

Uma abordagem estatística da separação magnética de rejeitos de minério de ferro

A statistical approach on the magnetic separation of iron ore tailings

Papini, R. M.^{1*}
Furtado, V. M.¹
Paiva, F. L. P.¹
Tameirão, D. R.¹
Gomes, A. C. F.²

¹Federal University of Minas Gerais, Antônio Carlos Avenue, 6627, Belo Horizonte-MG. ZIP CODE: 31270901, Brazil.

²Federal University of Mato Grosso, Fernando Corrêa Costa, 2367, Cuiabá-MT. ZIP CODE: 78060-900, Brazil.



RESUMO

Tendo em vista o viés socioambiental, os rejeitos de minério são alvos constantes de pesquisa e aplicações tecnológicas. Foi caracterizado um material disposto em barragem de rejeitos de uma operação de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, em que a rota de beneficiamento usa separação magnética. O material possui densidade de $2,98 \text{ g/cm}^3$, fases minerais de goethita, magnetita, hematita, quartzo, caulinita e gibbsita, com 95% passante em $150 \mu\text{m}$, 33% de passante em $38 \mu\text{m}$ e 8% menor que $22 \mu\text{m}$. Os testes de separação magnética foram realizados no separador tipo Jones e a curva de dispersão do material foi ensaiada, tendo seu máximo de dispersão em pH 11,0, porém escolheu-se pH 10,3 para preparo da polpa afim de evitar o consumo excessivo de NaOH. Duas rotas foram ensaiadas com Rougher e Cleaner, onde uma rota teve deslamagem e outra não, para comparar a influência dos finos no desempenho do equipamento. A rota com presença de finos obteve concentrado médio de 61,27% de Fe, 7,05 SiO_2 e Rglobal de 78,34%, enquanto a rota sem finos obteve 60,63% de Fe, 8,72% SiO_2 e Rglobal de 83,66%. Após os testes, realizou-se uma análise ANOVA e um teste de significância honesto de Tukey. Essas metodologias permitiram testar a relevância estatística de algumas variáveis operacionais.

Palavras Chave: rejeito, separação magnética, finos, minério de ferro.

ABSTRACT

Ore tailings are constant target of research and technological applications. A tailing dam material from an iron ore operation (located at the Quadrilátero Ferrífero) was characterized. The processing route uses magnetic separation. The characteristics of the material and which variables statistically influence the performance of the concentration was studied. The material presents a density of 2.98 g/cm^3 , phases the minerals of goethite, magnetite, hematite, quartz, kaolinite and gibbsite. It also has 95% of the mass passing through $150 \mu\text{m}$, 33%

passing through 38 μm and 8% with less than 22 μm . Magnetic separation tests were performed on the Jones separator and the material dispersion curve was tested, having its maximum dispersion at pH 11.0, but pH 10.3 was chosen for preparation of the pulp to avoid excessive consumption of NaOH. Two routes were tested with Rougher and Cleaner, in one route the mud was removed to compare the influence of the fines on the performance of the equipment. The route with presence of fines obtained an average concentrate of 61.27% Fe, 7.05 SiO_2 and R_{global} of 78.34%, while the route without fines obtained 60.63% Fe, 8.72% SiO_2 and R_{global} of 83.66%. After the tests an anova analysis and a Tukey's honest significance test were carried out. These methodologies allowed testing the statistical relevance of some operational variables.

Keywords: tailing, magnetic separation, fines, iron ore.

INTRODUÇÃO

O Grupo Itabira, no Quadrilátero Ferrífero, é composto por um conjunto de formações ferríferas metamórficas como itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos, sendo uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do mundo. Segundo Rosière *et al.* o metamorfismo e deformação ao longo da evolução geológica do Grupo Itabira modificaram características primárias dos sedimentos e garantiram ao conjunto um aspecto único [1]. Os itabiritos, principal alvo de exploração do cenário atual, são formações que podem apresentar corpos de alto teor (>64% Fe), bandamento bem definido alternando entre sílica (quartzo) e óxidos de ferro, permitindo uma rica caracterização dessas fases. Ferreira *et al.* indique os rejeitos do processamento do minério de ferro itabirítico são o quartzo e os óxidos de ferro não recuperados [2]. Eles são divididos em duas frações: uma com aspecto arenoso, mais grosseira, e outra com granulometria mais fina e aspecto de lama, rica em óxidos e maior quantidade de partículas em suspensão. Reis, discute como a preocupação com a conservação ambiental ao maior aproveitamento de rejeitos de mineração, seja pelo emprego de novas tecnologias de beneficiamento destes “minérios”

de teores mais pobres ou pela utilização em outras aplicações [3]. Sem dúvida alguma, para a validação do aproveitamento destes rejeitos faz-se necessária a caracterização tecnológica dos mesmos (caracterização mineralógica, granulométrica, química e ensaios específicos de determinada aplicação).

Estudos com rejeito da fração vista como fina, por Ferreira *et al.* [2], em rota de separação magnética buscaram compreender como o tamanho e variáveis do processo podem influenciar na resposta do separador magnético tipo Jones. A força magnética, conforme Schneider *et al.* [4], que atua em uma partícula dentro de um campo magnético pode ser escrita como o produto de dois fatores:

$$F = V_m f_m \quad (1)$$

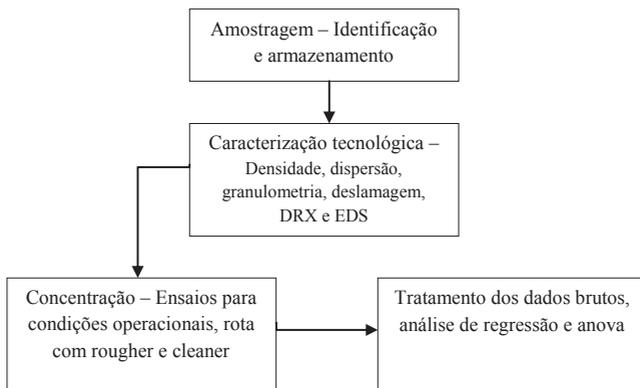
Onde V_m é o volume magnético da partícula, m^3 , e f_m é a densidade da força magnética, N/m^3 . Esse volume é determinado pelas características da partícula e a densidade magnética é função da geometria do equipamento e do campo magnético gerado por este. Utilizando o conceito de volume magnético, Schneider *et al.*, observa que este volume de uma partícula composta por mais de um mineral é a soma dos volumes magnéticos dos componentes individuais, logo ela tende a se comportar como o mineral de maior susceptibilidade magnética [4].

Com o aprofundamento dos depósitos ocorre o seu empobrecimento e a maior necessidade de cominuição, aumentando a quantidade de finos no material [5]. Além de tal fato, ressalta que grande parte dos depósitos brasileiros de minérios de ferro contém altas porções de finos por ação do intemperismo, e que ocorre geração de partículas finas durante as operações de lavra e processos de cominuição [5].

Nota-se então a crescente necessidade de estudos para melhorar a compreensão do comportamento dos finos de rejeitos nas rotas de concentração magnética, haja visto que é uma realidade a recuperação de rejeitos estocados hoje como passivo ambiental.

PARTE EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios – UFMG. Foram utilizados 11 kg de rejeito de minério de ferro, seco, proveniente da mina de Pau Branco da Vallourec, localizada em Brumadinho. A amostra foi homogeneizada manualmente e quarteada por meio dos divisores de rifles 90/12, 30/16 e 10/16 até que as alíquotas tivessem massa menor que 1 kg. Um arquivo maior que 5 kg foi guardado. A figura abaixo descreve o fluxograma de ensaios.



A densidade relativa foi determinada por picnometria segundo [6]. Foi utilizada balança com resolução de 0,01 g.

Tabela 1. Resultados do ensaio de picnometria

Ensaio	Densidade relativa				
	P_p (g)	P_{n+a} (g)	P_{n+m} (g)	P_{n+m+a} (g)	$D_{relativa}$
1	32,80	132,60	61,40	151,60	2,98
2	32,80	132,50	63,40	153,00	3,03
3	32,80	132,50	62,80	152,30	2,94

Por fim, adotou-se a densidade média de 2,98, sendo 0,04 g/cm³ o desvio padrão amostral.

O ensaio de dispersão utilizou o Tubo de Galery de acordo com a metodologia aplicada por [6].

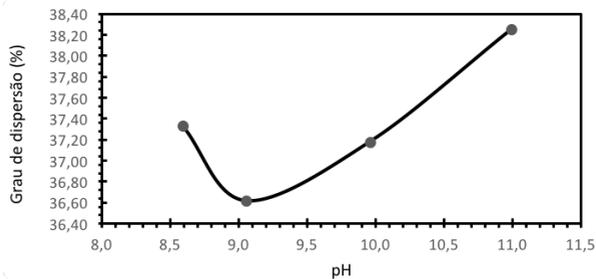


Figura 2. Gráfico de dispersão por Tubo de Galery

O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento a úmido com peneiras da série Tyler, onde é adicionada a peneira de 45 μm para garantia de especificação tipo “Pellet Feed Fines”.

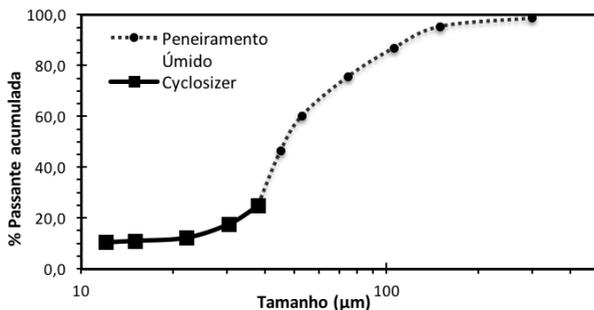


Figura 3. Distribuição granulométrica global da alimentação.

Dos resultados observa-se que 95% do material é passante em 150 μm , 33% de passante em 38 μm e 8% menor que 22 μm . O d_{50} calculado por interpolação igual a 51 μm . Assim, determinou-se que duas rotas de concentração seriam trabalhadas, uma com deslamagem, conforme rotina de [6], e outra não. O pH de deslamagem foi o mesmo do circuito de concentração fixado em $10,3 \pm 0,1$ para obtenção do maior grau de dispersão acima do pH in natura. Houve perda de 16,22% da massa, que conforme distribuição granulométrica indica separação de partículas de até 25 μm .

As análises de difratometria de raios-X foram realizadas em difratômetro, Philips (Panalytical), para o material de alimentação, todas as faixas contempladas no peneiramento e faixa única para o cyclosizer com sistema X'Perd-APD, controlador PW 3710/31, executando varredura de 2Θ de 3-80°. A análise química quantitativa foi realizada via EDS, em equipamento BRUKER S2 RANGER, com método de pastilha prensada para curva de minério de ferro.

A partir dos ensaios exploratórios e da caracterização do material, confirmando liberação com o uso de lupa de aumento de 20x, foram determinados os parâmetros operacionais elencados em tabela.

Tabela 2. Variáveis operacionais determinadas pelos ensaios exploratórios e fixadas para repetição de rota de concentração.

Rota	Variáveis operacionais				
	A.L.R (L)	A.L.C (MPa)	%sólidos (m/m)	Campo (Gauss)	Matriz (mm)
C. Lama	1,0	0,1	50,0	8.500	1,5
S. Lama	1,0	0,1	50,0	10.000	1,5

Na Tabela 2 apresenta-se as condições de operação para o separador tipo Jones, com etapa Rougher e Cleaner, matriz ranhurada, onde A.L.R = água de lavagem do rejeito, com volume fixo, A.L.C = pressão de lavagem do concentrado, com tempo máximo de 10 segundos, C. Lama = rota com presença de finos/lamas e S. Lama = rota com deslamagem, ou seja, sem finos. A diferenciação das rotas tem efeito de comparação da fração mais fina no desempenho do circuito. O pH, a partir da curva de dispersão, teve o melhor valor em $10,3 \pm 0,1$, para o menor consumo de NaOH e obtenção de dispersão acima do estado *in natura*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As rotas foram ensaiadas em duplicata. Para realização do estudo estatístico, os resultados dos ensaios em condições similares do trabalho de [6] foram compilados. Realizou-se análise anova para analisar se a diferença entre pelo menos um dos tratamentos apresenta significância estatística em um intervalo de 95%. A tabela a seguir

sumariza as variáveis operacionais usadas em cada tratamento:

Tabela 3. Variáveis operacionais usadas em cada tratamento

Tratamento	S1	S3	S5	S7	S2	S4	S6	S8
% Sólidos	50	50	50	50	30	30	30 i.f	30 i.f
pH	10.5	natural	natural	natural	10.5	natural	natural	natural
Campo (Gauss)	11.000	7.000	11.000	10.000	8.000	10.000	10.000	11.000

O valor de erro tipo I foi $\alpha=0,05$, ou seja, p-valores menores que α indicam que pode-se rejeitar a hipótese nula com um nível de confiança de 95%. O valor encontrado de estatística F foi 6,389 e o p-valor foi 0,00106. Como p-valor $< \alpha$, rejeita-se a hipótese nula de equidade entre os resultados de todos os tratamentos. Então é feito teste de Tukey segundo [7].

Tabela 4. P-valor obtido no teste de Tukey de diferença entre duas médias

	S1	S4	S6	S8	S2	S3	S5
S4	0,99665	-	-	-	-	-	-
S6	0,22168	0,06945	-	-	-	-	-
S8	0,36219	0,74424	0,00319	-	-	-	-
S2	0,41303	0,79687	0,00388	1	-	-	-
S3	0,66304	0,95515	0,00902	0,99923	0,99980	-	-
S5	0,24752	0,59141	0,00192	0,99999	0,99994	0,99089	-
S7	0,22667	0,55769	0,00173	0,99997	0,99984	0,98647	1

Os p-valores menores que α foram destacados em negrito. Destaca-se que, para uma porcentagem de sólido de 30% i.f. com pH natural, o aumento do campo magnético alterou significativamente a média obtida nos ensaios. Nas polpas com 50% de sólidos, a variação de pH, em um campo de 11.000 Gauss, não apresentou mudança significativa no valor obtido nos ensaios. Além disso, observa-se que nesta porcentagem de sólidos e pH natural, a alteração do campo magnético não alterou significativamente o resultado obtido.

A mudança na porcentagem de sólidos, em um campo de 10.000 Gauss e pH natural, não foi estatisticamente significativa. Por fim, a diferença entre os tratamentos S6 e S4 apresentou p-valor baixo

(p-valor = 0.0694). Mesmo não podendo rejeitar a hipótese nula, a inclusão de finos utilizando as variáveis operacionais dos tratamentos S6 e S4 alterou fortemente o resultado do ensaio.

Na Tabela 5 são usadas as abreviações e suas correspondências A. – alimentação, C. - concentrado, R. - rejeito, Rec. Fe – recuperação metalúrgica de ferro, Rec. Y – recuperação mássica, e nota-se que a recuperação do circuito S. Lama é maior, mas este obtém um concentrado final com menor teor de Fe e maior teor de SiO₂.

Tabela 5. Média da duplicata do balanço metalúrgico das rotas de concentração executadas.

Etapa	Rota C. Lama					Rota S. Lama				
	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P (%)
A. Rougher	35,19	40,26	0,97	0,28	0,04	34,75	41,99	0,84	0,28	0,04
C. Rougher	58,13	10,01	0,80	0,36	0,06	56,92	12,02	0,89	0,36	0,07
R. Rougher	12,88	69,66	1,14	0,21	0,03	9,49	76,14	0,78	0,18	0,01
A. Cleaner	58,13	10,01	0,80	0,36	0,06	56,92	12,02	0,89	0,36	0,07
C. Cleaner	61,27	7,05	0,69	0,36	0,06	60,63	8,72	0,79	0,36	0,07
R. Cleaner	24,55	40,55	2,06	0,38	0,07	23,78	41,81	1,80	0,38	0,07
R. Global	13,79	67,57	1,20	0,22	0,03	10,91	72,66	0,89	0,20	0,02
	Rougher	Cleaner	Global			Rougher	Cleaner	Global		
Rec. Fe (%)	81,21	96,29	78,34			87,24	95,80	83,66		
Rec. Y (%)	49,18	91,35	44,90			53,26	89,95	47,91		

CONCLUSÃO

As rotas C. Lama e S. Lama tiveram campos com intensidades diferentes, dado que a menor presença de finos na rota S. Lama aumenta o volume médio das partículas, e a partir da equação 1, a força magnética seria maior. Em contrapartida, a análise granuloquímica mostrou maior concentração de SiO₂ em frações mais grosseiras, logo, a susceptibilidade magnética média diminui, sendo assim necessário maior densidade magnética para manutenção da mesma força. Assim como colocado, para os tratamentos S6 e S4 da Tabela 4, a presença de finos altera os resultados fortemente, apesar do p-valor ser ligeiramente maior do que $\alpha=0,05$. Percebe-se pela tabela 5 que o circuito S. Lama obtém maior recuperação em sacrifício da perda de teor, uma vez que a fração fina é rica no elemento de interesse.

REFERENCIAS

1. C. A. Rosière, F. Chemale Jr. “Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão”. *Geonomos* 8,2; 27-43. Belo Horizonte, 2.000.
2. K. C. Ferreira, M. A. M. Aguiar, M. F. M. Oliveira, A. Q. N. Silva e A. E. C. Peres. “Estudos do aproveitamento de rejeitos de um minério de ferro itabirítico da região de Morro do Pilar”. *HOLOS*, a. 32, vol. 2, 77-83. IFRN, 2016.
3. E. L. Reis. “Caracterização de resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês silico-carbonatado da RDM – Unidade Morro da Mina”. DEMIN-UFOP, Ouro Preto, 2005.
4. C. L. Schneider, M. Calixto. “Desenvolvimento de um modelo para separadores magnéticos tipo Jones”. VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, 2.006.
5. M. A. Gomes. “Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro”. DEMIN-UFOP, Ouro Preto, 2.009.
6. A. C. F. Gomes. “Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração”. PPGEM-UFMG, Belo Horizonte, 2.017.
7. J. W. Tukey, (1.949). “Comparing individual means in the analysis of variance”. *Biometrics*, 99-114.