



FLOTAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

ROCHA, G.M.¹, SILVA, A.M.B², PEREIRA, C.A.¹

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Flotação. e-mail: geriane_ufop@hotmail.com

²Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Ouro Branco, Departamento de Metalurgia.

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados de ensaios de flotação com rejeito de minério de ferro oriundo de uma barragem localizada na região de Serra Azul, no Quadrilátero Ferrífero. Devido a diminuição de reservas minerais com elevados teores metálicos de Fe, e dificuldades e riscos na disposição de rejeitos gerados no processamento de minérios, estudos buscando o reaproveitamento desses materiais tem se tornado cada vez mais relevantes. A composição química do rejeito apresentou %Fe de ~44% e %SiO₂ de ~31%. Durante os ensaios foram avaliadas as dosagens dos reagentes, o uso de amido de milho e mandioca e diferentes métodos de preparação. Valores ótimos de dosagens dos reagentes depressor (amido) e coletor (amina) foram definidas em 600 g/t e 100 g/t, respectivamente. Os amidos de mandioca levaram a um aumento nas recuperações mássicas e metálicas, mas com uma leve queda no %Fe e aumento no %SiO₂ do concentrado. Os ensaios com amostra sem deslamagem foram pouco seletivos, gerando um concentrado com teor de sílica acima de 15%. Para as amostras deslamadas, precedidas de uma moagem de 2 minutos ou não, foram obtidos teores de Fe no concentrado em torno de 65%, adequado ao setor siderúrgico.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de minério de ferro, Flotação, Reagentes.

ABSTRACT

This work presents results of flotation tests with iron ore tailings from a dam located in Serra Azul region, at Quadrilátero Ferrífero. Due to the decrease in mineral reserves with high Fe metallic contents, and difficulties and risks in the disposal of tailings from mineral processing, studies aiming Fe recovery from this source have become increasingly relevant. The chemical composition of iron ore tailing showed %Fe ~44% and % SiO₂ ~31%. During the tests reagents dosages, use of corn starch and cassava starch and different preparation methods were evaluated. Optimum values for depressor (starch) and collector (amine) dosage were 600 g/t and 100 g/t, respectively. Cassava starches led to an increase in metal and mass recoveries, but with a slight decrease in %Fe and increase in %SiO₂ on concentrate. The tests with non-desliming sample were not selective, leading to a concentrate with a silica content above 15%. For the desliming samples, preceded or not by a milling of 2 minutes, the %Fe in the concentrate was around 65%, suitable for the steel industry.

KEYWORDS: Iron ore tailing, Flotation, Reagents.

1. INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo a minimização na geração e o reaproveitamento de rejeitos de mineração tornaram-se essenciais devido a diminuição de reservas minerais com elevados teores metálicos, e também devido à dificuldade e riscos em sua disposição. Para seu processamento são utilizadas as mesmas técnicas aplicadas para minérios, mas que são desenvolvidas ao longo do tempo.

A flotação é uma técnica consolidada mundialmente para processamento de partículas na faixa granulométrica $-250 \mu\text{m} +10 \mu\text{m}$. Segundo Bulatovic (2007) os reagentes são a parte mais importante desse método de concentração. Normalmente demanda-se muito tempo em estudos para sua seleção, buscando melhores resultados no processo de concentração, e sendo nas unidades industriais o ajuste adequado da dosagem também essencial no controle de custos de produção.

Na flotação catiônica reversa do minério de ferro o primeiro reagente a ser adicionado é o amido gelatinizado, depressor, que irá se adsorver preferencialmente nas partículas de minerais de ferro, cujas superfícies irão ter caráter hidrofílico. Posteriormente a amina, reagente coletor, é acrescentado no sistema de flotação e irá adsorver nas partículas de quartzo, deixando sua superfície com caráter hidrofóbico, atuando também como espumante.

A amina apresenta como principal propriedade, em meio aquoso, a hidrólise ou dissociação na qual há a predominância da forma iônica (RNH_3^+) na faixa de pH da solução ácida ou pouco alcalina, e na faixa de pH mais alcalina predomina a espécie molecular (RNH_2). A condição em que se tem o equilíbrio entre as concentrações dessas duas espécies é em torno do pH 10 (Bulatovic, 2007). Em função da baixa solubilidade das aminas em meio aquoso, são utilizadas as éter aminas parcialmente neutralizadas com ácido acético, que se dividem entre as diversas étermonoaminas ($\text{R-O}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$) e éterdiaminas ($\text{R-O}(\text{CH}_2)_3\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$) disponíveis no mercado.

Os amidos podem ser extraídos de várias espécies vegetais, a exemplo do milho, mandioca, batata, arroz, etc. Na indústria da mineração, o amido de milho é o mais usado, e no Brasil vem sendo aplicado desde 1978 (Araujo *et al.*, 2005). Esse autor explica que o amido extraído da mandioca possui alto potencial de substituição do amido de milho, apresentando inclusive custo baixo de produção. Um dos grandes obstáculos a sua ampla utilização é a escassez de grandes grupos produtores, que permita o atendimento à elevada demanda. Em comparação com amidos de milho, Bemiller e Whistler (2009) citam que os amidos de mandioca possuem baixo nível de materiais residuais (óleo, proteína, cinzas), menor teor de amilose, logo maior teor de amilopectina e elevados pesos moleculares.

Neste trabalho foram realizados ensaios de flotação em bancada com um rejeito de minério de ferro com o objetivo de determinar a dosagem ideal dos reagentes coletor e depressor, o efeito da forma de preparação da amostra de alimentação dos ensaios, e comparar a ação depressora de amido de milho (fubá de milho) e amido de mandioca (farinha de mandioca).

2. MATERIAL E MÉTODOS

A amostra de rejeito, aproximadamente 300 kg, proveniente de uma barragem localizada na região de Serra Azul no Quadrilátero Ferrífero-MG, foi inicialmente homegeneizada e quarteada, usando divisores do tipo carrossel e jones.

A análise granulométrica foi realizada através de peneiramento a úmido e difração a laser no equipamento Cilas 1064. A amostra inicial apresentou ~25% das partículas passantes em 10 µm, ~6,4% retidas em 300 µm e ~15% retidas em 150µm. Os processos de flotação de minério de ferro são alimentados por partículas na fração -150 µm +10 µm. As partículas ultrafinas são removidas através da deslamagem e o *top size* é limitado entre 5 a 10% retido em 150 µm (Lima e Valadão, 2008). Para retirada do excesso de partículas grosseiras foi feita uma classificação em peneiras com aberturas de 300 µm. Alguns ensaios de flotação foram precedidos de deslamagem do material, feita em balde de 20 litros, com % de sólidos de 15% e pH da polpa em 9,8. Após a deslamagem o % passante em 10 µm ficou ~10%.

A Tabela 1 apresenta a análise química global, determinada por fluorescência de raios X, e PPC (perda por calcinação), determinada por uso do forno mufla, antes (rejeito) e após a deslamagem (afundado da deslamagem que alimentou a flotação). O teor de SiO₂ de 30,93% é similar ao de outros rejeitos estudados dessa região geográfica, conforme Dauce *et al.* (2018). Observa-se na Tabela 1 que a deslamagem levou a uma redução significativa dos contaminantes (P, Mn, Al₂O₃ e PPC) da amostra, indicando que estes estavam concentrados principalmente na fração fina do rejeito.

Tabela 1. Composição química e perda por calcinação (PPC) das amostras globais.

Amostra	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P (%)	Mn (%)	Al ₂ O ₃ (%)	PPC (%)
Rejeito	44,30	30,93	0,042	0,046	2,64	2,14
Afundado da deslamagem	43,64	34,64	0,027	0,017	1,16	1,58

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados em uma máquina de fabricação CDC e cuba de 1500 mL. A percentagem de sólidos de condicionamento dos reagentes e de flotação foi 45%, velocidade do rotor de 1100 RPM. O coletor utilizado foi a monoamina Flotigam EDA da Clariant (1% p/v). Os depressores, cujas informações são apresentadas na Tabela 2, foram gelatinizados na proporção amido:soda de 5:1. Os tempos de condicionamento do coletor e depressor foram 1 e 5 minutos, respectivamente. O modulador de pH foi o NaOH (5% p/v) e o pH de flotação 10. Todos os ensaios foram realizados em duplicata e foram divididos em três etapas.

Tabela 2. Amidos utilizados e suas principais características informadas pelos fornecedores.

Reagente	Características principais				Fabricante
	> 1,0mm (%)	> 0,59mm (%)	Teor de óleo (%)	Amido (%)	
Fubá de Milho - Flotamil75	1,0 (max)	12,00 (max)	1,80 (max)	75,00 - 80,00	Caramuru
Farinha de Mandioca - FF01	2,49	-	0,45	75,00	Tecknoamido
Farinha de Mandioca - FF64	2,61	-	0,45	81,81	Tecknoamido

A primeira etapa foi de determinação das dosagens do coletor e depressor. Como referência padrão foi utilizado o amido de milho Flotamil75, e o tempo de coleta foi 5 minutos. Os ensaios foram definidos a partir de um planejamento fatorial de experimentos, alterando as variáveis dosagem de amina e dosagem de amido em dois níveis (Tabela 3). A variável resposta analisada, neste caso, foi o teor de SiO₂ no concentrado.

Tabela 3. Fatores e níveis dos ensaios de flotação.

Variáveis	Níveis	
	-	+
Amina (g/t)	70	120
Amido (g/t)	600	1000

Uma boa maneira de se estabelecer o tempo de flotação é através da construção de uma curva de cinética de flotação, que foi a segunda etapa. Moreira (2013) explica que a condução dos testes em bancada até a exaustão da espuma pode causar algumas interferências como influência do fator de residência, coleta desnecessária de minerais de ferro no flotado, devido ao aumento de possibilidade de arraste hidrodinâmico, desestabilização da camada de espuma, entre outros. A coleta do flotado foi realizada a cada 60 segundos, até 300. O tempo em que ocorreu a máxima recuperação de quartzo para o flotado foi definido para os próximos ensaios.

Na terceira etapa dos ensaios foram usadas três amostras oriundas de preparações diferentes: deslamada, moída em 2 minutos (moagem a seco) e deslamada e, não deslamada. O ensaio utilizando uma moagem rápida antes da classificação foi realizado com o objetivo de observar a influência da limpeza e geração de novas superfícies minerais, considerando que este rejeito ficou depositado por muito tempo na barragem, cuidando para evitar a geração de mais finos. Outro fator avaliado foram os reagentes depressores, sendo neste caso usados um amido de milho (Fubá de milho Flotamil75) e dois amidos de mandioca (Farinhas de mandioca FF64 e FF01). As variáveis respostas avaliadas foram recuperação em massa, recuperação de Fe e teores de Fe e SiO₂ nos concentrados obtidos.

Ao final de cada ensaio as amostras de concentrado e rejeito eram filtradas, secadas, pesadas e preparadas para análises químicas por fluorescência de raios X e de PPC através do uso de forno mufla.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação da Dosagem de Reagentes

Na curva de isovalores da Figura 1, gerada utilizando-se o *software* estatístico MINITAB, observa-se que teores de SiO₂ no concentrado menores que 3,0% foram obtidos na região de elevada dosagem de amina, e que a influência da dosagem do depressor, neste caso o amido de milho Flotamil75, foi pouco significativa sobre o resultado. Então, para os ensaios subsequentes a dosagem do coletor amina foi definida em 100 g/t, nível intermediário aos testados, e a dosagem de amido em 600 g/t, nível mínimo testado.

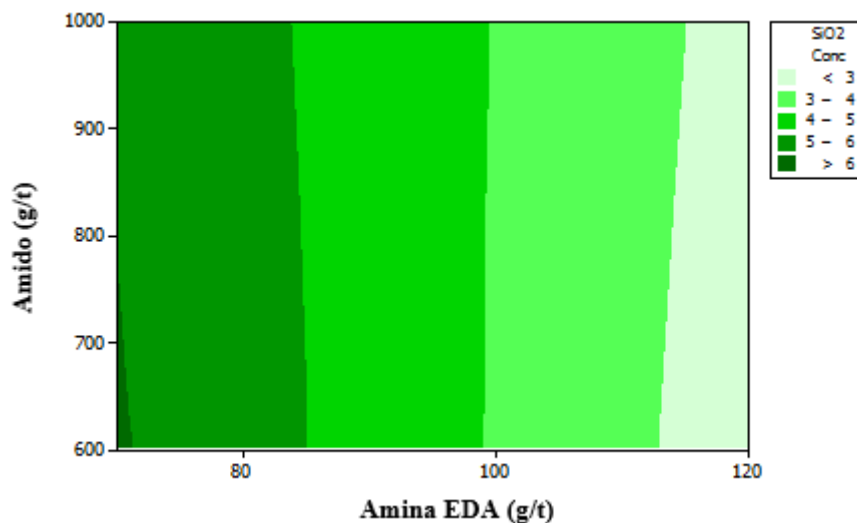


Figura 1. Curva de isovalores para a variável resposta % SiO₂ no concentrado.

3.2 Cinética de Flotação

A Figura 2 apresenta a curva de cinética de flotação em que a massa do flotado foi coletada a cada 60 segundos e feita a análise da sua composição química. Foi observado que o tempo assumido nos ensaios do item 3.1, 300 segundos (5 minutos), está adequado, pois é onde se observa elevada recuperação do quartzo (SiO₂) e também baixa alteração da mesma, que chegou a 96,0%. A recuperação em massa também se aproximou de zero nesse tempo.

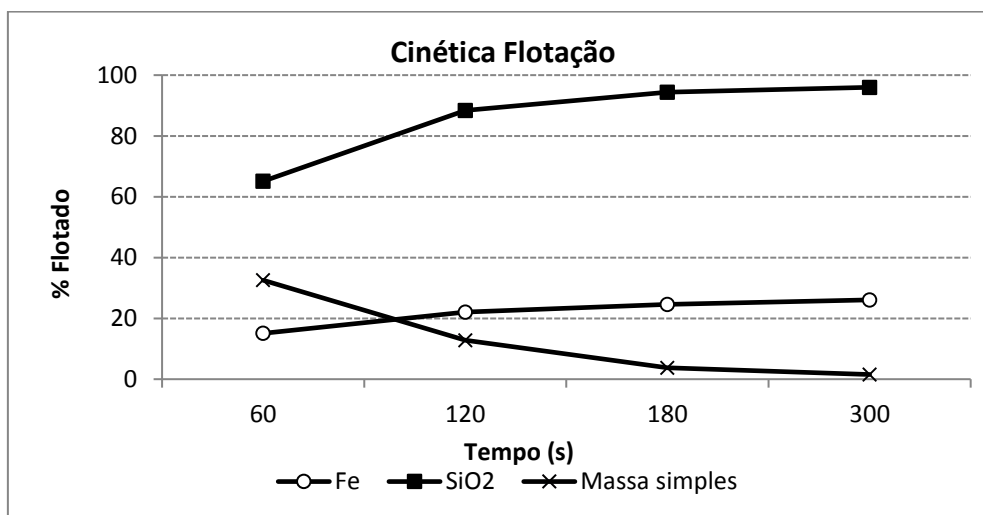


Figura 2. Gráfico de cinética de flotação.

3.3 Avaliação de Reagentes

Os resultados dos ensaios de flotação em função do depressor utilizado (Flotamil75 - fubá de milho, FF64 e FF01 – farinhas de mandioca) e para cada tipo de preparação da amostra aplicada, são apresentados na Tabela 4.

Sobre o método de preparação, sem deslamagem a seletividade é muito baixa e o teor de SiO₂ no concentrado fica muito elevado, mesmo usando tempo maior de flotação, que neste caso foi 12 minutos. Rabelo (1994) mostrou que percentual de lama elevado, acima de

8% de partículas passantes em 10 μm , leva a alto de teor de SiO_2 no concentrado, e Lima e Valadão (2008) explicam que uma ampla faixa granulométrica na alimentação da flotação prejudica a seletividade em função de diferenças de comportamento das partículas. As partículas finas apresentam pequena massa e alta área de superfície específica. A pequena massa leva a um baixo momento e baixa probabilidade de colisão com as bolhas, com tendência ao arraste hidrodinâmico das partículas finas na espuma. A elevada área superficial aumenta o consumo de reagentes, sendo que em uma polpa com partículas finas e grossas juntas grande parte do coletor seria consumido pelas partículas finas, fato que reduziria a disponibilidade para adsorção nas partículas grossas.

Para o material que foi moído por 2 minutos antes da classificação e deslamagem, observa-se na Tabela 4 um leve aumento de recuperação em massa e de ferro para os amidos Flotamil75 e FF64, e logo um aumento no teor de SiO_2 e queda no teor de Fe dos concentrados, comparado ao material que passou somente pela deslamagem. Este resultado é um indício de que ocorreu a limpeza e geração de novas superfícies nos minerais, que favoreceram a adsorção dos reagentes. A melhora na recuperação indica que provavelmente as alterações na superfície, sob as condições estudadas, foram mais significativas para os minerais de ferro. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato da hematita requerer menor energia na sua cominuição do que o quartzo. O Wi (índice de trabalho) médio da hematita (11,1 kWh/t curta) é menor do que o do quartzo (14,4 kWh/t curta), conforme Figueira *et al.* 2004.

Verifica-se na Tabela 4 que o uso de amidos de mandioca (Farinhas de mandioca FF64 e FF01) comparado ao amido de milho (Fubá de milho Flotamil75) como depressores levou a maior recuperação de Fe e de massa. Como consequência percebe-se concentrados com maiores teores de SiO_2 e menores teores de Fe com o amido de mandioca. Matos *et al.* (2015) observaram em estudos de agregação/dispersão com minério de ferro que o amido de mandioca apresentou efeito de agregação mais efetivo do que o amido de milho, e isso pode ter influenciado positivamente nas recuperações de Fe e mássica. Porém a comparação em função apenas da fonte do amido pode não ser conclusiva pois, conforme Bemiller e Whistler (2009) explicam, as propriedades dos amidos são afetadas por muitos fatores. Além da origem botânica, a forma de cultivo, estações de crescimento, idade das raízes, quando se aplica, e o método de extração afetam essas propriedades.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de concentração do rejeito de minério de ferro por flotação.

Depressor	Amostra deslamada				Amostra deslamada moída por 2 minutos				Amostra não deslamada			
	Rec. Massa (%)	Rec. Fe (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)	Rec. Massa (%)	Rec. Fe (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)	Rec. Massa (%)	Rec. Fe (%)	Fe (%)	SiO_2 (%)
Flotamil75	46,27	69,84	66,97	2,60	49,28	72,23	64,71	4,01	65,39	81,50	55,70	16,94
FF 64	49,50	72,97	65,94	3,10	52,63	76,82	64,85	4,31	64,65	80,28	55,08	17,01
FF 01	51,68	76,37	65,75	3,56	52,04	76,18	65,52	3,69	64,42	81,30	56,24	15,21

4. CONCLUSÕES

Testes de flotação com a amostra sem deslamagem apresentaram baixa seletividade, gerando um concentrado com elevado teor de sílica (acima de 15%). A etapa de deslamagem melhorou a seletividade do processo, e foi responsável por uma redução significativa nos teores dos contaminantes P, Mn, Al_2O_3 e PPC.

Os concentrados obtidos com as amostras deslamadas se mostraram adequados para atendimento ao setor siderúrgico, alcançando %Fe em torno de 65%. O uso de amidos de mandioca, comparado ao de milho, levou a maiores recuperações mássicas e metálicas, porém com leve aumento no %SiO₂ e queda no %Fe dos concentrados. As maiores recuperações metálicas (~76%) e mássica (~65%) foram obtidas com a farinha de mandioca FF01, que levou a concentrados com teor de Fe de ~65% e de SiO₂ de ~3,5%, com as amostras deslamadas, independentemente da limpeza da superfície das partículas.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto, CNPq, Fapemig. À empresa Mineração Usiminas por fornecer a amostra de rejeito e análises químicas. Aos fornecedores dos reagentes.

6. REFERÊNCIAS

- Araujo AC, Viana PRM, Peres AEC. Reagents in iron ores flotation. *Minerals Engineering* 2005; 18:219-224.
- Bemiller J, Whistler R. *Starch Chemistry and Technology*. 3a. ed. Oxford:Elsevier Inc; 2009. Chapter 12, Tapioca/cassava starch: production and use, p. 541-564.
- Bulatovic, SM. *Handbook of Flotation Reagents; Chemistry, theory and practice: Flotation of sulfide ores*. v1. Ontario:Elsevier Science e Tecknology Books; 2007.
- Dause PD, Castro GB, Lima MMF, Lima RMF. Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology* 2018.
- Figueira HVO, Almeida SLM, Luz AB. *Tratamento de Minérios*. 4ª. ed. CETEM/MCT; 2004. Chapter 4, Cominuição, p.113-193.
- Lima NP, Valadão GE. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. *Revista da Escola de Minas* 2008; 61:473-477.
- Matos VE, Peres AEC, Brandão PRG. Estado de agregação e dispersão de um minério de ferro na presença de diferentes tipos de amidos. In: *Encontro Nacional de Minérios e Metalurgia Extrativa, Proceedings do XXVI Encontro Nacional de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2009; Poços de Caldas, Brasil*.
- Moreira WR. Fontes de amido aplicáveis à flotação de minério de ferro. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2013.
- Rabelo PJB. Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte;1994.