

Influência do processo de lixiviação parcial do quartzo na liberação mineral de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero

Rodrigo Fina Ferreira ^{1*} 
Regisvander Gomes da Silva ¹ 

Resumo

Os itabiritos do Quadrilátero Ferrífero (MG) foram submetidos a uma série de processos geológicos que alteraram substancialmente as características da rocha original. Dentre eles, ocorreram processos supergênicos que causaram a lixiviação parcial do quartzo, gerando porosidade e dando origem aos itabiritos friáveis. O presente estudo avalia a influência da porosidade das partículas na liberação do quartzo após moagem, com o consequente resultado na flotação. Para tal, foram coletados 4 pares de amostras em diferentes regiões do Quadrilátero, sendo cada par composto por uma amostra de itabirito compacto e uma amostra de itabirito friável de uma mesma mina, as quais foram submetidas a caracterização química e mineralógica, além de ensaios de moagem, deslamagem e flotação. As amostras com maiores níveis de porosidade, que correspondem aos itabiritos friáveis, apresentaram maior grau de liberação do quartzo após moagem em comparação com o respectivo par de itabirito compacto, tendo sido obtidos na flotação concentrados com menor teor de SiO₂. A porosidade tende a promover a liberação por destacamento. Os resultados obtidos indicam que a porosidade gerada pela lixiviação parcial do quartzo dos itabiritos por processos supergênicos é fator influente na malha de liberação do quartzo.

Palavras-chave: Itabiritos; Quadrilátero Ferrífero; Liberação mineral; Processos supergênicos.

Influence of the partial leaching process of quartz on mineral liberation of itabirites from Quadrilátero Ferrífero

Abstract

The itabirites from Quadrilátero Ferrífero (MG - Brazil) were submitted to a series of geological processes that substantially altered the characteristics of the original rock. Among them, supergene processes have caused partial leaching of quartz, generating porosity and giving rise to friable itabirites. The present study evaluates the influence of the porosity of the particles on the liberation of quartz after grinding, with the consequent result in flotation. For this purpose, 4 pairs of samples were collected in different regions of the Quadrilátero, each pair being composed of a sample of compact itabirite and a sample of friable itabirite from the same mine, which were submitted to chemical and mineralogical characterization, in addition to tests of grinding, desliming and flotation. The samples with higher levels of porosity, which correspond to the friable itabirites, showed a higher degree of liberation of quartz after grinding compared to the respective pair of compact itabirite, being obtained concentrates with lower SiO₂ content after flotation. Porosity promotes liberation by detachment. The obtained results indicate that the porosity generated by partial leaching of quartz from itabirites by supergene processes in the itabirites is an influential factor in the quartz liberation size.

Keywords: Itabirites; Quadrilátero Ferrífero; Mineral liberation; Supergene processes.

1 Introdução

1.1 Aspectos geológicos: dos itabiritos compactos aos itabiritos friáveis

O Brasil possui grandes reservas de minério de ferro, como as do Quadrilátero Ferrífero (QF), no estado de Minas

Gerais, onde, além dos minérios de alto teor de Fe, ocorrem os itabiritos silicosos da Formação Cauê, Supergrupo Minas, formados pelo metamorfismo de uma “rocha laminada constituída de chert e óxido de ferro” conforme descreveu Dorr [1], com idade deposicional de 2,65 Ga [2]. Tais rochas são compostas essencialmente por quartzo e óxidos/hidróxidos de ferro, com alguns outros minerais em menor proporção.

¹Centro de Pesquisas Tecnológicas, CPT, Vale S/A, Nova Lima, MG, Brasil.

*Autor correspondente: rodrigo.fina@vale.com



Em algumas minas os itabiritos ricos e itabiritos pobres friáveis já são explorados em larga escala, e estudos de caracterização estão sendo desenvolvidos para o pleno aproveitamento dos itabiritos compactos e mais pobres em Fe, que já entram como diluição ou menor participação na alimentação de algumas usinas. Conforme ressaltaram Amorim e Alkmim [3], a demanda por minério de ferro pode levar ao aproveitamento de tipologias ainda não lavradas atualmente, como itabiritos dolomíticos, anfíbolíticos, e itabiritos silicosos e magnetíticos frescos, aumentando as reservas da região, porém trazendo consigo desafios tecnológicos para a indústria.

Vários estudos têm indicado que, devido ao teor mais baixo de Fe, à elevada coesão entre os cristais e às associações mineralógicas mais complexas, a rota de processo para os itabiritos compactos deve contemplar a moagem de todo o *Run of Mine*, com posterior concentração para produção de *pellet feed* (Lima et al. [4]; Gonçalves et al. [5]; Vasconcellos et al. [6]). Neste âmbito, estudos de liberação mineral do principal mineral de ganga (quartzo) são necessários para definição da granulometria ideal de cominuição de forma a garantir o bom desempenho dos métodos de concentração, sem, contudo, gerar sobremoagem.

A textura e o arranjo dos cristais na rocha exercem grande influência no modo de fragmentação das partículas e, conseqüentemente, na liberação entre os minerais. Processos de metamorfismo e deformação, além dos processos lateríticos (supergênicos e residuais), são os principais vetores que alteraram a textura dos minérios de ferro do QF. Ferreira et al. [7] relacionaram a malha de liberação de itabiritos compactos desta região ao seu grau de metamorfismo, sendo que quanto menor o grau metamórfico menor o tamanho dos cristais e, conseqüentemente, mais fina será a malha na qual ocorre liberação satisfatória do quartzo. Esta relação direta é válida para rochas compactas, basicamente o itabirito fresco.

Guild [8], em 1957, já afirmava que o itabirito inalterado, ou seja, o itabirito compacto, exigiria moagem fina para liberação dos constituintes minerais, e compara as dificuldades que poderiam ser enfrentadas no processamento deste minério aos taconitos americanos.

Além do metamorfismo, processos lateríticos alteraram profundamente as características texturais dos itabiritos. Guild [8] reportou a ocorrência dos itabiritos friáveis, afirmando que o abrandamento da rocha foi causado pelo enfraquecimento das ligações entre os grãos devido à lixiviação do quartzo e/ou carbonatos presentes, sendo que a presença ou não de carbonatos teria exercido o controle da intensidade da lixiviação devido à sua influência no pH da solução. O abrandamento resulta em desagregação completa ou parcial ou em perda de coesão da rocha. As laminações ferruginosas seriam geralmente menos afetadas, enquanto aquelas pobres em ferro se tornam um material arenoso, fracamente cimentado. Em alguns casos as laminações ferruginosas também mostram abrandamento. Tais alterações facilitarão muito a extração e o beneficiamento dos itabiritos friáveis frente aos compactos, segundo Guild [8].

Dorr e Barbosa [9] afirmaram, porém, que as evidências apontam que nem o pH e tampouco a participação de carbonatos seriam um fator preponderante na lixiviação do quartzo e conseqüente enriquecimento dos itabiritos, mas sim o tempo de reação e secundariamente a textura e o tamanho dos grãos na rocha.

Com relação ao tempo de reação, os autores postularam que a carapaça de canga que cobre os itabiritos os protegeu da erosão mecânica, possibilitando a ação das águas meteóricas descendentes, que percolaram o itabirito por tempo suficiente para lixiviar parcialmente o quartzo. Com relação à textura, cristais maiores levariam mais tempo para serem solubilizados, ao contrário de cristais mais finos.

Dorr [10] discutiu em detalhes a gênese de minérios de ferro supergênicos no QF, dividindo-os em três tipos: itabirito enriquecido, minério de teor intermediário e canga. O autor aponta como processo genético destas fácies intemperizadas a lixiviação do quartzo e enriquecimento secundário por hidratação (principalmente na canga), e listou como fatores preponderantes neste processo:

- Ambiente fisiográfico: o relevo deve ser propício à circulação de água subterrânea.
- Regime climático: a sazonalidade das chuvas é um requisito para a formação de canga e conseqüentemente dos minérios supergênicos. Na região do QF, durante o período chuvoso a chuva comumente ocorre em pancadas intermitentes após períodos de sol. O sol aquece consideravelmente as rochas, e quando a água entra em contato com as rochas aquecidas tem a temperatura elevada, o que a torna um solvente melhor para o quartzo e os minerais ferrosos. A canga suprajacente aos itabiritos funciona como um reservatório de água, que fornece o solvente lentamente devido à baixa permeabilidade desta formação. Quando o sol seca as rochas após a chuva, a água pode retornar às camadas suprajacentes por capilaridade, carreando Fe dissolvido. Nos períodos secos, nos quais meses podem se decorrer sem chuvas, os minérios supergênicos de elevada porosidade perdem a água e tornam-se aerados.
- Tamanho dos cristais: a granulação dos cristais é proporcional ao grau de metamorfismo. O autor reportou que nas áreas de grau metamórfico elevado, cujos cristais são maiores, não há ocorrências consideráveis de minérios supergênicos de teor intermediário, e concluiu que para formação deste tipo de minério o tamanho dos cristais de quartzo deve ser próximo ou inferior a 0,1 mm. Considerando partículas esféricas, a área dos grãos varia com o quadrado do raio, e o volume com o cubo, portanto o tamanho dos cristais é um fator importante no processo de lixiviação.
- Composição dos itabiritos: a susceptibilidade à lixiviação por soluções depende dos constituintes minerais da rocha.

Eichler [11] investigou as condições físico-químicas em perfis de intemperismo do QF, identificando ocorrência de pH entre 4 e 7, com redução de cima para baixo no perfil e variação também sazonal, com decréscimo de 0,5 na estação seca. Foram medidos potenciais de redução-oxidação entre +200 mV e +560 mV. Nas condições de intemperismo identificadas à época da pesquisa as águas pluviais dissolveriam aproximadamente 33 vezes mais sílica que ferro. O autor avaliou o papel de ácidos orgânicos na dissolução dos compostos nos itabiritos, porém concluiu que a dissolução não seria influenciada por reações bioquímicas, mas dependeria de outros fatores como exposição, permeabilidade e granulometria dos itabiritos. Com relação a este último item, Eichler [11] destacou que os resultados por ele obtidos indicam que nos itabiritos grosseiros, de maior grau metamórfico, não há um enriquecimento tão pronunciado de ferro devido à menor solubilidade da sílica. Admitindo-se condições semelhantes às atuais, os perfis avaliados devem ter sofrido a ação intempélica desde o Terciário Médio.

Ribeiro [12] estudou estruturas de colapso e desordem causadas pela formação de minérios supergênicos, descrevendo as alterações de propriedades como densidade, porosidade e reologia causadas pelo intemperismo. A Figura 1 apresenta fotomicrografias de itabiritos friáveis provenientes de minas do QF, evidenciando a porosidade gerada em pontos nos quais o quartzo foi parcialmente removido, conforme descrito por Ribeiro [12].

Segundo Biondi [13], os minérios hoje friáveis sofreram um abrandamento natural devido à lixiviação da sílica dos itabiritos que ocorrem na zona aerada, acima do nível do lençol freático, onde a percolação de água meteórica é livre. Estas seriam condições nas quais a maior parte do Fe ficaria imóvel, e a sílica seria lixiviada gerando o minério poroso e friável. O autor afirmou ainda que nos depósitos de ferro derivados das formações ferríferas, há sempre ocorrência de um corpo laterítico superficial, seguido em profundidade por minério maciço, minério friável e por último a rocha sã.

Dardenne e Schobbenhaus [14] também destacaram a importância da intensa percolação de água de origem superficial na lixiviação da sílica e concentração relativa do ferro como hematita residual e goethita neoformada. Segundo Amorim e Alkmim [3] processos morfotectônicos, provavelmente do início do Paleoceno, criaram as condições para circulação vertical e horizontal de água por entre as camadas da Formação Cauê.

1.2 Liberação mineral por destacamento

Os itabiritos friáveis são explorados atualmente em várias minas no QF. Nas ocorrências mais ricas em Fe, o minério é britado e peneirado em duas ou três faixas de tamanho, gerando *sinter feed* natural ou concentrado (jigagem do *sinter feed* grosso, e espirais concentradoras ou concentração magnética para o *sinter feed* fino) e *pellet feed* via deslamagem e flotação da fração mais fina, geralmente passante em 0,150 mm. Nos depósitos mais pobres em Fe, o minério é britado, moído, deslamado e flotado, com geração somente de *pellet feed*. Para esta última rota de processo é essencial o conhecimento da malha de liberação do quartzo para correto dimensionamento da moagem e obtenção de desempenho satisfatório na concentração.

Ferreira et al [7] associaram as definições de Gaudin [15] para as duas possibilidades de aumento do grau de liberação através de cominuição aos itabiritos compactos e friáveis do QF, supondo a tendência de liberação por redução de tamanho para os itabiritos compactos e liberação por destacamento para os itabiritos friáveis, devido à maior porosidade entre os cristais gerada pela lixiviação parcial do quartzo ocorrida nos processos supergênicos, reduzindo a coesão. O próprio Gaudin [15] citou as rochas intemperizadas como exemplo de materiais que podem sofrer liberação por destacamento. As mesmas conclusões foram obtidas por Ferreira e Lima [16] comparando o espectro de liberação de itabirito compacto e friável de diferentes graus metamórficos.

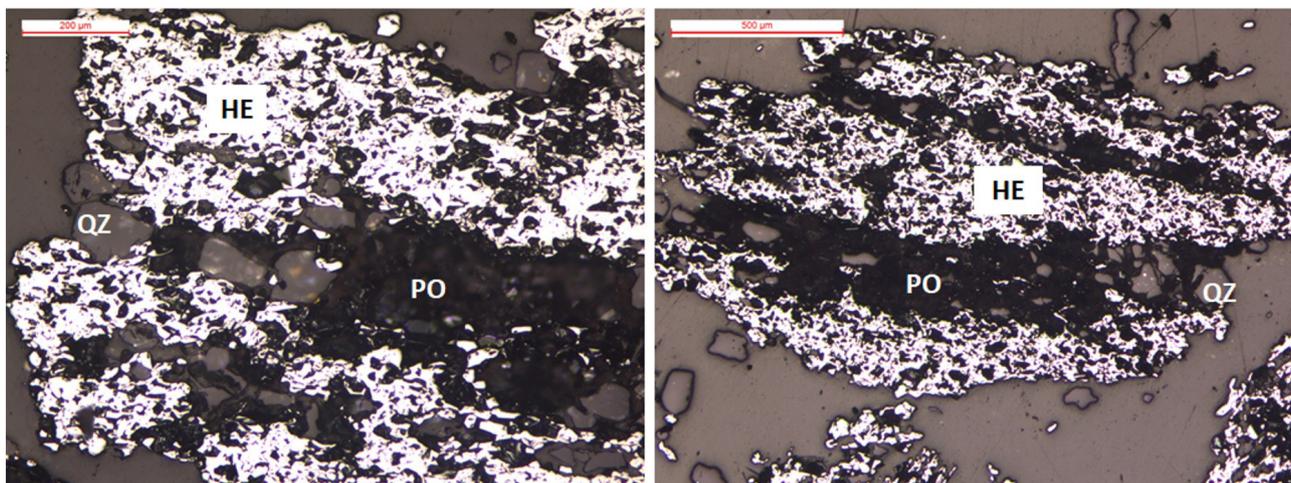


Figura 1. Fotomicrografias de partículas de itabiritos friáveis compostas por hematita (HE) e quartzo (QZ) com diferentes níveis de porosidade (PO) devido à lixiviação parcial do quartzo. Imagens dos autores.

Segundo Lawn [17], em materiais policristalinos os grãos estão cristalograficamente desorientados em relação aos demais grãos adjacentes.

Dependendo do material e da textura, uma fratura interceptando as bordas entre dois grãos pode transpor a borda e continuar se propagando pelo segundo grão com pequenas alterações no plano de propagação (fratura intragranular), ou desviar seguindo pela borda dos grãos (fratura intergranular). O autor afirmou que, geralmente, espera-se uma transição de fratura intragranular para intergranular à medida que os contatos entre os grãos se tornam mais fracos e desorientados. Em materiais policristalinos, uma trajetória intergranular pode ser mantida somente se os contornos entre os cristais são frágeis o suficiente para compensar o acréscimo de energia consumida nos desvios da fratura.

Quando predominam fraturas intergranulares no processo de fragmentação de um determinado minério, o processo é caracterizado pela não-aleatoriedade de propagação das fraturas, ou seja, estas não são independentes da textura do minério, conforme afirmou King [18], seguindo uma tendência de propagação relacionada às feições das partículas. King [18] descreveu seis tipos de fragmentação não-aleatória de partículas: quebra seletiva, quebra diferencial, quebra preferencial, fratura nas bordas, fratura na região periférica de cristais e a liberação por destacamento. Segundo o autor, a liberação por destacamento ocorre quando os grãos minerais estão fracamente ligados à matriz, sendo eles destacados durante a cominuição, levando a um elevado grau de liberação das fases minerais.

O conceito de liberação por destacamento está diretamente relacionado a fraturas intergranulares, ou seja, fraturas no contato entre os cristais. E quanto maiores as zonas de fraqueza presentes nos contatos (como porosidade), maior a tendência de fraturamento intergranular.

Hsieh e Wen [19] modificaram o modelo matemático de liberação de Gaudin incorporando aos cálculos um “fator de destacamento”, e afirmaram que este fenômeno é muitas vezes negligenciado na modelagem relacionada à liberação mineral. Os autores ressaltaram a importância não só da textura das partículas (forma e orientação dos cristais, porosidade), mas também das propriedades físicas dos minerais para a ocorrência de liberação por destacamento: diferenças de dureza, tenacidade e clivagem podem favorecer o destacamento de grãos de determinados minerais da matriz ou de cristais adjacentes de outras fases.

O presente trabalho teve por objetivo comparar o grau de liberação do quartzo após a moagem em pares de amostras de itabirito compacto (rocha fresca) e itabirito friável (rocha que sofreu alteração supergênica). As amostras foram coletadas em uma mesma mina, considerando diferentes regiões do QF submetidas a diferentes graus de metamorfismo, a fim de avaliar a influência da porosidade gerada pela alteração supergênica na malha de liberação dos itabiritos.

2 Materiais e métodos

Foram caracterizados quatro pares compostos por uma amostra de itabirito compacto (IC) e uma amostra de itabirito friável (IF), totalizando oito amostras, sendo cada par coletado em uma mina localizada em cada zona metamórfica conforme classificação de Pires [20]: Zona da Tremolita-Antofilita (ZTA), Zona da Actinolita (ZA), Zona da Cumingtonita (ZC) e Zona da Grunerita (ZG), sendo o grau metamórfico decrescente nesta ordem. As amostras de IF foram coletadas em pontos mais superficiais das minas, mais atingidos por processos lateríticos, e os itabiritos compactos foram coletados em profundidade (furos de sonda). Foram selecionadas amostras de composição química similar para a composição de cada par.

Realizou-se a caracterização química das amostras, sendo os elementos e compostos Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, TiO₂, CaO e MgO analisados via fluorescência de raios X (pastilhas prensadas e análise via curva de calibração, com fechamento aceitável entre 99% e 101%), e o PPC (perda por calcinação) determinado via gravimetria (calcinação conduzida a 1000°C em forno mufla por 1 hora).

As amostras foram submetidas a moagem de bolas buscando-se P95 em 0,150 mm, a úmido (65% de sólidos em massa), em moinho com diâmetro de 203,2 mm, comprimento de 304,8 mm e rotação de 72 RPM, 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). As análises granulométricas para certificação do tamanho de moagem foram realizadas via peneiramento a úmido, com tempo de 15 minutos. Foi realizada estimativa da porosidade em área e medição do tamanho de cristais da alimentação da moagem via microscopia ótica de luz refletida, considerando apenas partículas mistas, almejando-se dar foco ao processo de liberação.

Efetuuou-se a quantificação mineralógica modal por estimativa de área, realizando-se varredura de 25 campos, utilizando-se uma lente objetiva que permita a quantificação de, no mínimo, 20 partículas. Para obtenção da quantificação dos minerais em massa multiplicou-se a área medida pela massa específica do respectivo mineral. Através dos resultados da quantificação mineralógica calculou-se o grau de liberação do quartzo, utilizando 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 pelo método de Stokes, em polpa a 25% de sólidos, submetida a agitação mecânica por 5 minutos a 1200 RPM em pH 10,5 ajustado com adição de NaOH (5% de concentração), para dispersão das partículas, com posterior sedimentação por 10 minutos e sifonamento do *overflow*.

Ensaio de flotação em laboratório foram executados com o *underflow* da deslamagem, em célula mecânica MacDarma D12, com cuba de 2.600 mL de volume útil,

e rotor fechado com rotação de 1.000 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%. Adotou-se por meta a obtenção de concentrado com teor de SiO₂ máximo de 1%, típico de um *pellet feed* para redução direta.

3 Resultados e discussão

As Tabelas 1-2 apresentam os resultados da composição química e mineralógica das amostras.

Verifica-se que cada par de amostras de itabiritos (IC/IF) de cada mina contém amostras semelhantes quimicamente, cumprindo a premissa estabelecida no estudo. Em todos os casos o principal contaminante é a sílica, sendo baixos os teores dos demais contaminantes. As amostras 1 e 2, provenientes de mina localizada na Zona da Tremolita-Antofilita (maior grau metamórfico no Quadrilátero Ferrífero), são predominantemente compostas por hematita especular+lamelar dentre os minerais ferrosos, feição típica dos minérios de alto grau metamórfico. Já as amostras 3 e 4, coletadas em mina localizada na Zona da Actinolita,

apresentam as hematitas predominantemente martitizadas, e com ocorrência maior de goethitas em comparação às amostras 1 e 2. Nas amostras 5 e 6, coletadas na Zona da Cumingtonita existem diferenças com relação aos tipos morfológicos de hematita, sendo que na amostra 5 predomina a hematita granular e na amostra 6 a hematita sinuosa. As duas amostras (7 e 8) coletadas na Zona da Grunerita são compostas predominantemente por hematita martítica, dentre os minerais ferruginosos, sendo que a amostra 7 (IC) apresenta a maior participação de magnetita dentre todos os itabiritos caracterizados. Para todas as amostras, dentre os minerais contaminantes predomina o quartzo.

A Tabela 3 apresenta a porosidade média das partículas mistas assim como o tamanho médio de cristais mistos na alimentação da moagem de cada amostra. Observa-se que as amostras de IC apresentam porosidade inferior às amostras de IF, conforme esperado. O tamanho dos cristais nas amostras de IC e IF das zonas ZTA e ZA são muito próximos, e entre as amostras de IC e IF das zonas ZC e ZG os IFs apresentam cristais ligeiramente maiores.

A Figura 2 apresenta exemplos de partículas que ilustram a textura típica de cada amostra. Observa-se claramente que as partículas das amostras de IF são mais porosas, apresentando as feições descritas por Ribeiro [12] resultantes da lixiviação parcial de cristais de quartzo por processos supergênicos.

A Tabela 4 apresenta a quantificação mineralógica da alimentação da flotação com relação à liberação do quartzo, além da qualidade química dos concentrados obtidos na flotação.

Tabela 1. Caracterização química

Amostra	Lito	Zona Metamórfica (Pires [20])	Análise Química (%)									
			Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	
1	IC	ZTA	47,58	31,05	0,060	0,31	0,036	0,023	0,176	0,253	0,27	
2	IF	ZTA	47,48	30,72	0,028	0,39	0,314	0,019	0,031	0,044	0,40	
3	IC	ZA	43,87	34,94	0,047	0,37	0,112	0,015	0,047	0,001	1,63	
4	IF	ZA	43,58	35,21	0,056	0,51	0,064	0,010	0,013	0,053	1,64	
5	IC	ZC	35,94	47,35	0,015	0,55	0,296	0,021	0,020	0,159	0,45	
6	IF	ZC	35,62	46,82	0,022	0,72	0,187	0,014	0,013	0,100	0,86	
7	IC	ZG	43,81	33,02	0,030	1,28	0,290	0,005	0,008	0,107	1,93	
8	IF	ZG	43,34	35,72	0,043	0,79	0,061	0,001	0,007	0,046	1,77	

Tabela 2. Caracterização mineralógica

Amostra	Lito	Zona Metamórfica (Pires [20])	Quantificação Mineralógica (%)												
			Hematita Especular	Hematita Lamelar	Hematita Granular	Hematita Sinuosa	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo	Óxidos Mn	Caulinita	Gibbsita	Outros
1	IC	ZTA	17,6	23,5	14,9	10,5	0,0	0,0	0,0	0,2	33,0	0,0	0,2	0,0	0,1
2	IF	ZTA	8,0	60,7	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	30,8	0,0	0,2	0,0	0,0
3	IC	ZA	0,2	2,6	4,4	3,8	47,3	0,2	3,0	2,7	35,6	0,0	0,0	0,1	0,1
4	IF	ZA	0,2	1,9	9,6	0,1	43,2	0,1	5,7	1,6	37,2	0,1	0,1	0,1	0,0
5	IC	ZC	0,0	9,8	33,6	8,9	0,0	0,0	0,4	0,1	47,1	0,1	0,0	0,1	0,0
6	IF	ZC	0,0	3,0	9,4	13,6	12,8	9,7	2,7	1,2	47,1	0,2	0,1	0,2	0,0
7	IC	ZG	0,0	0,0	0,0	0,0	36,3	23,1	3,2	2,0	30,6	0,2	4,7	0,0	0,0
8	IF	ZG	0,4	0,3	1,5	18,1	36,5	3,8	5,9	0,8	32,6	0,0	0,2	0,0	0,0

Após moagem com P95 em 0,150 mm, obteve-se grau de liberação do quartzo mais elevado para todas as amostras de itabirito friável (entre 98 e 99% para todas) em comparação às amostras de itabirito compacto (entre 63% e 95%), independente da região do QF da qual o par IC/IF é proveniente. O maior nível de liberação do quartzo resultou em concentrados com teor de SiO₂ dentro da meta para todas as amostras de IF. Para as amostras de IC, o teor de SiO₂ no concentrado é maior e variou de 1,75% a 7,16%.

Considerando que, para cada par IC/IF, as amostras de IF apresentaram maior porosidade nas partículas mistas, e considerando que em todas as amostras o tamanho médio dos cristais mistos é similar entre IC e IF, ou ligeiramente maior para o IF mas sempre menor que a malha de moagem (0,150 mm), tendo sido possível obter liberação satisfatória do quartzo para obtenção de um produto dentro da especificação para os IFs mas não

para os ICs, pode-se postular que os poros nas partículas de IF formaram zonas de fraqueza que possibilitaram a liberação dos cristais de quartzo sem que seu tamanho fosse atingido pela cominuição, ou seja, nas amostras de IF ocorreu o mecanismo de liberação por destacamento devido à maior porosidade.

Análises mineralógicas dos concentrados de flotação demonstraram que a maior parte dos cristais de quartzo remanescentes se encontra associada aos minerais ferrosos.

Interessante ressaltar que a amostra de IC para a qual se obteve concentrado com menor teor de SiO₂ é proveniente da Zona da Tremolita-Antofilita, região de maior grau metamórfico. Este resultado coincide com as constatações de Ferreira et al. [7], sendo que itabiritos de maior grau metamórfico tendem a apresentar cristais maiores, o que tende a promover a liberação dos cristais com cominuição em tamanhos maiores.

Tabela 3. Porosidade e tamanho de cristais em partículas mistas

Amostra	Lito	Zona Metamórfica (Pires [20])	Porosidade Média de Partículas Mistas (%)	Tamanho Médio de Cristais Mistos (mm)
1	IC	ZTA	11	0,068
2	IF	ZTA	22	0,073
3	IC	ZA	4	0,045
4	IF	ZA	35	0,048
5	IC	ZC	3	0,020
6	IF	ZC	39	0,046
7	IC	ZG	7	0,020
8	IF	ZG	36	0,044

Tabela 4. Liberação do quartzo na alimentação da flotação e análise química dos concentrados

Amostra	Lito	Zona Metamórfica (Pires [20])	Quantificação Mineralógica (%) Alimentação da Flotação		Grau de Liberação do Quartzo (%)	Análise Química (%) Concentrado de Flotação								
			Quartzo Livre	Quartzo Misto		Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
1	IC	ZTA	31,3	1,7	95	67,62	1,75	0,051	0,15	0,037	0,036	0,193	0,137	0,24
2	IF	ZTA	30,4	0,4	98	69,04	0,54	0,022	0,03	0,187	0,030	0,024	0,018	0,31
3	IC	ZA	30,0	5,6	84	63,25	7,16	0,049	0,23	0,154	0,021	0,011	0,002	1,79
4	IF	ZA	36,6	0,6	99	67,65	0,53	0,069	0,28	0,062	0,040	0,036	0,041	2,04
5	IC	ZC	29,8	17,4	63	65,10	5,83	0,031	0,12	0,030	0,007	0,020	0,032	0,38
6	IF	ZC	45,4	0,9	98	67,92	1,06	0,022	0,41	0,283	0,022	0,017	0,119	0,69
7	IC	ZG	26,6	4,0	87	61,21	7,07	0,036	1,91	0,415	0,009	0,010	0,123	2,26
8	IF	ZG	32,3	0,3	99	67,24	0,93	0,048	0,57	0,082	0,004	0,035	0,061	1,88

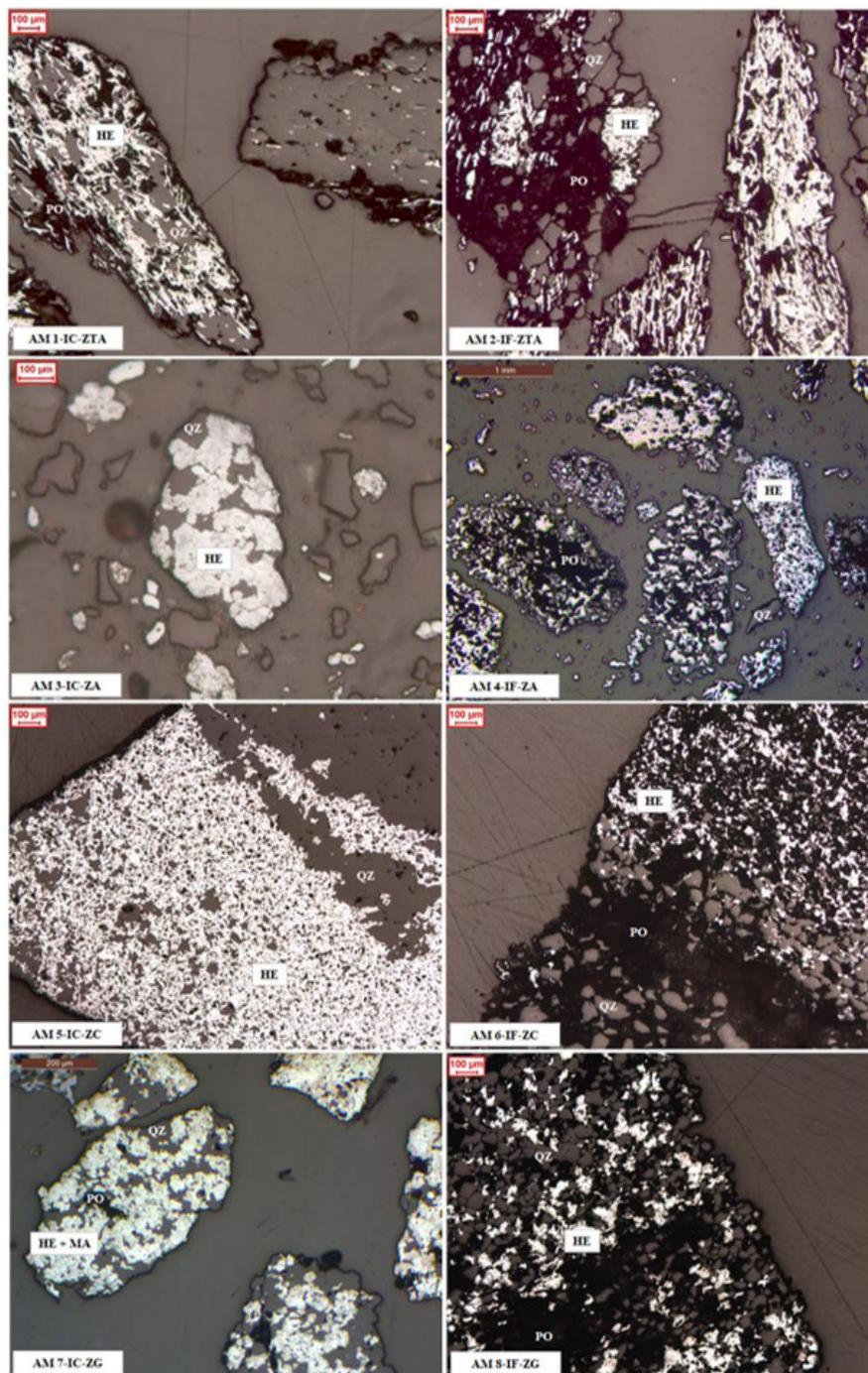


Figura 2. Fotomicrografias de partículas mistas evidenciando a textura típica das amostras. (HE) = hematita; (MA) = magnetita; (QZ) = quartzo; (PO) = poro.

4 Conclusão

Os resultados obtidos evidenciam, para amostras de uma mesma mina e com quantidades similares de quartzo, que itabiritos com maior porosidade nas partículas mistas na alimentação da moagem apresentaram maior grau de liberação do quartzo após moagem, independentemente da origem do itabirito com relação às zonas metamórficas do QF. Todas as amostras com esta característica correspondem

a itabiritos friáveis. Considerando-se o tamanho médio de cristais nas partículas mistas, pode-se concluir que a porosidade favoreceu a ocorrência de liberação por destacamento nas amostras de IF, permitindo a obtenção de concentrados com menor teor de SiO_2 quando cominuídos em uma mesma malha granulométrica com relação a amostras de IC. Pode-se concluir, portanto, que a porosidade gerada por processos supergênicos de lixiviação parcial do quartzo é um fator influente na malha de liberação deste mineral.

Referências

- 1 Dorr JVN. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Rio de Janeiro: DNPM; 1959. (Publicação Especial; no. 1).
- 2 Cabral AR, Zeh A, Koglin N, Gomes AAS Jr, Viana DJ, Lehmann B. Dating the Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: depositional U–Pb age of zircon from a metavolcanic layer. *Precambrian Research*. 2012;204(205):40-45.
- 3 Amorim LQ, Alckmim FF. New ore types from the Cauê banded iron-formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – responses to the growing demand. In: *Proceedings of Iron Ore Conference*; 11-13 Julho 2011; Perth, Austrália. Carlton South: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2011. p. 59-71.
- 4 Lima NP, Torquato NC, Costa JB, Ferreira RF. Rotas de processo para aproveitamento de itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero. In: *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*; 12-16 Setembro 2011; Vila Velha, Brasil. São Paulo: ABM; 2011. p. 587-594.
- 5 Gonçalves C, Lima NP, Torquato NC, Silva S. Rota de processo otimizada para concentração de itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero: 15º Prêmio de Excelência da Indústria Minerometalúrgica Brasileira. *Revista Minérios & Minerais*. 2013;349:20-22.
- 6 Vasconcelos JA, Brandão PRG, Lemos LN. Estudos de caracterização e concentração de itabirito compacto do Complexo Serra Azul, MG. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2012;9(2):89-94.
- 7 Ferreira RF, Silva RG, Marques MLS. Relação entre grau de metamorfismo e malha de liberação de itabiritos compactos do Quadrilátero Ferrífero. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2015;12(2):140-145.
- 8 Guild PW. *Geology and mineral resources of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil*. Washington: United States Government Printing Office; 1957. (Geological Survey Professional Paper; no. 290).
- 9 Dorr JVN II, Barbosa ALM. *Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil*. Washington: United States Government Printing Office; 1963. (Geological Survey Professional Paper; no. 341-C).
- 10 Dorr JVN II. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 1964;59(7):1203-1240.
- 11 Eichler J. O enriquecimento residual e supergênico de itabiritos através de intemperismo. *Geologia*. 1967;1:29-40.
- 12 Ribeiro DT. *Enriquecimento supergênico de formações ferríferas bandadas: estruturas de colapso e desordem [tese]*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2003.
- 13 Biondi JC. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2015.
- 14 Dardenne MA, Schobbenhaus C. *Metalogênese do Brasil*. Brasília: Editora UNB; 2003.
- 15 Gaudin AM. *Principles of mineral dressing*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd; 1939.
- 16 Ferreira RF, Lima RMF. Evolução do espectro de liberação na moagem de itabiritos em diferentes tamanhos e a resposta na flotação. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2015;13(4):302-309.
- 17 Lawn B. *Fracture of brittle solids*. Cambridge: Cambridge University Press; 1993.
- 18 King RP. *Modelling & simulation of mineral processing systems*. Englewood: SME; 2012.
- 19 Hsieh CS, Wen SB. An extension of Gaudin's liberation model for quantitatively representing the effect of detachment in liberation. *International Journal of Mineral Processing*. 1994;42:15-35.
- 20 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.

Recebido em: 25 Jun. 2022

Aceito em: 11 Abr. 2023