

EVOLUÇÃO DO ESPECTRO DE LIBERAÇÃO NA MOAGEM DE ITABIRITOS EM DIFERENTES TAMANHOS E A RESPOSTA NA FLOTAÇÃO

Rodrigo Fina Ferreira ¹
Rosa Malena Fernandes Lima ²

Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo de liberação mineral em duas amostras de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero, itabirito compacto (IC) e itabirito friável (IF), tendo sido obtidos os espectros de liberação do quartzo para ambas através de análises em QEMSCAN[®] após diversos graus de cominuição, a fim de comparar as características e avaliar a evolução do grau de liberação do quartzo com a fragmentação para definição da malha de moagem. Para tal, partículas com participação de quartzo superior a 90% foram consideradas como livres. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os itabiritos no âmbito da liberação. O IF, com elevada porosidade e maior tamanho dos cristais, apresenta tendência de liberação satisfatória em malhas granulométricas mais grossas (P95 em 0,210 mm). O IC apresenta textura e associações complexas, com baixa porosidade e cristais menores, com tendência de liberação em malhas mais finas (P95 em 0,045 mm). Ensaios de flotação em laboratório confirmaram as malhas de moagem definidas pelo estudo mineralógico, tendo-se obtido concentrados com qualidade adequada (teor de SiO₂ inferior a 1,0%) a partir dos minérios moídos nos tamanhos supracitados.

Palavras-chave: Itabiritos; Quadrilátero Ferrífero; Liberação mineral; QEMSCAN.

EVOLUTION ON THE LIBERATION SPECTRA AFTER ITABIRITES GRINDING IN DIFFERENT SIZES AND THE FLOTATION RESPONSE

Abstract

This paper presents a mineral liberation study on two itabirite samples from the Quadrilátero Ferrífero, compact itabirite (IC) and friable itabirite (IF). The liberation spectra for quartz has been measured for both samples through QEMSCAN[®] analysis after several degrees of comminution, aiming to compare the characteristics and evaluate the evolution of the quartz liberation spectra after fragmentation for grinding size definition. For this, particles with more than 90% of quartz have been considered free particles. The results have shown meaningful differences between the itabirites regarding liberation. IF sample, showing high level of porosity and coarser crystals, tends to show satisfactory liberation at coarser sizes (P95 at 0.210 mm). IC sample shows complex texture, with low level of porosity and finer crystals, tending to liberate at a finer size (P95 at 0.045 mm). Batch flotation tests have confirmed the grinding sizes defined by the mineralogical study, yielding concentrates showing adequate quality (SiO₂ content less than 1.0%) from the ores comminuted at the above-mentioned sizes.

Keywords: Itabirites; Quadrilátero Ferrífero; Mineral liberation; QEMSCAN.

I INTRODUÇÃO

I.1 Processamento de Itabiritos Pobres

Ocorre no Quadrilátero Ferrífero (QF) uma ampla gama de minérios de ferro, desde os hematititos brandos e duros com teor de Fe superior a 60%, até itabiritos friáveis

e compactos de vários tipos mineralógicos e com ampla faixa de variação de teor de Fe. Na região, a maior parte da exploração atualmente se concentra em minérios ricos e friáveis, produtos de processos supergênicos e residuais. Obviamente estes recursos são limitados, e o futuro da

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

²Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.



mineração de ferro no QF reside nos itabiritos pobres e compactos, com tendência de aumento na produção de *pellet feed*, já que a concentração destes itabiritos exige a moagem para liberação das fases minerais.

Souza [1] desenvolveu um estudo de definição de rota de processo para aproveitamento de itabiritos compactos e semi-compactos de baixo teor de Fe (40% a 49% Fe) da mina de Conceição, em Itabira, compostos basicamente por hematita e quartzo, propondo um circuito constituído por moagem em 0,150 mm, deslamagem e flotação, sendo que nos testes de laboratório realizados conforme esta rota foram obtidos concentrados com teor de SiO₂ inferior a 0,80%. Gonçalves et al. [2] desenvolveram uma rota otimizada para tratamento de itabiritos pobres de Itabira, através de moagem de bolas em dois estágios, flotação reversa fracionada de grossos e finos e concentração magnética dos rejeitos. A rota otimizada apresenta aumento de 6% na recuperação metálica e redução de US\$0,23/t no custo operacional em relação à rota convencional de moagem em um estágio e flotação. Estes ganhos foram obtidos devido à redução de 20% no consumo de energia na moagem, redução de 20% na geração de lama e redução no consumo de reagentes de flotação.

Novos projetos já incluem nas reservas os itabiritos frescos, dentre eles o projeto Serra Azul da Mineração Usiminas, localizado na região oeste do QF. Amorim e Alkmim [3] classificaram os itabiritos da região em quatro grupos: itabiritos silicosos, dolomíticos, anfíbolíticos e magnetíticos, e caracterizaram e descreveram este último tipo (ainda não descrito na literatura até então). Vasconcelos et al. [4] desenvolveram estudos de caracterização para aproveitamento de itabiritos compactos da região de Serra Azul, constituídos principalmente por hematita martítica e quartzo, com teor médio de Fe de 34,3%. O minério em questão apresentou 92% de grau de liberação do quartzo abaixo de 0,075 mm e 95% abaixo de 0,045 mm. O estudo desenvolvido pelos autores indicou como rota de processo a moagem em 0,150 mm, seguida de concentração magnética de baixo e alto campo, remoagem em 0,053 mm e flotação catiônica reversa, tendo sido obtido um produto com 67,8% Fe e 1,84% SiO₂ e recuperação metálica de 83%.

Lima et al. [5] salientaram a tendência de desenvolvimento de projetos com rotas de processo incluindo a moagem de todo o *run of mine* para posterior concentração para aproveitamento de itabiritos pobres. Os autores apresentaram várias opções de rotas de moagem para beneficiamento dos itabiritos, sendo as mesmas definidas visando redução de *capex* e *opex*, redução na geração de ultrafinos (lamas) e aumento de recuperação metálica. Carvalho [6] desenvolveu um estudo abordando aspectos econômicos e tecnológicos (lavra e beneficiamento) relacionados ao aproveitamento dos minérios de ferro de baixo teor (itabiritos friáveis e médios). O autor abordou o projeto ITMS, desenvolvido para aproveitamento dos itabiritos das minas de Sapicado e Galinheiro, operadas pela Vale em Itabirito, cuja rota

de processo consiste em moagem em dois estágios com posterior deslamagem e flotação.

1.2 Liberação Mineral

Diante do cenário que se apresenta, com rotas de moagem para os novos projetos no QF, estudos de liberação mineral tornam-se imprescindíveis. Existe uma correlação intuitiva entre liberação e fragmentação, ou seja, quanto mais fina a fragmentação mais liberados estariam os minerais, porém há duas razões pelas quais se deve limitar a cominuição ao estritamente necessário: o elevado custo desta operação e as dificuldades inerentes à concentração e recuperação de partículas mais finas. A textura exerce grande influência no modo de fragmentação das partículas e, conseqüentemente, na liberação dos minerais presentes. Processos de metamorfismo e deformação, além dos processos lateríticos, são os principais vetores que alteraram a textura dos minérios de ferro do QF. Ferreira et al. [7] estudaram a relação entre malha de liberação e grau de metamorfismo para itabiritos compactos desta região, constatando que quanto menor o grau metamórfico, mais fina a malha de liberação, sendo esta relação válida para o itabirito fresco, já que para minérios intemperizados outros fatores tornam-se preponderantes, dentre eles a elevação da porosidade devido à lixiviação parcial da sílica.

Gaudin [8] já defendia a possibilidade de se obter certo grau de separação entre partículas mistas de vários tipos, não sendo necessário liberá-las completamente. Pokrajcic e Lewis-Gray [9] salientaram que não limitar partículas recuperáveis às mono - minerais é uma importante premissa na definição da malha de moagem. Seguindo este mesmo conceito, Miller et al. [10] e Gottlieb et al. [11] afirmaram que para aplicações práticas em processo, uma partícula pode ser considerada livre caso sua composição seja superior a 90% da fase mineral de interesse. Na caracterização do minério de ferro magnetítico da mina de MalMBERGET, na Suécia, partículas com participação do mineral de interesse superior a 95% são consideradas livres [12]. Em um estudo envolvendo minérios sulfetados de cobre e zinco australianos, Vizcarra et al. [13] consideraram como livres partículas componentes da classe 80-100 de mineral de ganga. Estas referências evidenciam que a medição de liberação é relativa e depende do minério caracterizado, e neste âmbito não somente o grau de liberação é importante, mas também o espectro de liberação, que consiste na distribuição de composições mineralógicas das partículas na população considerada [14], o qual pode ser obtido por vários métodos, dentre eles o QEMSCAN® [15,16].

A definição da malha de moagem deve levar em consideração também o processo de concentração a ser aplicado. Para a flotação reversa de itabiritos, por exemplo, deve-se considerar a exposição de superfície do quartzo. Na concentração magnética, inclusões de minerais magnéticos em quartzo, mesmo não expostas na superfície, podem direcionar a partícula para o concentrado. Outro fator a ser

considerado é a inclusão de etapas de pré – concentração. Geralmente os minerais de ganga são parcialmente liberados em tamanhos mais grossos [9], sendo importante considerar malhas de moagem sucessivas que possibilitem a remoção de ganga o quanto antes no circuito, reduzindo a quantidade de material a ser cominuído na sequência.

O presente trabalho teve por objetivo definir a malha de moagem para dois tipos de itabirito do Quadrilátero Ferrífero, através da avaliação da evolução do espectro de liberação após moagem em diferentes tamanhos, e correlacionar estes resultados à concentração de cada produto moído por flotação reversa do quartzo, após deslamagem, para confirmação da malha definida pelo estudo mineralógico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas duas amostras de itabirito em minas operadas pela Vale S/A: um itabirito compacto (IC) e um itabirito friável (IF), provenientes das regiões ocidental e oriental do Quadrilátero Ferrífero respectivamente. As amostras foram submetidas a britagem em 1,0 mm em britador de rolos, sendo o produto britado direcionado a análise química global e por frações (por fluorescência de raios X e gravimetria), e quantificação mineralógica modal via microscopia ótica de luz refletida em faixas estreitas de tamanho, por estimativa de área. As amostras foram submetidas a moagem de bolas com P95 nas malhas 0,210 mm; 0,150 mm; 0,105 mm; 0,075 mm e 0,045 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. A Tabela 1 apresenta a distribuição de corpos moedores utilizada.

Foram realizados ensaios em diferentes tempos até que fosse atingido o P95 na malha de controle do teste. Os produtos moídos foram divididos e peneirados em faixas estreitas de tamanho e direcionados à análise mineralógica através do QEMSCAN® modelo Quanta 650 com fonte de tungstênio, sendo obtidos os espectros de liberação. Para as análises foram confeccionadas seções polidas com adição de grafita ultrapura na mesma faixa granulométrica das partículas para desaglomeração das mesmas. Utilizou-se o método de análise PMA (*particle mineral analysis*), com medidas bidimensionais, individualizadas por partícula.

Alíquotas de produto moído foram submetidas à deslamagem a 25% de sólidos em massa e pH 10,5 ajustado com adição de NaOH (5% de concentração). Manteve-se a

polpa em suspensão por meio de agitador mecânico durante 5 minutos. Posteriormente, a polpa permaneceu em repouso durante um intervalo de 15 minutos, para que ocorresse a sedimentação do *underflow*. Posteriormente efetuou-se o sifonamento do material sobrenadante (*overflow*).

Cada *underflow* obtido foi direcionado aos ensaios de flotação, realizados em célula mecânica Denver com cuba de 2.600 mL de volume útil e rotor a 1.200 RPM. O percentual de sólidos da polpa foi ajustado para 50% em massa e o pH de trabalho para 10,5. Utilizou-se como depressor o griz de milho (23 a 24% de amilose e 77 a 76% de amilopectina) gelatinizado com soda cáustica (NaOH) na relação de 10:1 e dosagem de 1.000 g/t. Como coletor foi aplicada amina Flotigam EDA-C (etermonoamina - coletor catiônico de cadeia média, ramificada, com grau de neutralização entre 48 e 52%), fornecida pela Clariant, na dosagem específica de 800 g/tSiO₂. Aplicou-se dosagem elevada de coletor na tentativa de remover o máximo de cristais de quartzo livres (exaustão). Como modulador de pH foi utilizada soda cáustica (NaOH) a 50%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a quantificação mineralógica modal, calculada com base na análise por faixas em microscópio ótico, além das análises químicas globais.

As amostras apresentam teores de Fe e SiO₂ similares, e diferenças pouco significativas ocorrem nos teores de CaO e MgO, que são mais elevados no IC, e no PPC, mais elevado no IF devido ao maior grau de alteração intempérica. Na amostra IC, predominam as hematitas de morfologia sinuosa, martítica e granular dentre os minerais minério. Há maior participação de magnetita nesta amostra, o que pode indicar menor nível de alteração. Ocorrem ainda hidróxidos de ferro, tanto na forma de goethita compacta quanto terrosa, esta última em menor proporção. Quanto aos minerais contaminantes predomina o quartzo, com traços de óxidos de manganês, caulinita e gibbsita. Há ocorrência sulfetos e carbonatos no IC, porém com participação ínfima, tendo sido quantificados como “Outros”. A amostra IF é essencialmente martítica, com menor participação de magnetita. A participação de goethitas é ligeiramente superior ao IC, o que explica os valores de PPC mais elevados. Quartzo predomina dentre os minerais contaminantes, havendo traços de óxidos de manganês, caulinita, gibbsita e outros minerais.

Na Figura 1 estão apresentadas as distribuições granulométricas dos produtos de britagem e moagem. No produto britado em 1,0 mm o IC apresenta distribuição granulométrica mais grossa entre as malhas 0,045 e 0,800 mm. Porém nos produtos moídos com P95 em 0,210 e 0,150 mm a distribuição desta amostra é mais fina, o que pode ser explicado pelo menor tamanho dos cristais (o IC é uma amostra da região ocidental do QF, de menor grau metamórfico e com menor tamanho de cristais [17]).

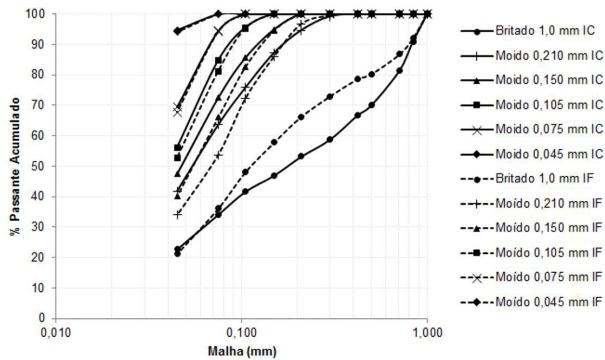
Tabela 1. Carga de corpos moedores

Diâmetro (mm)		Massa (g)	
Valor Padrão	Desvio Aceitável	Valor Padrão	Desvio Aceitável
38,1	± 3	11007	± 50
25,4	± 2	3430	± 20
19,1	± 2	1527	± 10
12,7	± 2	913	± 5

Tabela 2. Quantificação mineralógica modal e análise química global

Amostra	Quantificação Mineralógica (%)												
	Hematita Especular	Hematita Lamelar	Hematita Granular	Hematita Sinuosa	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo	Óxidos Mn	Caulinita	Gibbsita	Outros
IC	2,76	6,77	12,05	16,56	13,67	12,20	6,99	1,62	26,66	0,13	0,05	0,48	0,04
IF	0,65	6,99	13,29	0,42	32,08	3,61	11,83	0,41	30,34	0,01	0,13	0,24	0,01

Amostra	Análise Química								
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
IC	49,57	27,02	0,073	0,60	0,075	0,025	0,112	0,043	1,07
IF	47,37	28,86	0,071	0,43	0,086	0,021	0,005	0,001	2,43

**Figura 1.** Distribuição granulométrica após cominuição em vários tamanhos.

Os gráficos das Figuras 2 e 3 apresentam os espectros de liberação do quartzo para o produto britado a 1,0 mm e para os produtos moídos nas várias malhas granulométricas de controle, obtidos nas análises via QEMSCAN®, nos quais é possível averiguar a evolução da liberação do quartzo nas duas amostras à medida que é realizada fragmentação em tamanhos cada vez menores.

Considerando como livres partículas com participação de quartzo superior a 90%, o espectro de liberação do IF britado a 1,0 mm mostra grau de liberação de 48% na fração -1,0 + 0,5 mm, e o restante do quartzo encontra-se distribuído principalmente em partículas com menos de 40% do mineral de ganga na composição. Nas malhas inferiores a 0,5 mm o percentual de quartzo livre eleva-se ainda mais, e já não se observa grande percentual de partículas nas classes inferiores a 40%, mas sim acima de 90%. Na fração -0,21 + 0,15 mm o grau de liberação do quartzo já atinge 98,5%. Para o IF ocorreu uma elevação considerável na liberação do quartzo já com a moagem em 0,210 mm, para todas as classes de tamanho. O espectro de liberação deslocou-se quase que completamente para as classes superiores a 90% de quartzo na partícula, e assim ocorreu para os outros testes de moagem nas demais malhas de controle, sendo as distribuições bastante similares. Os dados mostraram que o IF é um minério de fácil liberação, e tal fato pode estar associado às características texturais, como a ocorrência significativa de poros conectados, formando zonas de fraqueza nas partículas, feições típicas de itabiritos friáveis, e também o maior tamanho dos cristais.

O espectro de liberação do produto britado a 1,0 mm do IC é mais complexo. O grau de liberação do quartzo no IC

é inferior ao IF em todas as frações granulométricas. Na fração mais grossa, -1,0 + 0,5 mm, verifica-se um espectro bastante amplo, com partículas distribuídas em todas as classes de composição, com maior concentração entre 80 e 40% de participação de quartzo. Para as frações granulométricas mais finas o grau de liberação aumenta progressivamente, atingindo um máximo de 93% na fração abaixo de 0,045 mm. Apesar de já evidenciar a presença de grande proporção de cristais de quartzo livres desde o primeiro grau de cominuição, o espectro de liberação do IC permaneceu mais distribuído até a moagem em 0,075 mm. O espectro referente ao produto moído em 0,045 mm já apresenta a grande maioria das partículas nas classes com mais de 90% de quartzo. Os dados mostram que o itabirito compacto é um minério de liberação mais difícil, reflexo das características texturais da rocha, cujas partículas são mais coesas, com menor porosidade e cristais menores e imbricados.

Para as duas amostras constatou-se ocorrência considerável de partículas livres já nos primeiros graus de cominuição, variando a quantidade entre os dois tipos de itabirito. Tal fato evidencia a importância da aplicação de processos de pré-concentração no tratamento destes minérios, para que os cristais livres do mineral de ganga sejam removidos o mais breve possível do circuito, para minimizar o consumo de energia na fragmentação. Todo o esforço de redução de tamanho para liberação deve ser aplicado às partículas ainda mistas.

Seguindo o conceito proposto por Miller et al. [10] e Gottlieb et al. [11], segundo o qual para aplicações de processo e considerando-se a flotação pode-se classificar partículas com participação de quartzo superior a 90% como livres, constatou-se que a moagem do IF com P95 em 0,210 mm e do IC com P95 em 0,045 mm deve resultar em bom desempenho na concentração, adotando-se meta de teor de SiO₂ inferior a 1,0% no *pellet feed*.

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados para averiguar a evolução da qualidade química do concentrado, à medida que os itabiritos foram submetidos a diferentes graus de cominuição (com exceção do produto britado a 1,0 mm, por limitação de granulometria na flotação em célula mecânica). Deste modo é possível correlacionar o grau de liberação do quartzo (que aumenta com o grau de cominuição) com o desempenho da concentração. A flotação foi conduzida nas etapas *rougher* e *cleaner* apenas, nas quais se buscou atingir a exaustão do quartzo livre e das partículas

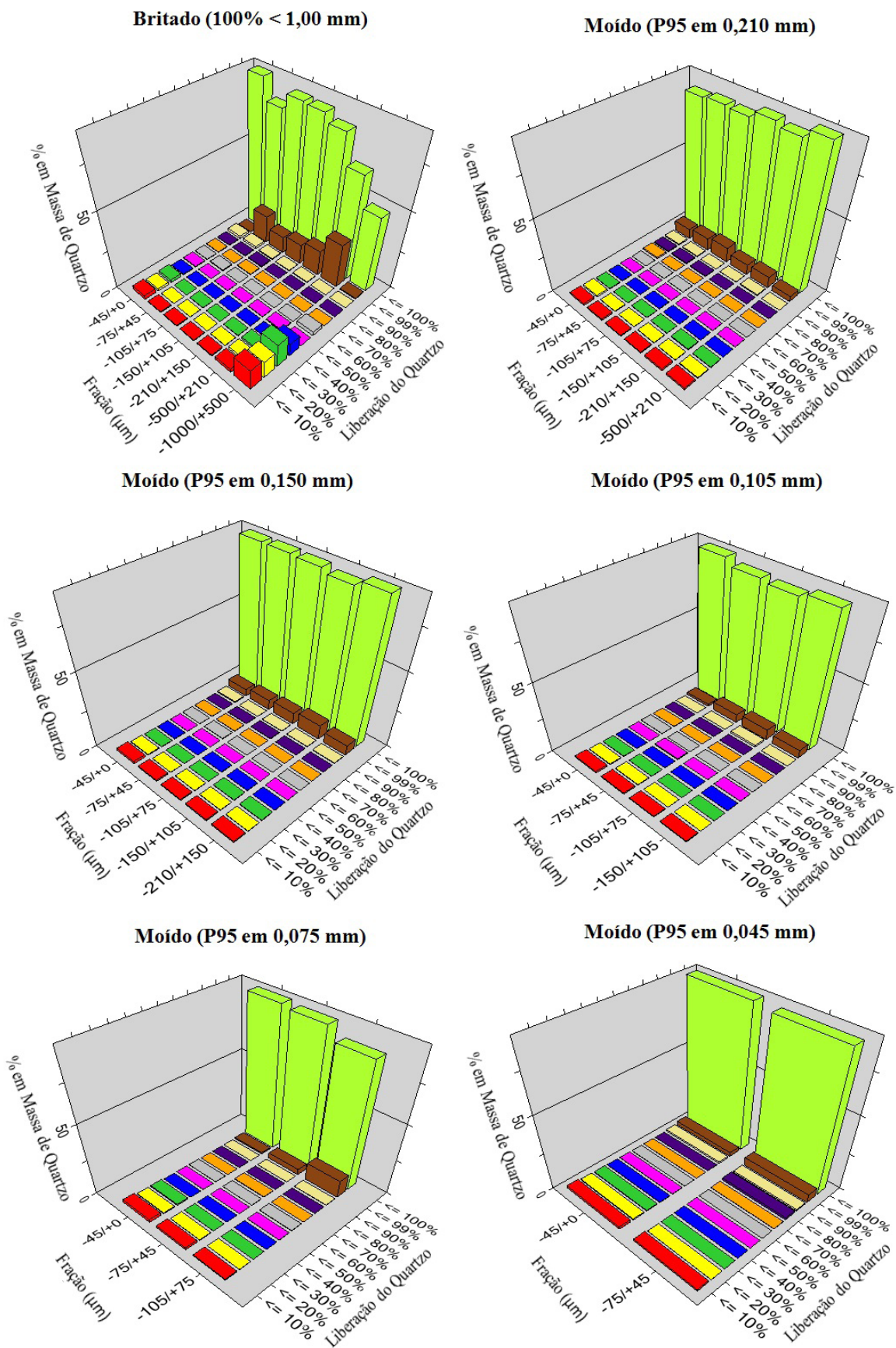


Figura 2. Espectro de liberação para os diferentes graus de cominuição – itabirito friável.

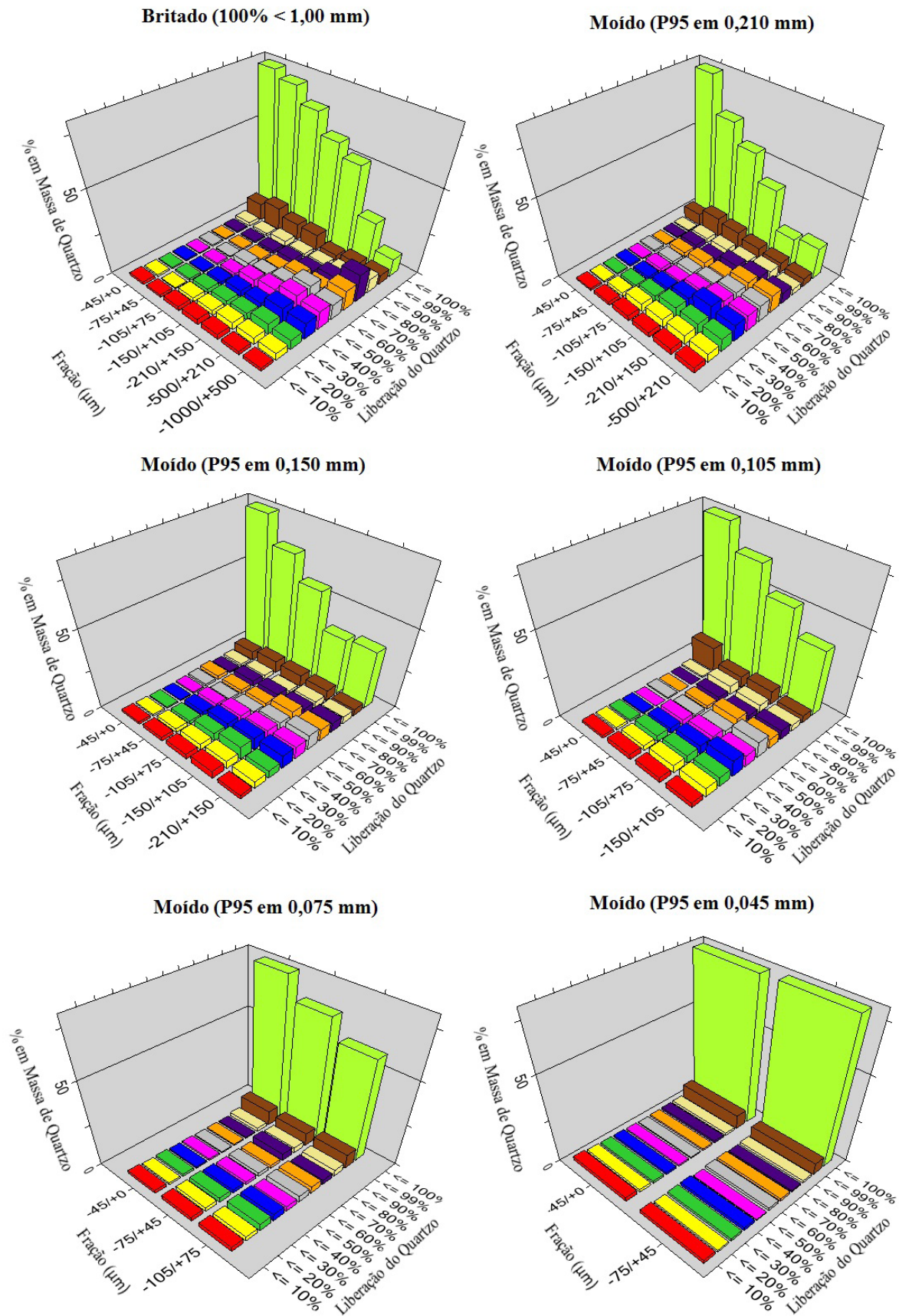


Figura 3. Espectro de liberação para os diferentes graus de cominuição – itabirito compacto.

Tabela 3. Análise química dos concentrados de flotação para cada produto moído

Amostra	Malha de Moagem P95 (mm)	Análise Química (%)								
		Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
IC	0,210	66,79	3,47	0,055	0,35	0,085	0,043	0,064	0,057	0,95
	0,150	67,50	2,27	0,059	0,43	0,087	0,046	0,059	0,055	0,94
	0,105	67,33	2,01	0,055	0,42	0,083	0,045	0,056	0,069	0,86
	0,075	68,13	1,67	0,054	0,41	0,079	0,047	0,022	0,037	0,72
	0,045	68,25	0,98	0,054	0,33	0,098	0,042	0,069	0,039	0,67
IF	0,210	67,02	1,03	0,099	0,50	0,116	0,048	0,023	0,039	3,09
	0,150	66,34	0,98	0,093	0,50	0,112	0,046	0,021	0,032	2,96
	0,105	67,42	0,75	0,090	0,42	0,109	0,045	0,019	0,027	2,80
	0,075	67,09	0,73	0,086	0,42	0,106	0,047	0,019	0,026	2,61
	0,045	67,40	0,73	0,093	0,56	0,132	0,033	0,002	0,010	2,75

mistas “flotáveis”. Salienta-se que esta avaliação se ateu à qualidade química do concentrado. A Tabela 3 apresenta as análises químicas dos concentrados obtidos para cada produto moído.

Os resultados obtidos na flotação evidenciaram que é possível obter teores de SiO₂ menores no concentrado do IF com moagem em malhas mais grossas, corroborando todas as previsões do estudo de liberação. Com moagem em 0,210 mm foi obtido um concentrado com cerca de 1% de SiO₂, e para as moagens em malhas mais finas o teor deste deletério tende a estabilizar em valores próximos a 0,70%. Para a amostra de IC este nível de qualidade só foi obtido com o produto moído em 0,045 mm. Os resultados confirmaram as definições de malha de moagem efetuadas com base no espectro de liberação, na abordagem segundo a qual as partículas com mais de 90% de quartzo foram consideradas livres.

4 CONCLUSÃO

A caracterização das amostras de itabiritos friável (IF) e compacto (IC) evidenciou diferenças significativas entre os dois tipos de minério no âmbito da liberação das fases minerais.

O IF apresenta características que facilitam a liberação, como elevada porosidade e maior tamanho dos cristais, o que implica na tendência de liberação satisfatória com cominuição em malhas granulométricas mais grossas. O IC apresenta textura e associações minerais mais complexas, com baixa porosidade e sem ocorrência de zonas de fraqueza nas partículas, com cristais menores, sendo necessário aplicar moagem em malhas mais finas para liberação satisfatória.

Os espectros de liberação dos produtos de cominuição mostraram que a moagem do IF com P95 em 0,210 mm, e com P95 em 0,045 mm para o IC devem resultar em liberação satisfatória para posterior concentração, levando em consideração que partículas com mais de 90% de quartzo em sua composição podem ser consideradas livres para efeito de processo. Ensaio de flotação confirmaram as malhas de moagem definidas por meio das análises mineralógicas e validaram as premissas adotadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S/A, especialmente à equipe do Centro de Pesquisas Tecnológicas, e ao CNPq, pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Souza ES. Rota de processo para aproveitamento de rochas itabiríticas estereis da Mina de Conceição [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.
- 2 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 & Minerale. 2013;349:20-22.
- 3 Amorim LQ, Alkmim FF. New ore types from the Cauê Banded Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: responses to the growing demand. In: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of the Iron Ore Conference; 2011 Julho 11-13; Perth, Australia. Victoria: AusIMM; 2011. p. 59-71.
- 4 Vasconcelos JA, Brandão PRG, Lemos LN. Estudos de caracterização e concentração de itabirito compacto do Complexo Serra Azul, MG. Tecnológica em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2012;9(2):89-94.

- 5 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; 2011 Setembro 12-16; Vila Velha, Brasil. São Paulo: ABM, 2011. p. 587-594.
- 6 Carvalho BCL. Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra [dissertação de mestrado]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2012.
- 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 Gaudin AM. Principles of mineral dressing. New Delhi: Tata McGraw-Hill; 1939.
- 9 Pokrajcic Z, Lewis-Gray E. Advanced comminution circuit design: essential for industry. *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin*. 2010;38:42.
- 10 Miller PR, Reid AF, Zuiderwyk MA. QEMSEM image analysis in the determination of modal assays, mineral associations and mineral liberation. In: Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of the XIV International Mineral Processing Congress; 1982 Outubro 17-23; Toronto, Canadá. Toronto: CIMM; 1983. p. 3.1-3.20.
- 11 Gottlieb P, Adair BJI, Wilkie GJ. QEM*SEM liberation indices for grinding classification and flotation. In: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of the V Mill Operator`s Conference; 1994 Outubro 16-20; Roxby Downs, Australia. Victoria: AusIMM; 1994. p. 5-13.
- 12 Mwangi A, Lamberg P, Rosenkranz J. Liberability: A new approach for measuring ore comminution behaviour. In: Minerals Engineering International. Proceedings of the 3rd International Symposium on Process Mineralogy; 2014 Novembro 17-19; Cape Town, South Africa. p. 126-142.
- 13 Vizcarra TG, Wightman EM, Johnson NW, Manlapig EV. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphides ores. *Minerals Engineering*. 2010;23:374-382.
- 14 Lin CL, Miller JD. Cone beam X-ray microtomography for three-dimensional liberation analysis in the 21st century. *International Journal of Mineral Processing*. 1996;47:61-73.
- 15 Jaime P, Gottlieb P, Butcher A, Dobbe R. The Applicability of automated mineralogy on process planning, process optimisation, quality control, audit studies and trouble shooting, with emphasis on processing plants. In: Proceedings of the VI International Mineral Processing Seminar – Procemin; 2009 Dezembro 2-4; Santiago, Chile. Santiago: GECAMIN; 2009.
- 16 Donskoi E, Manuel JR, Austin P, Poliakov A, Peterson MJ, Hapugoda S. Comparative study of iron ore characterization by optical image analysis and QEMSCANTM. In: Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Proceedings of the Iron Ore Conference; 2011 Julho 11-13; Perth, Australia. Victoria: AusIMM; 2011. p. 213-222.
- 17 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: 19 Nov. 2015

Aceito em: 12 Abr. 2016