

CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA PARA RECUPERAÇÃO DO FERRO CONTIDO NO REJEITO DA FLOTAÇÃO¹

Henrique Dias Gatti Turrel²
Kessius Bortolan Menezes²
Fabiano Henrique Pereira Gonzaga²
Julio César da Silva²
José Antônio de Almeida²
Carlos Roberto Magalhães²
José Cabello Russo³
Danielle Andrade Pimentel³
Douglas Batista Mazzinghy⁴

Resumo

A utilização do magnetismo para produção de concentrados de minérios de ferro é praticada industrialmente há algumas décadas. Nos últimos anos, diversos motivos levaram as minerações de ferro a investigar métodos mais eficientes de recuperação do mineral-minério perdido nos rejeitos. Vários estudos comprovaram a possibilidade de utilização da separação magnética para isso. O Projeto Minas-Rio da Anglo American, com capacidade para produção de 24,5 milhões de toneladas por ano de *pellet feed*, não contempla a instalação de concentradores magnéticos. Contudo, diante dos resultados positivos encontrados na literatura, o mesmo foi avaliado para a concentração do rejeito da flotação. Diversos testes foram efetuados com equipamento piloto para avaliação dos efeitos das variáveis de processo e operacionais, buscando-se uma maximização da recuperação metalúrgica. Os resultados iniciais se mostraram muito promissores. Por isso, testes em escala piloto e contínuos com minério representativo dos cinco primeiros anos de operação também foram realizados, mostrando um significativo aumento nas recuperações globais.

Palavras-chave: Separação magnética; Rejeito da flotação; *Pellet feed*.

MAGNETIC CONCENTRATION FOR IRON RECOVERY CONTAINED IN FLOTATION TAILINGS

Abstract

Magnetism use for iron ore concentrate production is performed industrially for many decades. In the last years, many reasons, led the iron ore mining companies to investigate methods more efficient to recover the wanted mineral lost in the tailings. Many studies proved the possibility to use magnetic separation for that. The Anglo American's Minas Rio Project, which has a pellet feed production capacity of 24.5 million tons per year, does not comprehend the magnetics separators installation. However, based in positive results found in the literature, the equipment was evaluated to concentrate flotation tailings. Many tests were performed with a pilot separator to evaluate the effects of some process and operational variables, aiming the metallurgical recovery maximization. The initial results were very promising. Therefore pilot and continuous tests also were performed with iron representative of first five years of operation, showing a significant increase in the global recoveries.

Key words: Magnetic separation; flotation tailings; Pellet feed.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Diretoria de Operações, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais Brasil.*

³ *Diretoria de Estudos Técnicos, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais Brasil.*

⁴ *Diretoria de Projetos, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concentradores magnéticos de baixa intensidade para produção de *pellet feed* já é praticada industrialmente há algumas décadas.⁽¹⁾ A utilização do magnetismo para produção de concentrados de minérios de ferro hematíticos se estabeleceu um pouco depois, com o uso de elevados campos magnéticos gerados por correntes elétricas.⁽²⁾

Recentemente, a separação magnética voltou a ganhar destaque na concentração de minérios de ferro com baixos teores e no reaproveitamento de subprodutos do processamento de diferentes minérios.

Dois concentradores magnéticos, *WHIMS-2000* e *Slon-1500*, instalados em paralelo, tiveram seu desempenho comparado para processar minério contendo ferro igual a 15,8%. O concentrador *Slon* forneceu alta recuperação mássica e metalúrgica. Entupimentos nas matrizes foram constantes no concentrador *WHIMS*, os quais não foram observados no concentrador *Slon*.⁽³⁾

Cinco rotas foram avaliadas para tratar um rejeito da flotação para: i) peneiramento (37 μm) e concentração magnética em um estágio; ii) peneiramento (37 μm) e concentração magnética em dois estágios; iii) peneiramento (74 μm), deslamagem e flotação; iv) peneiramento (74 μm), concentração magnética em um estágio e flotação; v) concentração magnética em dois estágios, *rougher* e *cleaner* e flotação. O separador magnético testado, *Ferrous Wheel*, foi utilizado com matrizes TQ14 (ii,v) e TQ8 (i,iv). A rota iv forneceu o menor teor de sílica, 1,14%, resultando em baixa recuperação mássica e metalúrgica, respectivamente, 13% e 35,7%. O melhor desempenho foi alcançado na rota "ii": O valor para a sílica no concentrado, a recuperação mássica e a recuperação metalúrgica foram, respectivamente, 3,72%, 24,4% e 67,4%.⁽⁴⁾

Viera e Queiroz⁽⁵⁾ usaram o *Ferrous Wheel* piloto para concentrar rejeito da flotação. Apesar da boa recuperação metalúrgica, 73%, e ferro no concentrado em 45,7%, a possibilidade de concentração magnética não foi recomendada. O baixo percentual de sólidos na alimentação, 30% (w/w), resultou em um concentrado muito diluído para recirculação, 5% (w/w).

Arol e Aydogan⁽⁶⁾ avaliaram que a baixa intensidade magnética via úmido não é muito efetiva para partículas menores que 10 μm . A magnitude da força de arraste do fluido excede a força magnética exercida sobre tais partículas. Assim, partículas magnéticas "finas" geralmente não são capturadas efetivamente por separadores magnéticos, resultando em perda do minério de interesse. Separação magnética aplicada após as partículas magnéticas ultrafinas sofrerem um aumento no tamanho devido à floculação por polímeros mostrou-se efetiva na redução de perdas dessas partículas ultrafinas.

Viera e Queiroz⁽⁷⁾ testaram o concentrador magnético *WHC-05S* para processar o rejeito da flotação. O concentrado magnético, contendo ferro igual a 48%, foi alimentado em uma coluna de flotação fornecendo um produto com 1,6% de sílica no concentrado. Foi obtido um concentrado com alta sílica, 33%, utilizando-se outro concentrador magnético no lugar da flotação *cleaner*. A matriz foi alterada de 1,5 para 2,5 mm, visando aumento na capacidade do equipamento, mas resultando numa redução da recuperação mássica.

Vieira, Mapa e Queiroz⁽⁸⁾ apresentaram os resultados de quatro rotas *rougher* para concentrar rejeitos da flotação: flotação reversa, flotação direta e separação magnética por *WHIMS* e *Slon*. A única rota que forneceu resultados promissores e que teve o concentrado tratado numa etapa *cleaner* de flotação foi com o *WHIMS*. O

concentrado final apresentou sílica abaixo de 1,0%. Dois separadores magnéticos de fornecedores distintos, *Minimag* e *WHC*, foram testados e apresentaram diferentes recuperações metalúrgicas devido, principalmente, a diferenças na regulagem da pressão da água de limpeza nos médios.

Souza, Calixto e Lima⁽⁹⁾ avaliaram em estudo piloto a concentração de rejeitos de uma planta industrial utilizando separadores magnéticos *Slon*. As duas etapas de concentração testadas resultaram em um concentrado com alta sílica, 4,5%, e recuperação mássica de 43%. Uma etapa *cleaner* foi sugerida pelos autores. Souza *et al.*⁽¹⁰⁾ conseguiram a produção de um concentrado contendo sílica abaixo de 1% a partir do tratamento de rejeitos de flotação com a utilização de *Slons* na etapa *rougher* e *cleaner*.

Zapparoli *et al.*⁽¹¹⁾ avaliaram duas rotas para o tratamento do material depositado nas barragens de rejeitos: i) concentração magnética da fração abaixo de 1,0 mm; ii) concentração magnética da fração abaixo de 1,0 mm e maior que 0,15 mm com deslamagem e flotação da fração abaixo de 0,15 mm. A primeira apresentou maior recuperação mássica e menor sílica no concentrado, de 1,5%.

Skosana⁽¹²⁾ observou que durante o beneficiamento do minério de Shishen, pertencente a Kumba, lama é gerada e descartada com 53% de ferro e P_{80} aproximadamente em 45 μm . Esse material é composto predominantemente por hematita e quartzo, com participação de outros minerais (illita, muscovita, serpentinito e apatita). O autor avaliou o processamento desse material para produção de *pellet feed* em dois testes de escala de bancada. No 1º teste, O material foi classificado em ciclone (15 μm). O *underflow* foi tratado por único estágio de *WHIMS* e cinco estágios de flotação. O *overflow* foi tratado por dois estágios de *WHIMS*. Obteve-se, assim, um concentrado com 66,5% de Fe e uma recuperação mássica de 43%. Essa rota foi também avaliada em escala piloto. Contudo, entupimentos eram constantes no *WHIMS*, resultando em baixo desempenho na flotação. No 2º teste laboratorial, foi utilizado um *Slon* nas etapas *rougher* e *cleaner*, com produção de concentrado com 65,4% de Fe e recuperação mássica de 50%.

Dworzanowski⁽¹³⁾ realizou um estudo em que um dos produtos de beneficiamento de um minério de cobre/ouro foi submetido à concentração magnética para produzir *pellet feed*. Esse material continha 25% de magnetita e outros minerais de ganga (quartzo, feldspato, mica, clorita, etc.). Uma boa recuperação foi obtida com intensidade do campo magnético de 1000 G. Partículas maiores que 25 μm apresentaram alto teor de sílica, enquanto que as partículas entre 25 e 10 μm apresentaram um resultado melhor devido a sua maior liberação, 92%. A rota avaliada permitiria a produção de cerca de 350.000 t/ano de *pellet feed* com 6,0% de sílica, 0,24% de K_2O , 0,9% de Al_2O_3 e 0,01% de P. Porém, o autor recomenda a realização de uma mistura com outros *pellet feed*

O presente trabalho objetivou investigar a possibilidade de utilização de separador magnético de alta intensidade para aumentar a recuperação de ferro global do processo de tratamento de minério do Projeto Minas-Rio através da concentração do rejeito da flotação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Uma amostra global foi obtida através de campanha de sondagem com sonda reversa de forma que resultasse em material representativo aos 5 primeiros anos de operação do projeto Minas-Rio.

Foram realizadas duas baterias de testes.

Na primeira, foram realizados testes em batelada usando-se o separador magnético de alta intensidade (*WHIMS*) *Minimag G-340* da Gaustec. O equipamento possui matrizes de 1,5, 2,5, 3,8 e 5,0 mm podendo alcançar um campo magnético de 19.000 G. As variáveis de processo foram testadas em diferentes níveis. Seus valores são explicitados junto aos resultados obtidos. Outra importante variável operacional avaliada foi a configuração do equipamento. Na configuração *cobber*, são produzidos somente dois produtos, enquanto na normal são produzidos três, concentrado, médio e rejeito. Na *cobber*, o desempenho do equipamento industrial que estaria sendo simulado possui uma capacidade maior. O material alimentado nesses testes consistia no rejeito produzido a partir do tratamento de amostras representativas do minério em circuito piloto, o qual é descrito adiante.

Flotação em bancada, para avaliação de uma etapa *cleaner*, foi utilizada. Esse teste foi realizado em cuba de 2,3 L com percentual de sólidos ajustado em 60 e 40%, respectivamente, no condicionamento e na flotação. Foram utilizadas soluções a 1% de amina *EDA-C* da Clariant e amido de milho da Kowalski. Amido foi gelatinizado com soda cáustica na relação de 5:1. Amina e amido foram dosados em somente um nível. O pH da polpa foi ajustado para 10,5 com soda cáustica. O amido foi condicionado por 5 minutos antes da adição da amina, que foi condicionada por 1 minuto. A agitação foi controlada em 1.300 e 1.500 rpm, respectivamente, no condicionamento e na flotação. A coleta do material flotado aconteceu por 6 minutos após início da aeração.

Na segunda bateria, a amostra global foi processada continuamente na planta piloto com o separador magnético tratando o rejeito final. Os parâmetros operacionais do separador magnético utilizados nessa bateria foram os definidos pela anterior. Os equipamentos utilizados na planta piloto e as principais variáveis controladas são descritos a seguir.

- Moagem:
 - moinho tubular de bolas: $\varnothing = 650$ mm, $L = 950$ mm;
 - ciclone de fundo chato: $\varnothing = 4$ " , apex = 8 mm, vortex = 20 mm ;
 - alimentação ≈ 300 kg/h;
 - descarga do moinho: $\%sol_{\text{peso}} \approx 70$ %;
 - OF do ciclone: $+0.150$ mm < 10 %; $\%sol_{\text{peso}} < 25$ %;
 - adição de hidróxido de sódio: pH = 11,0 - 11,5.
- Deslamagem:
 - primária: ciclone cônico de $\varnothing = 2,5$ " , apex = 4,8 mm, vortex = 13 mm;
 - secundária: ciclone cônico de $\varnothing = 2$ " , apex = 2 mm, vortex = 10 mm;
 - *UF* da deslamagem primária: $\%sol_{\text{peso}} \approx 50$ %.
- Flotação:
 - adição de hidróxido de sódio: pH = 10, 5;
 - uma célula *rougher* de 42L por linha;
 - uma célula *scavenger* primário e outra secundário de 28L por linha;
 - uma célula *cleaner* primário e outra secundário de 28L por linha;
 - depressor: amido de milho *Flokite 415* da Kowalski nas dosagens de 400 e 100 g/t, respectivamente, no *UF* da deslamagem e na alimentação do *scavenger* secundário;
 - coletor e espumante: etermonoamina *EDA-C* da Clariant nas dosagens de 50 e 20 g/t, respectivamente, na alimentação da *rougher* e na *cleaner* primária.

Para o fechamento do balanço, foram coletadas, após estabilização do processo, alíquotas de 30 em 30 minutos da alimentação e dos produtos do processo para composição de uma amostra por fluxo. Os demais fluxos foram amostrados uma única vez perto do fim do teste.

As análises para determinação da composição químicas foram feitas por fluorescência de raios-X, em pastilhas fundidas, em espectrômetro Axios da PANalytical.

Os resultados das massas e teores foram reconciliados usando *software* Bilco.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos testes em batelada, algumas variáveis operacionais e de processo foram manipuladas para verificação do efeito das mesmas no desempenho da separação. As principais descobertas são resumidas na Figura 1. Uma vez que o objetivo principal dessa operação seria maximizar a recuperação metalúrgica, optou-se por trabalhar nos demais testes com campo magnético e percentual de sólidos em níveis superiores.

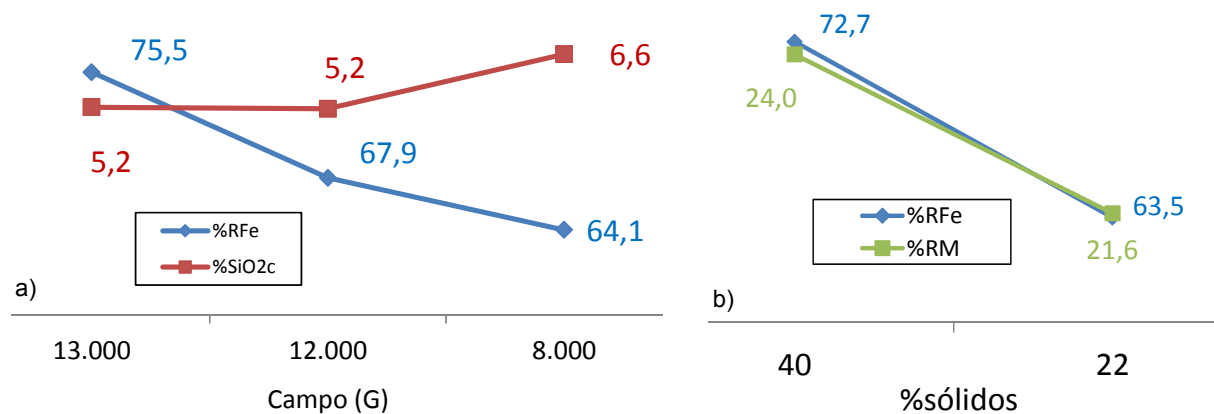


Figura 1. Efeito do campo magnético na recuperação metalúrgica e na sílica no concentrado (a) e do percentual de sólidos nas recuperações (b).

Os resultados dos testes comparando a configuração *cobber* com a normal (Figura 2), mostraram que a *cobber* exibiu recuperações ligeiramente superiores a normal. Contudo apresentou um teor de sílica muito superior. Foi observado que na configuração normal, caso os médios fossem adicionados ao concentrado, compondo um único fluxo, o resultado seria bem semelhante ao obtido com a *cobber*. Com base nessa avaliação, optou-se por prosseguir a investigação usando somente a configuração normal. O maior percentual de sílica obtido nesses testes deve ser atribuído a maior taxa de alimentação e diferenças de composição mineralógica do material alimentado.

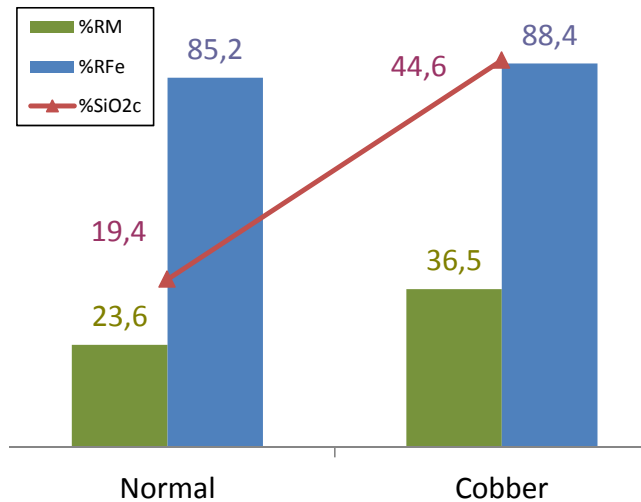


Figura 2. Efeito da configuração do separador no desempenho do mesmo.

Com base nos resultados obtidos até então, verificou-se a necessidade de utilização de uma etapa *cleaner* de tratamento para obtenção de concentrado dentro das especificações de mercado. Por isso, o concentrado produzido pelo separador magnético da configuração normal da Figura 2 foi submetido a uma nova etapa de separação magnética e a flotação.

Os resultados dessa investigação (Figura 3) mostraram que a flotação, apesar de exibir menores recuperações globais, ou seja, na etapa *rougher* de separação magnética e na *cleaner*, foi mais eficaz na produção de concentrado com a qualidade desejada. Adicionalmente, a flotação exibiu um índice de seletividade de Gaudin de 9,3, enquanto a separação magnética *cleaner* exibiu somente 4,9.

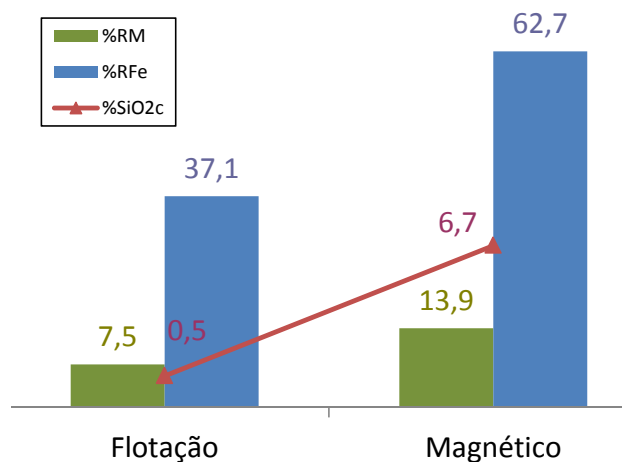


Figura 3. Desempenho das concentrações *cleaner* do concentrado da separação magnética.

Contudo, a adição de uma etapa de flotação *cleaner* irá afetar significativamente o custo de capital para adequação do circuito de recuperação do ferro contido no rejeito. Por isso, decidiu-se avaliar o retorno do concentrado da etapa *rougher* do separador magnético para o fluxograma já existente no projeto.

Para isso, foi realizado um teste contínuo, com a planta piloto montada na configuração do Projeto Minas-Rio, com o separador tratando o rejeito da flotação e seu concentrado sendo retornado para o processo antes da flotação, de forma que se juntasse a alimentação nova e fosse submetido, novamente, a um processo de

concentração para atingir do teor de sílica necessário. Três testes extras com o mesmo minério, mas sem a utilização do separador magnético, também foram realizados, permitindo quantificar o efeito dessa etapa adicional de concentração.

No primeiro teste, o concentrado da separação magnética foi retornado ao tanque de alimentação da flotação. Foi observado um significativo acréscimo nas recuperações globais, devido a redução do teor de ferro no rejeito final, que diminuiu de 11 para 5%. Contudo, o teor de sílica no concentrado final atingiu valor de 3,1%, ou seja, muito além do esperado. O concentrado do separador magnético, com um percentual de sólidos em peso muito baixo, cerca de 5%, certamente afetou negativamente a flotação.

Assim, no segundo teste este concentrado foi retornado para o tanque que alimenta a deslamagem (Figura 4). Dessa vez, o teor de sílica no concentrado final foi de apenas 1,0%. As recuperações globais continuaram apresentando valores superiores ao dos testes sem utilização do concentrador magnético. Não foram observadas alterações significativas no desempenho da deslamagem piloto. Esses resultados mostraram que o efeito negativo de aumento do volume de material alimentado na flotação foi superposto pelo efeito positivo de elevação do teor de ferro na alimentação da mesma.

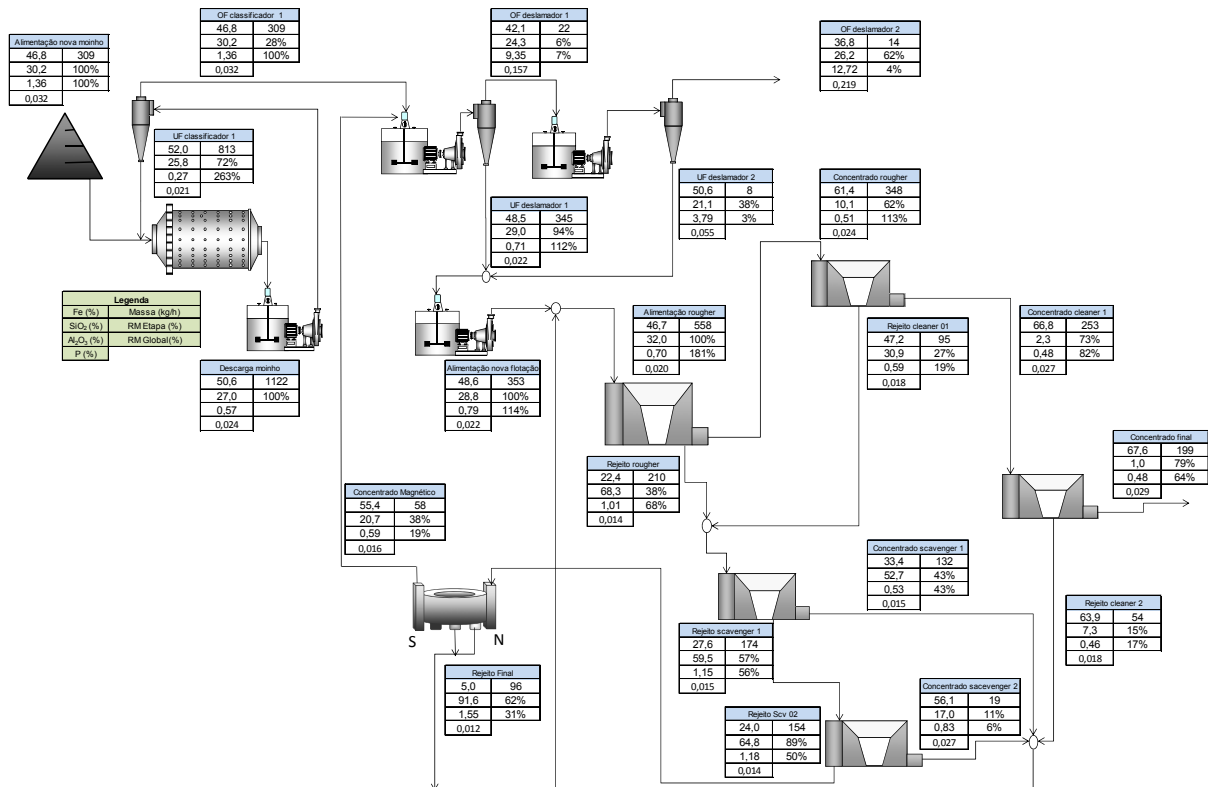


Figura 4. Balanço de massas do teste 2 com o separador magnético tratando o rejeito da flotação.

Vários tipos de minérios oriundos da Serra do Sapo foram processados no circuito de projeto da planta piloto produzindo *pellet feed* com baixo teor de sílica. Isso permitiu a determinação de uma correlação entre teor de ferro e recuperação em massa para o minério dessa região. O processamento, sem utilização dos separadores magnéticos, da amostra utilizada nos testes discutidos anteriormente mostrou que essa correlação se mantém para o minério estudado. Porém, foi observado (Figura 5), um potencial aumento da recuperação em massa de 4,8% com utilização do separador magnético no tratamento do rejeito da flotação.

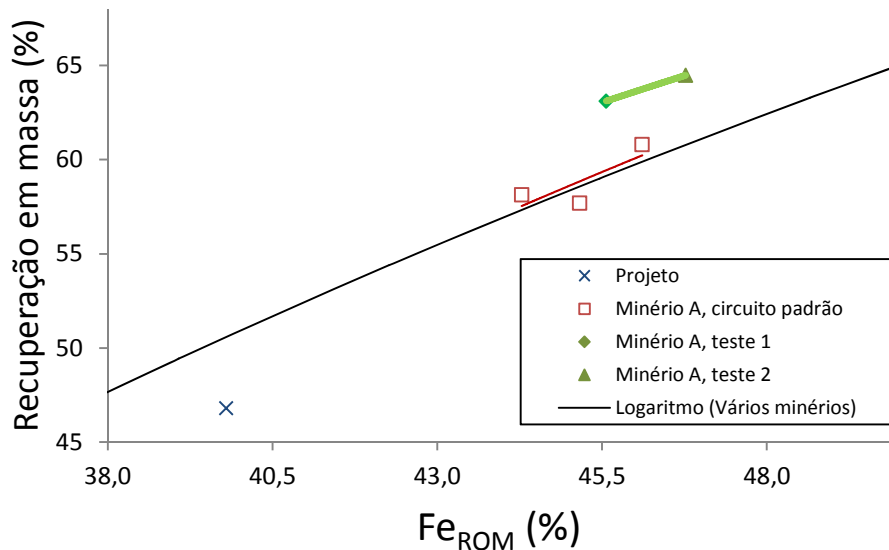


Figura 5. Comparação do desempenho de diferentes campanhas de produção da planta piloto.

4 CONCLUSÕES

As variáveis que afetaram mais significativamente o desempenho do separador magnético foram o campo magnético, percentual de sólidos e taxa de alimentação. A configuração *cobber* resultou num concentrado com teor de sílica muito maior do que o produzido com a normal.

A flotação, como etapa *cleaner* do concentrado magnético, apresentou um índice de seletividade maior do que o novo processamento em separador magnético.

O retorno do concentrado magnético para o mesmo circuito de flotação que produziu o rejeito beneficiado pelo separador magnético melhorou o desempenho de todo o processo. Contudo, o percentual de sólidos desse concentrado, que é muito baixo, deve ser ajustado para não comprometer o desempenho da flotação

Agradecimentos

Os autores gostariam de registrar o agradecimento aos colegas de Anglo American Aguinaldo Pereira Sander, Junio Simões Pereira, Marcelo de Castro, Naldio da Silva Vertelo, Rodrigo Faustino Gomes pela dedicação, esforço e comprometimento na realização dos testes e aos funcionários da Gaustec Carlos Roberto Rodrigues dos Santos a Lidiane Pereira Santana pelo suporte técnico.

REFERÊNCIAS

- 1 BARTNIK, J.A.; ZABEL, W.H.; HOPSTOCK, D.M. (1975) On the production of iron ore superconcentrates by high-intensity wet magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*, v.2, p.117-126.
- 2 WASMUTH, H.D.; UNKELBACH, K.H. (1991) Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals. *Minerals Engineering*, v.4, p.825-837.
- 3 ZENG, W.; DAHE, X. (2003) The latest application of SLon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator. *Minerals Engineering*, n.16, p.563-565.
- 4 SANTOS, I. J. (2003) Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir dos rejeitos da Barragem de Germano. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral da Escola de Minas da UFOP, 107p.

- 5 VIEIRA, M. G.; QUEIROZ, D. S. B. (2004) Testes com concentrador magnético piloto Ferrous Wheel. SAMARCO (Relatório Interno) apud VIEIRA, M. G. (2008) Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da Samarco. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, 90p.
- 6 AROL, A.I.; AYDOGAN, A. (2004) Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v.232, p.151-154.
- 7 VIEIRA, M. G.; QUEIROZ, D. S. B. (2006) Concentração magnética de rejeitos utilizando WHC. SAMARCO (Relatório Interno) apud VIEIRA, M. G. (2008) Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da Samarco. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, 90p.
- 8 VIEIRA, M. G.; MAPA, P. S.; QUEIROZ, D. S. B. (2008) Pellet feed production from the concentration of Samarco flotation tailings. In: 3rd International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore, p.519-523.
- 9 SOUZA, H. S.; CALIXTO, M. F.; LIMA, I. (2009) Produção de pellet feed a partir do rejeito da flotação convencional da usina de conceição/itabira utilizando concentradores magnéticos de alta intensidade. In: XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 4p.
- 10 SOUZA, H. S.; TOTOU, A.; FERREIRA, R. F.; CALIXTO, M. F. (2009) Produção de pellet feed a partir do rejeito da flotação da usina de alegria utilizando concentradores magnéticos de alta intensidade. In: 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 8p.
- 11 ZAPPAROLI, A. C.; GUIMARÃES, N. C.; PIRET, W.; CALIXTO, M.; PAULA, C. J.; BENTO, P.; SIMÕES, H. G. (2009) Reaproveitamento de depósitos de rejeitos de minério de ferro nos sistemas sul e sudeste da vale: exemplo da barragem de córrego do feijão. Anais do 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro.
- 12 SKOSANA, D. (2011) Upgrading of Sishen Thickener Underflow Slimes Using SLOn High Gradient Magnetic Separator (HGMS). In: Iron Ore and Manganese Ore Conference 2011, 17p.
- 13 DWORZANOWSKI, M. (2012) Maximizing the recovery of fine iron ore using magnetic separation. *J Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v.112, n.3, p.197-202.