o zonamento metamórfico.

Os processos metamórficos acarretam transformações em diversas características dos minerais, sendo uma delas de especial interesse para os processos de cominuição e concentração: o tamanho dos cristais. Segundo Rosière [7], o aumento do grau de metamorfismo contribui para um aumento generalizado no tamanho dos cristais resultando em minérios mais grossos. James *apud* Dorr [1], afirmou que o tamanho dos grãos de quartzo e hematita varia sistematicamente com o grau de metamorfismo. Assim sendo, considerando-se a divisão do Quadrilátero Ferrífero com relação ao grau de metamorfismo, espera-se certa variação na granulação dos cristais entre os depósitos situados nas diferentes zonas e domínios.

Deve-se salientar, entretanto, que esta análise considera uma visão bastante geral e ampla da região em voga. Estruturas tectônicas localizadas, como zonas de cisalhamento e charneiras de dobras, podem fazer com que a granulação dos cristais apresente variação, mesmo que menos significativa, em áreas menores.

1.3 Características que Influenciam na Definição da Malha de Moagem

A obtenção de produtos economicamente aproveitáveis a partir dos itabiritos compactos passa necessariamente por processos de cominuição fina, como a moagem, para individualização das fases minerais e posterior concentração, e para tal deve-se definir por meio da caracterização tecnológica o tamanho no qual se obtém liberação satisfatória entre os minerais-minério e os minerais de ganga. Caso esta condição não seja atendida, a seletividade do processo de concentração fica comprometida. Cabe lembrar a definição de Gaudin [8] para o grau de liberação de um determinado mineral, segundo a qual este termo se refere à percentagem do mineral que ocorre como partículas livres em relação ao total que ocorre como partículas mistas e livres. Atendo-se à moagem como processo através do

qual se obtém a individualização das fases minerais a partir de partículas poliminerálicas (ao menos em grau suficiente para a concentração), podemos citar as duas possibilidades de aumento do grau de liberação através de cominuição, segundo Gaudin [8]:

- Liberação por destacamento: se as propriedades físicas de minerais adjacentes em uma partícula são suficientemente distintas, ou caso a ligação entre os mesmos seja relativamente fraca com relação a cada mineral, as fraturas resultantes da cominuição podem ocorrer preferencialmente nas bordas dos cristais. Verifica-se na prática que algumas feições referentes à textura das rochas e ao arranjo dos cristais podem facilitar a liberação dos cristais por destacamento, não sendo necessário se atingir o tamanho dos mesmos (Figura 2). Gaudin [8] cita as rochas intemperizadas como exemplo de materiais que podem sofrer liberação por destacamento, sendo este o caso dos itabiritos friáveis, cujo quartzo teria sido parcialmente lixiviado por agentes supergênicos gerando maior porosidade entre os cristais, reduzindo a coesão entre os mesmos;
- Liberação por redução de tamanho: dependendo das características dos minerais, as fraturas podem ocorrer no interior dos cristais, e não nas bordas, o que pode implicar em partículas mistas remanescentes após a cominuição dependendo da malha de controle adotada. Neste caso deve-se reduzir o tamanho das partículas ao tamanho dos menores cristais presentes para individualização das fases minerais. Nos itabiritos compactos, pouco porosos, este pode ser o mecanismo preponderante (Figura 2). A principal característica intrínseca ao minério que deve ser considerada para se definir uma malha de moagem adequada para liberação por redução de tamanho é o tamanho dos cristais.

A predominância entre estes dois mecanismos na cominuição de um determinado minério vai depender das características dos minerais (dureza, tenacidade, clivabilidade) e das partículas como um todo (coesão entre cristais, textura, porosidade, bandamento, xistosidade, presença de zonas de fraqueza).

O presente trabalho tem por objetivo comparar o grau de liberação do quartzo em duas amostras de itabirito compacto provenientes de duas áreas no Quadrilátero Ferrífero submetidas a diferentes graus de metamorfismo, após moagem em uma determinada malha granulométrica, e avaliar o produto da flotação em termos de qualidade química. A partir destes dados, pode-se verificar a relação entre o grau metamórfico e a malha de moagem adequada à individualização das fases minerais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram caracterizadas duas amostras de furos de sonda de itabirito compacto, provenientes de áreas localizadas em duas zonas de metamorfismo do Quadrilátero Ferrífero: zona da grunerita (menor grau metamórfico, Amostra BG), e zona da tremolita-antofilita (maior grau metamórfico, Amostra AG). Optou-se por estudar os itabiritos compactos por serem rochas menos alteradas por processos superficiais, o que deve implicar na predominância do mecanismo de liberação por redução de tamanho.

Realizou-se a caracterização química das mesmas, sendo os elementos e compostos Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, TiO₂, CaO e MgO analisados via fluorescência de raios-X, e o PPC (percentual de perda por calcinação) determinado via gravimetria. As amostras foram inicialmente britadas em 8,0 mm e classificadas por tamanho (-8 mm + 1 mm, -1 mm + 0,15 mm, -0,15 mm), sendo as faixas granulométricas direcionadas a análise via microscopia ótica de luz refletida (microscópio Leica DM 6000) para quantificação mineralógica modal por estimativa de área. Posteriormente foram

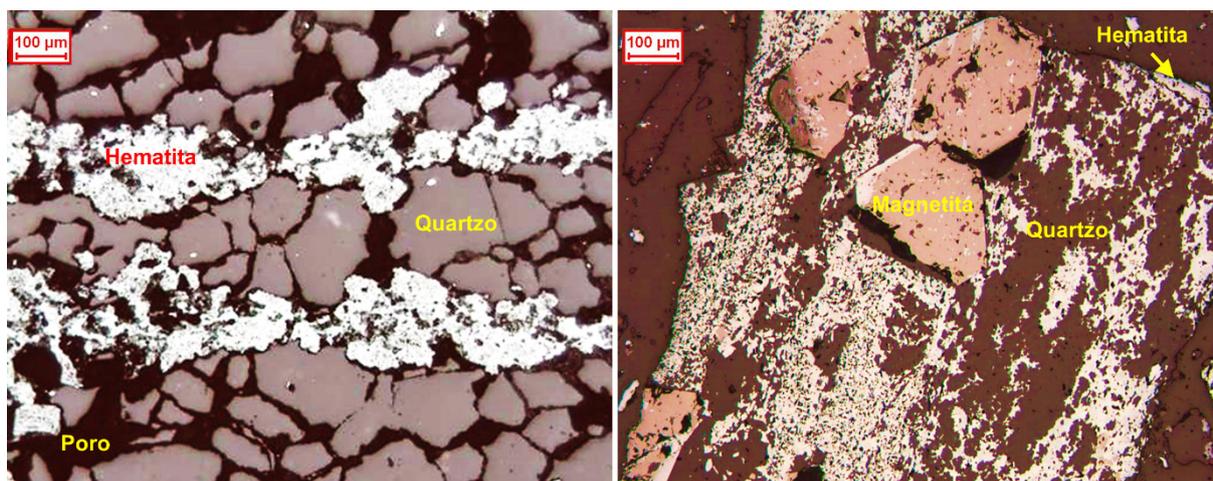


Figura 2. Partícula de itabirito friável com tendência a liberação por destacamento (esquerda). Partícula de itabirito compacto com tendência a liberação por redução de tamanho (direita).

submetidas à britagem em 2,0 mm e moagem em moinho de jarro com diâmetro de 8” e comprimento de 12”, com carga de bolas distribuída em 38,1 mm (11,007 kg), 25,4 mm (3,430 kg), 19,1 mm (1,527 kg) e 12,7 mm (0,913 kg), e polpa a 65% de sólidos. Aplicou-se rotação de 72 RPM. As amostras foram moídas até se atingir aproximadamente 95% passante na malha de 0,150 mm. As análises granulométricas foram realizadas via peneiramento a úmido, com tempo de 15 minutos.

Analisou-se o produto moído via microscopia ótica de luz refletida para determinação do grau de liberação por estimativa de área dos cristais de quartzo livres e mistos. Calculou-se o grau de liberação do quartzo conforme a Equação 1.

$$\text{Grau de Liberação} = \frac{\% \text{ Quartzo Livre} \times 100}{\% \text{ Quartzo Livre} + \% \text{ Quartzo Misto}} \quad (1)$$

O produto moído foi direcionado à deslamagem em bancada, em polpa a 25% de sólidos, submetida a agitação mecânica (1.200 RPM) em pH 10,5 por 5 minutos para dispersão das partículas, com posterior sedimentação por 10 minutos e sifonamento do *overflow* (lamas).

Ensaio de flotação em laboratório foram executados com o *underflow* da deslamagem, em célula mecânica MacDarma D12, com cuba de 2600 mL de volume útil, e rotor fechado com rotação de 1000 RPM, sendo o percentual de sólidos da polpa ajustado para 50%, e o pH de trabalho em 10,5. Utilizou-se como depressor o Farelo de Milho Kowalski gelatinizado com soda cáustica (NaOH) na relação de 10:1 e dosagem de 800 g/t, e como coletor foi utilizada amina Clariant Flotigam EDA-C (etermonoamina – coletor catiônico de cadeia média, ramificada, com grau de neutralização de 50%), em dosagem específica de 200 g/tSiO₂. Como modulador de pH utilizou-se soda cáustica a 50%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da quantificação mineralógica (global calculada a partir das análises por faixa de tamanho) e da análise química das amostras.

Verifica-se que os itabiritos analisados são semelhantes quimicamente, sendo o principal deletério a sílica, e são

consideravelmente pobres em Fe quando comparadas aos minérios ricos do Quadrilátero Ferrífero. Com relação aos minerais ferrosos a amostra BG apresenta distribuição em percentuais próximos entre hematita martítica, goethita e magnetita, sendo esta última predominante. Estes minerais são derivados de processos genéticos ou intempéricos. Já a amostra AG é essencialmente hematítica, ocorrendo principalmente cristais de morfologia granular. Para ambas o principal mineral contaminante é o quartzo que representa mais de 50% da composição mineralógica, sendo que minerais manganíferos, gibbsita e outros minerais transparentes ocorrem como traços. As fotomicrografias da Figura 3 apresentam as características morfológicas e texturais das amostras. As mesmas foram obtidas a partir de alíquotas do produto britado em 8,0 mm.

Observa-se, pelas imagens, que o tamanho dos cristais de quartzo e hematita tende a aumentar significativamente da amostra BG para a amostra AG, ou seja, de acordo com o aumento do grau de metamorfismo ao qual a amostra foi submetida, o que está plenamente de acordo com os autores previamente citados. Na fração -8,0 + 1,0 mm, por exemplo, o tamanho médio dos cristais de hematita (mais de 90% deles mistos ao quartzo em ambas as amostras) é 38 μm na amostra BG e 620 μm na amostra AG. Verifica-se, também, que não ocorrem zonas de fraqueza de forma significativa nas partículas de ambas as amostras.

A Figura 4 apresenta a distribuição granulométrica das amostras após moagem com malha de controle em 0,150 mm (P95).

Verifica-se que as amostras apresentam distribuições granulométricas similares, com a amostra BG ligeiramente mais fina nas frações inferiores a 100 μm. Esta análise é importante, pois desta forma a comparação do grau de liberação será efetuada para partículas com distribuições de tamanho próximas. Foi quantificado o grau de liberação do quartzo após a moagem, tendo sido obtidos os resultados apresentados no gráfico da Figura 5.

Obteve-se maior grau de liberação para a amostra AG, proveniente da zona de maior grau metamórfico do Quadrilátero Ferrífero, e menor grau de liberação para a amostra proveniente da zona de menor grau metamórfico (amostra BG). Existe, portanto, uma correlação coerente entre o grau de metamorfismo e o grau de liberação do

Tabela 1. Caracterização mineralógica e química

Amostra	Quantificação Mineralógica (%)												
	Hematita Especular	Hematita Lamelar	Hematita Granular	Hematita Sinuosa	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo	Óxidos Mn	Caulinita	Gibbsita	Outros
BG	0,00	0,00	0,00	0,43	13,42	19,95	12,73	0,19	53,09	0,12	0,00	0,08	0,00
AG	10,04	5,26	24,55	0,00	2,86	1,60	0,00	2,15	53,17	0,03	0,00	0,04	0,30

Amostra	Análise Química (%)								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
BG	31,01	53,88	0,056	0,42	0,157	0,010	0,016	0,076	1,73
AG	31,85	53,32	0,009	0,46	0,024	0,009	0,039	0,032	0,15

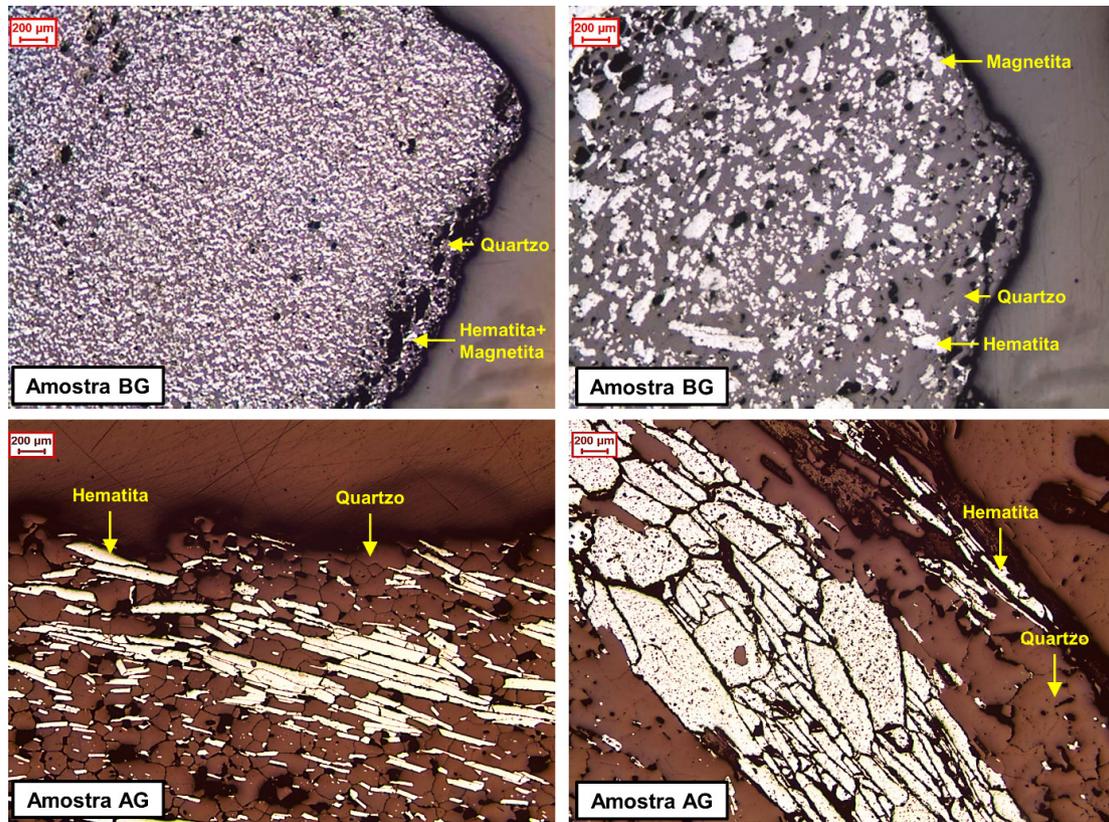


Figura 3. Fotomicrografias. Microscópio ótico de luz refletida. Nicóis paralelos.

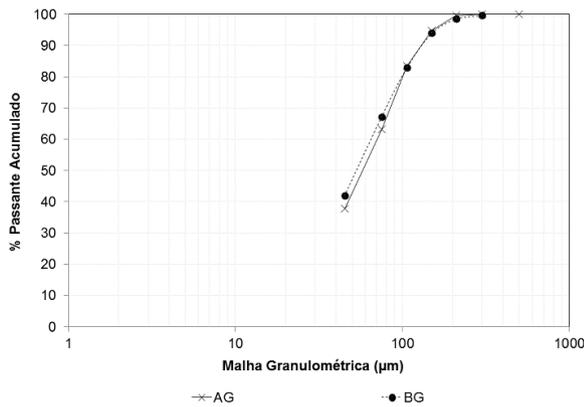


Figura 4. Distribuição granulométrica do produto moído.

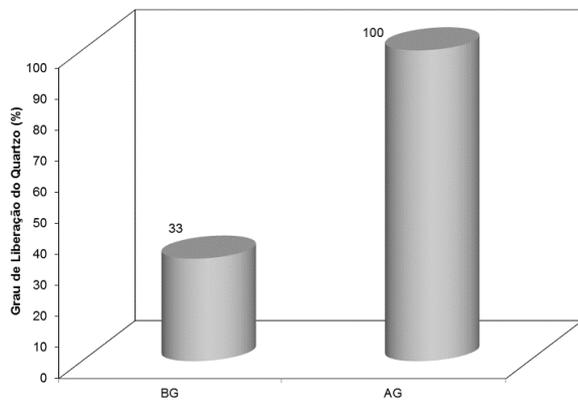


Figura 5. Grau de liberação do quartzo no produto moído.

quartzo na malha de moagem estudada. Além de fatores como intercrescimento entre cristais de hematita e quartzo, a diferença na granulação dos cristais, variável com o grau de metamorfismo, é um fator preponderante com relação aos resultados obtidos, constatando-se que a amostra com cristais menores apresenta malha de liberação em tamanho mais fino.

Submeteu-se o produto moído de cada amostra ao processo de deslamagem para remoção de ultrafinos, direcionando posteriormente o *underflow* aos ensaios de flotação, cuja meta foi a obtenção de um concentrado com percentual de SiO₂ inferior a 1,00%. A Tabela 2 apresenta a qualidade química dos concentrados obtidos.

O concentrado obtido para a amostra BG apresenta teor de SiO₂ muito elevado, próximo a 15%, incompatível com a especificação. Análises mineralógicas evidenciaram que 90% dos cristais de quartzo remanescentes no concentrado desta amostra encontram-se mistos. Assim sendo, para melhoria da qualidade química do produto desta amostra é necessário aplicar moagem em tamanho mais fino. Os cristais de quartzo que permaneceram associados a minerais ferrosos apresentam granulação média de 0,030 mm, com menor granulação em 0,006 mm. Com relação à amostra AG, obteve-se *pellet feed* com a qualidade desejada, ou seja, a moagem com P95 em 0,150 mm resulta em individualização satisfatória das fases minerais para este itabirito.

Tabela 2. Análise química dos concentrados de flotação

Amostra	Análise Química (%)								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
BG	56,51	14,46	0,110	0,55	0,315	0,026	0,013	0,101	3,34
AG	68,72	0,63	0,008	0,25	0,028	0,033	0,049	0,010	0,02

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para as duas amostras de itabirito compacto do Quadrilátero Ferrífero evidenciam a tendência de obtenção de grau de liberação satisfatório em malha granulométrica mais grossa para a amostra proveniente da zona de maior grau metamórfico, sendo que esta apresenta cristais maiores que o itabirito de menor grau metamórfico, cuja malha de liberação encontra-se em tamanho mais fino. Esta característica é preponderante na definição da malha de moagem para rochas compactas. Ensaio de flotação em laboratório comprovaram as estimativas mineralógicas.

No entanto, é importante ressaltar que esta análise leva em consideração um modelo geológico amplo do Quadrilátero Ferrífero, que considera uma tendência abrangente de variação de tamanho de cristais com o grau

de metamorfismo. Estruturas tectônicas localizadas, como zonas de cisalhamento e dobras, podem fazer com que haja variação da granulagem, mesmo que menos significativa, dentro de pequenas áreas. Pretende-se dar continuidade ao trabalho adicionando-se um maior número de amostras, o que pode reforçar as evidências apontadas neste estudo. A avaliação das demais zonas metamórficas não consideradas no presente trabalho, e a análise das diferenças com relação ao intercrescimento dos cristais devem também ser contempladas nos trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Carlos Alberto Rosière pelos preciosos comentários sobre o tema abordado no estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Dorr JVN. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG. In: DNPM-USGS. Rio de Janeiro: DNPM; 1959. (Publicação Especial, 1).
- 2 Biondi JC. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. São Paulo: Oficina de Textos; 2003.
- 3 Chemale F Jr, Rosière CA, Endo I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: um modelo. Pesquisas UFRGS. 1991;18(2):104-127.
- 4 Rosière CA, Chemale F Jr, Guimarães MLV. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização. Geonomos. 1993;1(1):65-84.
- 5 Pires FRM. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 1995;67(1):77-105.
- 6 Rosière CA, Chemale F Jr. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero: uma visão geral e discussão. Geonomos. 2000;8(2):27-43.
- 7 Rosière CA. Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II - Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética. Geonomos. 1996;4(1):61-75.
- 8 Gaudin AM. Principles of mineral dressing. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company; 1939.

Recebido em: 2 Fev. 2015

Aceito em: 21 Fev. 2015