

# RECUPERAÇÃO DE FERRO A PARTIR DO REJEITO DE ESPIRAIS DA MINA DE ÁGUA LIMPA POR MEIO DE SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Fábio de São José <sup>1</sup>  
Célio Guimarães Oliveira <sup>2</sup>  
Carlos Alberto Pereira <sup>1</sup>

## Resumo

Matérias-primas minerais são submetidas ao processamento mineral visando adequá-las quanto ao aspecto físico para um processo subsequente, objetivando a extração ou refino de um ou mais metais ou compostos orgânicos/inorgânicos úteis à atividade humana. No entanto, e com certa exigência contemporânea, a indústria utiliza-se de vários procedimentos do beneficiamento para reutilizar ou redirecionar volumes antes considerados rejeitos dos processamentos. Especificamente, e envolvido com estudos de reaproveitamento, o presente trabalho usufruiu de mecanismos de separação magnética para lidar com rejeito de minério de ferro das espirais da Unidade Operacional de Água Limpa/Vale - Rio Piracicaba-MG. O trabalho realizado demonstrou ser viável o tratamento do rejeito das espirais concentradoras. Utilizou-se de intensidade de campo de 6000 Gauss e vazão em 500 mL/s o que possibilitou recuperação de Fe igual a 93% com 60% de Fe. Outros ganhos consideráveis foram redução dos teores de ferro do rejeito, que baixaram de 20% para uma média de 3%, o que ajuda na racionalização de um bem não renovável e aumento da vida útil das pilhas e barragem de rejeitos.

**Palavras-chave:** Rejeito; Minério de ferro; Separação magnética; Mina de água limpa.

## IRON RECOVERY FROM TAILINGS PRODUCED BY A SPIRALS CONCENTRATOR OF ÁGUA LIMPA MINE USING MAGNETIC SEPARATION

## Abstract

Mineral raw materials are submitted to mineral processing in order to adapt them as the physical aspect to a subsequent process, aiming at the extraction or refining of one or more metals, organic or inorganic compounds useful to human activity. However, and with some contemporary demand, the industry uses several processing procedures to reuse or redirect volumes before considered the processing waste. Specifically, and involved with studies of reuse, the present work used a magnetic separation mechanisms to deal with iron ore tailings from the spirals concentrators of Água Limpa Operational Unit/Vale S.A - Rio Piracicaba-MG. The work proved to be possible the treatment of this tailing with feasible iron recovery. Was used a field strength of 6000 Gauss and water flow equal to 500 mL/s which made possible to achieve 93% of metallic recovery with containing about 60% of Fe. Other considerable earnings were the reduction of iron levels in the tailings, which dropped from 20% to 3% on average, allowing the optimization of a nonrenewable resource and increase of tailings dam useful life.

**Keywords:** Tailings; Iron ore; Magnetic separation; Água limpa mine.

## I INTRODUÇÃO

Matérias-primas minerais precisam ser submetidas a etapas de beneficiamento, por meio das quais se pode adequá-las à forma de produtos finais ou a um sequencial processo de fabricação, a exemplo do minério de ferro que segue rota pirometalúrgica.

Competentemente a cada espécie mineral e, após dispendiosas pesquisas, estabelecem-se procedimentos técnicos definidos e capazes de adequar a granulometria, a forma e a proporção relativa das espécies minerais, consistindo no beneficiamento ou tratamento de minérios. Dessa forma,

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: [fabio.sao.jose@hotmail.com](mailto:fabio.sao.jose@hotmail.com)

<sup>2</sup>Mina de Água Limpa, Vale S.A., Rio Piracicaba, MG, Brasil.



define-se a melhor rota de adequação do bem mineral. Por outro lado, rotas em plena operação necessitam de constantes ajustes ditados pela evolução do jazimento ou questões de mercado, obrigando, portanto mais pesquisas que permitam a manutenção do empreendimento.

Outra vertente, mais contemporânea, que instiga os estudos na área de tratamento de minérios é a reconsideração dos volumes dados como rejeitos nos processos já realizados. Para isso, as mesmas técnicas e operações para tratar *run of mine* são portanto aplicadas a estes rejeitos.

Especificamente, incluso a esse último viés de objetivo, o presente trabalho usufruiu de mecanismos de separação magnética para lidar com rejeito de minério de ferro das espirais da Usina de Água Limpa.

A Unidade Operacional de Minas de Água Limpa engloba as cavas de Água Limpa, Morro Agudo e Cururu e, insere-se no distrito ferrífero de Rio Piracicaba e João Monlevade, pertencente ao Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Trata-se de um distrito isolado, de direção estrutural nordeste, cercado pelo embasamento granitognáissico [1].

Com este estudo buscou-se aperfeiçoar a exploração de um bem mineral não renovável por meio de complementação das recuperações alcançadas nas etapas de concentração, e consequentemente aumentar a vida útil de pilhas de rejeito.

Os rejeitos como subprodutos, apresentam teoricamente baixo teor do mineral de interesse, por vezes devido a incompleta liberação, fruto de partículas mistas ou do uso de técnicas arcaicas e ineficientes durante os processos de concentração.

A Mina de Água Limpa é reconhecida como uma das porções do Quadrilátero Ferrífero que apresenta minerais de ferro (entre os óxidos e hidróxidos: 2,65% hematita especular, 16,44% hematita lamelar, 65,24% hematita granular, 7,40% hematita martítica, 4,92% magnetita, 3,36% goethitas) com maior tamanho de cristais (tamanho médio de 92  $\mu\text{m}$ ) [2].

A coleta magnética de qualquer material pode ser avaliada de forma direta, por meio de ensaios de laboratório. Este tipo rápido de análise é capaz de ditar se o material em estudo é candidato ou não à separação magnética. No mínimo, o ensaio de separação magnética, em escala de bancada, deve ser conduzido para determinar a resposta de um dado material a um campo magnético. Assim, o material selecionado deve responder ao campo, para que a separação magnética seja considerada uma opção de processo [3].

Um equipamento de laboratório muito empregado com este propósito é o separador magnético a úmido de alta intensidade, também designado por WHIMS (do inglês, *Wet High Intensity Magnetic Separator*) [4], cujo princípio de funcionamento está ilustrado pela Figura 1. Tal equipamento, dotado de uma câmara/vasilha removível de volume igual 311 mL, aceita uma grande variedade de tipos de matrizes, como esferas de aço e palhas de aço inoxidável, por exemplo. A densidade de fluxo magnético presente é de 21,6 kGauss

(máximo) com o uso de esferas de aço como matriz, e de 3,8 kGauss na configuração sem a câmara e a matriz. A intensidade variável do campo magnético do equipamento é ajustada por meio do controle da corrente elétrica da bobina (0 a 6A). A alimentação de amostras permitida ao WHIMS 4L é de até 100 g (base seca), dependendo do teor magnético do material.

## 2 METODOLOGIA

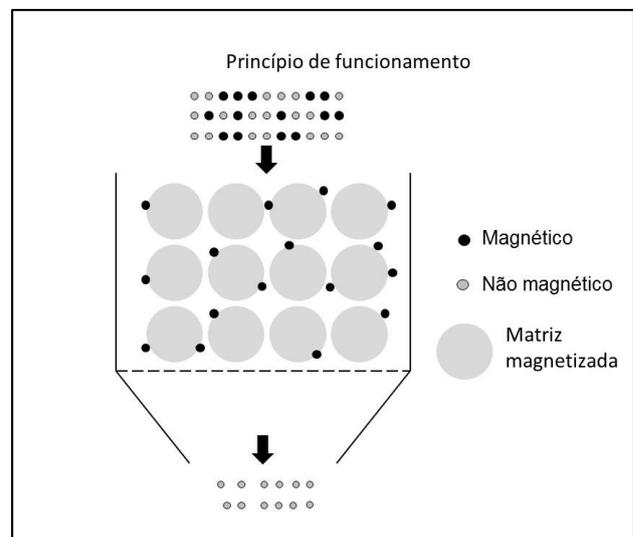
### 2.1 Preparação das Amostras

Coletou-se aproximadamente 100 kg do rejeito final das espirais da etapa *scavenger* da usina concentradora de Água Limpa e posteriormente foi conduzida ao laboratório de processos da usina de Brucutu, no qual se realizou todos os procedimentos de preparação, caracterização e concentração magnética.

A preparação das amostras finais, destinadas às caracterizações e aos testes de concentração foi feita a partir de técnicas de homogeneização e quarteamo por pazada alternada e pilha cônica até a obtenção de alíquotas de aproximadamente 300 g para a caracterização e 200 g para ensaios de concentração. Ainda cerca de 50 g, representativos da amostra global, foi encaminhada à análise química.

### 2.2 Caracterização das Amostras

Realizou-se análise granulométrica por meio de peneiramento a úmido e utilizando séries de peneiras com aberturas condizentes com o padrão Tyler®  $\sqrt{2}$  de peneiras, para posterior conhecimento da distribuição de ferro por faixas por meio de análises químicas.



**Figura 1.** Esquema de um separador magnético de laboratório destacando seu princípio de funcionamento.

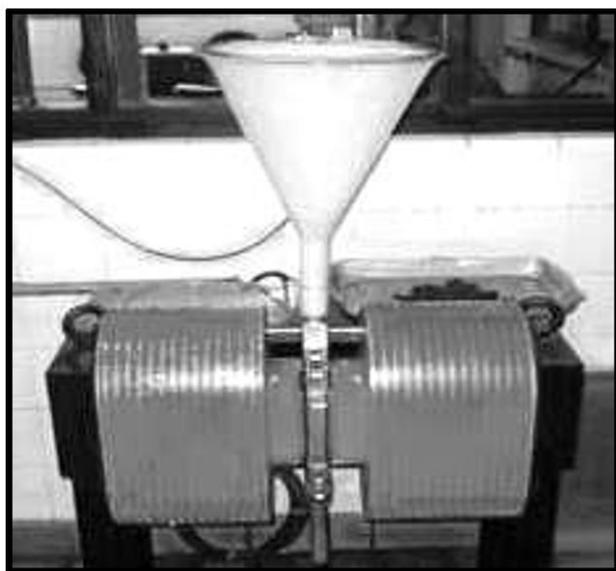
## 2.3 Análise Química

Empregaram-se os métodos de fluorescência de raios X (espectrômetro da marca Philips – PANalytical®, modelo MagiX), espectrometria de emissão atômica (espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente, marca Agilent®, modelo 725) e por via úmida, visando os seguintes elementos e/ou compostos químicos:  $Fe_{total}$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e P.

## 2.4 Ensaios de Concentração Magnética

Concentrador magnético de laboratório (Figura 2), com *gap* de matriz de 2,5 mm, intensidade de campo com ajuste entre 3000 e 6000 Gauss foi o equipamento utilizado nos ensaios de bancada, objetivando a recuperação de minerais de ferro existentes no rejeito das espirais da usina de Água Limpa.

Vazões de 100, 150 e 200 mL/s foram utilizadas como água de lavagem nos testes. A polpa formada com o rejeito das espirais possuiu cerca de 50% de sólidos.



**Figura 2.** Separador magnético de laboratório SHP3200 (Laboratório de Processos/Brucutu - Vale).

**Tabela 1.** Composição química do rejeito das espirais de Água Limpa

Amostra	%							
	Fe	Desvio*	$SiO_2$	Desvio*	$Al_2O_3$	Desvio*	P	Desvio*
A1	21,04	1,95	68,69	1,13	0,32	6,67	0,02	20
A2	19,71	4,49	70,41	1,35	0,29	3,33	0,01	40
A3	20,39	1,20	69,97	0,71	0,31	3,33	0,02	20
A4	21,23	2,88	68,52	1,37	0,31	3,33	0,02	20
A5	20,72	0,40	69,50	0,04	0,29	3,33	0,02	20
A6	20,73	0,45	69,76	0,41	0,28	6,67	0,01	40
Média	20,64	-	69,48	-	0,30	-	0,017	-

\*Em relação à média.

A matriz utilizada no separador foi composta por esferas de aço de 6 mm de diâmetro.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise Química das Amostras

A Tabela 1 sumariza a composição química das seis amostras escolhidas para os testes de separação magnética. Cada amostra possuía aproximadamente massa de 200 g.

Pode-se, seguramente, considerar as amostras A1 a A6 como representativas em termos de percentuais de Fe,  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ . Contudo, os teores de fósforo variaram em até 50%, apresentando desvio em relação à média de até 40%. Mesmo assim, tal discrepância não inviabiliza o uso das amostras para os objetivos propostos.

### 3.2 Análise Granuloquímica

A Tabela 2 exibe resultados da análise granuloquímica feita com amostra do rejeito das espirais de Água Limpa. Nota-se que as frações abaixo de 0,075 mm asseguraram as maiores percentagens de ferro. Fato que contribui com o processo escolhido, ou seja, indica-se sim a separação magnética a úmido para as faixas consideradas finas. Porém, como salientaram [5] a matriz deverá ser definida de forma a aumentar o gradiente, produzindo sítios dentro das mesmas com campo de alta intensidade e que permita a captura das partículas mais finas.

O efeito da granulometria das partículas na etapa de separação magnética depende do valor de sua susceptibilidade magnética. Para minerais com altos valores de susceptibilidade magnética, como os ferromagnéticos, a granulometria das partículas não influencia os resultados da separação [6].

Com a redução do tamanho das partículas, a energia e a área superficial aumentam, provocando problemas de agregação não seletiva (*slimes coating*) e baixa seletividade na adsorção dos surfactantes na superfície das partículas de menor tamanho. Nesse contexto, surge a oportunidade de aplicação de separadores magnéticos de alta intensidade na recuperação de materiais ferromagnéticos e paramagnéticos de granulometria mais fina [7]. Caso específico de rejeitos de processos como aqueles utilizados nesse estudo.

Nota-se também pela Tabela 2 que as frações com maior massa de retidos compreendem 0,15 a 0,075 mm, somando 84,5% do total e, que dentro do contexto da separação magnética podem ainda ser considerados finos, tornando assim otimistas as avaliações de concentração magnética desse rejeito. Silva [8] avaliou o uso da separação magnética de itabiritos pobres e obteve resultados que mostraram susceptibilidade magnética maior nas frações granulométricas consideradas finas e menores nas frações granulométricas mais grossas.

### 3.3 Ensaios de Separação Magnética

#### 3.3.1 Concentração de ferro

Os testes de separação magnética foram feitos em duplicatas e os resultados apresentados foram apenas aqueles que tiveram um desvio padrão abaixo de 10%.

A alimentação do separador magnético foi à base de polpas, todavia não houve padronização no carregamento

**Tabela 2.** Análise granuloquímica da amostra do rejeito das espirais de Água Limpa

Faixa (mm)	%Fe	%Massa retida
+ 0,15	22,78	29,1
- 0,15 + 0,106	14,36	34,7
- 0,106 + 0,075	14,46	20,7
- 0,075 + 0,045	35,55	9,4
-0,045	64,52	6,1

das mesmas na câmara de separação, nem do tempo de ensaio, pois não foram definidos como critérios de avaliação.

Nota-se, por comparação, Tabela 3, que um aumento da vazão de água de 500 para 1000 mL/s, aliado a um campo de 3000 Gauss, permitiu o arraste demorado de minerais de ferro para o rejeito, com conseqüente queda da recuperação de ferro.

A vazão de água é um das variáveis de processo, e portanto devem ser otimizadas e acompanhadas [5]. O campo mais baixo (3000 Gauss) não foi capaz de reter por si só os minerais ferromagnéticos da amostra.

Os teores de  $Al_2O_3$  e P não sofreram alterações ou pouco se alteraram com a manipulação dos parâmetros de processos escolhidos para as avaliações propostas.

Por outro lado, elevando-se a intensidade do campo magnético (Tabela 4) conclui-se que tal procedimento tornou a separação mais seletiva, com um aumento do teor de sílica no rejeito e assim possibilitou maior recuperação de ferro no concentrado.

No entanto, reduzindo a vazão de água para 500 mL/s possibilitou obter ganhos consideráveis de recuperação, atingindo 93%, maior valor registrado nos ensaios. A seletividade ainda mostrou-se interessante, com menor perda de ferro para o rejeito.

Pode-se considerar, dessa forma, que a combinação de um campo igual a 6000 Gauss com uma vazão de água de 500 mL/s (Tabela 5) permitiu vantajosa recuperação de ferro antes destinado ao rejeito, abrindo possibilidade de estudos mais próximos da escala industrial.

**Tabela 3.** Variação da vazão de água de lavagem com campo constante de 3000 Gauss

Ensaio	Intensidade de campo (Gauss)	Vazão de água (mL/s)	Produto	%				
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	RM
1	3000	500	Concentrado	63,0	9,19	0,41	0,02	56,0
			Rejeito	11,38	82,47	0,30	0,02	
2	3000	1000	Concentrado	63,0	8,51	0,38	0,02	38,0
			Rejeito	13,84	78,77	0,28	0,01	

RM = Recuperação Metalúrgica.

**Tabela 4.** Variação do campo com vazão de água de lavagem constante em 1000 mL/s

Ensaio	Intensidade de campo (Gauss)	Vazão de água (mL/s)	Produto	%				
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	RM
2	3000	1000	Concentrado	63,0	8,51	0,38	0,02	38,0
			Rejeito	13,84	78,77	0,28	0,01	
4	6000	1000	Concentrado	62,0	10,09	0,49	0,02	83,0
			Rejeito	4,86	92,34	0,24	0,01	

RM = Recuperação Metalúrgica

**Tabela 5.** Vazão de água de lavagem de 500 mL/s para um campo constante de 6000 Gauss

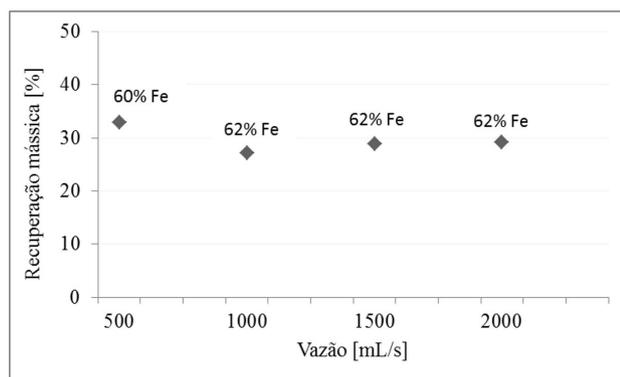
Ensaio	Intensidade de campo (Gauss)	Vazão de água (mL/s)	Produto	%				
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	RM
3	6000	500	Concentrado	60,0	12,82	0,5	0,02	93,0
			Rejeito	2,19	95,83	0,21	0,01	

RM = Recuperação Metalúrgica.

**Tabela 6.** Variação da vazão de água de lavagem para um campo constante de 6000 Gauss

Ensaio	Intensidade de campo (Gauss)	Vazão de água (mL/s)	Produto	%				RM
				Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	
5	6000	1500	Concentrado	62,0	10,06	0,48	0,02	87,0
			Rejeito	3,92	93,67	0,22	0,01	
6	6000	2000	Concentrado	62,0	9,99	0,47	0,02	87,0
			Rejeito	3,67	94,42	0,20	0,01	

RM = Recuperação Metalúrgica

**Figura 3.** Recuperação mássica obtida por separação magnética do rejeito de Água Limpa.

Vieira [9] utilizou também separação magnética a úmido de alta intensidade para recuperar partículas de ferro de material proveniente de barragem de rejeitos. Tal estudo tornou possível a criação de um novo produto, em escala *pellet feed*, após recuperação de 85% de ferro.

Mantendo-se a intensidade do campo em 6000 Gauss (Tabela 6), mas elevando-se a vazão de água para 1500 e 2000 mL/s não ocorreram grandes melhorias no processo, a recuperação metálica foi igual a 87% e permaneceu abaixo do maior valor alcançado com o ensaio número 4.

### 3.3.2 Recuperação mássica

Assim como a recuperação metalúrgica, a recuperação mássica nos ensaios utilizando intensidade de campo magnético igual a 6000 Gauss e vazão de água igual a 500 mL/s foi maior (Figura 3), confirmando-se como melhor combinação. Isso sugere menores perdas de minerais ferromagnéticos e paramagnéticos por arraste para o rejeito dos ensaios.

Contudo, notou-se menor teor de ferro (60%), porém associado a menor perda do mesmo elemento para o rejeito da separação magnética.

O ensaio 4 apresentou resultados que definiram uma razão de enriquecimento igual a 2,91 ( $\%Fe_{\text{alimentação}} = 20,64$  e  $\%Fe_{\text{produto sep. magnética}} = 60$ ) o que reforçou seu bom desempenho.

## 4 CONCLUSÕES

Com o trabalho realizado demonstrou ser viável o tratamento do rejeito das espirais concentradoras da mina de Água Limpa – Vale S.A. Utilizando-se intensidade de campo de 6000 Gauss e ajuste da vazão em 500 mL/s foi possível uma recuperação metálica de até 93% com teor médio de ferro igual a 60%.

Os teores obtidos com campo magnético em 6000 Gauss que corresponde em planta industrial em campos em torno de 12000 Gauss proporcionaram um concentrado possível de ser blendado aos atuais produtos do complexo, e até mesmo se tornar um novo produto no atual cenário que induz a redução dos volumes de rejeitos.

Outros ganhos consideráveis foram reduções dos teores de ferro do rejeito, que baixaram de 20% para uma média de 3%, permitindo manutenção de reserva de um bem não renovável e aumento da vida útil das pilhas de estéril e barragem de rejeitos. Além de incentivar aplicações em planta piloto, via empresas parceiras fornecedoras de equipamentos de concentração magnética.

Toda a faixa de tamanhos em que se encontram as partículas do rejeito trabalhado é, do ponto de vista técnico, possível de concentração por meio de separação magnética de alta intensidade a úmido.

## Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), Fundação Gorceix, CAPES, FAPEMIG e ao CNPq.

## REFERÊNCIAS

- Superintendência Regional de Regularização Ambiental do Leste Mineiro – SUPRAM. Processo de licenciamento ambiental. Belo Horizonte: SUPRAM; 2011. (Protocolo: SIAM N° 0244982/2011).

- 2 Queiros LA. Caracterização de minérios da Mina de Brucutu, VALE, focada na previsibilidade das operações de concentração mineral [tese de doutorado]. Belo Horizonte: Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.
- 3 Mular AL, Barratt DJ, Halbe DN, editores. Mineral processing plant design, practice, and control. Englewood: SME; 2002.
- 4 Outokumpu [página da internet]. [acesso em 11 jan. 2016]. Disponível em: <http://www.outokumpu.com/en/Pages/default.aspx>
- 5 Luz AB, Sampaio JA, França SC. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM; 2010.
- 6 Shao Y, Veasey TJ, Rowson NA. Wet high intensity magnetic separation of iron minerals. *Magnetic and Electrical Separation*. 1996;9:41-51.
- 7 Liu Q, Friedlander FJ. Fine particle processing by magnetic carrier methods. *Minerals Engineering*. 1993;7:449-463.
- 8 Silva JPM. Aplicação de separação magnética de alta intensidade (WHIMS) no beneficiamento de itabiritos pobres [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais; 2014.
- 9 Vieira MG. Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas; Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.

Recebido em: 27 Jan. 2016

Aceito em: 1 Abr. 2016