

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



MAÍSA OLIVEIRA ALVES

ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITO SEMI-COMPACTO POR FLOTAÇÃO CATIÔNICA REVERSA

Ouro Preto 2018

MAÍSA OLIVEIRA ALVES

ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITO SEMI-COMPACTO POR FLOTAÇÃO CATIÔNICA REVERSA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: Prof^a. Dr^a. Rosa Malena Fernandes Lima

A474e Alves, Maísa Oliveira.

Estudo da viabilidade de concentração de itabirito semi-compacto por flotação catiônica reversa [manuscrito] / Maísa Oliveira Alves. - 2018.

55f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Rosa Malena Fernandes Lima.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minérios de ferro. 2. Flotação. 3. Granulometria. I. Lima, Rosa Malena Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 622.765

Catalogação: ficha@sisbin.ufop.br





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Aos nove dias do mês de fevereiro de 2018, às 09:00 horas, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, pela aluna Maísa Oliveira Alves, intitulado: "ESTUDO DA VIABILIDADE DE CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITO SEMI-COMPACTO POR FLOTAÇÃO CATIÔNICA REVERSA", sendo a comissão avaliadora formada por Prof^a. Dr^a. Rosa Malena Fernandes Lima (orientadora), M. Sc. Tamiris Fonseca de Souza, e M.Sc. Daniel Geraldo da Cruz.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovaçõe...... da candidata, com a nota 9,5. concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

Ouro Preto, 09 de fevereiro de 2018.

Prof^a. Dr^a. Rosa Malena Fernandes Lima Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

Fonseca de Souza M Sc. Membro da Comissão Avaliadora

M.Sc. Daniel Geraldo da Cruz Membro da Comissão Avaliadora

Maisa Oliveira Alves

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Campus Universitário Morro do Cruzeiro- CEP: 35400-000 - Ouro Preto - MG Home page: http://www.cm.utop.br - E-mail: demin@demin.ufop.br- Tel: (0xx) 31 3559-1590/1595 - FAX: (0xx) 31 3559-1606

Dedico este trabalho ao meu pai (*in memoriam*), pelo amor e exemplo transmitidos durante sua existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Pai Celestial pela proteção e pelas incontáveis bênçãos.

À professora Rosa Malena Fernandes Lima pela orientação, paciência e, principalmente, pelo conhecimento transmitido ao longo da graduação, fundamentais ao desenvolvimento desse trabalho.

À toda equipe da ArcelorMittal Maizières Research and Development – Mining and Mineral Processing. Ao professor Armando Corrêa de Araujo, pelos valiosos ensinamentos e disponibilidade. Ao Wen, pela orientação, confiança e contínuo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e elaboração deste texto. Ao Filipe e Marcela, pela oportunidade, sugestões e contribuições a partir das experiências compartilhadas. Ao Arnaud, pelos estudos de caracterização contidos neste trabalho. Aos técnicos e demais colegas estagiários, pelo apoio constante na execução dos ensaios. Ao Diego (ArcelorMittal Brasil), por todo o suporte oferecido ao longo deste estudo.

Aos membros da comissão avaliadora pela atenção na leitura deste texto, sugestões e contribuições.

Ao Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP), na pessoa do técnico Luiz, por todo auxílio e experiência adquirida.

À todos os amigos da graduação, companheiros de trabalho, estudos e desafios.

Por fim, à minha família. Ao meu pai Hélio (*in memoriam*) e à minha mãe Nina por todos os valores transmitidos e por serem minha inspiração. Aos meus irmãos Márcio e Marcela pelos conselhos, incentivo e cuidado.

RESUMO

O processamento de minérios de ferro de baixo teor só é possível através do desenvolvimento de rotas de concentração que resultem em concentrados que estejam dentro das especificações de qualidade exigidas pelo mercado. Esse estudo foi desenvolvido de modo a investigar a possibilidade de obtenção de concentrado de minério de ferro do tipo pellet feed premium (teores de Fe e SiO₂ de 67,3% e 2%, respectivamente) a partir de uma amostra de itabirito semicompacto, por meio de flotação catiônica reversa. A fim de cumprir esse objetivo, uma série de ensaios de flotação em escala de bancada foi realizada com um pré-concentrado de separação magnética de alta intensidade a partir da amostra de itabirito semi-compacto. O d₈₀ determinado para a amostra global foi 90 µm. Sua análise química indicou teores de Fe e SiO₂ de 62,73% e 8,28%, respectivamente, apresentando hematita, quartzo e goethita como principais fases minerais. Os ensaios de flotação preliminares, executados com a amostra apresentando $d_{80}=90 \mu m$, tiveram como objetivo determinar o tipo de coletor utilizado e seu respectivo pH de condicionamento e flotação. A partir desses ensaios, constatou-se como 10,5 o valor de pH ideal capaz de obter concentrados de qualidade superior em termos de teor de Fe e SiO₂. O ensaio executado com o sistema entre éter monoamina e éter diamina (100 g/t) apresentou o maior teor de Fe e menor teor de SiO₂ no concentrado (67,38% e 1,76%, respectivamente), índice de seletividade 4,66. O efeito da variação da granulometria da alimentação foi avaliada, definindo-se a granulometria ótima de acordo com as especificações requisitadas. Dessa maneira, a amostra que apresentou $d_{80}=70 \ \mu m$ forneceu melhores resultados em termos de teores do concentrado e índice de seletividade, considerando-se também o tempo de moagem. Destacou-se o ensaio executado utilizando-se éter monoamina (100 g/t): teores de Fe e SiO₂ de 67,30% e 1,49%, respectivamente; índice se seletividade igual a 6,33. Os ensaios de flotação em escala de bancada revelaram a possibilidade de obtenção de concentrado por meio de flotação catiônica reversa de acordo com as especificações exigidas para a categoria de *pellet* feed premium.

Palavras-chave: Minério de ferro. Flotação catiônica reversa. Coletores. Granulometria.

ABSTRACT

The beneficiation of low-grade iron ore is possible due to concentration routes developed in order to produce concentrates that present the standard quality requested. This study evaluated into the technical feasibility the concentration viability of producing pellet feed premium (Fe and SiO₂ content of 67,3% and 2%, respectively) from a semi-compact itabirite by reverse cationic flotation. To fulfil this aim, bench scale flotation tests were performed using a sample corresponding to a high intensity magnetic separation pre-concentrate from a semi-compact itabirite. The d₈₀ determined for the global sample was 90 µm. Its chemical assay revealed Fe and SiO₂ contents of 62,73% and 8,28%, respectively; presenting hematite, quartz and goethite as the main mineral phases. The aim of the preliminary flotation tests, performed with the sample presenting $d_{80}=90 \mu m$, was to determine the collector type and its conditioning and flotation pH value. The tests performed at pH 10.5 produced concentrates presenting higher Fe contents and lower SiO₂ contents. The mixture of mono ether amine and di ether amine (100 g/t) obtained the best result: 67,38% and 1,76% of Fe and SiO₂ contents, respectively; selectivity index of 4,66. The particle size distribution effect during flotation was evaluated. defining the optimum particle size distribution according to the requested specifications. Therefore, the sample presenting $d_{80}=70 \ \mu m$ resulted in better values in terms of Fe and SiO₂ contents and selectivity index, considering the grinding time as well. The results obtained using mono ether amine (100 g/t) can be highlighted: Fe and SiO₂ content of 67,30% and 1,49%, respectively; selectivity index of 6,33. The bench scale flotation tests have shown the technical feasibility of producing the concentrate by reverse cationic flotation considering the standards requested by the pellet feed premium quality.

Keywords: Iron ore. Reverse cationic flotation. Collectors. Particle size distribution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de geração de carga na superfície do quartzo	19
Figura 2 - Estrutura molecular das unidades de amilose e amilopectina	21
Figura 3 - Célula de flotação em bancada utilizada para execução dos ensaios	27
Figura 4 - Distribuição granulométrica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-	
compacto	32
Figura 5 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -150 µm + 106 µm	34
Figura 6 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -106 µm + 75 µm	34
Figura 7 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -75 µm + 53 µm	35
Figura 8 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -53 µm + 38 µm	35
Figura 9 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica $-38 \ \mu m + 25 \ \mu m \dots$	35
Figura 10 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -25 µm	36
Figura 11: Proporção das fases minerais identificadas para a amostra de pré-concentrado d	le
itabirito semi-compacto	37
Figura 12 - Grau de liberação da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto	38
Figura 13 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO ₂ para os ensaios	
preliminares realizados com a amostra apresentando d_{80} =90 µm, utilizando-se éter mono	
amina (Flotigam EDA)	39
Figura 14 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO ₂ para os ensaios	
preliminares realizados com a amostra apresentando d ₈₀ =90 µm, utilizando-se éter diamin	a (F
2835)	39
Figura 15 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO ₂ para os ensaios	
preliminares realizados com a amostra apresentando d ₈₀ =90 µm, utilizando-se o sistema d	e
coletores (Flotigam EDA e F 2835 - 3:1)	40
Figura 16 - Curva de cinética de moagem obtida para a amostra de itabirito semi-compacte	o.42
Figura 17 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO ₂ para os ensaios realizados en se e	dos
com a amostra apresentando d_{80} =70 μm	43
Figura 18 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO2 para os ensaios realizados en se ensaios en se ensaios en se ensaios en se	dos
com a amostra apresentando d ₈₀ =40 µm	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reserva e produção mundial de minério de ferro no ano de 2016	15
Tabela 2: Parâmetros de flotação para os ensaios preliminares	
Tabela 3: Parâmetros adotados para o estudo de cinética de moagem	
Tabela 4: Valores de massa específica determinados por faixa granulométrica da amos	stra de
pré-concentrado de itabirito semi-compacto	
Tabela 5: Análise granuloquímica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-con	mpacto
Tabela 6: Proporção das fases minerais identificadas para a amostra de pré-concentrac itabirito semi-compacto	lo de 37
Tabela 7: Resultados obtidos para os ensaios realizados com éter monoamina e combi entre monoamina e diamina, em pH 10,5	nação 41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Minério de Ferro	14
3.2 Flotação: aspectos gerais	15
3.3 Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro	17
3.4 A interface Sólido-Líquido	
3.5 Reagentes na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Fer	ro19
3.5.1 Amina	
3.5.2 Amido	21
3.6 Influência da granulometria	
4. MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 Caracterização tecnológica da amostra de minério de fer	
4.1.1 Análise granulométrica	
4.1.2 Determinação da massa específica	
4.1.3 Análise química	
4.1.4 Análise mineralógica	
4.1.5 Grau de liberação	
4.2 Reagentes	
4.3 Ensaios de flotação em escala de bancada	
4.3.1 Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH	de flotação28
4.3.2 Efeito da variação na granulometria da alimentação	
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
5.1 Caracterização tecnológica da amostra de minério de fer	
5.1.1 Análise granulométrica	
5.1.2 Determinação da massa específica	
4.1.3 Análise química	
4.1.4 Análise mineralógica	
4.1.5 Grau de liberação	
4.2 Ensaios de flotação em escala de bancada	

	4.2.1 Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH de flotação	38
	4.2.2 Efeito da variação na granulometria da alimentação	41
6.	CONCLUSÕES	46
RE	EFERÊNCIAS	47
AP	ÊNDICES	50
1	APÊNDICE A – Análise química da amostra global de itabirito semi-compacto	51
1	APÊNDICE B – Balanços de massa e metalúrgico dos ensaios de flotação em bancada.	52

1. INTRODUÇÃO

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Os principais minerais-minério que possibilitam a obtenção desse elemento, em escala industrial, são os óxidos e hidróxidos de ferro: magnetita [Fe₃O₄], hematita [Fe₂O₃], goethita [FeO-OH] e siderita [FeCO₃] (CRISTIE e BRATHWAITE, 1997). Esses minerais se encontram comumente associados a minerais de ganga, de natureza silicosa, carbonática e sulfetada. A gênese das reservas de minério de ferro se dá através de diferentes processos. No entanto, a maioria dessas reservas são formadas por metamorfismo, também conhecidas como Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) (ALKMIM e MARSHAK,1998).

O processamento mineral corresponde a operações de fragmentação, classificação, concentração e separação sólido/líquido; todas elas associadas a operações auxiliares. Na maioria dos casos, portanto, essas operações se apresentam interligadas sequencialmente (ARAUJO, 2007).

A flotação é um método de concentração aplicado a minérios de ferro cuja granulometria seja inferior a 149 µm (ARAUJO *et al.*, 2005). A rota de flotação catiônica reversa é o processo mais adequado no caso de concentração de minério de ferro, visando à obtenção de produtos com baixo teor de contaminantes. Nesse caso, flota-se a ganga (silicatos, na maioria das vezes). A diferenciação entre os minerais que compõem o minério é alcançada pela capacidade de se aderirem às bolhas de ar que são introduzidas ao sistema durante a flotação. Neste caso, a densidade do complexo partícula-bolha diminui, movendo-se verticalmente em direção à superfície. Esse composto constitui a espuma, enquanto as partículas que não se aderiram à bolha permanecem afundadas (PERES e ARAUJO, 2006).

Os principais reagentes usados na flotação, de um modo geral, são os depressores e coletores. Na flotação catiônica reversa de minério de ferro, o amido de milho é o principal depressor utilizado. No caso dos coletores, éter amina é o principal reagente utilizado para a flotação de silicatos. A amina também pode atuar como espumante; no entanto, devido ao custo, espumantes vêm sendo desenvolvidos a fim de substituir a amina parcialmente em escala industrial (ARAUJO *et al.*, 2005).

2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo geral investigar, considerando as condições técnicas, a possibilidade de obtenção de um concentrado de minério de ferro através de um préconcentrado magnético proveniente de uma amostra de itabirito semi-compacto, que atenda à qualidade de *pellet feed premium*, aplicando-se flotação catiônica reversa.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- i) Caracterização tecnológica da amostra;
- ii) Avaliação da influência do pH durante o condicionamento do coletor e flotação;
- iii) Avaliação comparativa de duas aminas e um sistema de aminas, sob duas dosagens;
- iv) Avaliação da influência da granulometria na qualidade do concentrado final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

O ferro possui como características a maleabilidade, ductilidade e condutividade elétrica. Portanto, apresenta uma gama de aplicações, sendo empregado em quase sua totalidade como principal matéria prima para a produção de aço (MATOS, 2017). As reservas de minério de ferro ocorrem sob um gama de ambientes geológicos, formadas há mais de 3 milhões de anos. No entanto, a maior parte da produção mundial está focada na lavra de Formações Ferríferas Bandadas (do inglês, Banded Iron Formations - BIFs), datadas do período Pré-Cambriano (CRISTIE e BRATHWAITE, 1997). A geologia dos BIFs, também denominados itabiritos, consiste em rochas metassedimentares, de origem química ou bioquímica, formadas por camadas de óxidos de ferro alternadas com bandas de silicatos e/ou carbonatos (ALKMIM e MARSHAK,1998).

A hematita é o principal mineral-minério de ferro e é encontrada em rochas com diferentes origens e idades. A ocorrência do mineral se dá em depósitos vulcânicos, ígneos, sedimentares e metamórficos. Sua composição apresenta 69,9% Fe e 30,1% O. A magnetita apresenta, por sua vez, proporção de ferro e oxigênio 72,4% e 27,6%, respectivamente. É encontrada como mineral acessório em rochas ígneas e, pela segregação magmática, torna-se um dos principais constituintes da rocha, formando grandes reservas de minério. Também pode se associar a rochas metamórficas e sedimentares bandadas, formando grandes lentes (KLEIN e DUTROV, 2012).

A goethita é um hidróxido de ferro, cuja composição é 62,9% Fe, 27,0% 0 e 27% H₂O. É um produto do intemperismo de minerais de ferro, sob condições oxidantes, podendo também ser produto residual do intemperismo da serpentinita. Por fim, a siderita é um carbonato, apresentando 62,1% FeO, 37,9% CO₂, 48,2% Fe. Íons de magnésio e manganês podem substituir o ferro, formando espécies de rodocrosita e magnesita. Como minério, apresenta aspecto argiloso; portanto, não é utilizada em larga escala como fonte de ferro (KLEIN e DUTROV, 2012).

As maiores reservas de minério de ferro estão distribuídas na Austrália, Rússia, Brasil e China, correspondendo a aproximadamente 70% das reservas mundiais. A produção de minério de

ferro no ano de 2016 foi de 2,2 bilhões de toneladas (USGS, 2017). A Tabela 1 apresenta a produção mundial de minério de ferro no ano de 2016, bem como a distribuição de suas reservas.

Dairag	Proc	lução	Reservas			
raises	$(10^6 t)$	(%)	$(10^6 t)$	(%)		
Austrália	825	36,5	52000	30,1		
Brasil	391	17,3	23000	13,3		
China	353	15,6	21000	12,2		
Índia	160	7,1	8100	4,7		
Rússia	100	4,4	25000	14,5		
Ucrânia	58	2,6	6500	3,8		
Outros países 371		16,4 36900		21,4		
TOTAL 2258		100	172500	100		

Tabela 1: Reserva e produção mundial de minério de ferro no ano de 2016

Fonte: Adaptado de USGS, 2017

O Brasil detém 13,3% das reservas de minério de ferro atuais, contribuindo com 17,3% da produção mundial (USGS, 2017). Os estados brasileiros detentores das principais reservas de minério de ferro são Minas Gerais (72,5%), Mato Grosso do Sul (13,1%) e Pará (10,7%) (DNPM, 2014).

As cargas metálicas que alimentam os fornos para a produção de aço compreendem os minérios de ferro granulados, processados (sínter e pelotas) ou reciclados (sucatas). Os minérios de ferro do tipo granulado apresentam composição química e características físicas que conferem a eles alta qualidade. No entanto, a produção de granulado vem apresentando decréscimo devido à qualidade dos minérios lavrados nos últimos anos. Por isso, fez-se necessário o desenvolvimento de rotas de classificação e concentração a fim de aproveitar-se minérios de ferro mais pobres (MATOS, 2017).

3.2 Flotação: aspectos gerais

A concentração de minerais é fundamentada sobre três aspectos: liberalidade, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. A liberalidade ocorre através da combinação das etapas de cominuição (britagem e moagem) e classificação por tamanho. A diferenciabilidade,

está relacionada ao método de concentração adotado; enquanto a separabilidade dinâmica refere-se aos equipamentos empregados no método (PERES *et al.*, 2007).

O processo de flotação se define como uma operação de processamento mineral conduzida em meio aquoso (polpa) fazendo-se passar um fluxo de ar, tendo a hidrofobicidade como propriedade diferenciadora. Desse modo, partículas hidrofóbicas se aderem às bolhas de ar, carreando-se o agregado partícula-bolha da polpa até a espuma. Por outro lado, as partículas hidrofílicas se mantêm afundadas. O pequeno número de minerais naturalmente hidrofóbicos requer que reagentes químicos sejam adicionados para a transformação do caráter superficial das partículas minerais, induzindo-se o caráter hidrofóbico ou reforçando o caráter hidrofílico. Esses reagentes são do tipo coletores, modificadores e espumantes (PERES e ARAUJO, 2006).

Coletores são substâncias químicas heteropolar cuja estrutura molecular é dividida em dois grupos: apolar e polar. A porção apolar é constituída por um radical hidrocarboneto, não reagindo com água. Por outro lado, a porção polar do coletor reage com água. Dessa maneira, sendo o processo de flotação conduzido em meio aquoso, a porção apolar do coletor é orientada em direção à fase aquosa; enquanto o grupo polar orienta-se em direção à superfície do mineral, tornando-o hidrofóbico (RAO, 2004; BALTAR, 2010).

Considerando que a função dos coletores seja conferir hidrofobicidade a minerais hidrofílicos, os mesmos são classificados, de forma geral, levando-se em conta a habilidade de dissociaremse em solução aquosa. Ou seja, os coletores são classificados em aniônicos ou catiônicos. Um coletor aniônico é aquele cujo ânion é o responsável pela hidrofobicidade da superfície do mineral (grupo polar do coletor). Por consequência, o coletor catiônico é aquele que, quando dissociado em água, o respectivo cátion confere hidrofobicidade à superfície do mineral (BULATOVIC, 2007).

O uso de agentes modificadores possibilita a adsorção seletiva dos coletores na superficie dos minerais. BULATOVIC (2007) afirma que dentre os modificadores estão os reguladores de pH, que alteram a carga iônica da polpa a fim de controlar a adsorção do coletor; depressores, capazes de criar ou até mesmo reforçar o caráter hidrofílico de um mineral; e controladores do estado de agregação da polpa, como dispersantes, coagulantes e floculantes. Por fim, espumantes são reagentes capazes de adsorver à interface do sistema água-bolha, diminuindo a

tensão superficial da água, e cuja função é criar condições de formação e estabilidade da espuma (RAO, 2004).

Segundo PERES *et al.* (2007), a faixa granulométrica típica da alimentação dos circuitos de flotação está entre 1 mm (carvões) e 5 μ m (oxi-minerais). No entanto, o tamanho máximo é definido pelo estudo de liberação dos minerais, enquanto o limite inferior de tamanho está ligado à presença de lamas: partículas ultrafinas (entre 10 μ m e 1 μ m) e coloides (abaixo de 1 μ m).

A presença de lamas, além de aumentar o consumo de reagentes, também causa o fenômeno conhecido como *slime coating*, o qual se refere ao recobrimento das partículas do mineral pela lama, impedindo a adsorção dos reagentes na superfície dos mesmos, reduzindo a seletividade do processo (YU *et al.*, 2017). Portanto, a aplicação da etapa de deslamagem, bem como sua granulométrica de corte, é considerada confrontando-se a conveniência do consumo de reagentes na presença de partículas ultrafinas e a perda de mineral útil durante a deslamagem.

3.3 Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro

Segundo ARAUJO *et al.* (2006), considerando o quartzo como principal mineral de ganga presente em minérios de ferro, existem três rotas possíveis de concentração por flotação:

i) flotação aniônica direta de óxidos de ferro;

ii) flotação aniônica reversa de quartzo ativado;

iii) flotação catiônica reversa de quartzo.

A rota de flotação catiônica reversa é a mais empregada nos circuitos industriais de beneficiamento de minério de ferro. De acordo com MARTINS *et al.* (2012), os minérios de ferro itabiríticos são compostos predominantemente por hematita e quartzo, sendo ambos minerais hidrofílicos. Neste caso, flota-se o quartzo utilizando-se éter aminas como coletores. A rota por flotação aniônica direta se apresenta como um processo eficiente para concentração de minérios de baixo teor, utilizando-se ácidos graxos como coletores. No entanto, a depressão da ganga ainda se mostra como um desafio nessa rota (ARAUJO *et al.*, 2005).

MA *et al.* (2011) mostrou que a rota por flotação aniônica reversa apresentou melhores resultados quando aplicada a um minério que apresentava granulometria ultrafina, inferior a

10 μm, quando comparados aos resultados obtidos pelos ensaios realizados aplicando-se a rota por flotação catiônica reversa. Por outro lado, a rota catiônica apresentou melhores resultados quando aplicada a frações mais grossas, superiores a 210 μm.

Embora a rota por flotação aniônica reversa também se mostre eficiente, a mesma foi utilizada no passado, antes do desenvolvimento das aminas como coletores para a flotação catiônica reversa (ARAUJO *et al.*, 2005). As maiores vantagens da rota catiônica sobre a rota aniônica se devem à maior taxa de flotação, bem como seu melhor desempenho quando aplicada à circuitos que apresentem alta concentração de íons dissolvidos (FILIPPOV *et al.*, 2014).

3.4 A interface Sólido-Líquido

RAO (2004) define fase como uma região do espaço com composição química uniforme, assim como suas propriedades físicas e mecânicas. A fina camada que separa a transição entre duas fases é denominada interface. As interfaces são classificadas de acordo com os três estados da matéria: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Dessa maneira, pode-se dizer que uma espécie química está adsorvida à uma superfície quando a concentração da mesma na interface é superior à sua concentração na solução (BALTAR, 2010).

A adsorção pode ser do tipo não específica e específica, de acordo com forças eletrostáticas e mecanismos independentes da atração eletrostática, respectivamente. A adsorção não específica está diretamente ligada ao excesso de carga na superfície do mineral. Nesse caso, o adsorvato e adsorvente formam sistemas distintos; por isso, é pouco seletiva e é possível que o reagente seja reciclado (BALTAR, 2010).

A adsorção especifica ocorre segundo a afinidade entre um íon específico da fase líquida com um íon da superfície mineral. Nesse caso, existe o contato entre o íon desidratado com a superfície da partícula mineral. Dessa maneira, trata-se de uma adsorção seletiva, visto que existe correspondência entre o mineral e o íon da fase líquida (BALTAR, 2010).

A dupla camada elétrica (DCE) em torno de uma partícula mineral se forma através do excesso de carga superficial em torno da mesma, atraindo espécies iônicas com carga contrária, chamadas contra-íons. Ou seja, a dce é constituída pela superfície carregada e pela camada externa de contra-íons (BALTAR, 2010).

Óxidos e silicatos são considerados óxidos múltiplos, de baixa solubilidade. O mecanismo de geração de carga na superfície dessas partículas minerais se dá pela ruptura das ligações covalentes e iônicas durante a moagem, seguida pela adsorção dos íons presentes no meio aquoso. A Figura 1 exemplifica o esquema de geração de carga superficial do quartzo, que leva à ruptura das ligações Si-O: o cátion H⁺ se adsorve ao oxigênio, enquanto o ânion OH⁻ se adsorve o silício. O pH do sistema governa o sentido das reações (PERES e ARAUJO, 2006).



Figura 1 - Esquema de geração de carga na superfície do quartzo

Fonte: PERES e ARAUJO (2006)

3.5 Reagentes na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro

3.5.1 Amina

As aminas atuam sobre os minerais de ganga, essencialmente silicatos no caso da flotação catiônica reversa de minério de ferro (CASSOLA e BARTALINI, 2010). Tratam-se de coletores catiônicos derivados da amônia (NH₃), através da substituição por um número de grupos orgânicos (BALTAR, 2010). Segundo PERES *et al.* (2007), as aminas são compostos ionizáveis por protonação que são propensas à dissociação de acordo com o pH da solução, alterando a atividade superficial segundo a predominância de determinado radical (iônico ou molecular). A dissociação da amina é representada pelo seguinte equação de equilíbrio químico (RAO, 2004):

$$RNH_{2(aa)} + H_2O \leftrightarrow RNH_3^+ + OH^-$$

A concentração das espécies $RNH_2 e RNH_3^+$ varia conforme o pH: em pH ácido predomina a espécie RNH_3^+ , cuja concentração reduz a partir do aumento do pH. A espécie molecular predomina na faixa de pH extremamente alcalina. O equilíbrio entre as espécies é atingido em pH próximo à 10 (RAO, 2004). Segundo PERES e ARAUJO (2006), o intervalo de pH de flotação considerado para a rota de flotação catiônica reversa para minérios de ferro do tipo BIF está entre 9,5 e 10,5.

As aminas graxas, inicialmente utilizadas nas primeiras rotas de flotação catiônica de minério de ferro, foram substituídas pelas éteraminas [R-O(CH₂)₃.NH₂], às quais correspondem às aminas graxas primárias após a inserção do grupo polar (O-CH₂)₃ entre o radical R e a cabeça polar NH₂. Uma característica típica do grupo éter se dá pela presença da ligação covalente C-O, aumentando sua solubilidade. A adição desse grupo também favorece o contato do reagente com a interface sólido-líquido e líquido-gás, além de aumentar a elasticidade do filme líquido em torno das bolhas (ARAUJO *et al.*, 2005).

As aminas apresentam solubilidade limitada. Dessa forma, as mesmas são comumente fornecidas parcialmente neutralizadas, com grau de neutralização de 25% a 30%, pela adição de ácido acético ou ácido clorídrico. A adição desses ácidos para a neutralização da amina não altera o comportamento do reagente, mas aumenta a eficiência do mesmo (ARAUJO *et al.,* 2005; BALTAR, 2010).

De acordo com ARAUJO *et al.* (2005), o uso de éter monoamina em conjunto com éter diamina [(R-O-(CH₂)₃.(NH(CH₂)₃.NH₂)] é uma prática comum nos circuitos industriais de flotação, de modo a obter concentrados com baixos teores de sílica. FILIPPOV *et al.* (2014) afirma que a mistura de coletores também se mostra eficiente quando aplicada em circuitos alimentados por uma ampla distribuição granulométrica.

VIEIRA e PERES (2007) realizaram um estudo com amostras de quartzo puro, considerando éter monoamina e diamina como coletores. As amostras foram agrupadas segundo três granulometrias diferentes: fina (-74 μ m +38 μ m); média (-150 μ m +74 μ m) e grossa (-297 μ m +150 μ m). Três valores de pH foram considerados: 9, 10 e 10,5. O uso de éter monoamina se mostrou mais eficiente em termos de recuperação mássica quando aplicado à fração fina, em pH 9. Por outro lado, os ensaios realizados com a fração média e grossa apresentaram melhores resultados quando considerada a éter diamina, principalmente em pH 10 e 10,5.

O amido, cuja formula química simplificada é $(C_6H_{10}O_5)_n$, é um polissacarídeo não iônico de alto peso molecular empregado como depressor de minerais não sulfetados. O mecanismo de adsorção deste reagente à superfície do mineral pode ser explicada pela blindagem da ação do coletor, reforçando o caráter hidrofílico do mineral (PERES e ARAUJO, 2006; PERES *et al.,* 2007). Os amidos são formados por duas unidades de composição química semelhante: amilose e amilopectina. A amilose trata-se de um polímero quase linear, apresentando ligações glicosídicas α -1,4, enquanto a amilopectina apresenta estrutura ramificada, as quais se unem por ligações α -1,6 (RAO, 2004). A Figura 2 representa a estrutura molecular da amilose e da amilopectina.

Figura 2 - Estrutura molecular das unidades de amilose e amilopectina



Fonte: RAO, 2004

Segundo PERES *et al.* (2007), o amido é extraído de grãos e tubérculos, como o milho, mandioca e batata. No Brasil, o amido utilizado industrialmente tem como fonte o milho. A presença dos radicais OH⁻ nas unidades básicas das macromoléculas do amido de milho confere ao reagente alta hidrofilicidade. O tamanho de sua estrutura garante que a mesma atue como uma ponte entre as partículas minerais na polpa (SILVA, 2004).

Os amidos apresentam em sua composição, além das unidades amilose e amilopectina, óleo, proteínas, umidade, fibras e matéria mineral. A proporção de óleo em sua composição está diretamente ligada à estabilidade da espuma. Dessa maneira, o teor de óleo máximo recomendável é 1,5% (PERES *et al.*, 2007).

TURRER (2007) afirma que as ligações intragranulares do amido devem ser rompidas de modo a solubiliza-lo, através do processo chamado de gelatinização. A gelatinização pode ser

conduzida pela elevação da temperatura ou pela adição de reagentes químicos. A gelatinização pela rota térmica é realizada pelo aumento da temperatura da suspensão até cerca de 56°C. Por outro lado, a gelatinização química, principal rota utilizada industrialmente, ocorre com o emprego de hidróxido de sódio (ARAUJO *et al.*, 2005). A proporção mássica empregada entre amido e NaOH é normalmente 4:1 ou 5:1 (PERES *et al.*, 2007).

3.6 Influência da granulometria

De acordo com ARAUJO (2007), a distribuição granulométrica das partículas é uma das principais variáveis consideradas nos processos de tratamento de minérios, influenciando o desempenho dos mesmos e, em alguns casos, trata-se de uma especificação que se busca em produtos intermediários ou finais. A denominação entre os termos finos e grossos para as diferentes granulometrias é empregada, na prática, conforme cada tipo específico de processo (MATOS, 2017).

TRAHAR (1981) afirma que frações mais grossas demandam maiores dosagens de reagentes, embora dosagens elevadas possam causar efeitos deletérios ao desempenho do processo. Por outro lado, partículas finas apresentam maior área superficial quando comparadas às partículas grossas. Por isso, quando a distribuição granulométrica compreende partículas finas e grossas, a maior parte do coletor será consumida pelas partículas finas.

Cada tamanho de partícula requer um certo aumento no grau de hidrofobicidade; ou seja, aumento do grau de cobertura da superfície da partícula pelo coletor. No caso das partículas grossas, a taxa de flotação é influenciada também pela probabilidade de adesão e estabilidade do agregado partícula-bolha. O grande desafio da flotação das frações grosseiras se dá pela dificuldade em se manter o agregado partícula-bolha estável ao longo da espuma (CRUZ, 2010). A angularidade, o tamanho, o peso e a insuficiência da cobertura da superfície são responsáveis pela ruptura do filme líquido que envolve o agregado partícula-bolha (RAO, 2004).

LIMA e VALADÃO (2008) avaliaram a flotação em bancada de uma amostra de minério de ferro itabirítico fracionada em três diferentes granulometrias: -150 μm (global); -150+45 μm e -45 μm. Através desse estudo, verificou-se que as diferentes frações fornecem diferentes respostas Obteve-se aumento na recuperação mássica e seletividade nos ensaios cujas frações

foram flotadas separadamente (-150+45 μ m e -45 μ m), de acordo com o limite de especificação do concentrado.

De acordo com LIMA e VALADÃO (2008), a faixa granulométrica que alimenta os processos de flotação de minério de ferro está normalmente compreendida entre 10 e 150 μ m. As partículas ultrafinas, de tamanho inferior a 10 μ m, usualmente são removidas através da deslamagem por hidrociclones. No entanto, a necessidade de adição do processo de deslamagem, juntamente com sua granulometria de corte, deve ser considerada em conjunto com o custo de operação e a perda de mineral útil presente na fração a ser deslamada (PERES *et al.*, 2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contem a descrição das metodologias adotadas durante os ensaios de flotação em escala bancada, bem como os procedimentos considerados para a caracterização e preparação da amostra.

4.1 Caracterização tecnológica da amostra de minério de ferro

O minério utilizado neste estudo corresponde a um pré-concentrado proveniente de separação magnética de alta intensidade, gerado em escala piloto, de uma amostra de itabirito semicompacto. Cerca de 130 kg foram submetidos a secagem, homogeneização e quarteados em alíquotas, de cerca de 8 kg cada, por um divisor rotativo da planta piloto da ArcelorMittal Maizières Research and Development – Mining and Mineral Processing (França).

4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra foi realizada por peneiramento a úmido. Adotou-se a série Tyler de peneiras: 150μm (100#), 106 μm (150#), 75 μm (200#), 53 μm (270#), 38 μm (400#) e 25 μm (500#). A distribuição granulométrica da fração passante na malha de 25 μm foi determinada por difração a *laser* pelo equipamento Malvern Mastersize 2000 do laboratório da ArcelorMittal Maizières Research and Development – Mining and Mineral Processing.

4.1.2 Determinação da massa específica

A massa específica de cada faixa granulométrica obtida através do peneiramento a úmido, bem como da amostra global, foram determinadas através de picnometria a gás hélio pelo laboratório de caracterização da ArcelorMittal Maizières Research and Development – Mining and Mineral Processing. Utilizou-se o equipamento AccuPyc II 1340, fabricado pela Micromeritics.

O porta amostra recebeu cerca de 15 g para a determinação de cada densidade, cuja massa foi inserida como parâmetro de entrada. Dessa maneira, o volume da amostra foi automaticamente calculado. O equipamento realizou três medidas de densidade, fornecendo três valores, sendo a densidade do material correspondente à média desses três valores.

4.1.3 Análise química

A amostra global, juntamente com suas respectivas faixas granulométricas separadas via peneiramento a úmido, foram submetidas à análise química, realizadas pelo laboratório ALS Minerals (Irlanda). Os teores de Fe, SiO₂, Al₂O₃, S, P, CaO, K₂O, MgO, Mn, Na₂O e TiO₂ foram determinados por fluorescência de raios X. Os produtos de cada ensaio de flotação também tiveram sua composição química determinada pelo mesmo método.

A perda por calcinação da amostra, PPC, também foi determinada pelo laboratório ALS Minerals, conforme procedimentos internos, utilizando-se um Analisador Termogravimétrico (TGA).

4.1.4 Análise mineralógica

Uma amostra de cada faixa granulométrica foi submetida à difratometria de raios X (DRX) a fim de identificar sua composição mineralógica. Utilizou-se o equipamento D2 Phaser, fornecido pela Bruker, através do software Difrrac.eva. A manipulação dos resultados através desse software é baseada na coleção de padrões de raios X fornecida pelo Internacional Centre of Diffraction Data (ICDD, 2017).

4.1.5 Grau de liberação

Um estudo de liberação para cada faixa granulométrica da amostra foi realizado utilizando-se o Método de Gaudin através de microscópio óptico de luz refletida, identificando-se as partículas como sendo livres em relação à determinada fase, ou como partículas mistas (GAUDIN, 1939).

4.2 Reagentes

Os reagentes utilizados nos ensaios de flotação foram os seguintes:

- Depressor: amido de milho do tipo Maizena;
- Coletor: éter monoamina (Flotigam EDA) e éter diamina (F 2835), fornecidos pela Clariant;
- Regulador de pH: solução de NaOH

Os reagentes foram preparados de acordo com os seguintes procedimentos:

a) Amido de milho gelatinizado, 4 g/L

 i) 2 g de amido de milho e 0,5 g de NaOH foram separadamente pesados em uma balança, em dois béqueres de volume 50 mL;

 ii) Cerca de 20 mL de água destilada foram adicionadas em cada béquer, homogeneizando-se as soluções com um bastão de vidro;

iii) A solução de NaOH foi transferida para o béquer contendo o amido de milho. A nova solução foi então homogeneizada, agitando-a com um bastão de vidro, até sua completa gelatinização;

 iv) O amido gelatinizado foi transferido para um béquer de volume 500 mL adicionando-se água destilada. Completou-se o volume em 400 mL, agitando-se a solução por 30 minutos em um agitador magnético;

v) A solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, completando-se seu volume com água destilada.

b) Amina, 1 g/L

i) 0,5 g de amina foram pesados em um béquer de volume 500 mL

ii) Completou-se o volume até cerca de 400 mL com água destilada, agitando-se a solução por 5 minutos em um agitador magnético;

iv) A solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, completando-se seu volume com água destilada.

c) Solução para controle de pH, 3% p/p

i) 3 g de NaOH foram pesados em um béquer de volume 250 mL;

ii) Água destilada foi adicionada ao béquer até atingir a massa de 100 g;

iii) A solução foi agitada com um bastão de vidro até sua completa homogeneização.

4.3 Ensaios de flotação em escala de bancada

Os ensaios de flotação em escala bancada foram executados utilizando-se uma célula do tipo Denver D-12, fabricada pela Metso, em uma cuba de capacidade de 2 litros. Todos os ensaios foram realizados considerando-se 60% e 30% de sólidos durante o condicionamento do depressor e coletor/flotação, respectivamente, utilizando-se água destilada. A Figura 3 mostra a célula utilizada durante os ensaios.





A Tabela 2 mostra os parâmetros adotados para a execução dos ensaios preliminares.

Volume da cuba	2 L					
	Amido de milho					
Depressor	500 g/t					
	60% de sólidos					
	Agitação: 1100 rpm					
	Éter monoamina (Flotigam EDA); éter diamina (F 2835); monoamina e diamina (3:1)					
	50 g/t e 100 g/t					
Coletor	30% de sólidos					
	Condicionamento a pH 10 ou 10,5					
	Agitação: 900 rpm					
pH de flotação	10 ou 10,5					

Tabela 2: Parâmetros de flotação para os ensaios preliminares

4.3.1 Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH de flotação

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados segundo uma campanha inicial de modo a avaliar o comportamento de três coletores (éter monoamina; éter diamina e sistema entre mono e diamina, segundo a proporção 3:1), condicionados em pH 10 e 10,5. O pH de condicionamento da amina foi também mantido como pH de flotação. Considerou-se durante essa fase duas dosagens diferentes de amina: 50 e 100 g/t. A dosagem de depressor foi fixada em 500 g/t.

Os seguintes procedimentos foram adotados durante os ensaios preliminares de flotação em bancada:

i) Adicionou-se 786,55 g da amostra, ajustando-se a porcentagem de sólidos da polpa a 60% com a adição de 426,10 mL de água destilada.

 ii) Ajustou-se a agitação mecânica para 900 rpm, com condicionamento de 2 minutos. Durante esse estágio, coletou-se uma amostra da alimentação para análise química com o auxílio de uma seringa.

 iii) Regulou-se a agitação mecânica para 1100 rpm, adicionando-se posteriormente a dosagem de amido estabelecida, condicionando-se por 5 minutos.

iv) Reduziu-se a agitação mecânica para 900 rpm, ajustando-se a porcentagem de sólidos para 30% com a adição de água destilada (de acordo com a dosagem de amina estabelecida para o ensaio), condicionando-se por 2 minutos. Durante esse estágio, o pH da polpa foi ajustado de acordo com o pH de condicionamento da amina e flotação considerado para o ensaio (10 ou 10,5).

 v) Adicionou-se a dosagem de amina estabelecida para o ensaio, condicionando-se por 2 minutos. O pH foi corrigido durante esse estágio de modo a mantê-lo conforme o valor estabelecido para o ensaio.

vi) Abriu-se a válvula de injeção de ar sob uma taxa de 4 L/min, coletando-se a espuma segundo um tempo de flotação de 2 minutos.

Finalizado o procedimento, os produtos – flotado (rejeito) e afundado (concentrado) – foram secados em estufa a 105°C. Após secagem, as massas de cada um dos produtos, bem como da amostra retirada da alimentação, foram registradas e cerca de 15 g dos mesmos foram amostrados e encaminhados para análise química.

Para a análise dos resultados, foram avaliados os teores de Fe e SiO₂ determinados via análise química, bem como valores obtidos para recuperação mássica (RP), recuperação metalúrgica de ferro (RM) e índice de seletividade de Gaudin (IS), de acordo com as seguintes relações:

$$RP = \frac{C}{A} x 100 \tag{2}$$

$$RM = \frac{Cc}{Aa} x100$$
(3)

$$IS = \sqrt{\frac{Rec.Fe \text{ concent.} x \text{ Rec. } SiO_2 \text{ rejeito}}{Rec.Fe \text{ rejeito} x \text{ Rec. } SiO_2 \text{ concent.}}}$$

onde:

A = massa da alimentação C = massa do concentrado a = teor da espécie útil (Fe) na alimentação c = teor da espécie útil (Fe) no concentrado RP = recuperação mássica RM = recuperação metalúrgica da espécie útil (Fe) no concentrado IS = índice de seletividade de Gaudin

4.3.2 Efeito da variação na granulometria da alimentação

A partir dos resultados obtidos através da análise química dos produtos dos ensaios preliminares, definiu-se as condições a serem reproduzidas nos ensaios realizados considerando diferentes granulometrias da alimentação, de acordo com o estudo do grau de liberação obtido na fase de caracterização da amostra. Dessa maneira, um estágio de moagem foi adicionado antes de cada ensaio, juntamente com a secagem do produto da moagem em estufa a 105°C.

O tempo de moagem para cada granulometria considerada foi determinado de acordo com o estudo da cinética de moagem da amostra, utilizando-se moinho de bolas cilíndrico. Realizouse a moagem a úmido da amostra, de acordo com os parâmetros expressos na Tabela 3.

Carga do	Porcentagem	Rotação	Corpos moedores			
moinho	de sólidos	aplicada	Diâmetro	Massa total		
(%)	(%)	(rpm)	(mm)	(g)		
34	70	79	15	4317,1		

Tabela 3: Parâmetros adotados para o estudo de cinética de moagem

Durante o estudo, uma alíquota em torno de 1 g da polpa foi retirada a cada minuto de moagem, durante um ciclo de 20 minutos. A granulometria de cada alíquota foi analisada por difração a *laser*, considerando-se a média dos três valores de d_{80} fornecidos pelo equipamento.

(4)

Definidos os tempos de moagem para cada granulometria da alimentação, realizou-se os ensaios de flotação em escala bancada de acordo com os coletores e pH de flotação que apresentaram melhor resposta a partir dos resultados da análise química dos produtos dos ensaios preliminares. Dessa forma, os mesmos procedimentos descritos no item 4.3.1 foram adotados na execução dos ensaios para a avaliação do efeito da variação na granulometria da alimentação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização tecnológica da amostra de minério de ferro

5.1.1 Análise granulométrica

A Figura 4 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi- compacto, determinada através da combinação entre os resultados obtidos via peneiramento a úmido e difração a *laser*. De acordo com a distribuição, a amostra apresentou d_{80} igual a 90µm, com cerca de 12% da amostra menor que 10 µm.

Figura 4 - Distribuição granulométrica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-



5.1.2 Determinação da massa específica

A média dos valores de massa específica determinada por picnometria a gás, para a amostra global, foi 4,6997 g/cm³. A Tabela 4 apresenta os valores de peso específico obtidos para cada faixa granulométrica da amostra.

Faixa granulométrica (µm)	Massa específica (g/cm ³)
+150	4.6612
+150 -106	4.6675
-106 +75	4.6572
-75 +53	4.6004
-53 +38	4.6032
-38 +25	4.6696
-25	4.8283

Tabela 4: Valores de massa específica determinados por faixa granulométrica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto

4.1.3 Análise química

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise granuloquímica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi- compacto.

Faixa granulométrica	Retido	(Compone	ntes (%)		PPC	Distril (%	ouição %)
(µm)	(70)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Р		Fe	SiO ₂
+150	3,32	61,13	8,60	1,08	0,06	1,93	3,26	3,57
-150+106	9,67	62,41	7,93	1,08	0,05	1,48	9,69	9,57
-106+75	12,50	61,13	8,83	1,04	0,05	1,46	12,27	13,79
-75+53	12,73	60,99	9,98	0,94	0,05	1,41	12,46	15,86
-53+38	16,81	60,56	10,65	0,83	0,05	1,24	16,35	22,36
-38+25	9,47	61,04	9,72	0,90	0,05	1,35	9,29	11,50
-25	35,49	64,34	5,27	0,99	0,05	1,23	36,67	23,36
Total recalculado	100	62,27	8,01	0,97	0,05	1,34	100	100
Amostra global*	100	62,73	8,28	1,01	0,05	1,26	-	-

Tabela 5: Análise granuloquímica da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto

* Composição determinada por análise química

Pela análise granuloquímica da amostra em estudo, é possível identificar que a maior distribuição de Fe (36,37%) e SiO₂ (23,36%) se concentra na fração menor que 25 μ m. O maior teor de Fe também é encontrado nessa fração (64,34%). O teor de SiO₂ para essa fração foi de 5,27%, o valor mais baixo quando comparado às outras frações. No entanto, observa-se maior distribuição de SiO₂ na fração abaixo de 25 μ m devido à porcentagem passante nesta malha (35,49%). Considerando-se os resultados obtidos para Al₂O₃ e P, nota-se certa homogeneidade nos teores desses componentes determinados ao longo das faixas granulométricas da amostra.

Observou-se compatibilidade entre os valores fornecidos pela análise química da amostra global com os resultados obtidos pelos cálculos através da composição por faixa granulométrica (total recalculado). Dessa maneira, a alimentação da flotação apresentou, segundo análise química, teores de Fe e SiO₂ de 62,73% e 8,28%, respectivamente.

A análise química completa obtida para a amostra em estudo encontra-se no Apêndice A.

4.1.4 Análise mineralógica

As Figuras 5 - 10 apresentam os difratogramas de raios X obtidos para cada faixa granulométrica da amostra em estudo.



Figura 5 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -150 µm + 106 µm

Figura 6 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -106 µm + 75 µm





Figura 7 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica $\,$ -75 μm + 53 μm

Figura 8 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -53 µm + 38 µm



Figura 9 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica $-38 \ \mu\text{m} + 25 \ \mu\text{m}$





Figura 10 - Difratograma de raios X para a faixa granulométrica -25 µm

A interpretação dos difratogramas mostrou que a amostra apresenta hematita, quartzo e goethita como principais fases minerais. Traços de gibsita $[Al(OH)_3]$ puderam ser identificados na faixa granulométrica -53 µm + 38 µm (Figura 8), enquanto as frações menores que 38 µm apresentaram traços de caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$.

Durante a análise das diferentes tipologias da amostra por microscopia óptica, considerando-se as três principais fases minerais, identificou-se partículas mistas de quartzo e hematita, que puderam ser agrupadas segundo duas classificações:

- Partículas mistas recuperáveis: partículas minerais mistas compostas por hematita e quartzo, cujo limite entre os dois minerais é bem definido, possibilitando a recuperação da hematita a partir da moagem da amostra.
- Partículas mistas não recuperáveis: inclusões de pequenos grãos de hematita em partículas maiores de quartzo, cuja recuperação apenas seria possível com a moagem da amostra a partir de malhas muito finas.

Levando em consideração as fases minerais identificadas nos difratogramas de raios X e os resultados das análises químicas por faixa granulométrica, foram determinadas as proporções dos minerais presentes nas mesmas por cálculo estequiométrico, conforme apresentado na Figura 11 e Tabela 6.



Figura 11: Proporção das fases minerais identificadas para a amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto

Tabela 6: Proporção das fases minerais identificadas para a amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto

Fases minerais	Faixa granulométrica (µm)							
	-150 +106	-106 +75	-75 +53	-53 +38	-38 +25			
Hematita	62,30	68,80	62,70	70,60	73,60			
Quartzo	4,70	4,10	7,00	7,90	10,60			
Goethita	7,90	8,70	9,50	7,40	4,90			
Outras*	25,10	18,40	20,80	14,10	10,90			

*Partículas mistas recuperáveis e não recuperáveis

4.1.5 Grau de liberação

A Figura 12 apresenta o resultado do estudo de liberação para a amostra estudada, obtido através do método de Gaudin. Nesse estudo não foram consideras as partículas mistas – não recuperáveis.



Figura 12 - Grau de liberação da amostra de pré-concentrado de itabirito semi-compacto

Pela interpretação das curvas presentes na Figura 12, observa-se que na faixa granulométrica compreendida ente -106 μ m + 75 μ m, 91,3% da hematita encontra-se liberada. As frações menores que 53 μ m apresentaram considerável aumento do grau de liberação do quartzo quando comparadas às frações mais grosseiras, onde 86,9% do quartzo encontra-se liberado.

A definição das faixas granulométricas que apresentam maior liberação entre as espécies minerais determinou as malhas de moagem que foram adotadas durante a investigação do comportamento das diferentes granulometrias na flotação.

4.2 Ensaios de flotação em escala de bancada

4.2.1 Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH de flotação

As Figuras 13 a 15 apresentam os resultados obtidos para recuperação mássica, metalúrgica e teor de Fe no concentrado, bem como as curvas obtidas a partir do teor de SiO₂ no concentrado para os ensaios realizados utilizando-se éter monoamina (Flotigam EDA), éter diamina (F 2835) e combinação entre Flotigam EDA e F 2835, respectivamente. Os balanços de massa e metalúrgico para todos os ensaios de flotação em bancada encontram-se no Apêndice B.

Figura 13 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO₂ para os ensaios preliminares realizados com a amostra apresentando d₈₀=90 μm, utilizando-se éter mono amina (Flotigam EDA)



Figura 14 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO₂ para os ensaios preliminares realizados com a amostra apresentando d_{80} =90 µm, utilizando-se éter diamina (F



2835)

Figura 15 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO₂ para os ensaios preliminares realizados com a amostra apresentando d₈₀=90 μm, utilizando-se o sistema de coletores (Flotigam EDA e F 2835 - 3:1)



Conforme a interpretação das figuras 13 a 15, observou-se, para os três coletores testados, aumento do teor de Fe no concentrado conforme o aumento do pH de condicionamento e flotação (de 10 para 10,5), exceto para os ensaios realizados com o sistema de coletores, onde não houve variação expressiva. Seguindo a mesma tendência de qualidade do concentrado, obteve-se diminuição do teor se SiO₂ com o aumento do pH. Observou-se também evolução da qualidade do concentrado com o aumento da dosagem de coletor. Portanto, comprovou-se pelos ensaios preliminares que o pH ideal para o condicionamento do coletor e flotação se encontra na faixa de 10,5.

Estudos conduzidos por MATOS (2017) comprovaram maior eficiência da éter monoamina sobre partículas finas, enquanto a éter diamina se mostrou mais eficiente sobre partículas grossas, conforme afirmado por FILIPPOV *et al.* (2014). Dessa maneira, ainda sobre os resultados obtidos na campanha de ensaios preliminares, comprovou-se essa seletivadade de acordo com o tamanho de partículas. A análise granulométrica da amostra da alimentação revelou ampla distribuição de tamanho de partículas. Portanto, a combinação entre aminas em dosagem de 100 g/t forneceu melhor resultado em termos de teor de Fe no concentrado (67,38%) quando comparadas as condições dos demais ensaios. Vale ressaltar, portanto, que os

parâmetros de qualidade para a categoria de *pellet feed premium* (teor de Fe e SiO₂ de 67,3% e 2%, respectivamente) foram alcançados com a combinação entre aminas (100 g/t, pH 10,5).

Os ensaios utilizando-se éter diamina revelaram os maiores valores de recuperação mássica e metalúrgica durante essa campanha inicial de testes. No entanto, analisando-se os parâmetros de qualidade relativos ao teores obtidos no concentrado, observa-se que o uso de éter diamina resultou nos teores mais baixos de Fe e maiores de SiO₂. Portanto, constatou-se menor seletividade desse reagente em relação à monoamina. Novamente, comprova-se a afirmação de MATOS (2017), onde o emprego da éter diamina justifica-se sobre frações grossas.

Os resultados obtidos nos ensaios utilizando-se éter monoamina (Flotigam EDA) e a combinação entre monoamina e diamina (F 2835) mostraram valores similares, principalmente quando considera-se o teor de SiO₂ obtido no concentrado. A Tabela 7 apresenta os resultados de recuperação metalúrgica, distribuição de SiO₂ no rejeito e índice de seletividade (IS) obtidos nos ensaios realizados com esses coletores, a pH 10,5. A partir desses resultados, embora a qualidade dos concentrados (em termos de teores de Fe e SiO₂) obtidos com o uso da combinação de coletores tenha sido superior, o emprego de éter monoamina se mostrou mais seletivo durante os ensaios preliminares.

Tabela 7: Resultados obtidos para os ensaios realizados com éter monoamina e combinação entre monoamina e diamina, em pH 10,5

Coletor	Dosagem (g/t)	Rec. metalúrgica (%)	Dist. de sílica no rejeito (%)	IS
Elaticom EDA	50	90,15	75,32	5,29
FIOUGAIII EDA	100	81,40	85,83	5,15
Flotigam EDA	50	89,33	73,88	4,87
+ F 2835 (3:1)	100	80,16	84,31	4,66

4.2.2 Efeito da variação na granulometria da alimentação

A granulometria da alimentação dos ensaios efetuados para a avaliação da variação da mesma foi definida a partir dos resultados fornecidos pelo estudo de liberação da amostra de minério de ferro em estudo. Dessa maneira, investigou-se o comportamento da amostra apresentando duas granulometrias distintas, a partir de seu d₈₀: 75 μ m e 44 μ m. A Figura 16 apresenta a curva da cinética de moagem plotada através dos valores experimentais de d₈₀, por minuto,

determinados por difração a *laser*. Portanto, a partir da equação fornecida, determinou-se o tempo de moagem para cada granulometria em estudo: 12,1 minutos e 30,7 minutos para os valores de d_{80} iguais a 75 µm e 44 µm, respectivamente.



Figura 16 - Curva de cinética de moagem obtida para a amostra de itabirito semi-compacto

Os valores de d₈₀ determinados por difração a *laser* para as amostras moídas por 12,1 minutos e 30,7 minutos, respectivamente, foram 70 μ m e 40 μ m.

A partir dos resultados obtidos durante a campanha de ensaios preliminares, foram definidos os parâmetros e condições de flotação a serem reproduzidos nos ensaios seguintes. Dessa maneira, mantiveram-se como coletores a éter monoamina e a combinação entre monomina e diamina, seguindo a mesma proporção (3:1), conservando-se as duas dosagens aplicadas previamente: 50 e 100 g/t. Para o pH de condicionamento dos coletores e flotação, fixou-se o valor 10,5.

A Figura 17 apresenta a recuperação mássica, metalúrgica e teores de Fe, bem como a curva com os teores de SiO₂ no concentrado obtidos a partir dos ensaios executados com a alimentação apresentando d_{80} =70 µm. Verificou-se, comparando-se os histogramas obtidos pelos ensaios executados com a amostra antes do estágio de moagem, aumento dos teores de Fe, seguidos pela diminuição dos teores de SiO₂. Destacam-se principalmente os valores de recuperação metalúrgica obtidos para os ensaios executados com a combinação de coletores, apresentando aumento para ambas dosagens aplicadas.



Figura 17 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO₂ para os ensaios realizados com a amostra apresentando d₈₀=70 μm

Em relação às dosagens de coletor, percebe-se que, para os as duas aminas consideradas, não atingiu-se as especificações de qualidade para *pellet feed premium* (teor de Fe e SiO₂ de 67,3% e 2%, respectivamente) quando aplicada a dosagem de 50 g/t. No entanto, de modo a obter-se a análise completa da resposta das dosagens de coletores de acordo com a granulometria, manteve-se o emprego das dosagens de 50 e 100 g/t para a próxima granulometria a ser analisada.

Para a dosagem de coletor de 100 g/t, as especificações de produto foram atingidas para ambos coletores. Para esse consumo de reagente, destaca-se maior resposta para o caso em que a combinação de aminas foi empregada: teores de 67,47% e 1,39% para Fe e SiO₂, respectivamente. No entanto, uma investigação mais profunda dos resultados revela que o índice de seletividade para o ensaio executado com éter monoamina é superior ao valor obtido para a combinação entre mono e diamina: 6,33 e 5,89, respectivamente.

A Figura 18 contém os valores de recuperação mássica, recuperação metalúrgica, teores de Fe e curva de teor de SiO₂ obtidos para os ensaios executados com a alimentação apresentando d_{80} =40 µm. Destaca-se que a cominuição da amostra em fração mais fina resultou na diminuição do teor de SiO₂ no concentrado nos ensaios, cuja dosagem de coletor foi 50 g/t: em ambos os casos, os valores foram inferiores a 2%, valores não observados nas granulometrias anteriormente estudadas para essa dosagem de reagente. Por outro lado, os teores de Fe obtidos para essa dosagem não atingiram o padrão de qualidade especificado. Com relação aos ensaios executados com dosagem de coletor de 100 g/t, verifica-se que os teores especificados para *pellet feed premium* foram alcançados para as duas aminas, cujos valores foram similares, principalmente em relação aos teores de Fe obtidos. Portanto, é possível afirmar que 100 g/t se mostrou como a dosagem ideal de coletor para a amostra em estudo, em todas as granulometrias consideradas.



Figura 18 - Recuperação mássica, metalúrgica, teores de Fe e SiO₂ para os ensaios realizados com a amostra apresentando d_{80} =40 µm

Com relação às recuperações mássica e metalúrgica obtidas nessa série de ensaios, constata-se que, para o ensaio efetuado com éter monoamina a 100 g/t, houve redução desses valores quando comparados àqueles obtidos com a amostra apresentando $d_{80}=70$ µm. Estudos conduzidos por LIMA e VALADÃO (2008) a partir de uma amostra da fração fina (-45 µm) de um minério de ferro itabirítico comprovaram que o aumento da qualidade do concentrado em termos de teor de SiO₂, a partir do aumento da dosagem de coletor, leva à redução da recuperação metalúrgica. Nesse estudo os concentrados apresentaram teores mínimos de SiO₂ de 0,8%, a partir de uma dosagem de éter monoamina de 200 g/t.

Os índices de seletividade determinados para os ensaios efetuados à concentração de coletor de 100 g/t revelam que granulometrias mais finas resultam no aumento da seletividade do processo. Os valores obtidos para os ensaios com éter monoamina (Flotigam EDA) e pela combinação entre mono e diamina (F 28335) foram semelhantes: 6,07 e 6,11, respectivamente.

O aumento desses valores com relação aos mesmos obtidos com as granulometrias anteriormente estudadas indica que, em granulometrias que não apresentam ampla distribuição do tamanho de partículas, o consumo de reagentes pelas partículas constituintes da amostra se dá de maneira relativamente uniforme.

Complementando-se a interpretação dos resultados, a pequena diferença entre a qualidade dos concentrados obtidos com a amostra a d_{80} =40 µm não justifica o aumento do tempo de moagem, quando comparados os resultados obtidos com a amostra a d_{80} =70 µm, evitando maior consumo energético e desgaste do revestimento do moinho e cargas moedoaras. Dessa maneira, considerando-se essa granulometria, recomenda-se o uso do coletor éter monoamina (Flotigam EDA), a 100 g/t, em pH 10,5 para o condicionamento do coletor e flotação.

6. CONCLUSÕES

Baseando nos ensaios efetuados com o pré-concentrado magnético de itabirito semi-compato, utilizado neste trabalho, conclui-se que o material apresentou d_{80} =90µm. Os teores de Fe e SiO₂ obtidos para a amostra global foram 62,73% e 8,28%, respectivamente. A análise mineralógica por difração de raios X identificou hematita, quartzo e goethita como principais fases minerais. O estudo do grau de liberação revelou que as principais faixas granulométricas que possibilitam a liberação entre hematita e quartzo são -106 µm +75 µm e -53 µm +38 µm.

Os ensaios de flotação em bancada executados na fase preliminar revelaram que o pH de condicionamento da amina e da flotação a 10,5 forneceu os melhores resultados em termos de teores de Fe e SiO₂.

Os coletores que apresentaram melhor desempenho durante a campanha exploratória foram a éter monoamina (Flotigam EDA) e o sistema entre mono e diamina (Flotigam EDA e F 2835, 3:1). Os melhores resultados obtidos foram para o sistema dos dois coletores, a 100 g/t, que obteve concentrado de teores de Fe e SiO₂ de 67,38% e 1,76%, respectivamente; recuperação metalúrgica de 80,16%. Dessa maneira, alcançou-se a especificação requerida para a qualidade de *pellet feed premium* (teores de Fe e SiO₂ de 67,3% e 2%, respectivamente).

A flotação de frações mais finas implica em melhora da qualidade do concentrado. A melhor resposta foi obtida a partir do ensaio executado com a amostra com $d_{80}=70\mu m$, utilizando-se Flotigam EDA a 100 g/t: teores de Fe e SiO₂ de 67,47% e 1,33%, respectivamente; recuperação metalúrgica de 87,54%.

REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the QuadriláteroFerrífero. **Precambrian Research**, v. 90, p. 29-58, 1998

ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A.E.C. (2005). Reagents in iron ores flotation. **MineralsEngineering**, v.18, p. 219-224, 2005.

ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C.; VIANA, P. R. M.; OLIVEIRA, J. F. Flotação de Minérios de Ferro. In: CHAVES, A. P. (Org.). **Teoria e Prática no Tratamento de Minérios, Flotação**: O Estado da Arte no Brasil. São Paulo:Signus; v. 4, p. 317-330, 2006.

ARAUJO, A. C. Introdução. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. (Org.). Introdução ao Tratamento de Minérios. Editora UFMG, Belo Horizonte, p. 13-14, 2007.

BALTAR, C. A. M. Flotação no Tratamento de Minérios. Recife: Editora UFPE; 2. ed.; p. 61-82, p. 61-98, 2010.

BULATOVIC, S. M. Handbook of Flotation Reagents; Chemistry, theory and practice: Flotation of sufide ores. Amsterdam: Elsevier Science e Tecknology Books, v. 1, p. 5-36, p. 5-40, p.67-74, 2007.

CASSOLA, M.; BARTALINI, N. Comportamento de Coletores para o Tratamento de Minério de Ferro através da Flotação Reversa. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, São Paulo, v. 6, n. 4, p. 215-219, 2010.

CRISTIE, T.; BRATHWAITE, B. **Mineral commodity report 15 – iron**. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences. 1997.

CRUZ, M.R. Flotação Fracionada: Aumento do rendimento da flotação através da divisão da alimentação em duas frações granulométricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte. 155 p, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. 2014. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014/view>. Acesso em: 7 de nov. 2017. FILIPPOV, L. O.; SEVEROV, V. V.; FILIPPOVA, I. V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. **International Journal of Mineral Processing**, v. 127, p. 62–69, 2014.

GAUDIN, A.M. **Principles of Mineral Dressing**. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, p. 70-89, 1939.

KLEIN, C.; DUTROV, B. **Manual de ciências dos minerais**. Porto Alegre: Bookman, p. 395-426, 2012.

LIMA, N. P.; VALADÃO. G. E. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. **Revista Escola de Minas**, v. 61, p. 473-477, 2008.

MA, X.; MARQUES, M.; GONTIJO, C. Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of Vale iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v.100, p.179-183, 2011.

MARTINS, M.; LIMA, N. P.; LEAL FILHO, L. S. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. **Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 393-399, 2012

MATOS, V. E. **Seletividade de Reagentes na Flotação Reversa de Minério de Ferro**. (Dissertação de Mestrado ao curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais). 116 p, 2017.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. (Org.). **Teoria e Prática no Tratamento de Minérios, Flotação**: O Estado da Arte no Brasil. São Paulo:Signus; v. 4, p. 10-15, 2006.

PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G.; VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Métodos de Concentração. In: VALADÃO, G.E.S. ARAUJO, A.C. (Org.). Introdução ao Tratamento de Minérios. Editora UFMG, Belo Horizonte, p. 13-14, p. 117-135, 2007.

RAO, S. Surface Chemistry of Froth Flotation, ed. 2, New York, p.52, p. 50-53, p. 143-155, p. 436-452, p. 609-614, p. 689-694, 2004.

SILVA, R. R. R. (2004). Sistemas de reagentes surfatantes na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte. 120 p, 2004.

THE INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA. **Descrição do produto**. Pennsylvania, 2017. Disponível em: http://www.icdd.com/translation/port/overview.htm. Acesso em: 9 de dez. 2017.

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.

TURRER, H. D. G. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte. 203 p, 2007.

TURRER, H. D. G. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte. 203 p, 2007.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries**. 2017. Disponívelem: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>. Acessoem: 7novembro 2017.

VIEIRA, A. M.; PERES, A. E. C. The effect of amine type, pH and size range in the flotation of quartz. **Minerals Engineering**, v. 20, p. 1008-1013, 2007.

YU, Y.; CAO, M. ; LIU, Q. Slime coatings in froth flotation: a review. **Minerals Engineering**, v.114, p.26-36, 2017.

APÊNDICES

Faixagranulométrica		Elementos e compostos (%)									
(µm)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	Р	CaO	K ₂ O	MgO	Mn	Na ₂ O	TiO ₂
+ 150	61,13	8,60	1,08	0,010	0,055	0,16	0,018	0,06	0,126	0,028	0,11
- 150 + 106	62,41	7,93	1,08	0,009	0,052	0,05	0,012	0,05	0,120	0,027	0,11
- 106 + 75	61,13	8,83	1,04	0,008	0,051	0,05	0,011	0,04	0,113	0,021	0,11
- 75 + 53	60,99	9,98	0,94	0,019	0,049	0,12	0,012	0,05	0,099	0,035	0,11
- 53 + 38	60,56	10,65	0,83	0,006	0,045	0,12	0,01	0,05	0,088	0,024	0,10
- 38 + 25	61,04	9,72	0,90	0,006	0,049	0,07	0,009	0,05	0,091	0,013	0,11
- 25	64,34	5,27	0,99	0,004	0,046	0,04	0,011	0,04	0,088	0,019	0,10
Global	62,73	8,28	1,01	0,005	0,050	0,05	0,011	0,05	0,102	0,025	0,11

APÊNDICE A – Análise química da amostra global de itabirito semi-compacto

APÊNDICE B – Balanços de massa e metalúrgico dos ensaios de flotação em bancada

B.1) Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH de flotação

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floauto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	109,24	14,58	40,02	39,40	9,36	68,38	
Concentrado	639,93	85,42	66,16	3,11	90,64	31,62	4,58
Alim. recalc.	749,17	100,00	62,35	8,40	100,00	100,00	

• Flotigam EDA, pH 10, 50 g/t

• Flotigam EDA, pH 10, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Ploduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	187,81	24,43	47,23	28,70	18,69	83,98	
Concentrado	581,01	75,57	66,40	1,77	81,31	16,02	4,77
Alim. recalc.	768,82	100,00	61,72	8,35	100,00	100,00	

• Flotigam EDA, pH 10,5, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	118,23	15,50	39,77	40,10	9,85	75,32	
Concentrado	644,58	84,50	66,77	2,41	90,15	24,68	5,29
Alim. recalc.	762,81	100,00	62,59	8,25	100,00	100,00	

• Flotigam EDA, pH 10,5, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	186,42	24,44	47,30	29,40	18,60	85,83	
Concentrado	576,25	75,56	66,95	1,57	81,40	14,17	5,15
Alim. recalc.	762,67	100,00	62,15	8,37	100,00	100,00	

• F 2835, pH 10, 50 g/t

Produto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		15
FIGUUIO	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	34,11	4,47	35,55	46,70	2,55	25,65	
Concentrado	729,27	95,53	63,52	6,33	97,45	74,35	3,63
Alim. recalc.	763,38	100,00	62,27	8,13	100,00	100,00	

• F 2835, pH 10, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
FIOUUIO	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	99,11	12,80	37,38	44,40	7,69	68,26	
Concentrado	675,37	87,20	65,89	3,03	92,31	31,74	5,08
Alim. recalc.	774,48	100,00	62,24	8,32	100,00	100,00	

• F 2835, pH 10,5, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Ploduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	59,21	7,70	38,13	42,30	4,69	40,08	
Concentrado	709,30	92,30	64,66	5,28	95,31	59,92	3,69
Alim. recalc.	768,51	100,00	62,62	8,13	100,00	100,00	

• F 2835, pH 10,5, 100 g/t

Produto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IS
FIGUID	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	116,73	15,01	39,79	40,90	9,59	75,61	
Concentrado	661,06	84,99	66,27	2,33	90,41	24,39	5,41
Alim. recalc.	777,79	100,00	62,30	8,12	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IS
Floatio	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	128,62	16,57	42,44	36,30	11,31	70,61	
Concentrado	647,68	83,43	66,09	3,00	88,69	29,39	4,34
Alim. recalc.	776,30	100,00	62,17	8,52	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
FIGUID	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	204,36	26,64	49,34	26,90	21,00	84,59	
Concentrado	562,79	73,36	67,39	1,78	79,00	15,41	4,54
Alim. recalc.	767,15	100,00	62,58	8,47	100,00	100,00	

Produto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	122,14	16,14	41,23	38,20	10,67	73,88	
Concentrado	634,39	83,86	66,46	2,60	89,33	26,12	4,87
Alim. recalc.	756,53	100,00	62,39	8,35	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 50 g/t

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Piodulo	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	195,00	25,52	48,66	27,60	19,84	84,31	
Concentrado	568,96	74,48	67,38	1,76	80,16	15,69	4,66
Alim. recalc.	763,96	100,00	62,60	8,36	100,00	100,00	

- B.1) Ensaios preliminares para determinação do coletor e pH de flotação
 - B.1.1) Granulometria da alimentação: d_{80} =70 µm
 - Flotigam EDA, pH 10,5, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		15
FIOUUIO	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	126,47	16,50	34,75	46,80	9,43	77,21	
Concentrado	640,08	83,50	65,93	2,73	90,57	22,79	5,70
Alim. recalc.	766,55	100,00	60,79	10,00	100,00	100,00	

• Flotigam EDA, pH 10,5, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	144,47	18,65	41,79	37,10	12,46	85,09	
Concentrado	630,13	81,35	67,30	1,49	87,54	14,91	6,33
Alim. recalc.	774,60	100,00	62,54	8,13	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floauto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	107,63	13,95	36,70	45,20	8,20	76,42	
Concentrado	664,09	86,05	66,55	2,26	91,80	23,58	6,02
Alim. recalc.	771,72	100,00	62,39	8,25	100,00	100,00	

Droduto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floauto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	168,16	21,75	45,25	32,30	15,71	86,59	
Concentrado	605,07	78,25	67,47	1,39	84,29	13,41	5,89
Alim. recalc.	773,23	100,00	62,64	8,11	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 100 g/t

B.1.2) Granulometria da alimentação: d₈₀=40 µm

• Flotigam EDA, pH 10,5, 50 g/t

Produto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floatio	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	118,49	15,34	37,65	42,80	9,30	81,36	
Concentrado	653,74	84,66	66,58	1,78	90,70	18,64	6,53
Alim. recalc.	772,23	100,00	62,14	8,07	100,00	100,00	

• Flotigam EDA, pH 10,5, 100 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IS
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	153,65	19,84	42,73	35,10	13,54	85,22	
Concentrado	620,90	80,16	67,51	1,51	86,46	14,78	6,07
Alim. recalc.	774,55	100,00	62,59	8,17	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 50 g/t

Draduta	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floduto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	107,87	13,96	35,89	44,90	8,10	79,33	
Concentrado	664,78	86,04	66,10	1,90	91,90	20,67	6,60
Alim. recalc.	772,65	100,00	61,88	7,90	100,00	100,00	

• Flotigam EDA e F 2835 (3:1), pH 10,5, 100 g/t

Droduto	Massa	Rec. Massa	Teores		Distribuição (%)		IC
Floauto	(g)	(%)	Fe	SiO ₂	Fe	SiO ₂	15
Rejeito	153,87	19,89	43,46	34,40	13,79	85,67	
Concentrado	619,60	80,11	67,50	1,43	86,21	14,33	6,11
Alim. recalc.	773,47	100,00	62,71	7,99	100,00	100,00	