

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE CONCENTRAÇÃO POR FLOTAÇÃO E SEPARAÇÃO MAGNÉTICA PARA MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO¹

Adriano Totou²
Neymayer Pereira Lima³

Resumo

A flotação é um dos principais processos de concentração, sendo empregado para uma ampla classe de minerais (sulfetos, óxidos, etc), como também para uma variedade de tamanhos de partículas. Estudos anteriores mostram que a flotação pode ser empregada com sucesso para faixas granulométricas entre 10 µm e 300 µm. Fora destes limites granulométricos a seletividade do processo de flotação torna-se muito baixa, sendo as condições hidrodinâmicas do sistema incapazes de manter o nível de flotabilidade ideal das partículas. Diferentes tamanhos de partículas são encontradas nos atuais sistemas de flotação, podendo muitas vezes reduzir a seletividade do processo, devido às diferenças de comportamento das várias classes de tamanhos, tais como área superficial específica, hidrofobicidade e peso. A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata. Os separadores magnéticos de alta intensidade se baseiam na diferença de susceptibilidade magnética entre a hematita e o quartzo, possibilitando a separação destas fases minerais. Durante o período de 1998 a 2008 a fração -0,600 mm de um minério de ferro itabirítico foi concentrada por flotação em células mecânicas. Problemas de seletividade do circuito levaram a realização de estudos em bancada e piloto que culminaram na sua substituição por um circuito de concentração magnética com equipamentos de média e alta intensidade para a concentração da fração -1,0mm. Este trabalho mostra os resultados obtidos com estes dois circuitos de concentração.

Palavras-chave: Flotação; Separação magnética; Granulometria.

EVALUATION OF PROCEDURES FOR FLOTATION CONCENTRATION AND MAGNETIC SEPARATION FOR IRON ORE ITABIRITO

Abstract

Flotation is a very successful concentration process, and is employed for many types of minerals (sulphides, oxides, etc.) as well as for diverse particle sizes. Previous works show that flotation can be applied successfully for particle sizes between 10 to 300 µm. The flotation selectivity drops dramatically out of these size limits, as the system hydrodynamic conditions cannot keep at suitable levels for the flotability of these particles. Some flotation systems use a wide range of particle sizes, which can very often reduce the process selectivity due to distinct behaviors of the several size classes, and corresponding specific surface areas, hydrophobicity and weight. Magnetic separation is an important and traditional process used in the mineral processing industry, aiming the concentration of different minerals or removing scraps. The main variables of the magnetic separation equipments are: intensity of the magnetic field, density and flowrate of the feed, size distribution. The magnetic separation equipments, in the iron ore industry, besides on the difference behavior between hematite and quartz in the magnetic field, which causes their separation. During 1998 to 2008 the size fraction -0,600 mm of an itabiritic run of mine was concentrated using flotation cells. Selectivity problems leded the substitution for a magnetic separation circuit after the realization of bench and pilot plant tests. The new circuit comprises equipments of middle and high intensity magnetic fields aiming the concentration of the size fraction -1,0 mm. This work shows and discuss the results obtained using the two process concentration circuits.

Key words: Flotation; Magnetic separation; Size distribution.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Engenheiro de Processo, Gerência de Engenharia de Processo, Vale, Brasil.

³ Msc. Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Projetos, Vale, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A flotação é um dos principais processos de concentração de minerais hoje utilizados no mundo, tendo sido empregada há aproximadamente cem anos para uma ampla classe de minerais: sulfetos, óxidos, fosfatos, silicatos, carvão e sais solúveis. O desenvolvimento da indústria mineral não teria sido possível sem a descoberta da flotação, visto que outros processos físicos tradicionais de concentração de minerais (gravíticos, magnéticos e eletrostáticos) não permitem que a propriedade diferenciadora (densidade, susceptibilidade magnética ou condutividade elétrica) seja induzida ou modulada. Parte da produção mundial de minérios de ferro necessários à produção de aço nos níveis de consumo atuais só tornou-se possível nas últimas décadas com a utilização do processo de flotação em larga escala.⁽¹⁾

A seletividade do processo de flotação se baseia na diferença de hidrofobicidade das diferentes espécies minerais que se deseja separar. O conceito de hidrofobicidade está associado à menor facilidade de umectação dos minerais pela água, sendo as substâncias hidrofílicas classificadas quimicamente como polares e aquelas hidrofóbicas como apolares, havendo afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares. Na natureza, poucos minerais são naturalmente hidrofóbicos (grafita, molibdenita, talco, pirofilita, alguns carvões e ouro nativo livre de prata). Minerais conhecidos como polares exibem elevados valores de energia livre de superfície, reagindo fortemente com moléculas de água e apresentando ângulo de contato nulo ou próximo de zero.⁽¹⁻³⁾

Uma das vantagens do processo de flotação é a possibilidade de tornar hidrofóbica a superfície originalmente hidrofílica da maioria das espécies minerais. Este processo ocorre através da utilização de reagentes surfatantes que se adsorvem na superfície de tais minerais (interface mineral/solução). Adsorção é o processo de concentração de espécies químicas (coletores, modificadores, espumantes) em interfaces. Surfatantes são moléculas anfipáticas do tipo R-Z, isto é, que apresentam uma porção apolar R (R=cadeia hidrocarbônica) que pode ser ramificada, linear ou cíclica; acoplada a Z que constitui sua porção polar, isto é, um ou mais grupos funcionais.⁽⁴⁾

Os principais componentes do minério de ferro itabirítico – hematita e quartzo – podem ser flotados com coletores catiônicos como o acetato de alquil éter amina. Portanto, a seletividade tem que ser atingida com o uso do amido como depressor de minerais de ferro, que é condicionado na polpa do minério, previamente à adição do coletor. Então, o cátion alquil éter amina deve adsorver-se preferencialmente na interface quartzo/solução, de modo a tornar sua superfície hidrofóbica; enquanto o amido vai garantir o caráter hidrofílico da interface hematita/solução, viabilizando, assim, a flotação reversa.⁽⁵⁾

A coleta de partículas no processo de flotação é um produto das probabilidades de ocorrência dos seguintes eventos: 1) colisão entre partículas e bolhas de ar (P_c), 2) adesão entre partículas e bolhas (P_a), 3) destacamento da partícula aderida à bolha (P_d), 4) retenção da partícula na espuma durante o tempo necessário para transporte e remoção do sistema de flotação (P_r). A Equação 1 representa o produto destas probabilidades durante a coleta de partículas no processo de flotação:

$$P = P_c \times P_a \times P_r \times (1 - P_d)$$

Partículas grossas apresentam elevada probabilidade de colisão e baixas probabilidades de adesão e retenção (elevada probabilidade de descoleta), o que ajuda a entender a dificuldade de coleta destas partículas no processo de flotação. Estudos realizados por Hewitt et alii⁽⁶⁾, mostraram que a probabilidade de adesão aumenta com o decréscimo do tamanho de partículas e com o aumento do grau de hidrofobicidade, podendo este último ser obtido com aumento da dosagem de coletor.

A flotação de partículas grossas tem sido estudo de alguns pesquisadores,^(7,8) cujos resultados mostram que as mesmas forças responsáveis pela colisão e agregação entre partículas e bolhas podem romper a estabilidade do agregado e assim a descoleta das partículas. De forma geral, a eficiência de colisão e coleta cai drasticamente para partículas acima de 300µm. Pode-se dizer assim que a probabilidade de descoleta é maior para maiores tamanhos de partículas, embora estas apresentem também maiores probabilidades de colisão.

A separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério e na remoção de sucata. Os separadores magnéticos de alta intensidade se baseiam na diferença de susceptibilidade magnética entre a hematita e o quartzo, possibilitando a separação destas fases minerais.

Atualmente, a concentração magnética tem sido empregada com bastante êxito visando à concentração de partículas de minérios de ferro com granulometria abaixo de 1,0 mm. Geralmente são utilizados equipamentos de média intensidade seguidos por equipamentos de alta intensidade. Os circuitos de concentração magnética em operação apresentam as seguintes características:

- elevadas recuperação em massa e seletividade, considerando liberação entre minerais de ferro e quartzo;
- elevada robustez;
- elevado consumo de água;
- necessidade de peneiramento de proteção para retirada de partículas e contaminação que podem levar a entupimentos; e
- perda de seletividade devido a presença de partículas abaixo de 0,045mm, o que deve ser controlado em etapas de classificação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi dividido em duas etapas:

- 1- Avaliação de um processo industrial de flotação por células mecânicas para um minério de ferro itabirítico. Esta avaliação foi feita durante os anos de operação deste circuito, de 1998 a 2008.
Durante estes anos, o circuito de flotação foi alimentado com a fração -0,600mm com aproximadamente 50% de partículas menores que 0,150 mm, que representava 17% de um ROM itabirítico. O “top size” de 0,600 mm deve-se a dificuldades hidrodinâmicas encontradas durante a operação para manter partículas maiores em suspensão. Além disto, foi observado que o baixo percentual de partículas finas (-0,150 mm) na alimentação da flotação contribuía para perdas de seletividade e dificuldades operacionais.
- 2- Avaliação do circuito de concentração magnética, que substituiu o circuito de flotação, a partir de 2008.

As amostras obtidas foram caracterizadas (química e granulometricamente), sendo os resultados tratados matematicamente e interpretados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 mostram os fluxogramas dos circuitos de flotação e separação magnética .

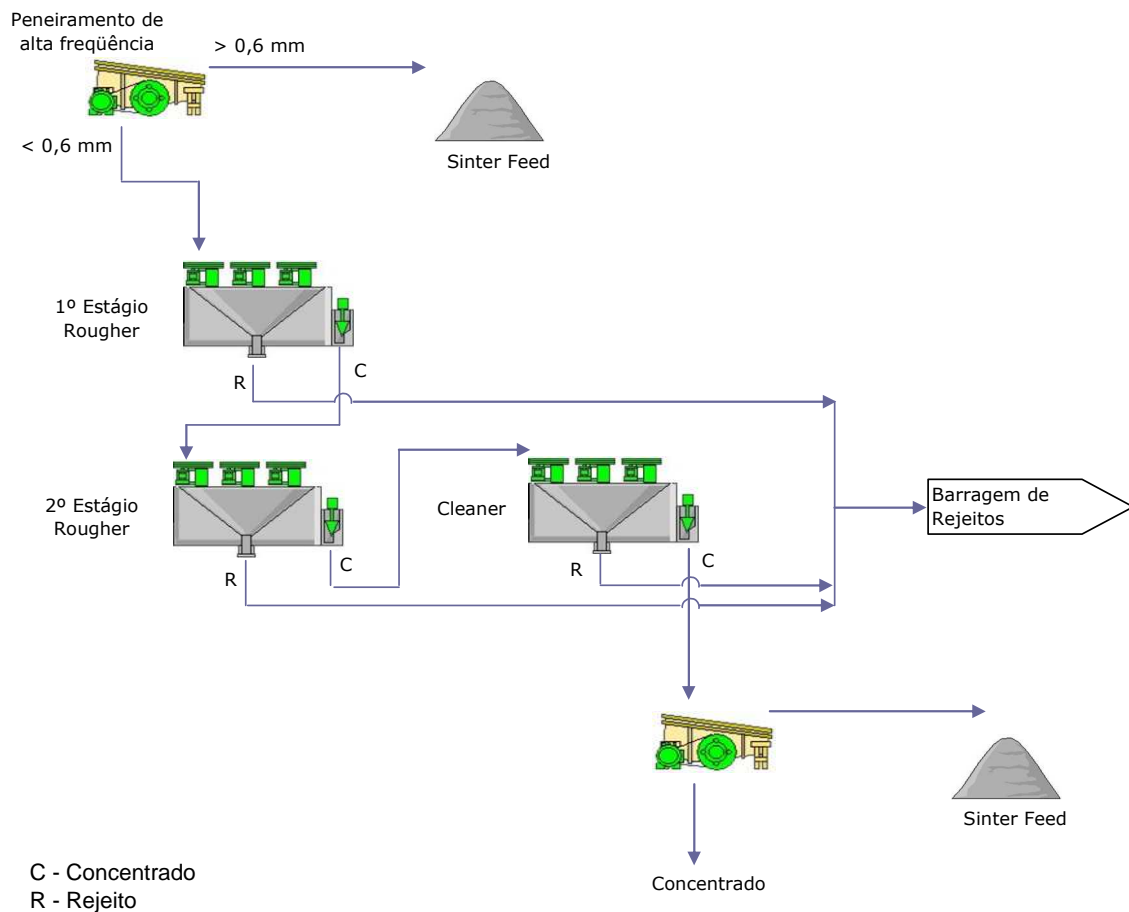
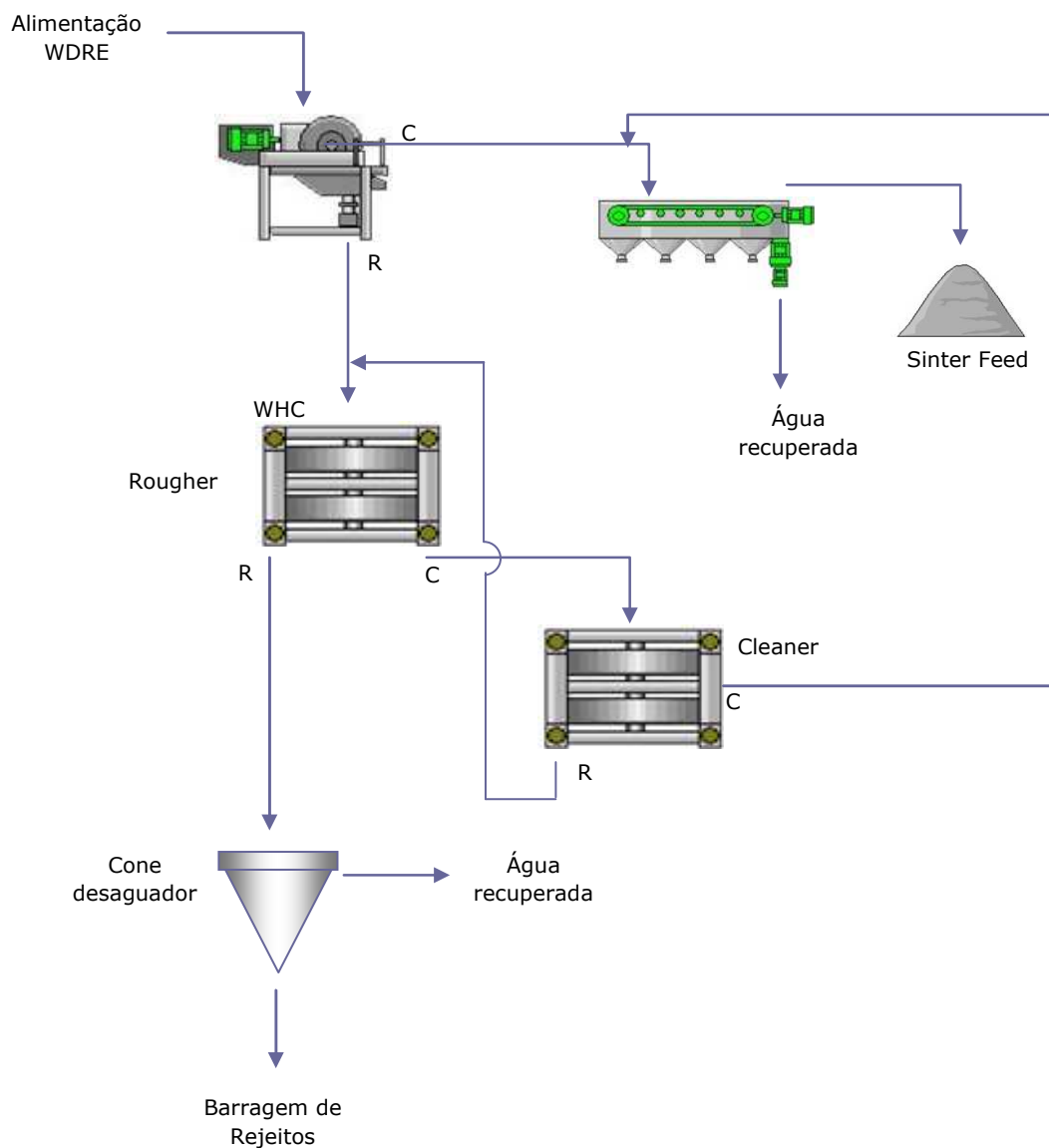


Figura 1 – Fluxograma simplificado do circuito de flotação de grossos.



C - Concentrado
R - Rejeito

Figura 2 – Fluxograma simplificado do circuito de concentração magnética.

A Tabela 1 mostra a distribuição granuloquímica da alimentação do circuito de flotação.

Tabela 1- Distribuição granuloquímica da alimentação do circuito de flotação

Malha (mm)	% Ret. Simples	% Ret. Acumulado	% Pass. Acumulado	Fe (%)	SiO ₂ (%)
0.300	9.62	9.62	90.38	53.02	20.56
0.200	12.93	22.55	77.45	39.17	41.05
0.150	22.59	45.14	54.86	28.48	56.14
0.105	10.48	55.62	44.38	27.21	58.09
0.075	13.41	69.03	30.97	31.27	49.97
0.053	8.26	77.29	22.71	41.21	34.20
0.045	6.70	83.99	16.01	55.54	16.36
-0.045	16.01	100.00	0.00	65.76	5.44
Global	100.00	xx	xx	41.30	37.55

A Tabela 1 mostra as características da alimentação do circuito de flotação: 45% de partículas acima de 0,150 mm, 9,62% de partículas acima de 0,300 mm e 16% abaixo de 0,045 mm. A limitação do “top size” na alimentação da flotação ocorreu devido a dificuldades hidrodinâmicas para manter partículas maiores em suspensão. O elevado percentual de finos (55%-0,150 mm) ocorreu devido a problemas operacionais e perdas de seletividade com a redução destas partículas na alimentação da flotação.

A Tabela 2 e Figura 3 mostram o desempenho do circuito de flotação, indicando baixo índice de seletividade (Gaudin) para as frações extremas (+0,500 mm e -0,045 mm). A elevada dosagem de coletor deve-se a tentativa de coleta de quartzo grosso (+0,150 mm), o que não foi observado conforme mostra a Tabela 2 (33,13% de partículas +0,150 mm no concentrado).

Tabela 2- Desempenho do processo de flotação

Parâmetro	Alimentação	Concentrado	Rejeito
Rec. Massa	100.00	37.18	62.82
Rec. Fe (%)	100.00	57.65	42.35
Rec. SiO ₂ (%)	100.00	5.29	94.71
Fe (%)	41.30	64.04	27.84
SiO ₂ (%)	37.55	5.35	56.60
% +0.300mm	9.62	22.25	2.15
% +0.150mm	45.14	65.44	33.13
% -0.150mm	54.86	34.56	66.87
% -0.045mm	16.01	2.14	24.22
Seletividade (Gaudin)		5	
Coletor (g/t _{SiO₂})		386	
Depressor (g/t _{alim.})		500	

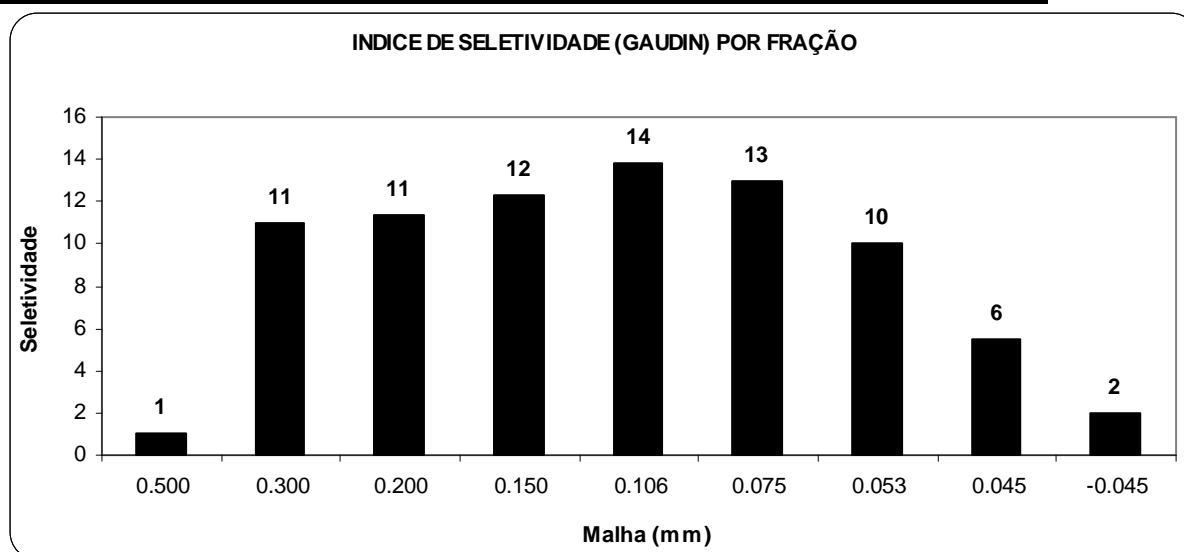


Figura 3- Índice de seletividade (Gaudin) por fração granulométrica do processo de flotação.

Os resultados acima mostram a possibilidade de coleta de partículas de quartzo com tamanho de até 0,300 mm (Seletividade = 11), devendo-se observar

que as partículas abaixo de 0,045 mm apresentam baixa seletividade, o que pode ser interpretado da seguinte forma: a elevada dosagem de coletor não foi suficiente para reduzir a elevada probabilidade de descoleta das partículas grossas de quartzo, podendo este excesso de reagente ter promovido a coleta das partículas finas de hematita.

A segunda avaliação industrial mostrou recuperação metálica de 89%, seletividade de Gaudin de 17, teor de SiO₂ no concentrado de 1,5% e ferro no rejeito de 13,5% com dosagem de coletor ajustada para 200g/t_{SiO₂}, à partir de uma alimentação nova

As dificuldades operacionais tais como a sedimentação do material nas células do circuito de flotação aliado a limitação granulometria (“top size”) na alimentação levaram a realização de estudos em escalas de bancada e piloto, que culminaram na substituição por um circuito de concentração magnética, conforme mostra o fluxograma da Figura 2, cujo “startup” foi em julho de 2008.

A Tabela 3 mostra os resultados do circuito de concentração magnética e as Figuras 4 e 5 mostram as distribuições de Fe e SiO₂ por fração granulométrica.

Tabela 3- Desempenho do circuito de separação magnética (colocar no mesmo formato da Tabela 2)

Parâmetros	Alimentação	Concentrado	Rejeito
Rec. Massa	100,00	85,54	14,46
Rec. Fe (%)	100,00	95,57	4,43
Rec. SiO ₂ (%)	100,00	23,95	76,05
Fe (%)	58,26	65,09	17,84
SiO ₂ (%)	13,39	3,74	71,51
% +0.500mm	26,5	19,00	10,90
% +0.250mm	64,10	51,00	43,40
% +0.150mm	86,00	63,80	73,70
% -0.150mm	14,00	36,20	26,30
Seletividade (Gaudin)		8	

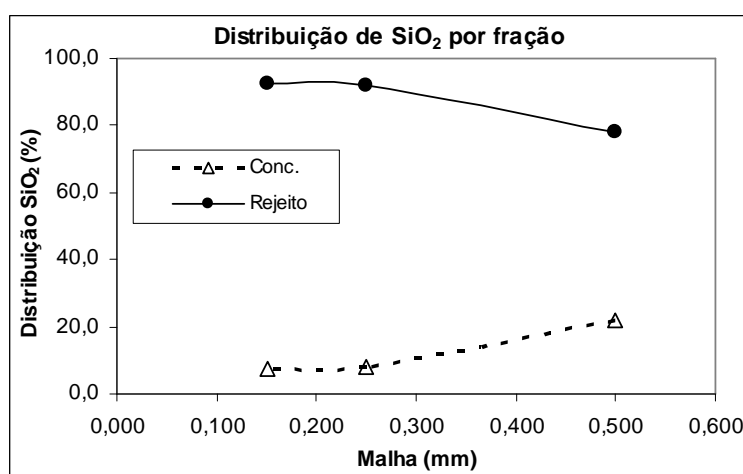


Figura 4- Distribuição de SiO₂ por fração no concentrado e rejeito da separação magnética.

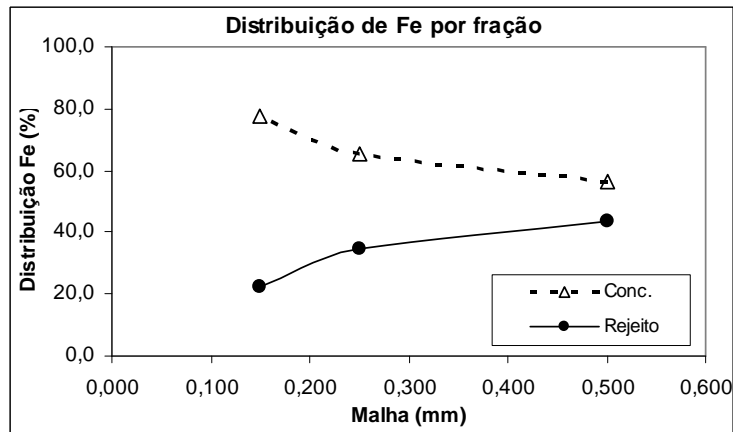


Figura 5- Distribuição de SiO₂ por fração no concentrado e rejeito da separação magnética.

4 CONCLUSÃO

O processo industrial de flotação por células mecânicas foi inicialmente implantado visando à concentração da fração -0,6+0,15 mm, tendo os resultados obtidos ao longo de sua operação mostrado baixo índice de seletividade, principalmente para partículas grossas, com necessidade de aumento do percentual de partículas <0,150 mm na alimentação para maior estabilização da espuma de flotação. Novos estudos de caracterização indicaram a concentração magnética, com equipamentos de média e alta intensidade, o processo mais adequado para concentração da fração -1,0+0,15 mm, o que foi confirmado após seu "start-up".

REFERÊNCIAS

- 1 OLIVEIRA, J.F. (2006). Setor Mineral: Tendências Tecnológicas, Texto elaborado para o projeto Setor Mineral – Tendências Tecnológicas, do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. 2006.
- 2 ARAÚJO, A.C.; VIANA, P.R.M.; PERES, A.E.C. (2005). Reagents in iron ore flotation. *Minerals Engineering*, v. 18, p. 219 – 224.
- 3 WILLS, B.A. (1997). *Mineral Processing Technology . An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 6 th edition, p. 258 – 341, 1997.
- 4 PERES, A.E.C.; COELHO, E.M.; ARAUJO, A.C. (1981). Flotação, espessamento, filtragem e floculação seletiva. In: Fundação Tecnológica do Estado de Pernambuco (ed). *Tratamento de minérios e hidrometalurgia*, in *Memoriam Prof. Paulo Abib Andery*. Recife, p.205-286.
- 5 BRANDÃO, P.R. A seletividade na flotação reversa de minério: adsorção dos reagentes. XXI Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa, Natal-RN, Novembro de 2005, p.22-33.
- 6 HEWITT, D.; FORNASIERO, D.; RALSTON, J. Bubble particle attachment efficiency. *Minerals Engineering*, v. 7, n.5/6, p. 657 – 665, 1994.
- 7 TRAHAR, W.J. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, v.8, p. 289 – 327, 1981
- 8 SCHULZE, H.J. New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability. *International Journal of Mineral Processing*, v. 4, p. 241 – 259, 1977.
- 9 LEPPINEN. J.O.; LASHKUL, A.V.; NENNO, V.E.; INGERTTILÄ. K.T.; KALLIONEN, J.O. Separation in froth: An effective technique for coarse flotation. *Proceedings XXII International Mineral Processing Congress.*, Cape Town, África do Sul, p. 882 – 891, 29/09 a 03/10/2003.