



BENEFICIAMENTO DE ITABIRITO DOLOMÍTICO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

RASO, E. F.¹, LAMEIRAS, F.S.², ALBUQUERQUE, R.O.³

¹Universidade Púnguè, Departamento de Ciência da Terra e Ambiente – Moçambique. email: rasoedsonfernandes@gmail.com

^{2,3}Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Divisão de Materiais e Minerais.

RESUMO

Em plantas industriais de concentração de minério de ferro, diversos são estéreis produzidos, depositadas em estruturas conhecidas como pilhas de estéril. Na Mina de Conceição - MG existem reservas significativas de itabirito dolomítico que é considerado e tratado como estéril. Este estudo tem como objetivo desenvolver uma rota de separação magnética para concentrar itabirito dolomítico, de modo a obter um concentrado com especificações aceitas na indústria siderúrgica. Foram realizados estudos de caracterização, cominuição e grau de liberação, buscando condições de separação seletiva entre a hematita e dolomita nos testes de separação magnética via úmida. O ponto ótimo para maximização de teor de Fe e minimização de teor de CO_3^{2-} e SiO_2 no concentrado foi obtido na seguinte condição: tamanho de GAP da matriz no nível alto +1 (5 mm) e valor de campo magnético no nível baixo -1 (5554,0 Gauss).

PALAVRAS CHAVE: itabirito dolomítico; estéril; separação magnética.

ABSTRACT

In industrial plants of iron ore concentration, several are produced sterile, deposited in structures known as sterile cells. In the Conceição Mine - MG there are significant reserves of dolomitic itabirite which is considered and treated as sterile. The objective of this study is to develop a magnetic separation route to concentrate dolomitic itabirite in order to obtain a concentrate with specifications accepted in the steel industry. Characterization, comminution and degree of release studies were performed, searching for conditions of selective separation between hematite and dolomite in wet magnetic separation tests. The optimal point for maximizing Fe content and minimizing CO_3^{2-} and SiO_2 content in the concentrate was obtained in the following conditions: matrix GAP size at high level +1 (5 mm) and magnetic field value at low level -1 (5554.0 Gauss).

KEYWORDS: dolomite itabirite; sterile; magnetic separation.

1. INTRODUÇÃO

A lavra de minério de ferro gera diariamente grandes quantidades de estéril, material constituído por agregados de minerais provenientes da mina, camadas sem nenhum valor econômico, armazenadas em pilhas conhecidas como pilhas de estéril. Este material tem criado muita preocupação em relação à segurança e de meio ambiente, o que leva as mineradoras a desenvolverem projetos da sua gestão e do seu aproveitamento econômico. Um material considerado estéril pode ser tratado como minério no futuro, quando houver rotas de processo que permitam o seu aproveitamento econômico (Rocha, 2015). O itabirito dolomítico é o principal estéril da extração de minério de ferro na Mina de Conceição-MG. Compõe um conjunto de formações ferríferas metamórficas do grupo Itabira do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do mundo (Rosière C.A. & Chemale JR, 2000). A sua textura é análoga ao de itabirito silicoso, com faixas alternadas de carbonato e ferro, composto por dolomita, hematita e menores quantidades de quartzo, podendo também conter quantidades variáveis de calcita, talco, clorito e anfibólios (Rosière et al., 2008).

A hematita é um mineral fracamente magnético, que se torna magnética e atraída quando sofre ação de um campo magnético externo. Enquanto que a dolomita é um mineral diamagnético, repelida quando é submetida a um campo magnético. Esta diferença de propriedade magnética entre estes dois minerais é base da seletividade na concentração por separação magnética. A separação magnética é uma das técnicas de concentração muito utilizada nas plantas industriais de minério de ferro. Esta técnica é classificada de acordo com o meio utilizado (via úmida ou via seca) e a intensidade do campo magnético (Sampaio et al., 2007). O método de separação magnética via seca é usado, em geral para minerais de granulometria grossa e o a úmido para aqueles mais finos (Luz & Samapio, 2004). Abaixo da faixa de tamanho de 0,5 cm o método a seco tende a ser substituído por método a úmido, que produz menos perda de finos e normalmente um produto mais limpo (Wills & Napier-Munn, 2006).

O separador eletromagnético de carrossel, de alta intensidade, via úmida é muito utilizado no Brasil na concentração de itabirito silicoso. Neste equipamento, o GAP e campo magnético são fatores principais para uma boa seletividade. O GAP promove um forte gradiente de campo magnético e permite o fluxo da polpa pela matriz, sendo espaço vital onde ocorre o processo de separação entre as frações magnética e não magnética (Silva & Luz, 2013; Ribeiro & Ribeiro, 2015). As frações magnéticas são atraídas pelas paredes do GAP e as frações não magnéticas são repelidas e transportadas para a descarga. O objetivo deste estudo foi obter um concentrado de minério de ferro por meio de separação magnética a partir de um Itabirito dolomítico, que atualmente é considerado estéril da extração de minério de ferro, na mina de Conceição - MG.

2. MATERIAL E MÉTODO

A amostra de itabirito dolomítico foi obtida em blocos na mina de Conceição (Figura 1). Para a caracterização das amostras, foram realizadas as análises por difração de raios X (XRD), fluorescência de raios X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), conversão eletrônica de espectroscopia Mössbauer (CEMS), termogravimetria e densidade por picnometria de hélio. Todas estas análises de caracterização foram realizadas no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. O grau de liberação foi determinado de acordo

com Gaudin (1939). Os blocos de minério foram submetidos à cominuição (britagem e moagem). De acordo com o grau de liberação, a moagem foi realizada dentro de tempo suficiente para que 5% do material fosse retido na peneira de 74 μ m. O produto da moagem foi submetido a peneiramento a úmido, utilizando a peneira de 37 μ m. A fração + 37 μ m foi seca e classificada no agitador eletromagnético, onde foram utilizadas as seguintes séries de peneira: 100, 74, 53, 44 e 37 μ m. A fração -37 μ m foi classificada no cyclosizer nas seguintes frações: 24,7, 18,4, 12,6, 9,0 e 7,2 μ m.

Os testes de concentração magnética foram conduzidos no separador eletromagnético de carrossel, de alta intensidade, via úmida, de escala de laboratório, modelo L-4. Variaram-se três matrizes de tamanho de GAP diferente, 1,5; 2,5 e 5 mm (Figura 2), e cinco valores de campo magnético, em 1950, 4030, 5830, 7150 e 7960 Gauss. As matrizes utilizadas tem a mesma área (200 x 50 mm), diferenciando-se apenas no tamanho de GAP. A Tabela 1 mostra o planejamento fatorial dos testes de separação magnética. Para o fator campo magnético (CM), os níveis superior e inferior foram de 7960Gauss (+1) e 1950Gauss (-1), respectivamente. Para o tamanho de GAP, os níveis superior e inferior foram de + 5,0 mm (+1) e 1,5 mm (-1), respectivamente. Para cada teste de separação magnética, foi usada 100g de minério; preparou-se polpa com 25% de sólidos; 75mL/s de água de lavagem; 15 min de estabilização do campo magnético antes de cada teste. Os resultados foram analisados no software estatístico Minitab 17.

Tabela 1. Planejamento fatorial dos testes de separação magnética

CM (Gauss)	Níveis	-1	-0,308	+0,291	+0,730	+1
	Codificação	1950	4030	5830	7150	7960
GAP (mm)	Níveis	-1		-0,43		+1
	Codificação	1,5		2,5		5,0
Teste		GAP (mm)			CM (Gauss)	
T1		-1			-1	
T2		-1			-0,308	
T3		-1			-0,291	
T4		-1			-0,73	
T5		-1			+1	
T6		-0,43			-1	
T7		-0,43			-0,308	
T8		-0,43			-0,291	
T9		-0,43			+0,73	
T10		-0,43			+1	
T11		+1			-1	
T12		+1			-0,308	
T13		+1			+0,291	
T14		+1			+0,73	
T15		+1			+1	



Figure 1. Amostra de Itabirito Dolomítico da Mina de Conceição

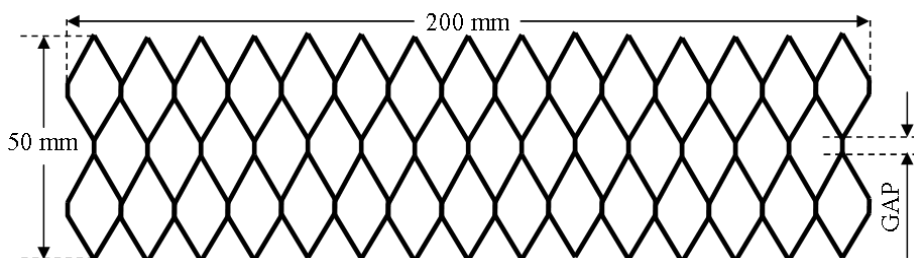


Figura 2. Esquema da matriz utilizada nos testes de separação magnética

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização

A análise mineralógica por difração de raios X mostrou que a amostra é composta por dolomita e hematita, e pequenas quantidades de clorito e talco. Além da hematita, no estado de oxidação de Fe^{3+} , a análise por espectroscopia eletrônica de conversão Mössbauer identificou outra fase de ferro, ferrihidrita, sendo a hematita a fase mais predominante (98,00%). Os resultados da fluorescência de raios-X são mostrados na Tabela 2. A termogravimetria mostrou que a $691^{\circ}C$ a amostra perdeu 11% de massa devido à liberação de CO_2 da fase carbonatada (Martins et al., 2000), isto justifica o alto valor da perda ao fogo (13,00).

Tabela 2. Teores da amostra de itabirito dolomítico (%)

Fe	SiO ₂	CO ₃ ²⁻	Mg	Ca	MnO	P2O5	Al2O3	PPC
42,64	2,45	22,95	5,88	5,74	0,70	0,42	0,53	13,00

Na determinação de grau de liberação dos minerais foi considerada a razão hematita / ganga, onde a ganga constitui todos os outros minerais da amostra. Para a fração -74 + 53 μ m as partículas estão praticamente liberadas, sendo 88,56% a fração de liberação nesta faixa.

De acordo com o grau de liberação, os resultados dos testes de moagem mostraram que, por 12,5 min, o P_{95} é 74 μ m. A Figura 3c mostra a imagem de elétrons retroespalhados (BSD) gerada na microscopia eletrônica de varredura da amostra moída em 12,5 min. Nesta granulometria as partículas estão praticamente todas liberadas, sendo possível observar a existência de frações individualizadas de hematita (frações brancas). A análise granulométrica (Figura 3d) mostrou que a distribuição de CO_3^{2-} está concentrada nas frações mais finas e a fração Fe nas frações mais grossas, isto é, 45,9% de Fe estão distribuído nas frações > 37 μ m e 37,7% de CO_3^{2-} nas frações <37 μ m . Apenas 8% do material tem a granulometria menor que 10 μ m. A densidade da amostra por picnometria de hélio foi de 4,13 g / cm³.

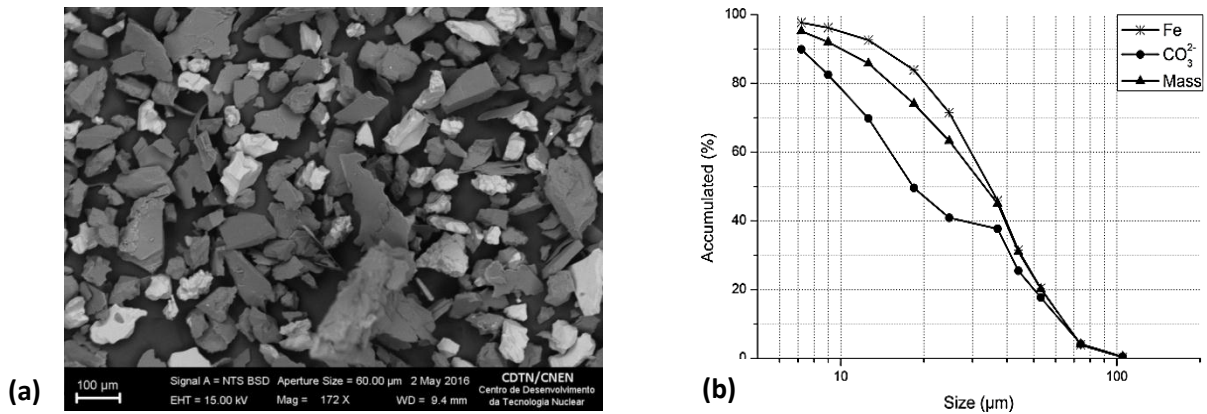


Figura 2. (a) Imagem BSD / MEV do itabirito dolomítico: tempo de moagem 12,5min, P₉₅ = 74μm, mostrando partículas livres de hematita (partículas claras); (b) distribuição de massa de Fe e CO₃²⁻ em função da granulometria das partículas.

3.2. Separação Magnética

A Tabela 3 mostra os resultados dos teores de Fe, CO₃²⁻ e SiO₂ no concentrado e no rejeito, dos testes cujo planejamento é mostrado na Tabela 1. A avaliação da qualidade de ajuste de modelo foi feita pela análise dos resíduos e da variância. Dos quatro modelos de ajuste testados (linear, linear + squares, linear + interações e quadrado completo), o quadrático completo foi o que se ajustou melhor as respostas (teor de Fe, CO₃²⁻ e SiO₂ no concentrado e no rejeito).

Tabela 3. Teores de Fe, CO₃²⁻ e SiO₂ no concentrado e no rejeito (as condições de cada teste são mostradas na Tabela 1).

Teste	Concentrado (%)			Rejeito (%)		
	Fração Magnética			Fração não Magnética		
	Fe	CO ₃ ²⁻	SiO ₂	Fe	CO ₃ ²⁻	SiO ₂
T1	64,5	4,6	0,8	14,1	47,0	5,4
T2	61,9	6,8	0,8	14,1	47,0	5,0
T3	59,6	9,0	0,9	14,0	49,0	5,0
T4	57,6	11,0	0,8	14,5	47,0	5,4
T5	56,2	12,3	0,9	15,2	46,0	5,5
T6	65,3	3,7	0,7	14,5	40,5	5,4
T7	64,7	4,4	0,7	8,1	52,5	5,2
T8	63,6	5,5	0,7	8,6	51,5	4,1
T9	61,5	7,5	0,6	5,3	52,6	5,7
T10	60,4	8,4	0,7	4,6	55,5	6,1
T11	67,0	1,9	0,72	30,8	55,5	2,88
T12	67,2	2,2	1,0	9,5	34,2	5,05
T13	66,7	2,7	0,5	7,3	51,1	5,4
T14	64,1	5,8	0,7	6,5	52,6	5,1
T15	63,2	5,8	0,6	6,1	53,4	5,7

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados de cálculos estatísticos do efeito dos fatores e das suas interações, realizados no Minitab 17, para o concentrado e para rejeito. Apenas os efeitos dos fatores e as interações com valor de $p < 0,05$ são considerados estatisticamente significativos. Para o teor de Fe no concentrado, os fatores e as suas interações são todos significativos (Tabela 4). O GAP tem efeito positivo e o CM tem efeito negativo, sendo que todas as interações têm efeito positivo. Portanto, para ter alto teor de Fe no concentrado, o CM deve estar no nível baixo e o GAP no nível alto, como também mostra o gráfico de superfície de resposta de Fe (Figura 3a), e o mínimo teor de ferro é alcançado com nível baixo de GAP e alto de CM.

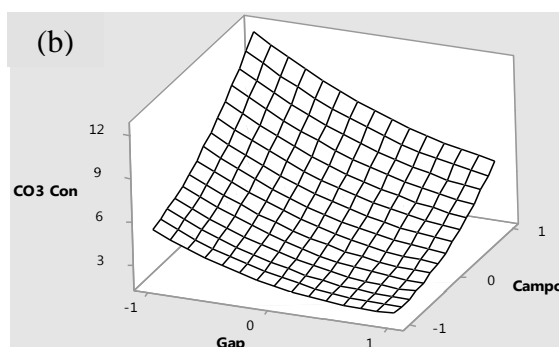
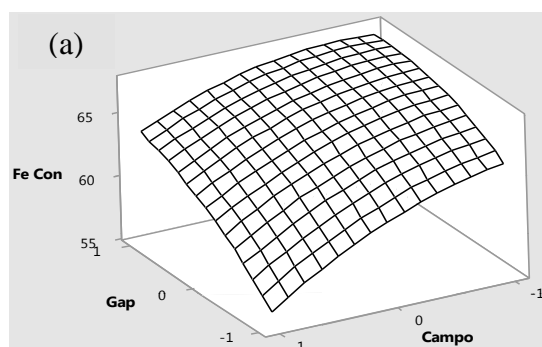
Para o teor de CO_3^{2-} no concentrado, os fatores e as suas interações são todos significativos (Tabela 4). O GAP tem efeito negativo e o CM positivo, somente a interação GAP*CM tem efeito negativo. Isto significa que, para minimizar o teor de CO_3^{2-} o GAP deve estar no nível alto e o CM no nível baixo. O gráfico da superfície de resposta de CO_3^{2-} mostra este comportamento (Figura 3b). Para o teor de SiO_2 no concentrado, os fatores e suas interações são todas não significativas. O gráfico de superfície de resposta mostra que o mínimo teor de SiO_2 é alcançado com GAP e CM no nível alto (Figura 3c).

Tabela 4. Cálculo dos principais fatores, efeitos e interações para o concentrado ($\alpha = 0,05$).

Factor	Fe			CO_3^{2-}			SiO_2		
	Efeito	SE	p	Efeito	SE	p	Efeito	SE	p
Constante		0,417	0,000		0,420	0,000		0,073	0,000
GAP	5,43	0,199	0,000	-4,86	0,200	0,000	-0,13	0,035	0,173
CM	-5,42	0,224	0,000	5,39	0,225	0,000	-0,03	0,039	0,690
GAP*GAP	-3,72	0,428	0,002	3,43	0,431	0,003	0,31	0,075	0,067
CM*CM	-2,55	0,392	0,010	2,21	0,395	0,021	0,00	0,068	0,984
Gap*CM	1,86	0,263	0,006	-1,41	0,264	0,026	-0,09	0,046	0,426

Tabela 5. Cálculo dos principais fatores efeitos e interações para o rejeito ($\alpha = 0,05$).

Factor	Fe			CO_3^{2-}			SiO_2		
	Efeito	SE	p	Efeito	SE	p	Efeito	SE	p
Constante		2,03	0,038		2,04	0,000		0,502	0,000
GAP	-0,75	0,971	0,706	0,36	0,974	0,859	-0,76	0,240	0,146
CM	-11,84	1,09	0,000	10,50	1,10	0,001	1,00	0,270	0,096
GAP*GAP	13,46	2,09	0,010	-7,17	2,09	0,121	-0,54	0,515	0,612
CM*CM	8,75	1,91	0,048	10,59	1,92	0,022	0,46	0,472	0,641
GAP*CM	-11,25	1,28	0,002	7,33	1,28	0,019	0,91	0,316	0,184



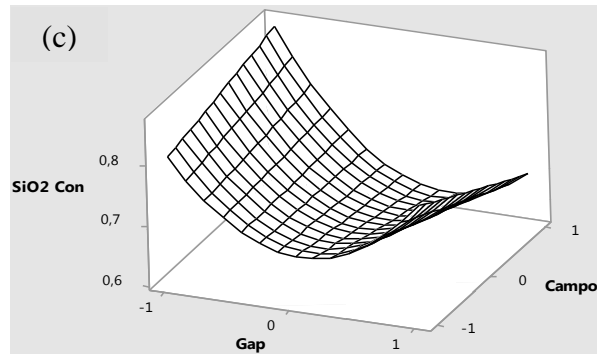


Figura 3. Superfície de resposta para teores no concentrado: (a) Fe; (b) CO_3^{2-} e (c) SiO_2 .

3.2.1. Otimização

A Tabela 6 apresenta as condições dos fatores GAP e CM para otimização das respostas, calculado a partir do Minitab 17, de modo a: maximizar o teor de Fe e minimizar o de CO_3^{2-} e SiO_2 no concentrado; maximizar o teor de CO_3^{2-} e SiO_2 e minimizar o de Fe no rejeito. O ponto ótimo para separação magnética foi alcançado com GAP no nível alto +1 (5,0 mm) e CM no nível baixo -0,1717 (5554,0 Gauss). Os resultados dos testes de confirmação da otimização são apresentados na Tabela 7. A média dos teores de Fe, CO_3^{2-} e SiO_2 no concentrado foram de 67,17; 2,18 e 0,36%, respectivamente, e no rejeito de 7,31; 53,00 e 6,01%, respectivamente. As médias destes teores ficaram em conformidade com os valores esperados da otimização (Tabela 6).

Tabela 6. Resultado para otimização da resposta, calculado a partir do Minitab 17 para obter no concentrado: o teor máximo de Fe e o mínimo de CO_3^{2-} e SiO_2 ; no rejeito: o teor mínimo de Fe e máximos de CO_3^{2-} e SiO_2 .

	Nível	CM	GAP
	Alto	+1,0	+1,0
*D: 0.7458	Ótimo	[-0,1717] (5554,0 Gauss)	[1.0] (5,0 mm)
	Baixo	-1,0	-1,0

* D: função de desejo

Tabela 7. Testes de confirmação dos fatores otimizados

Teste	Concentrado			Rejeito		
	Fração magnética (%)			Fração não magnética (%)		
	Fe	CO_3^{2-}	SiO_2	Fe	CO_3^{2-}	SiO_2
T16	66,83	2,25	0,43	7,80	52,60	5,90
T17	67,41	2,00	0,33	7,12	53,00	6,27
T18	67,27	2,28	0,33	7,00	53,40	5,85
Média	67,17	2,18	0,36	7,31	53,00	6,01
Erro	0,30	0,15	0,06	0,43	0,40	0,23
Expetativa	66,25	3,17	0,72	9,4	51,58	4,54

Tabela 9. Análise química completa do teste T17

Produtos	Teor (%)								
	Fe	Mg	Ca	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CO ₃ ²⁻	PPC
Concentrado	67,41	0,60	0,28	0,33	0,07	0,04	0,02	2,00	2,30
Rejeito	7,12	12,58	14,30	6,27	1,11	1,40	0,87	53,00	---

4. CONCLUSÃO

O Itabirito dolomítico da Mina de Conceição – MG é basicamente constituído por dolomita e hematita. A diferença de propriedade magnética entre estes dois minerais permitiu a concentração de itabirito dolomítico por separação magnética via úmida. Os fatores campo magnético e o tamanho de GAP da matriz, assim como as interações entre elas tem efeitos nas respostas de teor de Fe, CO₃²⁻ e SiO₂ no concentrado e no rejeito. O ponto ótimo para concentração por separação magnética foi alcançado com valor do campo magnético no nível baixo (5554,0 Gauss) e tamanho de GAP da matriz no nível alto (5 mm). Os testes de confirmação de otimização mostraram que nestas condições a média dos teores de Fe, CO₃²⁻ e SiO₂ no concentrado foram de 66,25, 3,17 e 0,72%, respectivamente. O balanço de massa e metalúrgico do teste T17 mostrou que as recuperações de massa e de Fe foram de 62,29 e 93,90%, respectivamente. Portanto, é possível se obter um concentrado rico em Fe a partir da concentração por separação magnética de itabirito dolomítico, estéril da extração de mineiro de ferro.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Tecnologia Mineral do CDTN, CAPES e Vale S.A.

6. REFERÊNCIA

- LUZ, A. B da. SAMPAIO, J. A. Química de Superfície na Flotação. In: LUZ, A. B da. SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. de; Tratamento de Minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 339-402.
- RIBEIRO, J. P., RIBEIRO, C. H. T. The No BLOCK Technology A Major Breakthrough in Wet High Intensity Magnetic Separation (WHIMS). Rem: Revista Escola de Minas, v. 68, n. 3, p.361-366, 2015.
- ROCHA, A. C. P da. Avaliação do material estéril de formação ferrífera em mineração para disposição seletiva e reaproveitamento futuro. 2015. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- ROSIÈRE C.A., CHEMALE JR., F. Itabirites e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero: uma visão geral e discussão. Geonomos, v. 8, n.2 p. 27-43, 2000.
- ROSIÈRE, C. A., SPIER, C. A., RIOS, F. J., SUCKAU, A. V. E. The Itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. Reviews in Economic Geology, v.15, p. 223-254. 2008.
- SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., LUZ, A. B da. Tratamento de Minério: Ensaio de separação magnética e eletrostática. In: SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 321 – 348.
- SILVA, M. B. da; LUZ, J. A. M. da; Magnetic scavenging of ultrafine hematite from itabirites. Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 66, n. 4, p. 499-505, 2013.
- WILLS, B. A; NAPIER-MUNN, T. J. Mineral Processing Technology. 7ª ed. Elsevier Science & Technology Books, 2006.