

ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITO COMPACTO DO COMPLEXO SERRA AZUL, MG

João Antônio Vasconcelos¹
Paulo Roberto Gomes Brandão²
Lucas Nogueira Lemos³

Resumo

A Mina Lagoa das Flores constitui uma das principais ocorrências de minério de ferro situada no Complexo Serra Azul, localizado na borda noroeste do Quadrilátero Ferrífero, onde se encontram outras empresas como Arcelor Mittal, Usiminas, MBL e MMX. Atualmente, são gerados cerca de 2,2 Mt/ano de estéril, sendo 70% constituído de itabirito compacto cujo recurso mineral é da ordem de 370 Mt. Os objetivos são, para esta tipologia, a caracterização mineralógica e o desenvolvimento de rotas de processo, por ensaios de bancada com estudos de *work index*, índice de abrasão e ensaios de concentração magnética, deslamagem e flotação. O minério mostrou-se composto essencialmente por quartzo e hematita martítica, com magnetita minoritária; o teor médio de ferro foi 34,3%; o grau de liberação do quartzo foi de 92% abaixo de 0,075 mm. A melhor opção para aproveitamento do minério é a moagem a -0,15 mm, seguida de concentração magnética de médio e alto campo, remoagem a -0,053 mm e flotação catiônica reversa. Assim, é possível obter um concentrado final com 67,8% Fe e 1,84% SiO₂ e recuperação metálica de 83%.

Palavras-chave: Itabirito; Caracterização mineralógica; Rota de processo; Resíduos.

STUDIES OF CHARACTERIZATION AND CONCENTRATION OF COMPACT ITABIRITE OF THE SERRA AZUL COMPLEX, MG

Abstract

The Lagoa das Flores Mine is an important iron ore deposit located at the Serra Azul complex in the Northwestern border of the Ferriferous Quadrangle, Minas Gerais, where other important mines also occur, such as Arcelor Mittal, Usiminas, MBL and MMX. Presently 2.2 Mt/year of waste are generated; 70% of this waste is comprised by compact itabirite whose mineral resource is of the order of 370 Mt. The goals are to perform a mineralogical characterization and the development of process routes for this ore type by bench scale testing. The latter was carried out by work index and abrasion index determinations and magnetic concentration, desliming and flotation testing. The ore was composed by quartz, martitic hematite and minor magnetite; the average iron content was 34.3% and the quartz liberation degree was 92% below 0.075 mm. The best processing route are grinding to -0.15 mm, followed by medium and high strength field magnetic concentration, regrinding to -0.053 mm and reverse cationic flotation. Therefore, a final concentrate with 67.8% Fe, 1.84% SiO₂ contents and metallic recovery of 83% is obtained.

Key words: Itabirite; Mineralogical characterization; Process route; Waste.

I INTRODUÇÃO

A Mina Lagoa das Flores, pertencente à empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda., constitui uma das principais ocorrências de minério de ferro situada no Complexo Serra Azul, localizado no Quadrilátero Ferrífero (Figura 1), próximo à cidade de Itatiaiuçu-MG.

O Complexo Serra Azul caracteriza-se pelo cavalgamento das rochas do Grupo Itabira sobre as rochas mais novas do Grupo Piracicaba em flanco invertido, com estrutura homoclinal, constituído exclusivamente por itabiritos e associados principalmente às formações ferríferas bandadas (BIFs).⁽¹⁾

Recentemente, rochas itabiríticas estéreis e rejeitos de processo têm sido alvo de vários estudos,^(2,3)

¹Engenheiro de Minas, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Rua Edison Pompeu Mayer, nº 8, quadra 59, Manoel Plaza, Cep 29160-420, Serra, ES, Brasil. E-mail: vasconcelos_ufop@yahoo.com.br

²Professor Emérito, Departamento Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Ph.D., membro da ABM, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Escola de Engenharia, Bloco 2, Sala 2230, Cep 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil E-mail: pbrandao@demin.ufmg.br

³Diretor de Produção, Minerita Minérios Itaúna Ltda, Praça Augusto Gonçalves, 146, 12, Centro, Cep 35680-054, Itaúna, MG, Brasil. E-mail: lucas@minerita.com.br

envolvendo desde a caracterização mineralógica e microestrutural até ensaios de concentração para definição de rotas de processo.

Logo, este trabalho tem como objetivos: 1) a caracterização da tipologia de itabirito compacto da Mina Lagoa das Flores; 2) o desenvolvimento de rotas de processo, principalmente por meio de flotação e de concentração magnética em escala de bancada, visando a obtenção de concentrados dentro das especificações químicas para a indústria siderúrgica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas cinco amostras de itabirito compacto em diferentes frentes de lavra da Mina Lagoa das Flores, e realizada a blendagem na proporção de 1:1 de modo a caracterizar as litologias atualmente expostas.

As amostras foram inicialmente submetidas a uma etapa de britagem e peneiramento na planta de beneficiamento da Minerita, em circuito aberto, com britador de mandíbula modelo 10060 Faço (britagem primária) e, em circuito fechado, com o rebitador cônico modelo 1144 Nordberg (britagem secundária). Após essas etapas, as amostras foram homogeneizadas em pilhas alongadas e separadas as seguintes alíquotas: 100 kg da

fração $-25,4 \text{ mm}(-1'') + 12,7 \text{ mm}(1/2'')$, 100 kg da fração $-12,7 \text{ mm}(1/2'') + 9,52 \text{ mm}(3/8'')$, 100 kg da fração $-6,35 \text{ mm}(1/4'')$ e 1.000 kg da amostra cabeça cominuída abaixo de $6,35 \text{ mm}(1/4'')$ para os diversos estudos, como mostrado na Figura 2.

Os estudos microestruturais e mineralógicos foram realizados no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais da EE-UFMG e na Fundação Gorceix, pela preparação de seções polidas para análise em microscópio óptico de luz refletida (MOLR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanalisador EDS. O microscópio óptico utilizado foi da marca Leitz/Leica, modelo Orthoplan Pol, com câmera digital Canon PowerShot S80, do Laboratório de Caracterização Mineralógica da EE-UFMG, enquanto o microscópio eletrônico de varredura utilizado foi da marca JEOL, modelo JSM-5410, sendo as microanálises obtidas no espectrômetro dispersivo em energia (EDS) marca Noran, modelo TN-M3055.

Para os estudos de liberação mineral foram avaliadas somente as frações: $-1,000 + 0,212 \text{ mm}$; $-0,212 + 0,105 \text{ mm}$; $-0,105 + 0,075 \text{ mm}$; $-0,075 + 0,044 \text{ mm}$ e $-0,044 + 0,010 \text{ mm}$, uma vez que os resultados de análise granulométrica mostraram uma tendência de liberação nestas frações. Na determinação da energia específica de moagem (*Wi Bond*) foi utilizado um moinho de Bond de $305,8 \times 305,8 \text{ mm}(12'' \times 12'')$, sendo

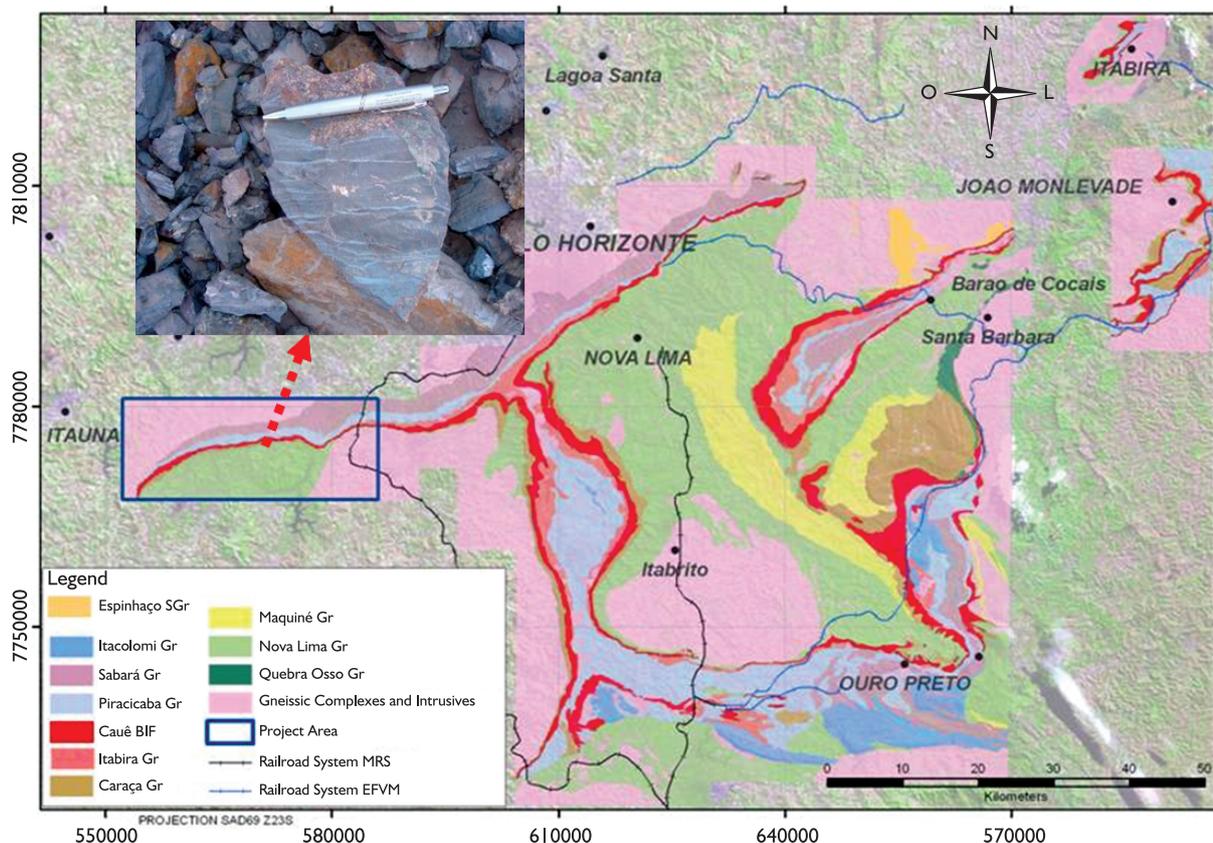


Figura 1. Localização e amostra de itabirito compacto da área em estudo.

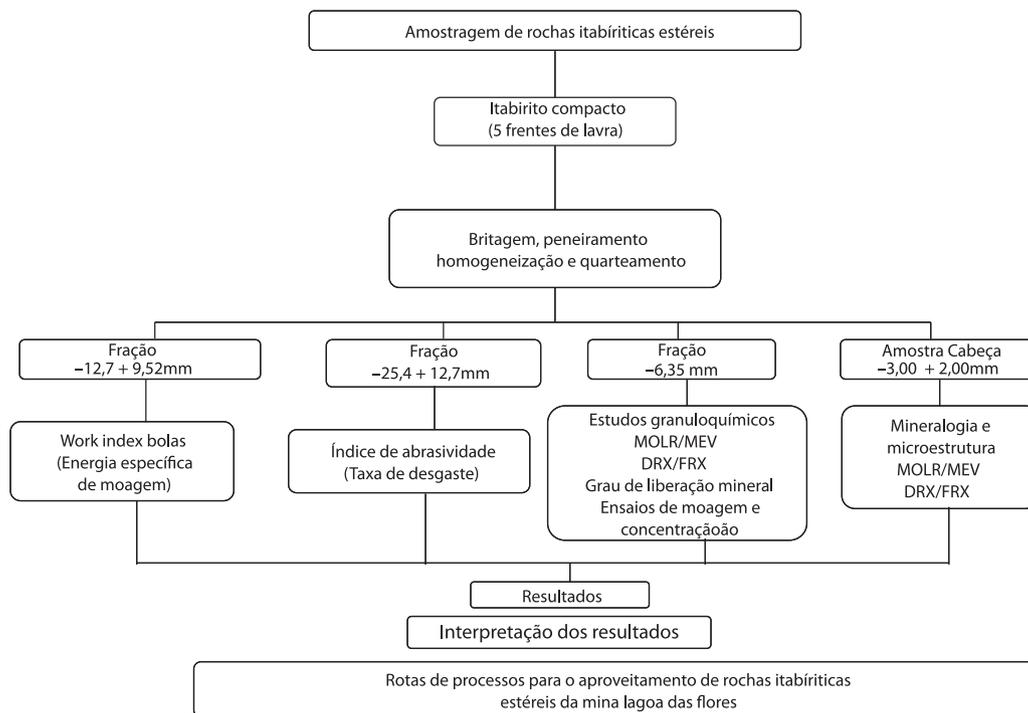


Figura 2. Procedimento adotado para a preparação das amostras e estudos gerais realizados. Legenda: AQU: análise química via úmida; FRX: espectrometria por fluorescência de raios X; DRX: difração de raios X; MOLR: microscopia óptica de luz refletida; MEV: microscopia eletrônica de varredura.

estes ensaios realizados no Centro de Testes da Metso, em Sorocaba, SP, mesmo local onde foi realizado o ensaio para determinação do índice de abrasividade (*Ai Bond*).

Para os estudos de caracterização tecnológica, a amostra cabeça $-6,35$ mm foi pré-reduzida em $3,35$ mm em um britador de rolos lisos. Posteriormente, foi realizada uma moagem primária $-0,15$ mm no moinho de bolas de bancada, de dimensões 635 mm ($25''$) \times 762 mm ($30''$) do laboratório da NUTEC-Fundação Gorceix. Após a etapa de moagem primária foram selecionadas as seguintes rotas de processo:

- *rota 1*: estágio *rougher* (10.000 G), remoagem do pré-concentrado a $-0,053$ mm do concentrado *rougher*, seguido do estágio *cleaner* em diferentes campos (8.000 G, 10.000 G e 12.000 G) e estágio *re-cleaner* (8.000 G), através de concentração magnética de alto campo utilizando separador magnético L4 da Inbrás;
- *rota 2*: deslamagem e flotação *rougher*, seguida da deslamagem e flotação *scavenger*, e, posteriormente, remoagem a $-0,053$ mm dos pré-concentrados obtidos nos estágios anteriores. Em sequência, utilizou-se uma etapa de flotação *cleaner*. Os reagentes utilizados foram o depressor amido de milho da Cargill gelatinizado (solução 2% p/v) com hidróxido de sódio (solução 5% p/v) e coletor etermonoamina Flotigan EDA da Clariant (2% p/v) em condições de pH $10,5$;

- *rota 3*: concentração magnética de médio campo (7.500 G) utilizando tambor magnético em escala de bancada da Inbrás no estágio *rougher*; concentração magnética de alto campo (13.000 G) no estágio *scavenger* através do separador magnético L4 da Inbrás. Em seguida, remoagem dos pré-concentrados obtidos em $0,053$ mm e posteriormente flotação *cleaner* em escala de bancada com uso dos mesmos reagentes da rota 2.

Para as diferentes rotas de processo, foram avaliadas as seguintes variáveis nos concentrados obtidos dos distintos estágios de concentração: recuperação em massa, teores de Fe e SiO_2 , distribuição de ferro e índice de seletividade de Gaudin, que leva em consideração a maior distribuição dos minerais de ferro no concentrado (%Fe) e a distribuição dos minerais de ganga que vão para o rejeito (% SiO_2). Após os diversos ensaios de concentração, realizados na NUTEC - Fundação Gorceix, as amostras foram secadas em estufa, quarteadas, pesadas para o cálculo da recuperação em massa e pulverizadas para a realização de análise química no Laboratório de Análises da Minerita Minérios Itaúna Ltda..

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas diferentes frentes de lavra de itabirito compacto, a média e variação de teores das amostras coletadas foram: $34,11 \pm 4,06\%$ Fe, $48,85 \pm 6,09\%$ SiO_2 ,

0,034 ± 0,010% Mn, 0,027 ± 0,010% P, 0,64 ± 0,19% Al₂O₃ e 0,13 ± 0,15% PPC. Após o *blend* dessas frentes foi realizada uma análise química por faixa granulométrica apresentada na Tabela 1, cujos resultados mostram a inviabilidade de produzir *sinter-feed* diante dos altos teores de SiO₂ nas faixas estudadas, o que resulta num baixo grau de liberação do quartzo (10% na fração -1,00 + 0,2010 mm).

Observa-se na Figura 3, que os grãos de hematita lamelar ocorrem associadas à hematita martítica e relictos (mineral preservado no processo de martitização) de magnetita: porém, de acordo com o levantamento dos constituintes minerais da amostra de itabirito compacto, verifica-se que a hematita lamelar e os relictos de magnetita contribuem apenas com 1,26% e 0,77%, respectivamente, enquanto as fases majoritárias de hematita martítica e quartzo contribuem com 25,01% e 72,78%. Também foram observadas fraturas, tanto nos grãos de hematita martítica como nos de quartzo, o que favorece a fragmentação, principalmente pelo uso de equipamentos que proporcionem uma maior tensão de compressão das partículas, como a prensa de rolos.^(4,5)

A Figura 4 mostra o pseudomorfismo caracterizado por hematitas microporosas apresentando formas octaédricas em seção, típicas da magnetita, o que indica a ocorrência da martitização. As fases de hematita martítica mostram-se bastante impuras, apresentando porcentagens significativas de alumina, óxidos de magnésio e ainda cloro, conforme constatado na microanálise por EDS. Também é possível observar o bandeamento de hematita e quartzo, com grande presença de inclusões de quartzo na hematita, o que resulta num grau de liberação de 94% somente a partir de 0,045 mm. Assim a partir dos ensaios para determinação do *work index* de bolas e índice de abrasividade de Bond chegou-se a valores respectivamente iguais a 10,81 ± 2,10 kWh/st e 0,663 g, considerados elevados para minério de ferro.⁽⁶⁾ Logo, com base na lei de Bond utilizada em vários estudos⁽⁷⁾ e fórmulas empíricas da Mestso,⁽⁶⁾ estima-se um consumo específico de energia nas diferentes etapas de cominuição igual a 18 kWh/t (sem considerar a eficiência dos equipamentos de cominuição) para obter um grau de liberação mineral em torno de 95%, a partir da redução de um bloco de minério inicial

de 450 mm, bem como uma taxa de desgaste de bolas em torno de 1,26 kg/t, tanto na etapa de moagem primária como secundária, valores estes comparados aos taconitos da empresa Erie Mining Co, em Minnesota-EUA, que é 17,20 kWh/t.⁽⁸⁾

Diante do alto consumo energético nas etapas de moagem confirma-se a estratégia adotada para concentração desta tipologia, ou seja, utilização de etapas de moagem estagiada, visando moer previamente para obter um pré-concentrado e, a partir deste, realizar uma remoagem para concentração final, o que gera uma economia significativa de energia. Desta maneira verifica-se que os P₉₀, após as etapas de moagem primária e remoagem são, respectivamente, iguais a 0,106 mm e 0,045 mm, gerando um grau de liberação de 80% e 93%. A melhor rota de concentração para obtenção de um pré-concentrado envolveu a utilização de concentração magnética de campo médio (7.500 G) e campo alto (13.000 G), cujos resultados estão indicados na Figura 5. Deste modo, foi possível obter recuperação metálica de ferro de 92%, porém o teor de SiO₂ (13,76%) ainda é considerado alto para obtenção de produto final, necessitando desta

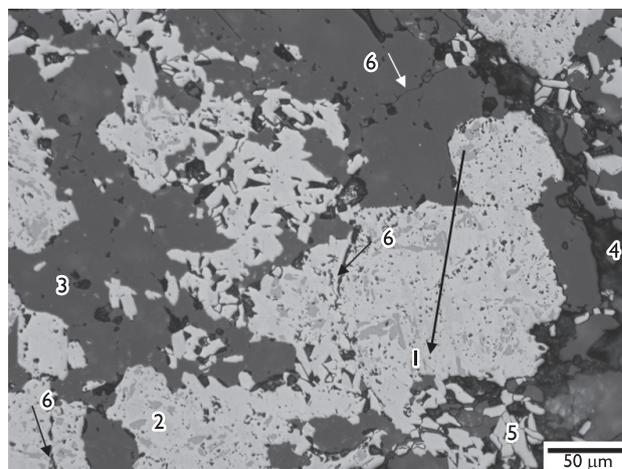


Figura 3. Fotomicrografia obtida pela técnica MOLR da amostra cabeça de itabirito compacto. Iluminação: apenas polarizador. Legenda: 1-relictos de magnetita, 2-hematita martítica, 3-quartzo, 4-poro, 5-hematita lamelar e 6 planos de fratura.

Tabela 1. Análise granuloquímica da amostra de itabirito compacto utilizada nos diversos estudos após fragmentação -6,35 mm, determinada por via úmida e por espectrometria de fluorescência de raios X

Malha (mm)	Ret. Simples (%)	Teores (%)								
		Fe	SiO ₂	Mn	P	Al ₂ O ₃	PPC	CaO	FeO	TiO ₂
+6,35	1,40	34,53	48,54	0,031	0,034	0,76	0,11	0,13	2,28	<0,01
-6,35+1,00	76,91	34,29	48,64	0,034	0,024	0,67	0,08	0,09	2,15	0,02
-1,00+0,15	14,51	33,18	49,77	0,029	0,040	0,45	0,39	0,16	2,10	<0,01
-0,15	7,18	34,01	49,30	0,040	0,035	0,66	0,09	0,14	2,05	<0,01
Cabeça	100,00	34,11	48,85	0,034	0,027	0,64	0,13	0,10	2,14	0,02

Nota - teores de MgO e ZnO menores que 0,01% em todas as faixas granulométricas testadas.

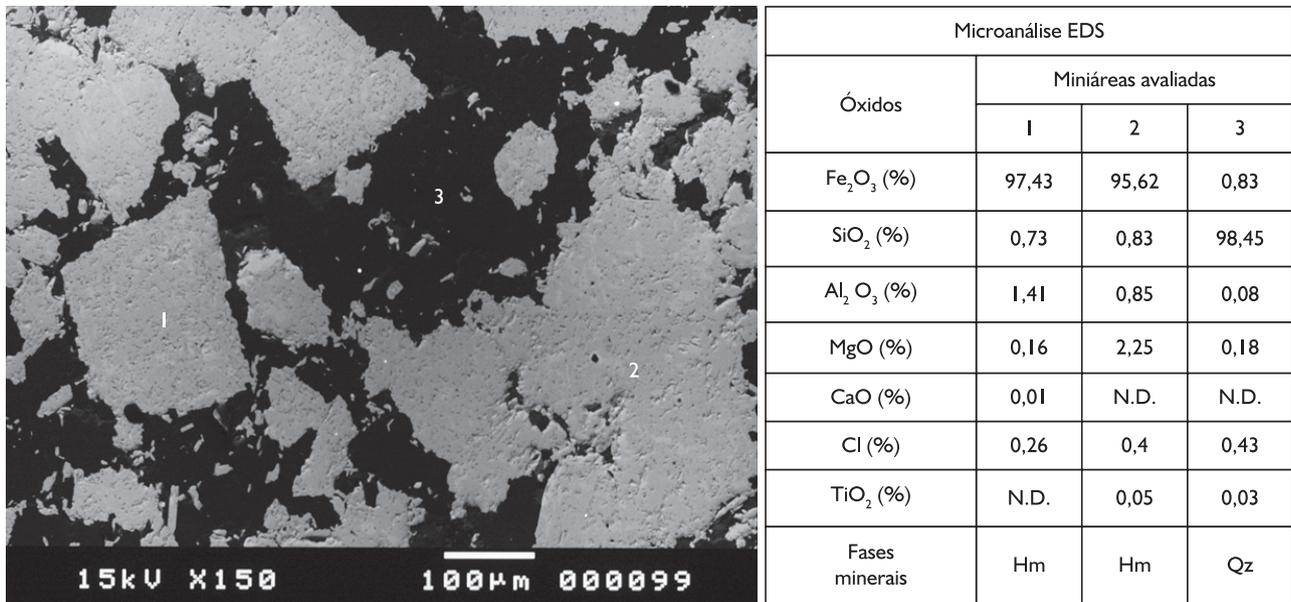


Figura 4. Esquerda: micrografia da amostra cabeça de itabirito compacto, obtida por imagem de elétrons retroespalhados no MEV. Direita: microanálises pela técnica EDS obtidas para as miniáreas 1, 2 e 3. **Legenda:** Hm-hematita martítica e Qz-quartzo.

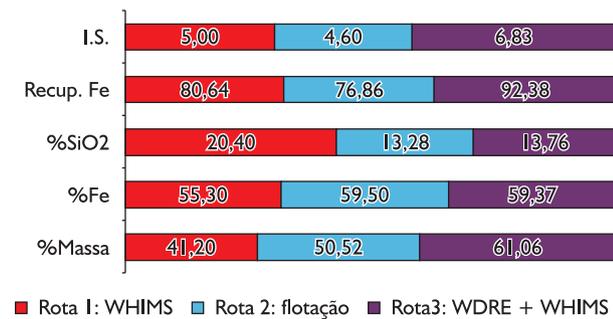


Figura 5. Resultados obtidos para o pré-concentrado (estágio rougher + scavenger) nas diferentes rotas de processo estudadas.

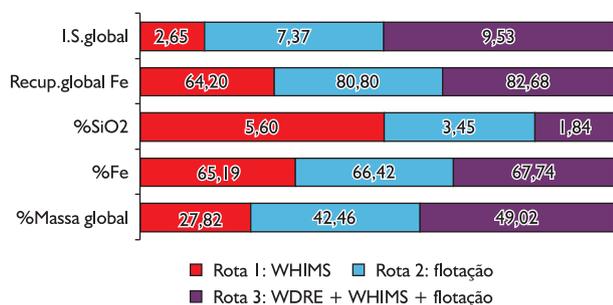


Figura 6. Resultados obtidos para o concentrado final (estágio cleaner) nas diferentes rotas de processo estudadas.

maneira de uma remoagem para alcançar um maior grau de liberação.

Após a etapa de remoagem, a melhor rota para concentração do itabirito compacto é a rota 3 (Figura 6), apresentando uma recuperação metálica igual a 83%, que indica a obtenção de um concentrado final com os seguintes

teores: 67,74% Fe, 1,84% SiO₂; 0,04% Mn; 0,04% P; 0,48% Al₂O₃ e 0,09% PPC. Também foi obtido um rejeito final bem pobre, com os seguintes teores: 7,86% Fe, 86,98% SiO₂; 0,015% Mn; 0,032% P; 1,05% Al₂O₃ e 0,13% PPC. Embora não tenha sido possível a obtenção de *pellet-feed* de redução direta (SiO₂+Al₂O₃ ≤ 2%), o teor de SiO₂ no concentrado final poderá ser melhorado pela otimização das variáveis operacionais de flotação e remoagem do pré-concentrado, para alcançar um grau de liberação maior que 95%.

4 CONCLUSÃO

Os resultados de análise granulométrica evidenciam a impossibilidade de geração de *sinter-feed*, dentro das especificações de qualidade determinadas atualmente pelo mercado, pois o teor de SiO₂ nas diversas faixas variam de 48% a 49%. Pelas caracterizações mineralógicas e microestruturais verifica-se que a fase majoritária da amostra é quartzo, associada à hematita martítica, tanto na forma de partículas livres como partículas mistas, o que gera um grau de liberação de 95% somente a partir de 0,045 mm. Os estudos de liberação mineral e valores de *work index* mostram que será necessário um alto consumo específico de energia (18 kWh/t) e elevada taxa de desgaste de corpos moedores (1,26 kg/t) para tipologia de itabirito compacto, comparado aos taconitos da empresa Erie Mining em Minnesota-EUA.⁽⁸⁾ Em termos de rotas de processo, o melhor resultado é obtido pelas etapas de concentração magnética de médio (7.500 G) e alto campo (13.000 G), respectivamente nos estágios *rougher* e *scavenger*, seguido de flotação catiônica reversa no estágio *cleaner*. Por meio

dessa rota é possível obter uma recuperação metálica de ferro igual a 83%, gerando um concentrado final com os seguintes teores: 67,74% Fe, 1,84% SiO₂; 0,04% Mn; 0,04% P; 0,48% Al₂O₃ e 0,09% PPC. Ressalta-se que mesmo não tendo sido possível produzir um *pellet feed* de redução direta, a qualidade do concentrado final poderá ser melhorada via otimização das variáveis operacionais de flotação e remoagem do pré-concentrado para obter um maior grau de liberação mineral. Portanto, os resultados apresentados mostram-se bastante promissores para o aproveitamento da tipologia de itabirito compacto da Mina Lagoa das Flores, o que poderá gerar cerca de 148 Mt de *pellet feed*, considerando 40% de recuperação

em massa do recurso mineral (~370 Mt), contribuindo para minimizar um passivo ambiental, além de buscar o desenvolvimento sustentável na mineração.

Agradecimentos

Os autores agradecem especialmente à Minerita Minérios Itaúna Ltda., pelo financiamento e apoio dos colegas, e à equipe da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, principalmente ao prof. Paulo Brandão, pela orientação e discussões nas caracterizações mineralógicas e microestruturais.

REFERÊNCIAS

- 1 ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JUNIOR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero: uma visão geral e discussão. *Genomas*, v. 8, n. 2, p. 27-42, 2000.
- 2 SOUZA, E. S. *Rota de processo para aproveitamento de rochas itabiríticas estéreis da mina de Conceição*. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- 3 CALIXTO, M. F. *Rotas para concentração de rejeitos de minério de ferro itabiríticos*. 2001. 101 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- 4 KNECHT, J.; PATZELT, N. High pressure grinding rolls: applications for the platinum industry. In: INTERNATIONAL PLATINUM CONFERENCE 'PLATINUM ADDING VALUE', 2004, San City. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. P. 83-8.
- 5 DANIEL, M. J.; MORRELL, S. HPGR model verification and scale-up. *Minerals Engineering*, v. 17, n. 11-12, p. 1149-61, Nov-Dec. 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.016>
- 6 METSO MINERALS. *Manual de britagem*. 6. ed. Sorocaba: Grafilínea, 2005.
- 7 DONDA, J. D. *Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas*. 2003. 71 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- 8 FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. *Cominuição*. Comunicação técnica elaborada para a 4a edição do livro de Tratamento de Minérios, 2004. p. 113-94. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-182-00.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2009.

Recebido em: 04/01/2011

Aceito em: 13/02/2012