

Avaliação da abordagem heurística para liberação mineral em itabiritos

Rodrigo Fina Ferreira ^{1*} 
Rosa Malena Fernandes Lima ² 

Resumo

Caracterizar a liberação mineral é um dos papéis fundamentais da mineralogia aplicada ao tratamento de minérios, e muito esforço tem sido aplicado ao longo do tempo no desenvolvimento de ferramentas para este fim, tanto no âmbito de técnicas de medição quanto em modelagem. Diversos autores reportaram um padrão nas características de liberação para diferentes tipos de minério, constatando empiricamente que o grau de liberação do mineral de interesse em uma determinada faixa de tamanho é o mesmo independentemente do grau de cominuição. Caso esta abordagem heurística seja válida, tem-se uma ferramenta útil em estudos de caracterização, porém, não existem evidências de que este padrão seja universal. O presente estudo teve por objetivo avaliar a aplicabilidade da abordagem heurística para liberação mineral em itabiritos do Quadrilátero Ferrífero. Os resultados demonstraram que o grau de liberação do quartzo em uma determinada fração granulométrica apresenta certo nível de variação entre produtos de diferentes graus de cominuição, mas esta diferença tende a reduzir nas faixas mais finas. Conclui-se que a abordagem heurística pode ser uma ferramenta útil para avaliar tendências relacionadas a liberação, mas alguns cuidados devem ser tomados. A aplicabilidade da heurística depende do objetivo e da precisão desejada na caracterização.

Palavras-chave: Itabiritos; Liberação mineral; Heurística.

Evaluation of the mineral liberation heuristics approach for itabirites

Abstract

Mineral liberation characterization is a fundamental role of applied mineralogy in mineral processing. Over time, considerable effort has been devoted to developing tools for this purpose, both in terms of measurement techniques and modelling. Several authors have reported a pattern in liberation characteristics for different types of ore, empirically finding that the degree of liberation of the target mineral in a given size fraction is the same regardless of the degree of comminution. If this heuristic approach is valid, it becomes a useful tool in characterization studies. However, there is no evidence that this pattern is universal. This study aimed to evaluate the applicability of the heuristic approach for mineral liberation in Quadrilátero Ferrífero itabirites. The results showed that quartz degree of liberation in a given size fraction exhibits some variation between products of different degrees of comminution, but this difference tends to decrease in finer size fractions. It is concluded that the heuristic approach can be a useful tool for evaluating liberation trends, but some precautions should be taken. The applicability of the heuristic depends on the objective and the desired accuracy in the characterization.

Keywords: Itabirites; Mineral liberation; Heuristics.

1 Introdução

O declínio dos minérios de ferro de alto teor impulsiona no Quadrilátero Ferrífero a exploração de itabiritos, minérios mais desafiadores que exigem concentração para atender às especificações do mercado [1]. A rota de processamento tradicional, composta por britagem, moagem, deslamagem e flotação catiônica reversa do quartzo, gera o concentrado direcionado para a pelotização.

A etapa crucial de moagem, responsável pela liberação dos minerais de ferro da ganga, precisa ser cuidadosamente dimensionada para evitar a sobre moagem, que acarreta geração excessiva de finos, com consequente redução de recuperação mássica e metálica, além de maior consumo energético. Neste contexto, a correta determinação da malha de liberação é essencial.

¹Desenvolvimento de Processo Mineral, Vale S/A, Nova Lima, MG, Brasil.

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

*Autor correspondente: rodrigo.fina@vale.com



Desde o trabalho clássico de Gaudin [2], inúmeros estudos têm sido conduzidos com intuito de desenvolver modelos capazes de prever a evolução da liberação mineral com a redução do tamanho das partículas [3-14], porém, na prática, ainda não há modelos com aplicação difundida, e a determinação das malhas de liberação e de moagem é determinada com base em testes de laboratório. O modo mais direto de se definir em qual tamanho as fases minerais presentes em um determinado minério apresentam grau de liberação satisfatório para o processo de concentração consiste em determinar as curvas de qualidade de produto versus malha de moagem, ou seja, submeter o minério a moagem em diversas malhas granulométricas com posterior concentração e avaliar em qual tamanho se obtém a qualidade química especificada para o produto. Uma outra abordagem, indireta e heurística, consiste em considerar que o grau de liberação em uma determinada faixa de tamanho do minério se mantém constante independentemente da distribuição granulométrica do material [15]. Na prática se cominui o minério em um determinado tamanho, classifica-se o material em faixas estreitas de tamanho e analisa-se o grau de liberação do mineral de interesse em cada fração, inferindo-se que os valores obtidos serão mantidos caso o minério seja cominuído em tamanhos mais finos.

Diversos autores observaram este padrão em vários tipos de minério. Bérubé e Marchand [16] estudaram a evolução da liberação mineral com a cominuição em vários tamanhos em minérios de ferro do Canadá, concluindo que o grau de liberação das faixas de tamanho analisadas se manteve o mesmo para diferentes malhas de moagem para frações abaixo de 48 mesh, e sugerindo que este padrão possa se repetir para outros tipos de minério, especialmente aqueles que tendem a se fragmentar nos contatos entre os cristais. Manlapig et al. [17] estudaram o comportamento de um minério de chumbo/zinco com relação à liberação, concluindo que o nível de liberação das fases majoritárias em cada faixa de tamanho se manteve constante para diferentes níveis de moagem. Evans e Wightman [18] caracterizaram 5 tipos diferentes de minérios sulfetados, os quais foram cominuídos em diversos tamanhos por diferentes métodos de cominuição, sendo fracionados por tamanho com posterior determinação do espectro de liberação, e concluíram que, para as amostras testadas, as características de liberação em uma determinada faixa de tamanho são independentes tanto do método de cominuição quanto do tamanho no qual o minério foi fragmentado. As autoras ressaltaram que este comportamento provê um potencial método para modelar a liberação em processos de cominuição. Vizcarra et al. [19] obtiveram as mesmas conclusões para duas amostras de minérios sulfetados. A abordagem heurística foi utilizada na prática por alguns autores em estudos de otimização em processos de cominuição e concentração [20,21]. O fato de ser possível replicar o grau de liberação de um mineral de interesse em uma faixa de tamanho para diferentes malhas de cominuição a partir da amostra cominuída em uma única

malha representa uma redução considerável de esforço laboratorial em estudos de liberação.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a aplicabilidade da abordagem heurística de liberação mineral a itabiritos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), ou seja, avaliar se é possível inferir que o grau de liberação do mineral de interesse em uma determinada faixa de tamanho se mantém constante independentemente da malha de cominuição. Como no processamento dos itabiritos por flotação o quartzo é o mineral flotado, toda a análise de liberação tem foco neste mineral. O estudo é complementar ao trabalho [1] e fez uso das mesmas amostras.

2 Materiais e métodos

Foram coletadas uma amostra de itabirito compacto (IC) e uma amostra de 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 uma alíquota do produto britado direcionada para análise química, e outra alíquota direcionada para fracionamento em faixas estreitas de tamanho por peneiramento a úmido entre 1,0 mm e 0,045 mm, para quantificação mineralógica modal e determinação do grau de liberação do quartzo. A composição mineralógica global das amostras foi calculada a partir dos resultados obtidos nas frações granulométricas. As amostras foram posteriormente 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. As análises granulométricas para controle da moagem foram realizadas via peneiramento a úmido, com tempo de 15 minutos. Cada produto moído foi também fracionado em faixas de tamanho por peneiramento a úmido até 0,045 mm, com posterior determinação do grau de liberação do quartzo.

A caracterização química foi realizada via fluorescência de raios X (espectrômetro Rigaku Simultix 12), sendo quantificados os elementos e compostos Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn, TiO₂, CaO e MgO. Analisou-se o PPC (perda por calcinação) via gravimetria, calculando-se a perda de massa após calcinação em mufla a 1.000 °C por 1 hora.

A determinação do grau de liberação do quartzo foi realizada por dois métodos:

- Microscopia ótica de luz refletida (MOLR): realizou-se a quantificação mineralógica modal por estimativa de área em microscópio Leica DM6000M, realizando-se varredura de toda a seção polida, utilizando-se uma mesma lente objetiva para a medição de área, e desconsiderando-se os campos próximos às bordas da seção. Para obtenção da quantificação dos minerais em massa multiplicou-se a área medida pela massa específica do respectivo mineral.

- Análise automatizada baseada em microscopia eletrônica: utilizou-se o sistema QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by SCANning electron microscopy*) modelo Quanta 650 com fonte de tungstênio, o qual emprega análises de elétrons retroespalhados (BSE) e de raios X para identificar os minerais. 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.

Para os dois métodos calculou-se o grau de liberação conforme a Equação 1.

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

3 Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta imagens macroscópicas e fotomicrografias obtidas em MOLR para as amostras caracterizadas, evidenciando as diferenças entre os dois tipos de minério. O IC se caracteriza por maior coesão, com cristais de granulação muito fina. No IF os cristais são maiores, e a rocha se apresenta pouco coesa, sendo possível destacar uma camada da outra manualmente, com pouco esforço, ocorrendo desprendimento de quantidade considerável de

cristais, principalmente de quartzo. As fotomicrografias mostram menor porosidade no IC.

A Tabela 1 apresenta a composição química e mineralógica global das amostras.

Verifica-se que as amostras são quimicamente semelhantes, com teores de Fe e SiO₂ similares, sendo este último composto o principal contaminante. As maiores diferenças, que ainda assim não são muito significativas, ocorrem nos teores de CaO e MgO, que são mais elevados no IC, e no PPC, mais elevado no IF. As duas amostras são compostas predominantemente por óxidos e hidróxidos de Fe e por quartzo. A amostra IC apresenta maior participação de magnetita, e a amostra IF apresenta maior proporção de hematita martítica e goethita, indicando se tratar de um material mais alterado por processos intempéricos.

Na Figura 2 estão apresentadas as distribuições granulométricas dos produtos da britagem em 1,0 mm e moagem nas diversas malhas estudadas. No produto britado em 1,0 mm a amostra IC apresenta distribuição granulométrica mais grossa entre as malhas 0,105 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, sendo que o itabirito compacto caracterizado é proveniente da região ocidental do QF, de menor grau metamórfico e conseqüente menor tamanho de cristais [22].

As Tabelas 2 e 3 apresentam o grau de liberação do quartzo por fração granulométrica para cada um dos produtos

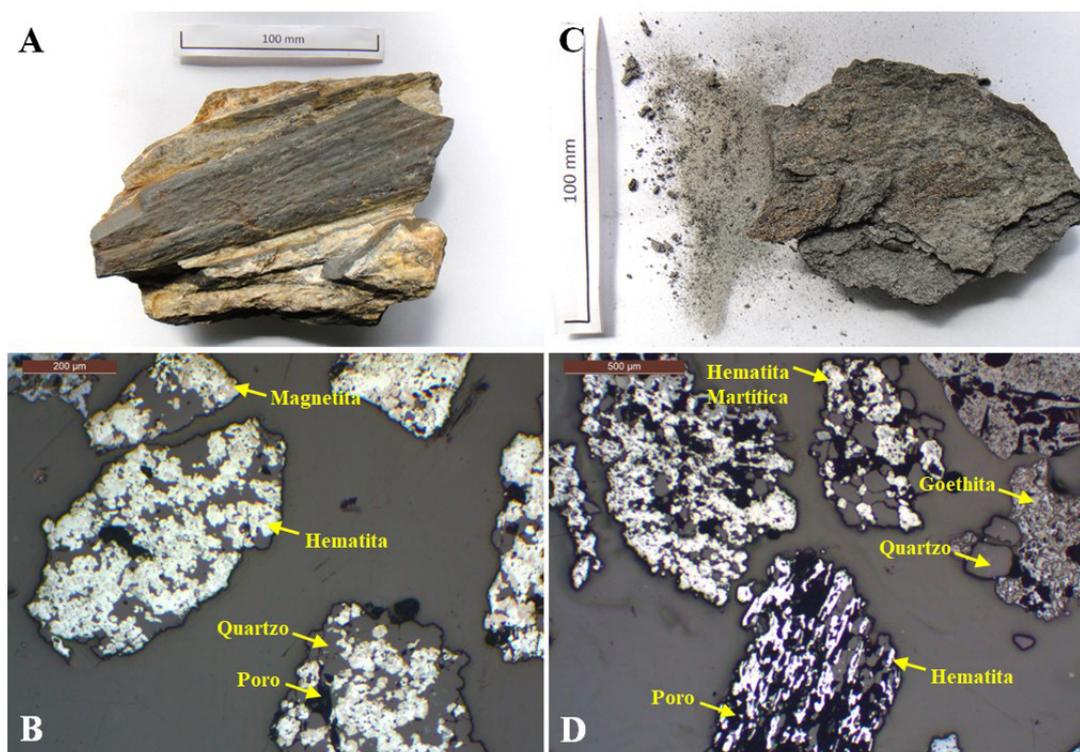


Figura 1. Imagem macroscópica e fotomicrografia de MOLR (nicóis paralelos) para o IC (A e B) e IF (C e D).

Tabela 1. Caracterização química e mineralógica

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
Amostra	Quantificação Mineralógica (%)								
	Hematita	Hematita Martítica	Magnetita	Goethita	Goethita Terrosa	Quartzo	Outros		
IC	38,15	13,67	12,20	6,99	1,62	26,66	0,70		
IF	21,34	32,08	3,61	11,83	0,41	30,34	0,38		

Tabela 2. Grau de liberação do quartzo por fração granulométrica no IC

Método	Fração (mm)	Grau de Liberação do Quartzo (%)						Média	Desvio Padrão
		Britado 1,0 mm	Moído 0,210 mm	Moído 0,150 mm	Moído 0,105 mm	Moído 0,075 mm	Moído 0,045 mm		
MOLR	- 1,00+0,50	16	-	-	-	-	-	16	-
	-0,50+0,21	33	23	-	-	-	-	28	6,9
	- 0,21+0,15	54	25	39	-	-	-	39	14,8
	-0,15+0,105	58	47	40	40	-	-	46	8,4
	-0,105+0,075	78	70	59	62	68	-	67	7,7
	-0,075+0,045	84	80	82	74	83	86	82	4,1
	- 0,045	95	96	97	94	95	94	95	1,1
QEM SCAN	- 1,00+0,50	11	-	-	-	-	-	11	-
	-0,50+0,21	26	20	-	-	-	-	23	4,1
	- 0,21+0,15	52	18	37	-	-	-	36	17,3
	-0,15+0,105	59	41	35	38	-	-	43	10,5
	-0,105+0,075	69	55	56	52	59	-	58	6,6
	-0,075+0,045	77	66	69	66	70	80	71	6,0
	- 0,045	80	85	84	78	81	80	81	2,5

Tabela 3. Grau de liberação do quartzo por fração granulométrica no IF

Método	Fração (mm)	Grau de Liberação do Quartzo (%)						Média	Desvio Padrão
		Britado 1,0 mm	Moído 0,210 mm	Moído 0,150 mm	Moído 0,105 mm	Moído 0,075 mm	Moído 0,045 mm		
MOLR	- 1,00+0,50	49	-	-	-	-	-	49	-
	-0,50+0,21	94	96	-	-	-	-	95	1,6
	- 0,21+0,15	96	97	98	-	-	-	97	0,8
	-0,15+0,105	99	99	98	98	-	-	98	0,6
	-0,105+0,075	99	99	97	99	98	-	98	0,8
	-0,075+0,045	99	99	98	99	99	100	99	0,7
	- 0,045	99	100	100	100	100	100	100	0,2
QEM SCAN	- 1,00+0,50	48	-	-	-	-	-	48	-
	-0,50+0,21	65	94	-	-	-	-	80	20,2
	- 0,21+0,15	82	89	91	-	-	-	87	5,0
	-0,15+0,105	86	91	88	93	-	-	90	2,9
	-0,105+0,075	87	88	91	90	93	-	90	2,3
	-0,075+0,045	79	89	91	92	90	90	89	4,8
	- 0,045	91	87	91	96	92	93	92	2,7

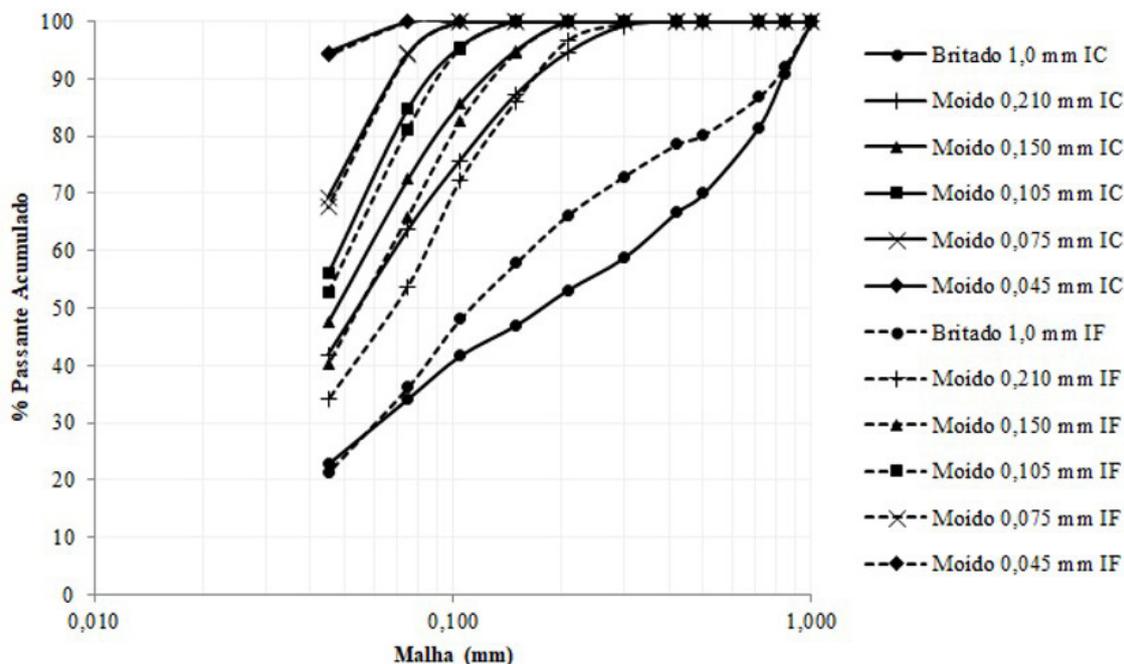


Figura 2. Distribuição granulométrica pós cominuição.

de cominuição, contendo os resultados obtidos através das duas técnicas utilizadas.

Comparando-se primeiramente os resultados entre as duas amostras, observa-se, de uma maneira geral, maior grau de liberação do quartzo para a amostra IF. Esta comparação e as implicações deste fato para o processo de concentração foram explorados detalhadamente em trabalho anterior [1]. Comparando-se as duas técnicas de análise constatou-se diferença sistemática nos resultados, sendo que o QEMSCAN tende a fornecer grau de liberação inferior ao MOLR. Segundo Spencer e Sutherland [23], o método da inversão da função de transformação (kernel) para conversão estereológica está implementado no *software* do sistema QEMSCAN, o que explicaria a obtenção sistemática de grau de liberação mais baixo. Porém, os autores do presente estudo não puderam confirmar se esta informação ainda é válida nas versões mais recentes do sistema, que não se encontra mais em produção.

Avaliando-se o grau de liberação do quartzo em uma mesma fração granulométrica para os diferentes produtos de cominuição, observa-se que existe certa variação no IC para ambas as técnicas de análise, e para o IF no QEMSCAN. Os resultados do IF no MOLR são elevados e muito similares, não somente numa mesma faixa de tamanho, mas de uma forma geral. Na amostra IC houve um comportamento similar no grau de liberação das faixas de tamanho: o desvio padrão do grau de liberação para as diferentes malhas de cominuição iniciou em um valor intermediário na fração $-0,5 + 0,21$ mm, aumentou consideravelmente na fração $-0,21 + 0,15$ mm, e voltou a reduzir, decaindo de forma constante nas faixas mais finas, até atingir um valor baixo

em $-0,045$ mm. Já na amostra IF analisada no QEMSCAN, o desvio padrão tem início em um valor mais elevado já na primeira faixa de tamanho ($-0,5 + 0,21$ mm), com tendência de queda na sequência. Para as duas amostras nos dois métodos, o desvio padrão se mantém inferior a 10,5 abaixo da malha de 0,150 mm. O comportamento constatado nas amostras de itabirito é consistente com a literatura para minério de ferro canadense [16], sugerindo que a liberação mineral varia pouco com a malha de cominuição a partir de um determinado tamanho.

Na maior parte dos casos, tanto no IC quanto no IF, as diferenças são maiores quando se compara as frações grossas do produto britado em 1 mm com os produtos moídos, provavelmente devido às diferenças nos mecanismos de fragmentação, que devem gerar diferentes padrões de quebra nas partículas implicando na obtenção de graus de liberação distintos. Interessante ressaltar que, para a amostra de IC numa mesma fração granulométrica, o grau de liberação do quartzo no produto britado em 1,0 mm é maior que nos produtos moídos, na maioria das frações. Tal fato ocorreu tanto nas medições do QEMSCAN quanto do MOLR. Porém, na amostra de IF ocorreu o inverso para o QEMSCAN, e no caso do MOLR os valores do produto britado são muito próximos dos produtos moídos.

As Figuras 3 e 4 apresentam *grids* de composição de partículas de uma mesma fração granulométrica até a fração $-0,150 + 0,105$ para os diferentes produtos de cominuição, possibilitando a visualização em termos de partículas e classes de associação, do que foi apresentado numericamente nas Tabelas 2 e 3, evidenciando as diferenças entre os dois tipos de itabirito.

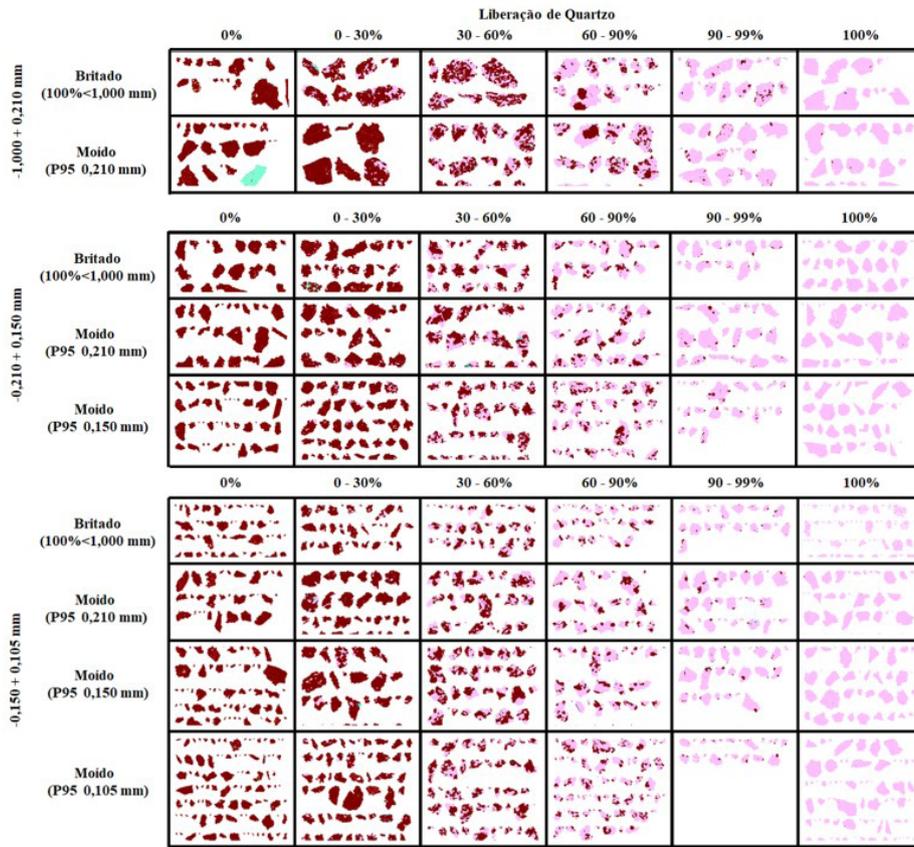


Figura 3. Grids de composição de partículas para a amostra IC – relativo ao % de quartzo.

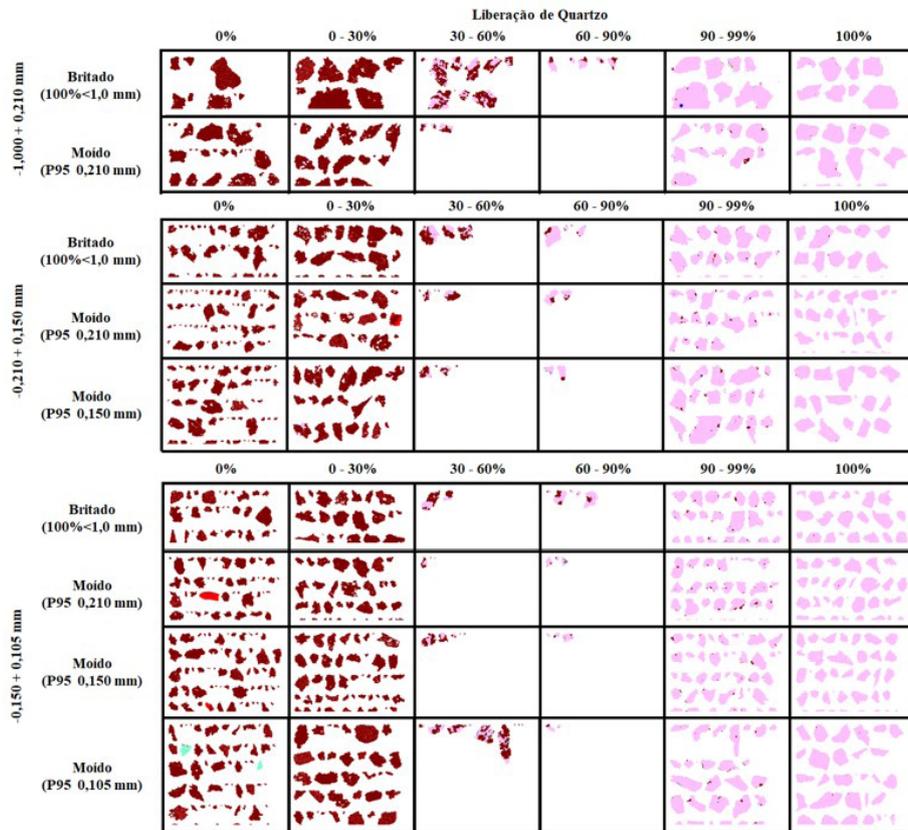


Figura 4. Grids de composição de partículas para a amostra IF – relativo ao % de quartzo.

4 Conclusão

O presente estudo investigou a aplicabilidade da abordagem heurística de liberação mineral na caracterização de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero, com foco na liberação do quartzo. A análise do grau de liberação do quartzo em uma mesma fração granulométrica em diferentes produtos de cominuição revelou certa variação no IC para ambas as técnicas de análise, e para o IF no QEMSCAN, sendo que ao microscópio ótico o IF apresentou alto grau de liberação em todas as faixas de tamanho inferiores a 0,5 mm. No entanto, em geral, as diferenças no grau de liberação tendem a reduzir nas faixas inferiores a 0,15 mm.

Conclui-se, portanto, que a abordagem heurística pode ser uma ferramenta útil para avaliar tendências relacionadas a liberação em itabiritos, reduzindo o esforço laboratorial em explorar diversas malhas de cominuição, e reduzindo o tempo de resposta das análises, mas alguns cuidados devem ser tomados. Primeiramente os valores de grau de liberação obtidos em um

determinado nível de cominuição não devem ser inferidos de forma absoluta para outras distribuições granulométricas, pois dependendo do nível de precisão desejado, desvios podem ocorrer. É mais confiável se tomar os resultados como tendência.

Dito isso, a aplicabilidade da abordagem heurística depende do objetivo e da precisão desejada na caracterização, sendo que, em casos que requerem avaliações mais precisas, a confirmação das inferências com testes reais faz-se essencial. Deve-se, ainda, avaliar se existe massa de forma representativa nas faixas de tamanho caracterizadas, principalmente para minérios compactos, pois uma pequena quantidade de material em uma fração granulométrica pode não representar de forma fidedigna a liberação naquele tamanho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S/A, CNPq, CAPES e Fapemig por todo o suporte ao trabalho.

Referências

- 1 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.
- 2 Gaudin AM. *Principles of mineral dressing*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd; 1939.
- 3 Wiegel RL, Li K. A random model for mineral liberation by size reduction. *Transactions of the AIME*. 1967;238:179-189.
- 4 Andrews JR, Mika TS. Comminution of a heterogeneous material: development of a model for liberation phenomena. In: *Proceedings of 11th International Mineral Processing Congress; 1975; Cagliari, Itália*. Cagliari: Università di Cagliari Istituto di Arte Mineraria; 1975.
- 5 King RP. A model for the quantitative estimation of mineral liberation from mineralogical texture. *International Journal of Mineral Processing*. 1979;6:207.
- 6 Herbst J, Rajamani K, Lin C, Miller J. Development of a multicomponent-multisize liberation model. *Minerals Engineering*. 1988;1(2):97-111.
- 7 Schneider CL, Lin CL, King RP, Miller JD. An improved transformation technique for the prediction of liberation by a random fracture model. *Powder Technology*. 1991;67:103.
- 8 Barbery G, Leroux D. Prediction of particle composition distribution after fragmentation of heterogeneous materials. *International Journal of Mineral Processing*. 1988;22:9-24.
- 9 King RP. Linear stochastic models for mineral liberation. *Powder Technology*. 1994;81:217-234.
- 10 Gay SL. A liberation model for comminution based on probability theory. *Minerals Engineering*. 2004;17:525-534.
- 11 Wiegel RL. The rationale behind the development of one model describing the size reduction/liberation of ores. In: Kawatra SK, editor. *Advances in comminution*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2006. p. 225-241.
- 12 Zhang J, Subasinghe N. Prediction of mineral liberation characteristics of comminuted particles of high-grade ores. *Minerals Engineering*. 2013;49:68-76.
- 13 Hilden MM, Powell MS. A geometrical texture model for multi-mineral liberation prediction. *Minerals Engineering*. 2017;111:25-35.
- 14 Guntoro PI, Ghorbani Y, Parian M, Butcher AR, Kuva J, Rosenkranz J. Development and experimental validation of a texture-based 3D liberation model. *Minerals Engineering*. 2021;164:106828.
- 15 Evans CL, Morrison RD. Mineral liberation. In: Becker M, Wightman EM, Evans CL, editors. *Process mineralogy*. Indooroopilly: JKMRRC; 2016. p. 219-233.

- 16 Bérubé MA, Marchand JC. Evolution of the mineral liberation characteristics of an iron ore undergoing grinding. *International Journal of Mineral Processing*. 1984;13:223-237.
- 17 Manlapig EV, Drinkwater DJ, Munro PD, Johnson NW, Watsford R. Optimisation of grinding circuits at the lead/zinc concentrator, Mount Isa Mines Ltd. In: *Proceedings of the Symposium on Automation for Mineral Resource Development (IFAC '85)*; 1985; Brisbane, Austrália. Laxenburg: International Federation of Automatic Control; 1985. p. 265-274.
- 18 Evans CL, Wightman EM. Modelling liberation of comminuted particles. In: *Proceedings of the SME Annual Meeting and Exhibit and CMA's 111th National Western Mining Conference*; 2009; Denver, United States. New York: Curran Associates; 2009. p. 554-556.
- 19 Vizcarra TG, Wightman EM, Johnson NW, Manlapig EV. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):374-382.
- 20 McIvor RE, Finch JA. A guide to interfacing of plant grinding and flotation operations. *Minerals Engineering*. 1991;4(1):9-23.
- 21 Evans CL, Wightman EM, Manlapig EV, Coulter BL. Application of process mineralogy as a tool in sustainable processing. *Minerals Engineering*. 2011;24:1242-1248.
- 22 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.
- 23 Spencer S, Sutherland D. Stereological correction of mineral liberation grade distributions estimated by single sectioning of particles. *Image Analysis & Stereology*. 2000;19:175-182.

Recebido em: 31 Jan. 2024

Aceito em: 1 Jul. 2024