

(RE)APROVEITAMENTO DE REJEITOS DA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO VISANDO A OBTENÇÃO DE CONCENTRADO FINAL

ULIANA, A.¹, SILVA, J.P.M.², GUEDES, T.S.³

¹Engenheiro de Minas pela UFOP – Samarco Mineração S.A. – alexandro.uliana@samarco.com;

²Engenheiro de Minas pela UFMG – Samarco Mineração S.A. – joao.silva@samarco.com;

³Engenheiro Químico pela UFMG – Gerdau – thiago.guedes@gerdau.com.br.

RESUMO

A Samarco Mineração S.A., em suas unidades industriais localizadas nos municípios de Mariana e Ouro Preto (MG), vem desenvolvendo estudos para o (re)aproveitamento dos rejeitos gerados em suas operações unitárias de flotação. Este (re)aproveitamento visa: obtenção de concentrado com teor de SiO₂ inferior a 1,7% e redução do teor de ferro no rejeito global para níveis inferiores a 5,0%. Atualmente contendo teor médio de 10,0% de ferro (dados Concentrador II, ano 2012), amostras de rejeito foram submetidas a diferentes tecnologias e rotas de processo, sendo a separação magnética e flotação as melhores opções encontradas. Utilizando-se de equipamentos semi-industriais e laboratoriais, teores médios de 3,1% de SiO₂ para o concentrado e 6,2% de ferro para o rejeito foram obtidos. Para as recuperações globais, os valores alcançados foram de 5,1% e 36,5% para a recuperação mássica e metálica, respectivamente. Além dos ensaios, análises complementares foram realizadas. Como resultado do estudo, em maior relevância, cita-se: possibilidade de (re)aproveitamento dos rejeitos atualmente dispostos; obtenção de concentrados comercializáveis e redução do teor de ferro do rejeito global.

PALAVRAS-CHAVE: aproveitamento de rejeitos; separação magnética; caracterização mineralógica.

ABSTRACT

Samarco Mineração, at its industrial units located in cities Mariana and Ouro Preto, state of Minas Gerais, has been developing studies to (re)use of tailings generated in its flotation unit operations. This (re)use aims: obtention of concentrate with silica content less than 1.7% and reduction of iron content in overall tailing to level less than 5.0%. Currently containing average iron content 10.0% (data Concentrator II, year 2012), tailing samples were subjected to different technologies and process routes, being the magnetic separation and flotation the best options found. Using semi-industrial and laboratory equipments, 3.1% of SiO₂ in concentrate and 6.2% of iron in tailing were obtained - average levels. For the overall recoveries, the levels obtained were 5.1% and 36.5% for mass and metallic recovery, respectively. In addition to the tests, complementary essays were done. As results of the study, in greater relevance, we cite: possibility of (re)use of currently disposed tailings; obtainment of marketable concentrates and reduction of iron content in overall tailing.

KEYWORDS: processing of tailings; magnetic separation; mineralogical characterization.

1. INTRODUÇÃO

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa de mineração que, desde 1977, lavra itabiritos de baixo conteúdo metálico. Em Mariana e Ouro Preto, estado de Minas Gerais, localizam-se as suas 2 (duas) unidades industriais de Concentração. Em Anchieta, estado do Espírito Santo, localizam-se as suas 3 (três) unidades industriais de Pelotização. A interligação destes dois complexos é realizada através de um mineroduto de, aproximadamente, 400 quilômetros de extensão – passando por 25 municípios.

Atualmente a capacidade produtiva dos Concentradores é de 24,1 milhões de toneladas por ano de *pellet feed*. O Concentrador I, localizado em Mariana, produz 14,7 milhões. Já o Concentrador II, localizado em Ouro Preto, produz 9,4 milhões. As recuperações mássica e metálica – valores médios – são de 57% e 82%, respectivamente (dados 2012). Todos os rejeitos gerados, foco deste estudo, são oriundos de operações unitárias de flotação. Estes rejeitos, atualmente dispostos em barragens de disposição, representam – aproximadamente – uma perda metálica de 8%.

Tendo por objetivo a redução desta perda metálica para as barragens e também o aumento da capacidade produtiva, diferentes tecnologias e rotas de processo foram estudadas. Tinha-se, por meta, a obtenção de concentrados finais (com teor de sílica inferior a 1,7%) e a redução dos percentuais de ferro no rejeito global para níveis inferiores a 5,0%. A separação magnética, atualmente utilizada em larga escala para o reaproveitamento de rejeitos, associada à etapa de flotação, mostrou-se como a melhor rota de processo a ser utilizada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo KLEIN & DUTROW (2007), os minerais podem ser separados quando submetidos a campos magnéticos de alta intensidade por apresentarem uma ampla gama de valores para a susceptibilidade magnética.

Segundo QUEIROZ e BRANDÃO (2009), o minério de ferro pode ser dividido em três grandes grupos de partículas, quanto à sua resposta, frente a campos magnéticos. Partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de intensidade baixa (menor que 0,2 Tesla ou 2.000 Gauss). Partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de média intensidade (0,2 a 0,9 Tesla ou 2.000 a 9.000 Gauss). Partículas que manifestam susceptibilidade magnética sob a presença de campos magnéticos de alta intensidade (maior que 0,9 Tesla ou 9.000 Gauss). Ainda segundo QUEIROZ e BRANDÃO (2009), a maneira com a qual as partículas minerais estão associadas tem influência no comportamento das mesmas frente a campos magnéticos distintos.

Segundo ROSENBLUM e BROWNFIELD (2000), as substâncias paramagnéticas apresentam elétrons desemparelhados nos orbitais moleculares e substâncias diamagnéticas contêm elétrons emparelhados nos orbitais moleculares. Quando uma molécula contém elétrons desemparelhados apresenta apenas um número quântico spin, consistindo em um dipolo magnético. Para dois elétrons emparelhados, a molécula possui nos orbitais moleculares dois elétrons, sendo que o dipolo magnético caracterizado pelo spin de cada um dos elétrons se anula, uma vez que apresentam orientação oposta. Para as substâncias ferromagnéticas, os dipolos magnéticos existentes apresentam a mesma orientação.

Quando uma partícula sólida é colocada em um campo magnético, a partícula provoca distúrbios no campo e o campo magnetiza as partículas. Essa magnetização é importante para a separação

magnética uma vez que o movimento das partículas sob a ação do campo magnético é função do momento magnético induzido na partícula (KING, 2001).

ARVIDSON (1977) afirmou que separadores magnéticos têm sido considerados para a recuperação de minério de ferro de baixo teor ou de rejeitos. O autor também afirmou que os taconitos denominados de não magnéticos apresentam uma ampla gama de valores referente às suas propriedades magnéticas. Em muitos depósitos de taconitos não magnéticos as partículas de quartzo têm pequenas inclusões de magnetita, fazendo com que pequenas partículas de quartzo apresentem a mesma susceptibilidade magnética de partículas homogêneas de hematita. Nesses casos uma pré-concentração em separadores magnéticos de alta intensidade seguida de uma etapa de flotação pode apresentar bons resultados.

VIEIRA (2008) estudou a produção de *pellet feed* a partir da concentração de rejeitos de flotação utilizando diferentes rotas de processo que incluíam etapas de flotação direta, flotação reversa e separação magnética. Os resultados obtidos mostram que a rota constituída por concentração magnética utilizando separadores eletromagnéticos de carrossel (WHIMS) como etapa *rougher* e flotação em coluna como etapa *cleaner* apresentaram os melhores resultados. Os teores de Fe e de SiO₂ nas amostras de rejeito testadas foram de 11,01% e 83,68%, respectivamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Conforme ilustrado através da figura 1, o Concentrador II possui as seguintes operações unitárias em seu processo produtivo: britagem e peneiramento, moagem primária, deslamagem, flotação convencional e flotação de finos, moagem secundária, flotação em colunas, espessamento e bombeamento do concentrado produzido através de mineroduto. Os rejeitos, foco deste estudo, foram gerados nas etapas da flotação convencional e flotação em colunas. O rejeito da flotação de finos, gerado posteriormente ao início deste estudo através de projeto de expansão, não foi aqui contemplado.

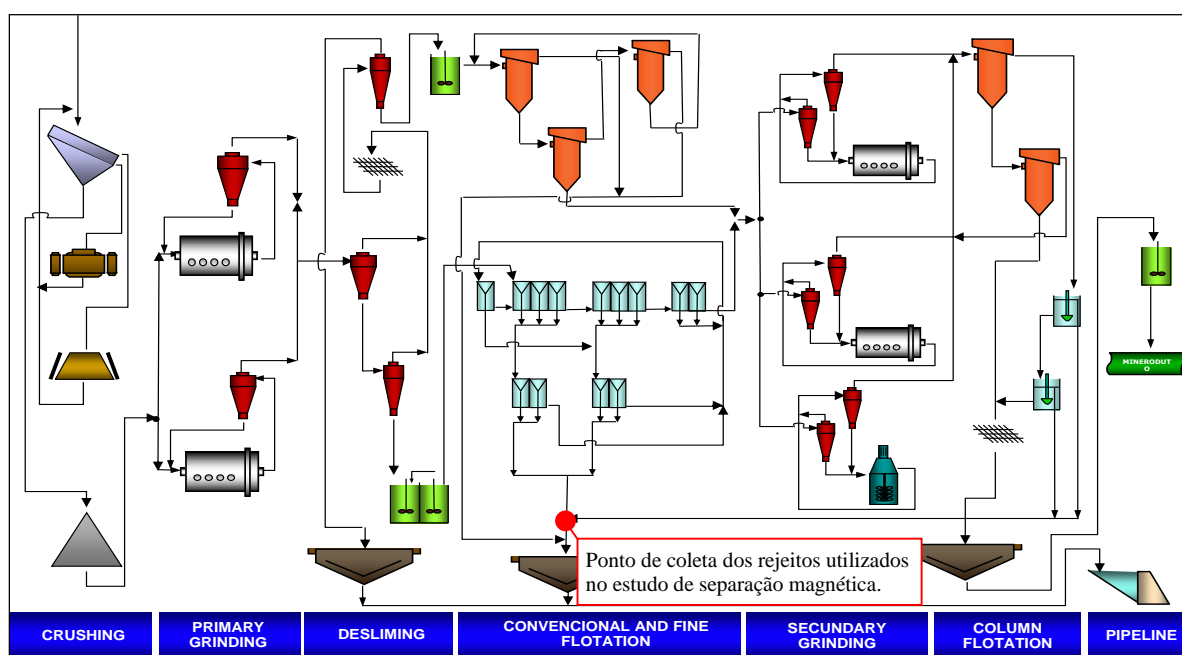


Figura 1. Ponto de coleta dos rejeitos gerados nas operações unitárias de flotação do Concentrador II.

3.2. Métodos

3.2.1. Análise granulométrica e química

Utilizando-se de série de peneira da marca *Tyler*, um peneiramento foi realizado em peneirador do tipo *Ro-tap* por durante 20 (vinte) minutos. As faixas utilizadas foram de 20# (840 μ m), 28# (590 μ m), 35# (420 μ m), 48# (297 μ m), 65# (210 μ m), 100# (149 μ m), 150# (105 μ m), 200# (74 μ m), 270# (53 μ m), 325# (44 μ m) e 400# (37 μ m). Aproveitando-se do peneiramento realizado, massas retidas em faixas específicas foram acumuladas para análise química dos elementos Fe, SiO₂, Al₂O₃, P, PPC e MnO₂. As frações analisadas quimicamente foram +100# (+149 μ m), +200# (+74 μ m), +325# (+44 μ m) e -325# (-44 μ m).

3.2.2. Análise do grau de liberação

Em microscopia óptica de luz refletida, uma análise quantitativa e qualitativa do grau de liberação da ganga (essencialmente quartzo) em relação aos óxidos e hidróxidos de ferro (essencialmente hematita) foi realizada. Conforme ilustrado na figura 2, diferentes tipos de associações foram quantificados. À saber: tipo 1 (quartzo livre), tipo 2 (quartzo com inclusão), tipo 3 (partículas mistas), tipo 4 (partículas mistas), tipo 5 (óxido e hidróxido de ferro com inclusão) e tipo 6 (óxido e hidróxido de ferro livre).

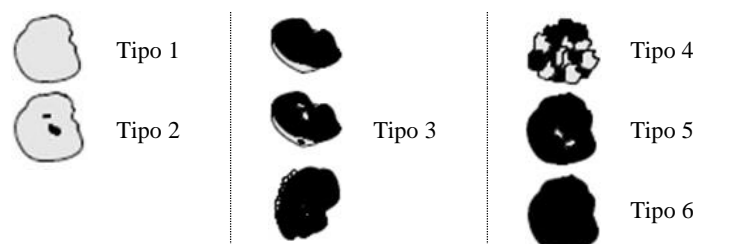


Figura 2. Diferentes tipos de associações entre a ganga e os óxidos e hidróxidos de ferro identificados em análise do grau de liberação (Fonte: Open Brasil & Associates).

3.2.3. Separação Magnética

Para a execução dos ensaios, uma planta semi-industrial foi projetada e instalada no Concentrador II – ver foto e desenho ilustrativo na figura 3. Contendo peneira de proteção, separador magnética, peneira de alta frequência, ciclone, condicionador, coluna de flotação, bombas e caixas, esta planta – com capacidade de 85t/h – possibilitou a realização de diversos ensaios em diferentes rotas de processo. Para a etapa de separação magnética, melhor opção identificada, algumas variáveis de processo foram analisadas: campo magnético, velocidade de rotação do rotor e pressão de água dos sprays de concentrado e rejeito.

3.2.4. Flotação

Após realização da etapa de separação magnética, o concentrado gerado foi seco, homogeneizado e quarteado em alíquotas para a realização de flotação em escala laboratorial. Utilizando-se de célula *Denver*, 1.500g de material, a 40% de sólidos, foi condicionado por durante 5 minutos com amido de milho (depressor) e 1 minuto com amina (coletor). A correção de pH foi realizada durante o condicionamento e após a adição de depressor. Passado o tempo de condicionamento, a válvula de ar era aberta e a flotação realizada por durante 3 minutos. Diferentes dosagens de depressor e coletor, principalmente, foram testados.

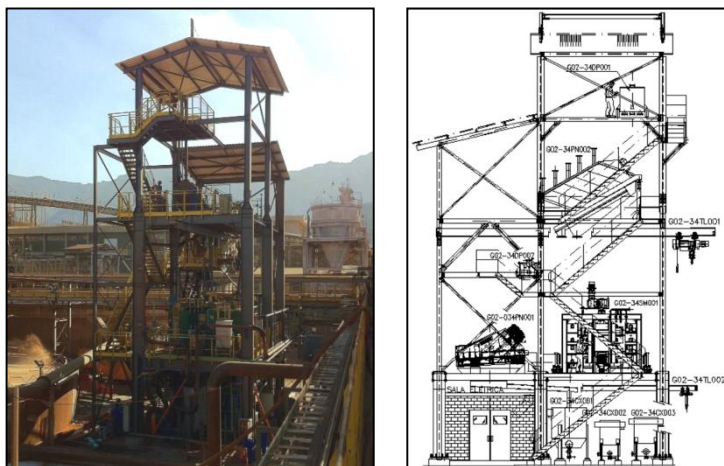


Figura 3. Planta semi-industrial projetada e construída para a execução dos ensaios.

4. RESULTADOS

4.1. Análise granulométrica e química

A Tabela I apresenta os resultados obtidos através do peneiramento e posterior análise química. Como pode ser visto, maior parte da massa – 43,26% – encontra-se retida na faixa de 200# (74 μ m). Para o teor de ferro, maior valor – 34,20% – é encontrado na fração -325# (-44 μ m). Analisando-se a distribuição de ferro, sendo esta a média ponderada entre massas e teores, 59,68% encontra-se na fração -325# (-44 μ m). A análise destes resultados indicam uma dificuldade para o tratamento deste material: presença de minerais de ferro nas frações finas (-44 μ m) e quartzo nas frações grosseiras (+74 μ m), ambos prejudiciais à qualquer processo de concentração.

Tabela I. Análise granulométrica, análise química e distribuição de ferro.

Malha	Abertura	Massa	Ret. Simples	Ret. Acum.	Passante	Fe	SiO ₂	Distr. Fe
(Tyler)	(μ m)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
100	149	14,11	17,06	17,06	82,94	2,61	96,19	4,97
200	74	24,20	43,26	60,33	39,67	3,67	94,49	17,73
325	44	6,33	24,05	84,37	15,63	6,56	90,39	17,62
-325	-44	14,43	15,63	100,00	0,00	34,20	50,06	59,68

Calculado (%): 8,95 86,85

Analisado (%): 8,56 87,31

Desvio (%): 4,61 -0,52

4.2. Análise do grau de liberação

A Tabela II apresenta os resultados obtidos através da análise do grau de liberação. A coluna “Tipo GL” identifica os 6 (seis) diferentes tipos de associações entre a ganga e os minerais úteis, conforme anteriormente mostrado através da figura 2. As colunas “GL – Quartzo” e “GL – Ferro” representam os percentuais do grau de liberação para o quartzo e os minerais de ferro, respectivamente. Colunas “Tipo 1” e “Tipo 2” representam diferentes definições para o grau de liberação, conforme anteriormente descrito no item “3.2.2. Análise do grau de liberação”.

Tabela II. Resultados detalhados do grau de liberação do rejeito utilizado como alimentação da planta semi-industrial de separação magnética.

Tipo GL	GL - Quartzo*		GL - Ferro**		Partículas	
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Nº	Ret.
(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)
1	0,80	97,08	21,13	26,34	3	0,62
2					432	80,23
3					59	10,96
4					17	3,16
5					1	0,24
6					26	4,79

* Grau de liberação obtido para o quartzo, principal contaminante, e todos os demais contaminantes;

** Grau de liberação obtido para todos os óxidos e hidróxidos de ferro.

Conforme pode ser visto, para o grau de liberação do quartzo, há uma considerável diferença entre a quantificação realizada através da metodologia “Tipo 1” ou “Tipo 2”. Os valores obtidos foram de 0,80% e 97,08% para o “Tipo 1” e “Tipo 2”, respectivamente. Para o grau de liberação dos minerais de ferro, não há elevada diferença entre os valores obtidos para o “Tipo 1” e “Tipo 2”, demonstrando que grande parte dos minerais presentes na amostra se dão na forma de minerais livres. Para a quantificação das diferentes associações minerais, 80,23% das partículas presentes apresentam-se como do Tipo 2, demonstrando que grande parte das partículas de ganga apresentam-se com inclusões de óxidos e/ou hidróxidos de ferro – o que provoca perda de eficiência do processo.

4.3. Separação Magnética

A Tabela III apresenta os resultados médios obtidos através dos ensaios semi-industriais de separação magnética. Para o elemento ferro, o teor médio de alimentação dos testes foi de 9,3%, obtendo-se concentrado e rejeito com 30,2% e 4,5%, respectivamente. Recuperações mássica e metálica, para o concentrado, foram de 60,7% e 39,3%, respectivamente. Os resultados até aqui obtidos representam, principalmente para o rejeito, uma positiva expectativa com relação aos objetivos do estudo. Para o teor de ferro obtido no concentrado, ainda aquém do esperado, etapas complementares de flotação em escala de bancada foram realizadas de forma à simular a obtenção de concentrados finais com a inserção desta etapa em maior escala.

Tabela III. Resultados químicos e recuperações da etapa semi-industrial de separação magnética.

Etapa	Produto	Fe	RP	RM
(-)	(-)	(%)	(%)	(%)
Separação Magnética	Alim.	9,3	100,0	100,0
	Conc.	30,2	18,7	60,7
	Rej.	4,5	81,3	39,3

4.4. Flotação

A Tabela IV apresenta os resultados médios obtidos através dos ensaios laboratoriais de flotação. Para o elemento ferro, o teor médio de alimentação dos testes foi de 30,2%, obtendo-se concentrado e rejeito com 66,9% e 16,5%, respectivamente. Recuperações mássica e metálica, para o concentrado, foram de 27,2% e 60,2%, respectivamente. Para o SiO₂, essencialmente quartzo, o concentrado apresentou um teor médio de 3,1%. Para a Samarco Mineração, produtos atualmente

comercializáveis possuem, para o SiO₂, especificação máxima de 1,7%. Porém, alguns clientes siderúrgicos comercializam e aceitam *pellet feed* com maiores percentuais de contaminantes.

Tabela IV. Resultados químicos e recuperações da etapa laboratorial de flotação.

Etapa	Produto	Fe	SiO ₂	RP	RM
(-)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)
Flotação	Alim.	30,2	---	100,0	100,0
	Conc.	66,9	3,1	27,2	60,2
	Rej.	16,5	---	72,8	39,8

4.5. Global

Após execução dos ensaios semi-industriais de separação magnética e dos ensaios laboratoriais de flotação, uma análise global pode ser realizada. Para o elemento ferro, o teor médio de alimentação da rota de processo – separação magnética e flotação – foi de 9,3%, obtendo-se concentrado e rejeito com 66,9% e 6,2%, respectivamente. Recuperações mássica e metálica, para o concentrado, foram de 5,1% e 36,5%, respectivamente. Considerando-se as metas iniciais deste estudo – concentrado com teor de SiO₂ inferior a 1,7% e rejeito com teor de Fe inferior a 5,0% - menciona-se que os objetivos não foram estritamente alcançados. Porém salienta-se, especificamente para os ensaios de flotação em escala laboratorial, uma menor eficiência destes em comparação à operações industriais.

Tabela V. Resultados químicos e recuperações de todas as etapas.

Etapa	Produto	Fe	SiO ₂	RP	RM
(-)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)
Global	Alim.	9,3	---	100,0	100,0
	Conc.	66,9	3,1	5,1	36,5
	Rej.	6,2	---	94,9	63,5

5. CONCLUSÕES

Como resultado do estudo, em maior relevância, cita-se: a possibilidade de um maior (re)aproveitamento mássico (5,1%) e metálico (36,5%) dos rejeitos atualmente dispostos nas barragens de rejeito; obtenção de concentrados finais com percentuais médios de 3,1% de SiO₂, podendo este *pellet feed* ser comercializado para alguns clientes siderúrgicos; e a geração de rejeitos finais – em ensaios semi-industriais e laboratoriais – com percentuais médios de 6,2% de ferro, 3% inferior aos valores atualmente praticados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições que, diretamente, contribuíram para a realização deste estudo: Samarco Mineração S.A., Gaustec, PCM - Processamento e Caracterização Mineral e Open Brasil & Associates.

7. REFERÊNCIAS

ARVIDSON, B.R. Metallurgical and Economic Advantages of High Gradient Magnetic Separators. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 12, 1977, São Paulo. Meeting 4 - Paper 4. São Paulo: Nacional – Publicações e Publicidade 1977. p.1-41.

KING, R.P. Magnetic Separation. In: KING, R.P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. 1. ed. Butterworth Heinemann, 2001. Chapter 4, p.269-288.

KLEIN, C. and DUTROW B. Crystal Growth and Defects; Twinning, Color, and Magnetism. In: KLEIN, C. and DUTROW B. The Manual of Mineral Science. 23. ed. John Wiley & Sons, INC, 2007, Chapter 10, p.217-244.

OPEN BRASIL & ASSOCIATES, Metodologia para Minério de Ferro Aplicado para Geologia de Mina. Belo Horizonte, 2008. (Apostila)

QUEIROZ, L.A. e BRANDÃO, P.R.G. Aspectos Mineralógicos Relacionados à Concentração Magnética de Minério de Ferro Itabirítico. Metalurgia & Materiais, Volume 65, p. 148-151, abr. 2009.

ROSENBLUM, S. and BROWNFELD, K. Magnetic Susceptibilities of Minerals. USGS Open-File Report 99-529, p.38, 2000.

VIEIRA, M.G. Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 90 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).