

# COMPARAÇÃO ENTRE ROTAS DE CONCENTRAÇÃO: FLOTAÇÃO X CIRCUITOS MISTOS<sup>1</sup>

João Paulo Melo Silva<sup>2</sup>  
Marcos Gomes Vieira<sup>3</sup>  
Paulo Sergio Mapa<sup>4</sup>  
Antônio Eduardo Clark Peres<sup>5</sup>

## Resumo

Com a constante redução dos teores de ferro nos minérios que alimentam as usinas, o emprego de rotas de concentração que maximizem as recuperações mássica e metálica se torna cada vez mais importante. O aumento de recuperação pode ser obtido utilizando circuitos de concentração mistos, nos quais as etapas *rougher* e *scavenger* são realizadas em separadores magnéticos e a etapa *cleaner* é realizada em máquinas de flotação. O rejeito *rougher* seria encaminhado para a etapa *scavenger*, também realizada em separadores magnéticos e o concentrado *rougher* seria encaminhado para a etapa *cleaner*, que seria realizada em colunas de flotação. Com o objetivo de comparar o desempenho de um circuito de concentração constituído apenas por etapas de flotação com o desempenho obtido em um circuito misto (separação magnética + flotação), foram realizados testes em escala piloto de separação magnética e testes em escala de bancada de deslamagem e flotação. Os resultados obtidos nos testes exploratórios confirmam o potencial do circuito de concentração misto (separação magnética + flotação) para aumentar a recuperação mássica (+2,0%) e a recuperação metálica (+4,4%), quando comparado com o circuito de concentração constituído apenas pela etapa de flotação.

**Palavras-chave:** Circuitos de concentração mistos; Separação magnética; Flotação.

## COMPARISON BETWEEN CONCENTRATION ROUTES: FLOTATION X MIXED CIRCUITS

### Abstract

With the reduction of iron contents in ores that feed the concentrators, the use of concentration routes that maximize metal and mass recoveries becomes increasingly important. The increased recovery can be obtained using mixed concentration circuits, in which the rougher and scavenger steps are performed in magnetic separators and the cleaner step is performed in flotation machines. The rougher tailings would be forwarded to the scavenger step, also carried out in magnetic separators and the rougher concentrate would be forwarded to the cleaner step, to be carried out in flotation columns. In order to compare the performance of a circuit constituted only by flotation machines with a mixed circuit that is constituted by magnetic separators and flotation machines, tests were conducted using a pilot scale magnetic separator and bench scale desliming and flotation cells. The results obtained in exploratory tests confirm the potential of the mixed circuit (magnetic separators and flotation machines) to increase mass recovery (+2.0%) and metal recovery (4.4%) compared with the circuit constituted only by flotation machines.

**Key words:** Mixed concentration circuits; Magnetic separation; Flotation.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Engenheiro de Processo, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Chefe de Departamento, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Especialista de Processo, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Com a constante redução dos teores de ferro nos minérios que alimentam as usinas, o emprego de rotas de concentração que maximizem as recuperações mássica e metalúrgica se torna cada vez mais importante. A aplicação de separadores magnéticos de alta intensidade no beneficiamento de minério de Fe tem apresentado bons resultados quanto à redução dos teores de Fe no rejeito. Vieira<sup>(1)</sup> 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 separação 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 SiO<sub>2</sub> nas amostras de rejeito testadas foram de 11,01% e 83,68%, respectivamente.

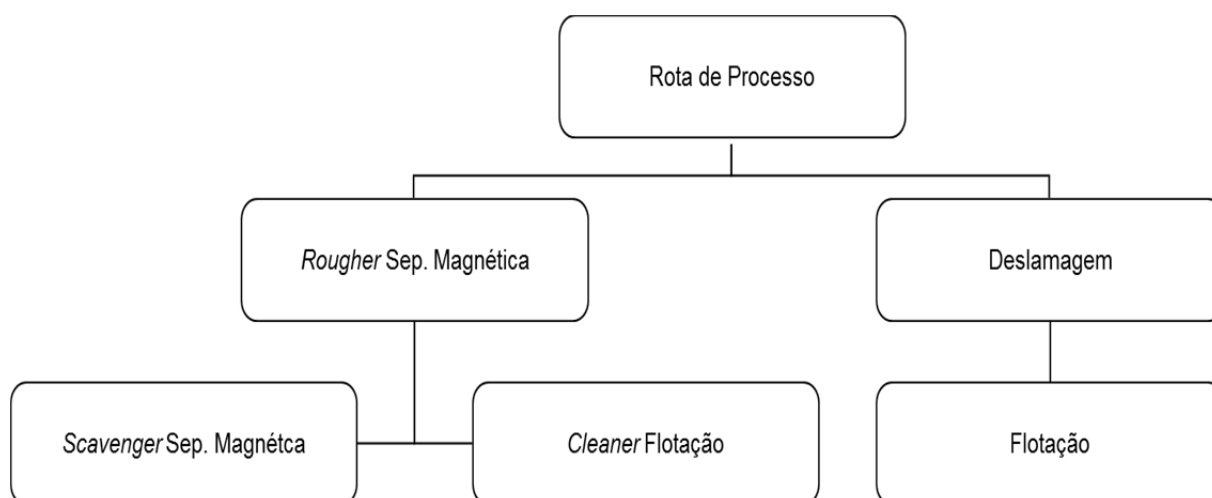
O emprego dos separadores magnéticos não se restringe a recuperação de Fe no rejeito. O aumento de recuperação pode ser obtido utilizando circuitos de concentração mistos, nos quais as etapas *rougher* e *scavenger* são realizadas em separadores magnéticos e a etapa *cleaner* é realizada em máquinas de flotação. Arvidson<sup>(2)</sup> 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.

Segundo Queiroz e Brandão<sup>(3)</sup>, 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<sup>(3)</sup>, a maneira com a qual as partículas minerais estão associadas tem influência no comportamento das mesmas frente a campos magnéticos distintos.

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, caracterizando assim um dipolo magnético. Por sua vez quando a molécula apresenta dois elétrons emparelhados, 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<sup>(4)</sup>.

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 concentração magnética uma vez que o movimento das partículas sob a ação do campo magnético é função do momento magnético induzido na partícula<sup>(5)</sup>.

O circuito misto considerado neste trabalho consiste em realizar as etapas *rougher* e *scavenger* em separadores magnéticos de alta intensidade e a etapa *cleaner* em células de flotação. O rejeito *rougher* seria encaminhado para a etapa *scavenger*, também realizada em separadores magnéticos e o concentrado *rougher* seria encaminhado para a etapa *cleaner*, que seria realizada em células de flotação. Para comparar os resultados obtidos com o circuito misto, foram realizados testes com um circuito de concentração constituído apenas por etapas de flotação. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma com as rotas de processo consideradas nos testes. No caso específico do minério que alimenta as usinas de concentração da Samarco, no qual 8% da massa é constituída por partículas menores que 10 $\mu$ m (lama), o emprego dos separadores magnéticos na etapa *rougher* poderia eliminar a necessidade de uma etapa de deslamagem anterior ao primeiro estágio de concentração.



**Figura 1.** Fluxograma com as rotas de processo consideradas nos testes.

O objetivo deste trabalho é avaliar os resultados, em termos de recuperação mássica e metálica, do circuito de concentração misto constituído por etapas de separação magnética e etapas de flotação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A amostra utilizada nos testes foi coletada na usina de concentração da Samarco na alimentação da etapa de deslamagem. A análise química, a porcentagem maior que 150 $\mu$ m e menor que 45 $\mu$ m estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise química, porcentagem passante em 150 $\mu$ m e retida em 45 $\mu$ m para as amostra da alimentação da deslamagem utilizadas nos testes simulando as duas rotas

Fe%	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	PPC%	+150 $\mu$ m (%)	-45 $\mu$ m (%)
45,37	32,24	0,33	2,47	5,7	50,0

A análise química das amostras geradas nos testes foi realizada por dicromatometria (determinação do Fe), por análise em espectrômetro de emissão ótica com plasma acoplado (determinação da SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P e MnO<sub>2</sub>) e por gravimetria (determinação de PPC). A análise granulométrica das amostras foi realizada utilizando peneiras da

série Tyler, com as seguintes aberturas: 590 $\mu$ m, 420 $\mu$ m, 297 $\mu$ m, 210 $\mu$ m, 149 $\mu$ m, 105 $\mu$ m, 74 $\mu$ m, 53 $\mu$ m, 44 $\mu$ m e 37 $\mu$ m. As peneiras usadas foram da marca Bronzinox, com 20cm de diâmetro e 7cm de altura.

Os testes de flotação em bancada foram realizados em uma célula de flotação WEMCO de 2400 mL, com rotação de 1300rpm. O depressor dos minerais de ferro utilizado foi o amido de milho gelatinizado com hidróxido de sódio, na proporção mássica 5:1. As dosagens de depressor e coletor empregadas nos testes foram, respectivamente, 550g/t e 50g/t e o pH de flotação empregado foi de 10,5.

Os testes de separação magnética foram realizados no Minimag, equipamento piloto fabricado pela Gaustec. Os parâmetros de processo empregados nos testes de separação magnética piloto estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros de processo empregados nos testes de separação magnética piloto utilizando o Minimag

Etapa	Matriz (mm)	Intensidade Campo (T)	Velocidade de Rotação (rpm)	Pressão Água (kgf/cm <sup>2</sup> )	
				Médios	Concentrado
<i>Rougher</i>	5,0	0,8	4,5	2,5	4,0
<i>Scavenger</i>	1,5	1,2	5,0	3,5	4,0

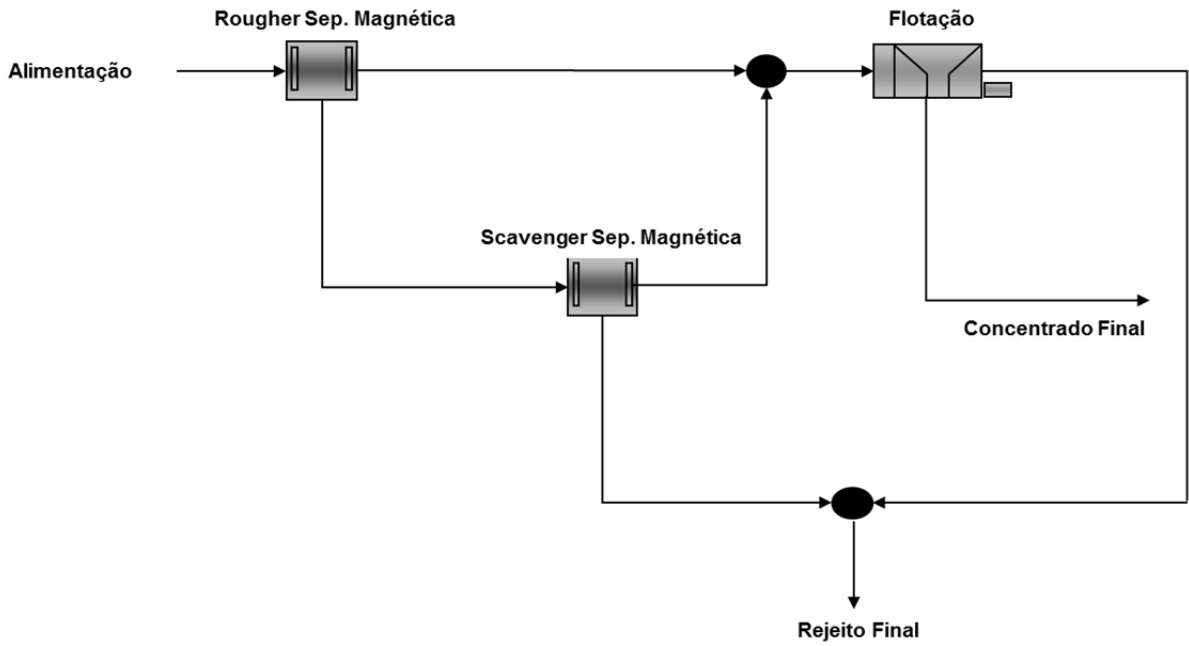
### 3 RESULTADOS

O fluxo de processo que representa as duas rotas consideradas no estudo está apresentado nas Figuras 2 e 3. No circuito de concentração misto, os testes de flotação em bancada foram realizados com o fluxo de concentrado gerados na etapa *rougher* e *scavenger*. No circuito de concentração em células de flotação, os testes de flotação em bancada foram realizados com o *underflow* gerado nos testes de deslamagem.

O resultado da análise química dos fluxos gerados nos testes simulando a rota de concentração mista (separação magnética + flotação) e os resultados obtidos na rota de concentração em células de flotação estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Nos testes de separação magnética, tanto na etapa *rougher* quanto na etapa *scavenger*, o fluxo de médios foi direcionado para o fluxo de concentrado.

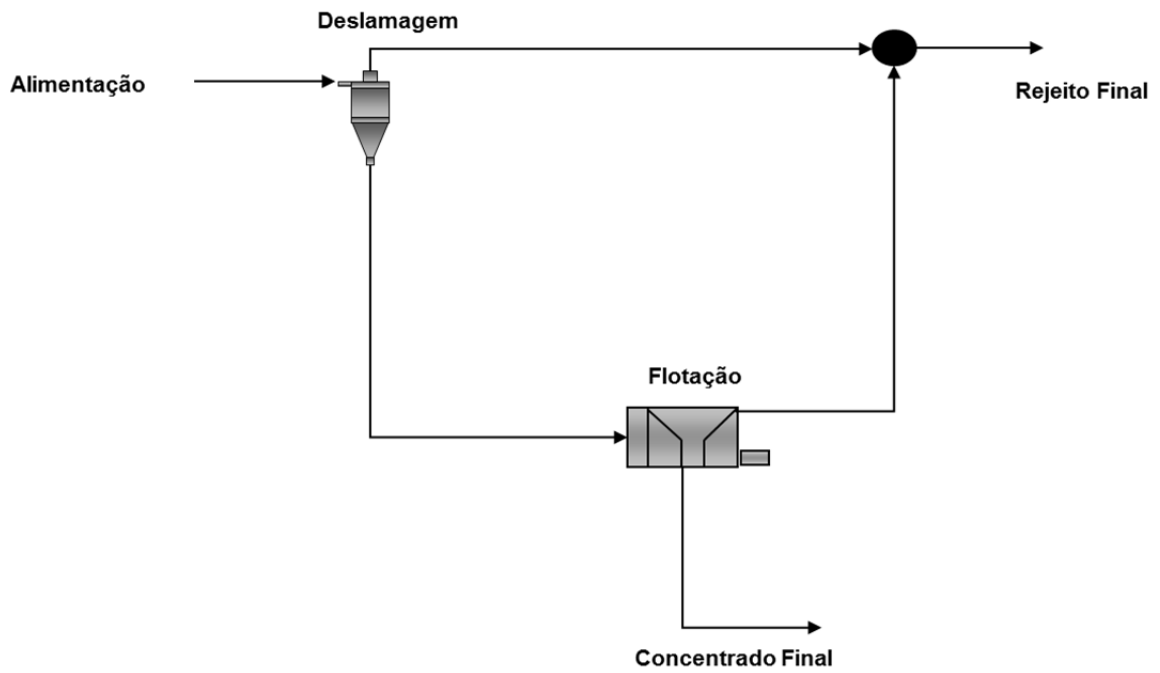
Na Tabela 5 estão apresentados os resultados da recuperação em peso, metálica e os teores de Fe na alimentação do circuito, no concentrado da flotação e o teor de Fe no rejeito global encontrado nos testes simulando as duas rotas. No circuito misto o rejeito global é constituído pelo rejeito *scavenger* (separação magnética) e pelo rejeito da flotação. No circuito de concentração em células de flotação o rejeito global é constituído pelo *overflow* da deslamagem e pelo rejeito da flotação.

Circuito de Concentração Misto (Sep. Magnética + Flotação)



**Figura 2.** Fluxo de processo representando a concentração mista (separação magnética + flotação).

Circuito de Concentração em Células de Flotação



**Figura 3.** Fluxo de processo representando a concentração em células de flotação.

**Tabela 3.** Resultados obtidos nos testes simulando a rota de concentração mista (separação magnética e flotação)

Etapa	Fluxo	Fe%	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	PPC%
<i>Rougher</i> Sep. Magnética	Alimentação	45,37	32,24	0,33	2,47
	Concentrado	61,19	10,20	0,24	1,96
	Rejeito	30,50	53,26	0,63	2,39
<i>Scavenger</i> Sep. Magnética	Concentrado	49,03	26,19	0,29	3,27
	Rejeito	10,44	83,49	0,30	1,23
<i>Cleaner</i> Flotação	Concentrado	66,76	1,40	0,22	2,82
	Rejeito	25,60	----	----	----

**Tabela 4.** Resultados obtidos nos testes simulando a rota de concentração em células de flotação

Etapa	Fluxo	Fe%	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	PPC%
Deslamagem + Flotação	Alimentação	45,37	32,24	0,33	2,47
	<i>Overflow</i>	50,19	17,05	0,29	7,38
	<i>Underflow</i>	44,92	30,67	0,34	2,20
	Concentrado	65,81	2,10	0,24	3,24
	Rejeito	15,15	----	----	----

**Tabela 5.** Resultados da recuperação em peso, metálica e os teores de Fe na alimentação do circuito e no concentrado da flotação e o teor de Fe no rejeito global encontrado nos testes simulando as duas rotas

Opção Circuito	% Fe Alim.	% Fe Conc. Final	% Fe Rej. Global	RP Global	RM Global
Misto (Sep. Magnética + Flotação)	45,37	66,76	16,20	57,40	84,80
Flotação		65,81	20,00	55,40	80,40

#### 4 DISCUSSÃO

A qualidade do concentrado da flotação obtido no teste simulando o circuito misto foi equivalente à qualidade obtida no concentrado da flotação no teste simulando o circuito de concentração em células de flotação. Todos os contaminantes analisados (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, PPC) apresentaram valores menores no concentrado da flotação no

teste do circuito misto quando comparado com o concentrado da flotação obtido no teste do circuito de concentração em células de flotação.

Os resultados das etapas *rougher* e *scavenger* demonstram o potencial da separação magnética para maximizar a recuperação do circuito de concentração. Enquanto o teor Fe no rejeito global do circuito misto foi 16,20%, no circuito de concentração em células de flotação o teor de Fe no rejeito global foi de 20,00%. Essa diferença se deve ao resultado da etapa *scavenger*, na qual o teor de Fe no rejeito foi de 16,20%. Em consequência, a recuperação em peso global do circuito misto foi 2,00% maior e a recuperação metálica global foi 4,40% maior.

A aplicação de separação magnética antes da etapa de flotação demonstrou ter potencial para substituir a etapa de deslamagem.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos testes exploratórios confirmam o potencial do circuito de concentração misto (separação magnética + flotação) para aumentar a recuperação mássica (+2,0%) e a recuperação metálica (+4,4%), quando comparado com o circuito de concentração constituído apenas pela etapa de flotação.

A aplicação de separação magnética antes da etapa de flotação indica a possibilidade de eliminação da etapa de deslamagem.

## REFERÊNCIAS

- 1 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).
- 2 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.
- 3 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.
- 4 ROSENBLUM, S. and BROWNFELD, K. Magnetic Susceptibilities of Minerals. USGS Open-File Report 99-529, p.38, 2000.
- 5 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.