



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

**FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
DEPÓSITO JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG**

MARIANA APARECIDA TORRES

ARAXÁ

2015

MARIANA APARECIDA TORRES

**FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO
DEPÓSITO DE JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira.

Co-Orientador: Prof. Ms. Leandro Henrique Santos.

ARAXÁ

2015

MARIANA APARECIDA TORRES

FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO PROVENIENTE DO DEPÓSITO
DE JAMBREIRO DA REGIÃO DE GUANHÃES-MG

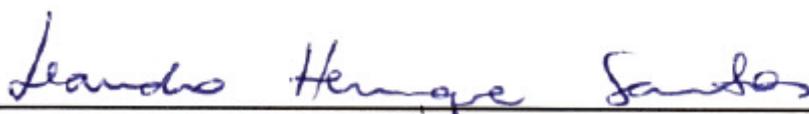
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 10 /08 /2015

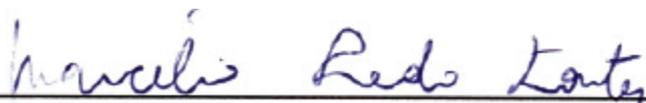
Banca Examinadora:



Prof^a. Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira – Presidente da Banca Examinadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientadora



Prof. Ms. Leandro Henrique dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Marcélio Prado Fontes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Francisco de Castro Valente
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

DEDICATÓRIA

À memória da minha querida avó Maria Cândida Bernardes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido forças para seguir em frente com a pesquisa, encaminhando-a da melhor forma possível.

Aos meus orientadores Michelly dos Santos Oliveira e Leandro Henrique Santos, que além de orientadores se tornaram amigos, dedicando parte do seu tempo para me ajudar a realizar e desenvolver o meu trabalho, além de me auxiliar com muita paciência.

Aos meus pais, Jefferson Lima Torres e Selma Aparecida Torres, por me incentivarem, apoiando minhas decisões, acreditando que sou capaz, e meus irmãos Taiana Torres, Vitor Henrique Lima Torres e Vitória Lima Torres pelo apoio e amor dedicado.

A meu namorado Matheus Alexandre Pereira Vaz pelo companheirismo, dedicação oferecida e pela compreensão nos momentos de estudos.

Aos meus amigos e familiares por terem me dado forças para desenvolver este trabalho, em especial Layane Lórem Pimenta, Luis Alberto Silva e Victor Leonardo de Oliveira Soares pela ajuda e auxílio nos momentos de necessidade.

À empresa de capital australiano Centaurus Metals Brasil - CBM pela amostra, incentivo ao desenvolvimento, apoio e oportunidade.

“Pode-se vencer pela inteligência,
pela sorte ou pela habilidade,
mas nunca sem trabalho”

Destoef

RESUMO

O cenário mundial para o minério de ferro vem apresentando dia após dia reservas de teores cada vez mais reduzidos, além da crescente demanda mundial por este recurso. Diante disto, se apresenta como estratégica a necessidade de busca por técnicas alternativas para o processo produtivo deste bem mineral. O objetivo deste trabalho consiste na avaliação da concentração de minério de ferro pelo método da flotação reversa com amina, sendo realizados os experimentos no laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá. O minério estudado é proveniente do depósito do quadrilátero ferrífero denominado Depósito Jambreiro, distante cerca de 20 km do município de Guanhões – MG. Foram analisadas as variáveis operacionais dosagem de coletor e dosagem de depressor, sendo estes Flotigam EDA e amido de milho gelatinizado, respectivamente. A caracterização química da amostra feita na alimentação do processo indicou a presença de SiO_2 (52,33%), Fe_2O_3 (46,46%), assim como outros elementos em menor porcentagem como SO_3 (0,607%), K_2O (0,309%), CaO (0,223%) e MnO (0,061%). A análise de fluorescência de raio-X indicou que o principal mineral portador de ferro é a hematita, enquanto que o quartzo é o principal mineral de ganga. Com o uso do coletor Flotigam EDA e dosagem de 150 g/t, depressor amido de milho com dosagem de 200 g/t, encontrou-se uma expressiva recuperação do mineral de interesse a partir da amostra de minério de ferro proveniente do depósito de Jambreiro da região de Guanhões- MG, além da melhor porcentagem de Fe de 39,70%.

Palavras-chave: Flotação reversa. Reagentes. Minério de ferro.

ABSTRACT

The global scenario for iron ore has shown day after day levels of reserves dwindling, and the increasing worldwide demand for this feature. Given this, it has a strategic need to search for alternative techniques for the production process of this well-mineral. The objective of this study is to assess the concentration of iron ore by the method of reverse flotation amine, the experiments being conducted in the laboratory treatment of CEFET-MG ores, Araxá unit. The ore is studied from the deposit of iron quadrangle called deposit Jambreiro, far about 20 km from the city of Guanhões - MG. The collector dosage and dosage operating variables were analyzed depressant, these being Flotigam EDA and gelatinized corn starch, respectively. The chemical analysis of the sample made in the process feed indicated the presence of SiO₂ (52.33%), Fe₂O₃ (46.46%) and other elements to a lesser percentage as SO₃ (0.607%), K₂O (0.309%), CaO (0.223%) and MnO (0.061%). The X-ray fluorescence analysis indicated that the mineral iron is hematite main carrier, while quartz is the main mineral gangue. Using the Flotigam EDA and collector dosage of 150 g / t, depressant cornstarch with dosage of 200 g / t, found a significant recovery of the mineral of interest from the sample of iron ore from the deposit Jambreiro MG Guanhões- the region beyond the best percentage of Fe 39.70%.

Keywords:Reverse flotation. Reagents. Iron ore.

ILUSTRAÇÕES

A) FIGURAS

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DO DEPÓSITO DE JAMBREIRO.....	5
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS MINAS DE MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL.....	11
FIGURA 4.1 – MOINHO DE BOLAS	24
FIGURA 4.2 – PILHA DE HOMOGENEIZAÇÃO E QUARTEAMENTO	25
FIGURA 4.3 – MATERIAL FLOTADO E MATERIAL AFUNDADO RESPECTIVAMENTE	30

B) QUADROS

QUADRO 3.1 – FÓRMULA QUÍMICA, CONTEÚDO TEÓRICO DE FERRO (EM %), DENSIDADE RELATIVA E IMAGENS DOS PRINCIPAIS MINERAIS PORTADORES DE FERRO.....	9
QUADRO 3.2 – MINERALOGIA DOS DIFERENTES TIPOS COMPOSICIONAIS DE FORMAÇÕES FERRÍFERAS	14
QUADRO 1.1 – DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA FLOTAÇÃO DE MINÉRIOS DE FERRO NO MUNDO	16

C) GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	34
GRÁFICO 5.2 – RECUPERAÇÃO MÁSSICA X DOSAGEM DE COLETOR.....	35
GRÁFICO 5.3 – DOSAGEM DE COLETOR X TEOR	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ESTIMADA.....	12
TABELA 4.1 – PENEIRAS UTILIZADAS.....	26
TABELA 4.2 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO.....	27
TABELA 4.3 – PARÂMETROS OPERACIONAIS CONSTANTES.....	27
TABELA 5.1 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA (MINÉRIO DE FERRO)	33
TABELA 5.2 – RESULTADOS DE RECUPERAÇÃO E TEOR DOS TESTES DE FLOTAÇÃO.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJETIVOS	7
2.1	Objetivo geral	7
2.2	Objetivos específicos	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1	Minério de Ferro	8
3.1.1	Panorama Nacional do Minério de Ferro	10
3.1.2	Minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero	12
3.2	Os métodos utilizados para concentração de minério de ferro	15
3.2.1	A flotação	17
4	METODOLOGIA	23
4.1	Materiais	23
4.2	Amostra	23
4.2.1	Preparação da amostra	24
4.2.2	Caracterização da Amostra	25
4.3	Planejamento dos experimentos	26
4.4	Teste de Flotação Reversa	27
4.5	Preparação dos Reagentes	28
4.6	Teste de Flotação	29
4.7	Cálculo da densidade da amostra	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1	Caracterização Química	33
5.2	Distribuição Granulométrica	33
5.3	Resultados dos Testes de Flotação	34
6	CONCLUSÃO	38

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
REFERÊNCIAS	40
ANEXO A- RESULTADO DOS TESTES DE FLOTAÇÃO REVERSA	43

1 INTRODUÇÃO

No tratamento de minérios, a etapa de concentração apresenta suma importância na cadeia produtiva mundial de bens minerais. Esta etapa visa uma separação seletiva dos minerais, que se fundamenta nas diferentes propriedades entre os minerais-minério e os minerais de ganga. Durante o processo podem ser exploradas propriedades diferenciadoras, tais como: condutividade elétrica, peso específico, propriedades de superfície, entre outras existentes. Possui como principais métodos: separação magnética, separação gravítica ou gravimétrica, flotação e seleção manual.

Para garantir a eficiência na etapa de concentração há necessidade de que os minerais estejam separados fisicamente, isto é, a partícula deve apresentar composição monomineralógica o que corresponde a partículas minerais compostas por uma única espécie mineralógica. Para que tal cenário seja alcançado o minério deve ser submetido à etapa de cominuição visando-se obter uma liberação adequada dos seus constituintes minerais. Como resultado da concentração do minério, são obtidos dois produtos sendo estes, concentrado e rejeito. Esta etapa visa atingir um alto teor de mineral-minério no concentrado e, conseqüentemente, o menor teor possível na ganga.

Atualmente o método de flotação é dominante no tratamento de minérios para quase todos os tipos de minérios. Isto se deve à sua alta seletividade e imensa aplicabilidade. O método se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais que compõe a suspensão aquosa (polpa mineral). Os sistemas de flotação possuem um dispositivo aerador responsável pela geração de bolhas no interior da polpa mineral. Quando em contato com a suspensão aquosa, as partículas que apresentarem afinidade pela bolha de ar (partículas hidrofóbicas) irão se aderir às mesmas sendo encaminhadas para a zona de coleta, sendo retiradas como material flotado. Já as partículas que apresentarem afinidade pela água (partículas hidrofílicas) irão sedimentar, sendo retiradas como material afundado.

A adição de reagentes na flotação permite uma maior eficiência na concentração de espécies minerais em variadas associações mineralógicas resultando em grande versatilidade da tecnologia da flotação. Os reagentes químicos são adicionados à polpa mineral, permitindo induzir as propriedades de superfície das partículas minerais, tanto para as hidrofóbicas, quanto para as hidrofílicas. As proporções e tipos dos reagentes que são adicionados à polpa dependem das características mineralógicas das espécies minerais de interesse comercial (DUDENKOV *et al.*, 1980 *apud* VERAS, 2010, p.7).

A flotação de minério de ferro em geral pode ser realizada por duas rotas: reversa ou direta. Na primeira, a sílica é flotada com a ajuda de reagentes catiônicos (aminas) e com os depressores (amido). Na flotação direta, o óxido de ferro é flotado, através do uso de reagentes aniônicos como ácidos graxos ou sulfonato de petróleo (LOPES, 2009).

A flotação catiônica reversa é considerada uma rota consagrada no Brasil. Nesta rota, as aminas são empregadas como coletores, sendo consideradas efetivas na flotação de silicatos e quartzo. Esta rota possui como vantagens uma boa seletividade alcançada, além do fato de que as fases de interesse (hematita) se encontram em maior proporção, em relação ao quartzo, fazendo com que o consumo de coletores seja baixo (COSTA, 2009).

O Brasil possui reservas com altos teores de ferro e baixa quantidade de elementos que são indesejados no processo, como por exemplo: o enxofre. Atualmente as reservas mundiais de minério de ferro de alto teor estão se exaurindo, diante do crescimento do mercado consumidor deste produto.

O complexo localizado cerca de 20 km da cidade de Guanhães, no estado de Minas Gerais, é considerado uma reserva que contem baixo teor de ferro. Se encontra inserido no embasamento da Faixa Araçuaí denominado de depósito de Jambreiro que possui aproximadamente 128 Mt de minério. A formação ferrífera bandada (FFB) ocorre em um enorme dobramento reclinado, na formação média do grupo Guanhães, com plano axial e mergulho para a direção SW. Denominado corpo Tigre com comprimento de 1,5 km e larguras de 40 a 80 metros, o flanco

sudoeste é o que apresenta maior homogeneidade e continuidade. O flanco nordeste se apresenta sedimentado, gerando dois corpos menores denominados Cruzeiros e Galo (SILVA *et al.*, 2014). A FIG. 1.1 mostra a localização do depósito de Jambreiro em relação a capital do estado.

Figura 1.1 – Localização do depósito de Jambreiro



Fonte: Centaurus Metals

Nas formações ferríferas bandadas (FFB) ocorrem corpos enriquecidos de anfibólio e dolomita, além de algumas partes xistosas ricas em muscovita. As FFB's são homogêneas apresentando teor médio de ferro de 25% a 35%, além de grãos de granulometria média a grosseira, com bandas milimétricas de hematita e baixas quantidades de magnetita alternada com finas bandas de quartzo. A porção intemperizada de profundidade de 60 a 80 metros apresenta uma formação ferrífera bandada friável, o que permite uma concentração eficiente, basicamente utilizando-se classificação, separação gravimétrica e separação magnética. A operação de lavra não necessita do uso de explosivos. Além disso, minerais na parte intempérica, como dolomita e actinolita, estão completamente ou parcialmente alterados promovendo a geração de produtos que não são contaminados por cálcio e magnésio (SILVA *et al.*, 2014).

A rota prevista, até o momento, para o beneficiamento do minério de Jambreiro é a concentração gravítica. Tendo em vista que a flotação não foi investigada como opção para a concentração deste minério, testes de bancada foram desenvolvidos no laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá, objetivando avaliar a eficiência da flotação catiônica reversa, método consagrado para os minérios do quadrilátero ferrífero, neste caso específico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em aferir a viabilidade da concentração do minério de ferro de Jambreiro pelo processo de flotação reversa.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos destacam-se:

- Avaliar o efeito da variação das dosagens dos reagentes coletor e depressor na recuperação e no teor do mineral de interesse;
- Contribuir com informações técnicas e dados experimentais para a concentração de minério de ferro proveniente do depósito de Jambreiro da região de Ganhães.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

Os minérios de ferro são denominados como rochas a partir da qual se pode extrair o metal de forma economicamente viável. Este metal ocupa o quarto lugar do elemento mais abundante na natureza, cuja composição participa com cerca de 5% em massa, sendo superado apenas pelo silício, alumínio e o oxigênio (DEVANEY, 1985 *apud* SOUZA, 2010, p. 1).

O minério de ferro é conhecido desde a civilização egípcia a 4000 a.C, sendo que seu uso se tornou importante a 800 a.C., no início da idade do ferro (ALECRIM, 1982 *apud* MAZON, 2006, p.4).

As possibilidades em grande escala do uso do ferro são devido a: (ABREU, 1973 *apud* MAZON, 2006, p. 4):

- Descoberta dos processos de transformação do ferro gusa em aço;
- Conhecimento das propriedades magnéticas do ferro;
- Substituição do carvão de madeira pelo coque mineral na sua fabricação;
- Descoberta de *Robert Hadfield* sobre a melhoria das propriedades do aço pela adição de quantidades substanciais de manganês, fato este que marcou a era dos aços especiais.

Seus minérios mais comuns são a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4), a limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), como carbonato, a siderita (FeCO_3), ou ainda a pirita (FeS_2). Este último não pode ser extraído devido à presença do enxofre que altera importantes propriedades do ferro (MOREIRA, 2007).

Embora o ferro (Fe) faça parte da composição de vários minerais, apenas alguns destes podem ser economicamente explorados para a obtenção deste metal. Isto se dá quer pela concentração ou distribuição desses minerais nas rochas que constituem os corpos de minério, quer pela quantidade desse elemento nesses minerais. Industrialmente, a única forma de obter o ferro é a partir de substâncias minerais (CARVALHO *et al.*, 2014).

De acordo com a composição química do mineral que fornece o elemento metálico, os minérios de ferro, economicamente viáveis, são classificados em: óxidos, sulfetos, silicatos e carbonatos. Apenas os óxidos possuem significativa obtenção econômica (CARVALHO *et al.*, 2014).

O aumento no aproveitamento econômico deste metal é mais expressivo diante de um teor elevado do minério, como pode ser observado nos minerais magnetita e hematita. Estes minerais contêm teores que variam entre 72% e 70% respectivamente. No caso da siderita, o teor do metal se apresenta menos expressivo, girando em torno de 48% (TAKEHARA, 2004 *apud* SILVA, 2014, p. 22).

Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro, entre outra característica são apresentados no QUADRO 3.1 (CARVALHO *et al.*, 2014).

Quadro 3.1 – Fórmula química, conteúdo teórico de ferro (em %), densidade relativa e imagens dos principais minerais portadores de ferro.

Mineral	Fórmula Química	Conteúdo teórico de ferro (%)	Densidade Relativa	Imagem
Magnetita	Fe_3O_4	72,4	5,1	
Hematita	Fe_2O_3	69,9	4,9 – 5,3	
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9	3,3 – 4,3	
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	59,8	3,3 – 4,3	

Ilmenita	FeTiO_3	36,8	4,5 – 5,0	
Siderita	FeCO_3	48,2	3,7 – 3,9	
Pirita	FeS_2	46,5	4,5 – 4,87	
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0	4,95 – 5,1	

Fonte: adaptado de CARVALHO *et al.*, 2014, p. 198.

3.1.1 Panorama Nacional do Minério de Ferro

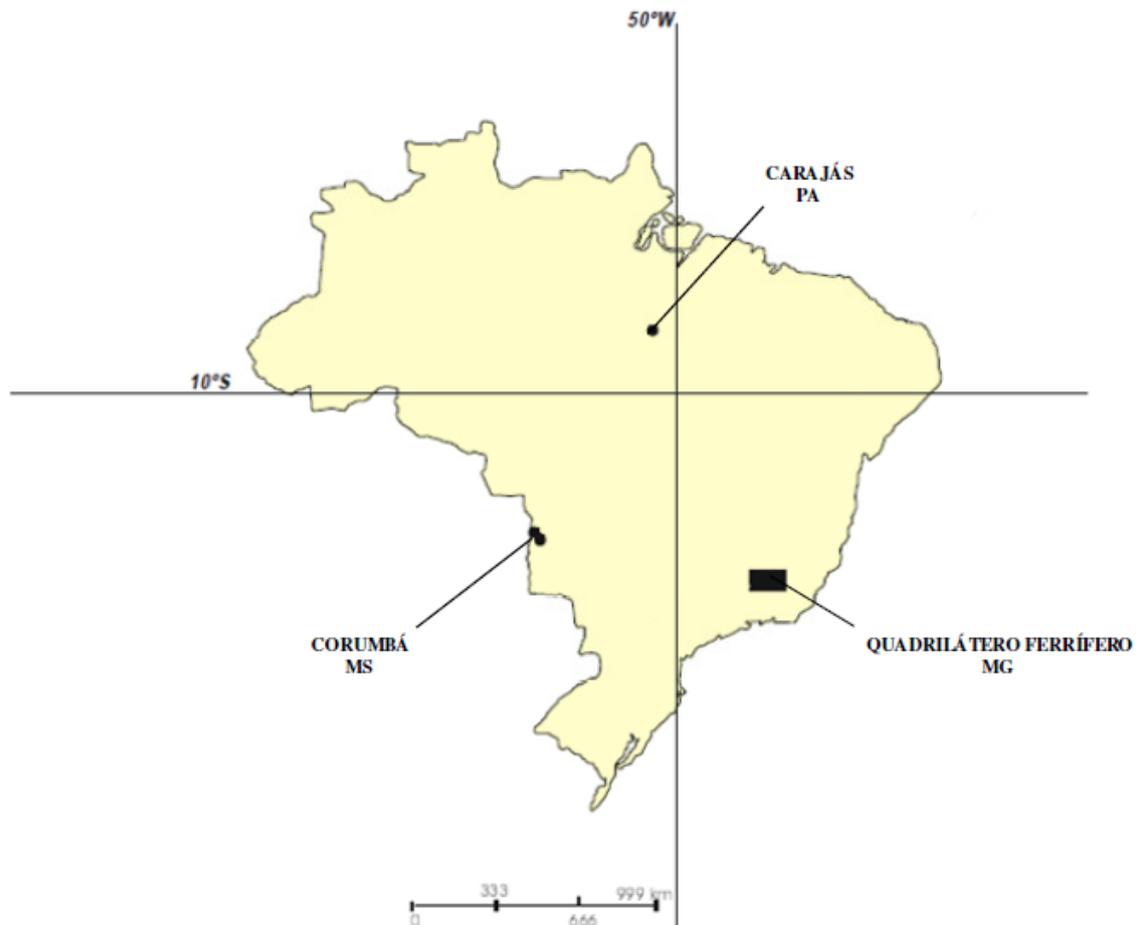
Em 2011 o Brasil possuía cerca 29 bilhões de toneladas de minério de ferro, aproximadamente 18% das reservas mundiais, estimadas em 160 bilhões de toneladas. O Brasil se destaca mundialmente no que diz respeito às reservas em termos de ferro contido, devido ao alto teor nos minérios hematita, predominante no Pará, e itabirito, predominante em Minas Gerais (IBRAM, 2011 *apud* PORTES, 2013, p. 6).

No Brasil o estado de Minas Gerais se apresenta com 67% das reservas de minério de ferro, seguido pelo Pará (16%), Mato Grosso do Sul (15,5%), além dos estados de Alagoas, Amazonas, Bahia, Ceará, Goiás, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo (1,5%) (DNPM, 2011 *apud* PORTES, 2013, p. 6).

A FIG. 3.2 mostra a distribuição das principais minas de minério de ferro no Brasil, sendo estas a Serra do Carajás (Pará), o Quadrilátero Ferrífero (Minas

Gerais) e Corumbá (Mato Grosso do Sul). O Quadrilátero Ferrífero corresponde à área de maior destaque, com suas jazidas de minério de ferro cobrindo uma área total de 7000 km², apresentando teores que podem chegar a 65% (BIZZI *et al.*, 2003 *apud* PORTES, 2013, p. 6).

Figura 3.1 – Localização das principais minas de minério de ferro no Brasil.



Fonte: adaptado de LAMOSO, 2001 *apud* PORTES, 2013, p. 6.

As maiores empresas produtoras no Brasil são: Vale (84,52%), CSN (5,45%), Samarco (6,29%), MMX (2,03%) e Usiminas (1,71%) (IBRAM, 2012, p. 32).

A TAB. 3.1 mostra a produção estimada de minério de ferro no país.

Tabela 3.1 – Produção de minério de ferro estimada

Ranking	Empresa / Ano	2011	2012	2015	2016
1	Vale	311.800	360.000	425.000	425.000
2	CSN	20.100	30.000	89.000	89.000
3	Samarco	23.223	24.000	30.500	30.500
4	Ferrous Resources	-	3.000	23.000	40.000
5	Outros	-	-	1.500	20.000
6	MMX	7.500	13.000	42.500	42.500
7	Usiminas	6.300	12.000	29.000	29.000
8	Namisa	-	8.000	-	-
9	Anglo American	-	5.500	3.500	35.000
10	Mineração Corumbaense	-	5.000	10.000	10.000
11	V&M	-	5.000	5.000	5.000
12	Arcelor Mittal	-	4.300	15.000	15.000
13	Mhag	-	1.000	12.000	12.000
14	Bahia Mineração	-	-	20.000	20.000
15	Bemisa	-	-	2.000	5.000
16	Manabi	-	-	-	31.000
TOTAL		368.923	470.800	751.000	809.000

Fonte: IBRAM estimativas, 2012.

3.1.2 Minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero, situado na região centro sul em Minas Gerais, com área de cerca de 7000 km², tem vértices sudeste em Mariana, sudoeste em Congonhas, noroeste em Itabira e nordeste em Itaúna (DORR, 1959 *apud* AZEVEDO *et al.*, 2012, p. 186).

As séries Itacolomi, Rio das Velas e Minas formam a coluna estratigráfica deste complexo, sendo estas compostas por rochas metamórficas, podendo haver metassomatismo, granitização ou processos ígneos (BARBOSA, 1985; WALLACE, 1965; ROSIÈRE, 1987 *apud* MAZON, 2006, p. 11).

Os depósitos de minério de ferro são classificados como itabiritos, apresentam rochas quartzosas contendo óxidos de ferro com alguns carbonatos e silicatos, estes depósitos são do tipo Lago Superior (ALECRIM, 1982 *apud* NASCIMENTO, 2010, p. 18).

Estes depósitos datam do Proterozóico Inferior (2,5 a 1,8 Ga). Eles constituíram-se pela enorme abundância de sedimentos clásticos e vulcânicos que se depositaram em grandes bacias marginais rasas (LIMA, 1995; MORRIS, 1980; SILVA, 1990; MELNIK, 1982 *apud* MAZON, 2006, p. 10).

As rochas do Quadrilátero Ferrífero ocorrem nas formas de: quartzito hematítico, itabirito quartzoso, itabirito, itabirito dolomítico, itabirito anfibólico, itabirito clorito-dolomítico, itabirito com magnetita, itabirito magnético com talco, dolomito hematítico, dolomito com magnetita, dolomito com leitos magnético-hiperstênico, itabirito com leitos alternados (rico em magnetita e tremolita), dolomito quartzo-hematítico, dolomito quartzo-magnético, dolomito com talco, clorita, anfibólio (antofilita ou tremolita) e raramente muscovita (GUIMARÃES, 1961 *apud* COSTA, 2003, p. 5).

A sequência de formações ferríferas bandadas de espessuras mais expressivas com corpos de minério de alto teor economicamente exploráveis pertencem ao Grupo Itabira, sendo constituído por itabiritos, dolomitos e, subordinadamente, metapelitos (ESCHWEGE, 1833 *apud* ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000, p. 28).

Itabiritos correspondem a formações ferríferas metamórficas e intensamente oxidadas exibindo corpos de minério descontínuos de alto teor (acima de 64% Fe), de morfologia aproximadamente lenticular e tamanhos alteráveis desde alguns decímetros até centenas de metros (ESCHWEGE, 1833 *apud* ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000, p. 28).

A mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas pode ser observada no QUADRO 3.2.

Quadro 3.2 – Mineralogia dos diferentes tipos composicionais de formações ferríferas

Tipos de formação ferrífera	Componentes Mineralógicos Principais	Componentes Acessórios
Itabirito comum	Hematita, martita, kenomagnetita, quartzo.	Clorita, sericita, dolomita ferroana, caolinita, cianita, óxidos de Mn, sulfetos, apatita, pirofillita.
Itabirito dolomítico	Martita, hematita, kenomagnetita, dolomita ferroana.	Calcita, grunerita-cummingtonita, clorita, stilpnomelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo (chert), sulfetos, pirofillita.
Itabirito anfibolítico	Martita, hematita, kenomagnetita, maghemita, grunerita-cummingtonita, tremolita, actinolita, quartzo.	Carbonato, talco, dolomita ferroana, egrina, biotita, Mg-riebeckita, kupferita, sulfetos.
Hematita - filito	Hematita, sericita.	Quartzo, clorita
Filito piritoso	Pirita, matéria carbonosa	

Fonte: PIRES, 1995 *apud* ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000, p. 31).

A sequência de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero é monótona, sendo a hematita (sob a forma de martita, hematita granoblástica e especularita), o óxido que predomina, sendo gerada em diversas gerações com nítida relação com o grau de metamorfismo e deformação (ROSIÈRE *et al.*, 2001a, no prelo *apud* ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000, p. 32).

A magnetita na maioria das vezes ocorre sob a forma de kenomagnetita como cristais idiomórficos a hipidiomórficos, se apresentando individualmente ou constituindo agregados (KULLERUD *et al.*, 1969 *apud* ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000, p. 32).

Normalmente, a magnetita ocorre como relictos no interior dos cristais de hematita, tendo como mineral de ganga predominante o quartzo, bem como anfibólios e dolomita. Há presença de outros silicatos como minerais acessórios (ROSIÈRE; JÚNIOR, 2000).

3.2 Os métodos utilizados para concentração de minério de ferro

É de suma importância tanto para o entendimento quanto para a escolha do método mais adequado para utilização no beneficiamento, os aspectos geológicos, a gênese e em especial a mineralogia dos minérios de ferro (LOPES *et al.*, 2011).

Pesquisadores constataram que o beneficiamento de minérios laminados hematíticos e maciços, pode ser realizado por classificação granulométrica e fragmentação (LOPES *et al.*, 2011)

Utiliza-se apenas peneiramento para o minério pulverulento azul de teor elevado. Para outros tipos de minérios, com baixo teor, concentra-se por métodos que consideram a sua aglomeração mineralógica. A jigagem é mais eficaz para minérios grosseiros de teores médios. Ciclonagem, separação magnética, meio denso e determinadas práticas mais desenvolvidas como flotação em coluna e separação multigravítica, foram eficazes na concentração das frações finas e das lamas (UPADHYAY, 2009 *apud* LOPES *et al.*, 2011, p. 126-127).

De acordo com Lopes *et al.*, (2011, p. 127):

A escolha da técnica de concentração (concentração gravítica, separação magnética de baixa e alta intensidade, flotação) para as frações granulométricas finas de minérios brasileiros, *sinter feed* e *pellet feed*, é efetuada levando-se em consideração a proporção dos minerais-minérios de ferro e dos minerais de ganga presentes nos mesmos.

O *sinter feed* são considerados finos na faixa granulométrica de 6,3 a 0,1 mm para sinterização e o *pellet feed*, concentrado abaixo de 0,1 mm, utilizado na produção de pelotas para alto-forno (SCHNELLRATH *et al.*, 2002). Para *sinter feed* empregam-se concentração magnética e concentração gravítica (meio denso, espirais e jigagem). Não recomenda-se a concentração magnética de alta intensidade em minérios dos quais a magnetita e o quartzo são minerais predominantes. A flotação reversa catiônica de *pellet feed* é altamente utilizada para minérios, cujo mineral-minério predominante é a hematita, sendo a ganga constituída principalmente pelo quartzo com baixa proporção de minerais de alumínio. Ela é recomendada também para minérios, cujos minerais portadores de

ferro predominantes são a magnetita e geothita, associadas ao quartzo com baixas proporções de alumino-silicatos (LOPES *et al.*, 2011).

Segundo Lopes *et al.*, (2011, p. 127):

Em circuitos industriais de beneficiamento de minério de ferro, que empregam concentração magnética de alta intensidade, faz-se necessária uma etapa inicial de desbaste em equipamentos de baixo campo magnético (acima de 2.000 G) para minérios de ferro com proporção volumétrica de 30% de magnetita. Para proporção volumétrica de magnetita entre 5% e 30%, a etapa de desbaste é efetuada por separação magnética de médio campo (2.000 G a 9.000 G).

Dentre as principais aplicações conhecidas da flotação de minério de ferro o Brasil é destaque mundial com relação tanto ao número de usinas de concentração quanto em termos de toneladas tratadas (acima de 80 milhões de toneladas por ano de alimentação). O quadro resume as principais aplicações conhecidas da flotação do bem mineral no mundo (ARAÚJO; VIANA, 2003 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013, p. 318).

Quadro 1.1 – Distribuição geográfica da flotação de minérios de ferro no mundo

PAÍS	TECNOLOGIA	Nº DE USINAS
EUA	Flotação catiônica reversa de silicatos: FM e FC*	5
Canadá	Flotação catiônica reversa de silicatos: FM	2
Chile	Flotação catiônica reversa de silicatos: FP	1
México	Flotação reversa de fosfatos: FM	1
Brasil	Flotação catiônica reversa de silicatos: FM+FC (contemplando o emprego de células tipo tanque de grande volume)	10
Venezuela	Flotação catiônica reversa de silicatos: FC	1 usina piloto e 1 projeto em implantação
Peru	Flotação aniônica reversa de fosfatos: FM	1
Suécia	Flotação reversa de fosfatos: FM+FC	1
Rússia	Flotação catiônica reversa de silicatos e flotação direta (?): FM(?) + (?)	(2 em implantação)
Ucrânia	Flotação catiônica reversa de silicatos e flotação direta (?): FM(?) + FC (?)	pelo menos 1
China	Desconhecia (possivelmente flotação direta em células mecânicas convencionais)	pelo menos 2
Índia	Flotação aniônica reversa de silicatos: FC	pelo menos 1
Irã	Flotação reversa de fosfatos: FM	1
TOTAL MUNDIAL CONHECIDO		26
FM: Flotação Mecânica	FC: Flotação em Coluna	FP: Flotação Pneumática

Fonte: ARAÚJO; VIANA, 2003 *apud* ARAÚJO *et al.*, 2013, p. 319

3.2.1 A flotação

Nos últimos cem anos o processo de flotação, em termos industriais, vem sendo largamente utilizado, além de consagrado como o método mais empregado na separação de minerais (NASCIMENTO, 2010).

A flotação consiste na flutuação de um material hidrofóbico sobre uma fase líquida, enquanto que o material hidrofílico se deposita no fundo do recipiente. A operação é realizada sob agitação da suspensão ou borbulhando-se ar através da mesma (RABOCKAI, 1979 *apud* NASCIMENTO, 2010, p. 21). O processo de flotação é considerado complexo por se basear nas diferenças das propriedades físico-química das superfícies das partículas minerais, sendo que esta diferença se relaciona ao conceito de hidrofobicidade (COSTA, 2009).

Deve-se destacar que os compostos químicos são divididos em apolares e polares. Estas características são derivadas da presença, em sua molécula, de um dipolo permanente. Quando estes compostos não apresentam dipolos permanentes, são denominados apolares. Caso contrário, recebem a designação de polares (COSTA, 2009).

Levando em consideração o sistema de flotação, o ar corresponde à fase apolar, enquanto a água apresenta características de uma fase polar. Então, uma substância hidrofóbica, possui maior afinidade pelo ar devido à sua superfície apolar. Já uma partícula hidrofílica apresenta maior afinidade pela água devido à presença de uma superfície polar (COSTA, 2009).

Consideram que a probabilidade de ocorrer a flotação de um determinada partícula mineral é representada através de um produto de três probabilidades individuais, como pode ser observado pela equação a seguir (ARAUJO et. al., 1995 *apud* BATISTELI, 2007, p. 33):

$$P = P_a \cdot P_c \cdot (1 - P_d)$$

Onde: P = probabilidade de flotação;

P_a = probabilidade de adesão entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar;

P_c = probabilidade de colisão bolha-partícula;

P_d = probabilidade do rompimento bolha-partícula.

A probabilidade de adesão (P_a), está diretamente ligado ao ambiente químico predominante em um dado sistema de flotação, ou seja, essa probabilidade pode ter por influência a mineralogia do mineral, os reagentes envolvidos no processo e as condições da polpa, sendo controlada predominantemente pelas forças superficiais (BATISTELI, 2007).

A probabilidade de colisão (P_c), é principalmente influenciada pelo tamanho da bolha, tamanho da partícula e pela turbulência presente no sistema. As probabilidades restantes (P_d e P), são governadas pela hidrodinâmica do sistema de flotação (BATISTELI, 2007).

Este processo depende da aderência das partículas a uma interface. Por isso os reagentes que controlam esses atributos são classificados de acordo com seu papel no processo, em coletores, espumantes, coagulantes, floculantes e modificadores de carga. Estes reagentes possuem uma função de extrema importância na melhoria da eficiência dos processos envolvidos (SANTOS,2010).

Os coletores são classificados em espécies químicas possuidora de um grupo funcional iônico, podendo ser classificados em polar ou apolar. Estes reagentes têm por finalidade básica, se adsorverem a superfície das partículas, a fim de reforçar ou induzir a hidrofobicidade da partícula mineral, visando um acréscimo na seletividade (VERAS, 2010). Ao adsorverem-se sobre as partículas de uma determinada espécie mineral, que na grande maioria das vezes são hidrofílicas, alteram-nas em hidrofóbicas. O grupo polar do coletor deve apresentar afinidade pelo mineral a ser flotado para que ocorra a adsorção, e as cadeias hidrocarbônicas do mesmo, produzem a superfície hidrofóbica (NASCIMENTO, 2010).

O quartzo corresponde ao principal mineral de ganga presente em minérios de ferro. Para concentrar o minério de ferro por flotação é usual utilizar um coletor

para hidrofobizar a ganga composta por silicatos, coletando o quartzo na fração flotada. As aminas destacam-se como coletoras de silicato (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Os modificadores são espécies químicas que atuam na interface sólido/líquido, assim como no *bulk* (seio da solução), e são classificados de acordo com sua função, podendo ser considerado como: depressor, ativador ou regulador (VERAS, 2010).

Os depressores são conhecidos como sais ou polímeros, empregados com o intuito de adsorverem-se seletivamente na superfície dos minerais, que não se tem interesse em flotar. Competem com os coletores nos sítios da interface sólido/líquido, além de reforçar a hidrofobicidade dos minerais que não se deseja flotar (VERAS, 2010).

Os minerais de ferro estão susceptíveis à flotação na presença de amina, devido ao componente eletrostático do mecanismo de adsorção das aminas e principalmente por possuírem maiores cadeias. Deste modo, torna-se essencial a adição de um depressor, permitindo assim a seletividade do coletor para hidrofobizar apenas o quartzo, reforçando o caráter hidrofílico dos minerais de ferro, tendo como principais reagentes depressores os amidos (MAPA, 2006 *apud* SANTOS, 2010, p.9).

Este depressor tem como característica, ser extraído por diversas espécies vegetais (*e. g.* trigo, arroz, milho, mandioca, cassava, entre outros), portanto, devido sua grande disponibilidade de quantidade, o amido de milho é eminentemente empregado na indústria mineral (ARAÚJO *et al.*, 2005 *apud* SANTOS, 2010, p.9).

Insolúveis em água fria e dependente de um processo de gelatinização, os amidos não modificados, podem ser realizados através de aquecimento e/ou adição de NaOH (consiste no método mais aplicado, e o único utilizado industrialmente (ARAÚJO *et al.*, 2005 *apud* SANTOS, 2010, p.10). Este processo de gelatinização por adição de NaOH, fundamenta-se na adsorção de parte do álcali da solução diluída de hidróxido de sódio pelas moléculas da suspensão do amido de milho. Tem como principais variáveis do processo: os níveis de adição de NaOH, além do tempo

necessário a gelatinização (PERES *et al.*, 1996; PERES *et al.* 2004, *apud* SANTOS, 2010, p.10).

Podem ser observados diversos processos de concentração via flotação para minérios de ferro contendo ganga constituída por quartzo. Estas rotas podem ser: flotação catiônica reversa de quartzo, flotação aniônica direta de óxidos de ferro e flotação aniônica reversa de quartzo ativado (ARAÚJO *et al.*, 2013).

3.2.1.1 *Flotação aniônica direta de óxidos de ferro*

O método de flotação direta com reagentes aniônicos foi o primeiro método avaliado e aplicado nos óxidos de ferro (HOUOT, 1993; MONTES-SOTOMAYOR *et al.*, 1998 *apud* SANTOS, 2010, p. 11). A flotação aniônica direta é indicada para minérios de baixo teor ou rejeitos descartados para barragem de rejeitos. Utilizam principalmente os ácidos graxos como coletores. Reagentes depressores ainda são estudados, pois a depressão dos minerais de ganga ainda é um desafio (ARAÚJO *et al.*, 2004 *apud* SANTOS, 2010, p. 11).

O oleato de sódio tem sido utilizado para a flotação da apatita há muitos anos (SHIBATA; FUERSTENAU, 2003 *apud* SANTOS, 2010, p. 11). Este coleta as partículas que contém ferro, adsorvendo-se quimicamente na superfície dos oximinerais, sendo estes coletados na espuma de flotação (HOUOT, 1983 *apud* SANTOS, 2010, p. 11).

De acordo com Santos (2010, p.11), os parâmetros essenciais do processo de flotação de ferro usando este coletor são:

- i. Deslamagem na faixa de 15 micrômetros é indispensável, sendo conduzida pela separação em ciclones em dois estágios;
- ii. Condicionamento em polpa espessa se é desejável uma elevada recuperação com a mínima adição de coletor. Esta é a fase chave do processo. Isto representa 5 a 8 minutos de condicionamento para a polpa com 65% - 70% de sólidos;
- iii. O ácido graxo mais seletivo é o ácido oleico, mas a espuma formada é de difícil operação. Desta maneira, torna-se mais atrativo o uso do *tal oil*, que é composto de uma mistura de ácido oleico e linoleico. Entretanto, a espuma pode ser controlada pela adição de MIBC (metil isobutilcarbinol).

3.2.1.2 *Flotação aniônica reversa de quartzo ativado*

Quando não havia a disponibilidade das aminas para os tratadores de minérios, a flotação aniônica reversa de quartzo ativa era uma rota empregada no passado (ARAUJO *et al.* 2013)

Nesta rota de flotação, os minerais ferríferos são deprimidos, sendo coletados no interior da célula. Gomas, diversos tipos de amido ou dextrinas são os reagentes geralmente utilizados. Ativa-se a sílica por um sal de cálcio, geralmente cloreto de cálcio, sendo flotada, posteriormente, com ácidos graxos (HOUOT, 1983 *apud* SANTOS, 2010, p. 12).

A utilização da flotação aniônica reversa do quartzo ativado para recuperação de ferro de baixo teor (cerca de 31,6% de Fe) foi investigada experimentalmente. Os resultados mostraram que o amido de cassava foi mais eficiente do que a dextrina, considerando pH entre 10 e 11. A melhor concentração de íons de cálcio na ativação e flotação do quartzo com ácido oléico ocorreu na faixa de 50 a 100 ppm (UWADIALE; NWOKE, 1995 *apud* SANTOS, 2010, p. 12).

3.2.1.3 *Flotação catiônica reversa de quartzo*

A flotação catiônica reversa de quartzo corresponde ao método mais utilizado. Este consiste na flotação do quartzo com éter aminas como coletores, além de funcionarem também como espumante quando parcialmente neutralizadas com ácido acético, pois sua solubilidade se mostra altamente reduzida. Geralmente os graus de neutralização variam entre 25% e 30%. Para depressores, utilizam-se amidos não modificados, pois são os mais utilizados para deprimir os minérios de ferro por causa de sua disponibilidade e alta quantidade. O amido de milho reforça o caráter hidrofílico dos minerais de ferro permitindo assim maior seletividade para o coletor de quartzo (ARAUJO *et al.*, 2005 *apud* SANTOS, 2010, p.9).

Tendo como destaque a rocha itabirito, no Brasil a forma de concentração mais empregada dos minérios de ferro com teor baixo corresponde à flotação catiônica reversa, na qual o quartzo considerado mineral de ganga, é flotado e a

hematita considerada como concentrado, sai o afundado (SILVA, 2004 *apud* COSTA, 2009, p. 24).

Gilmara Mendonça Lopes efetuou testes de flotação em escala de bancada com quatro tipologias de minério de ferro do quadrilátero ferrífero. Os ensaios foram realizados através de planejamento fatorial de experimentos (2^2) com réplica, cujas variáveis estudadas foram dosagem de amina EDA da Clariant (75 g/t e 150 g/t) e dosagem de amido de milho da Santa Amália (200 g/t e 400 g/t). Nesses ensaios foram fixados o valor de pH em 10,5, porcentagem de sólidos em 45% em peso, rotação da célula de flotação (CIMAQ com cuba de 1,5 L) em 1.200 RPM, tempo de condicionamento com amido e amina em 5 minutos e 3 minutos, respectivamente. O maior índice de seletividade (5,4) entre o Fe e o SiO_2 foi obtido para a dosagem de 150 g/t de amina e de 400 g/t de amido, cujos teores de Fe e SiO_2 no concentrado foram de 65% e de 6,5%, respectivamente (LOPES, 2009).

4 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Unidade Araxá.

4.1 Materiais

Foram usados os seguintes materiais disponíveis no laboratório:

- Amostra de minério de ferro;
- Balança semi-analítica;
- Béqueres;
- Estufa;
- Peneiras;
- Bandejas metálicas;
- Recipiente (15 litros);
- Célula de flotação;
- Coletor: flotigam EDA;
- Depressor: amido de milho;
- Agitador magnético;
- Ímã;
- Pisseta;
- Espátula metálica;
- pHmetro ;
- Solução padrão;
- Hidróxido de Sódio.

4.2 Amostra

A amostra utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi fornecida pela empresa Centaurus Metals, correspondente ao minério de ferro do depósito de Jambreiro, situado na localidade de São João Evangelista, no município de Guanhães-MG.

4.2.1 Preparação da amostra

A preparação da amostra foi realizada no laboratório. Primeiramente, foi feita a homogeneização de aproximadamente 100kg de minério de ferro com o propósito de se obter uma distribuição uniforme dos minerais constituintes. Este procedimento foi executado, por tombamento, em uma lona, através da formação de uma pilha cônica, e dividindo-se a mesma em quatro partes iguais.

Em seguida, houve a necessidade de quarterar a amostra, que foi feito no quarterador mecânico Jones, com o objetivo de dividir esta amostra primária em 10 amostras de aproximadamente 10 kg, esta etapa foi repetida ate a obtenção das alíquotas de menor massa.

Logo após, esta foi submetida à etapa de moagem, realizada pelo moinho de bolas (FIG 4.1).

Figura 4.1 – Moinho de Bolas



O procedimento de moagem foi a seco. O moinho de bolas (dimensões de 590 x 570 mm, volume de 151 L e 70% da velocidade crítica) foi alimentado com 30 quilos de material, com tempo de moagem de aproximadamente 1 hora.

Logo após, houve necessidade de adequação granulométrica da amostra. Esta foi realizada através do método de peneiramento manual a seco, com malha de 65 mesh, correspondente à série Tyler (abertura de 0,210 mm). O material utilizado nos testes de flotação apresentava granulometria 100% abaixo de 0,210mm.

A grande quantidade de finos gerados pelo peneiramento, o qual é prejudicial a flotação, devido esses finos recobrirem a superfície das partículas minerais e impedirem a eficiência dos reagentes, houve a necessidade do material ser submetido a etapa de deslamagem. O procedimento foi realizado em recipientes com capacidade de 15 litros e amostras de aproximadamente 3 kg. Agitou-se a polpa (composta por água mais sólidos) manualmente por cerca de 5 minutos. Ao fim desta etapa, após a decantação do minério de ferro, retirou-se a água com as lamas, e o material decantado foi levado para a estufa. Este foi seco em estufa a 100 °C, por aproximadamente 24 horas.

Após a etapa, o material foi submetido a sucessivos quarteamentos, até serem obtidas amostras de massa necessária para a execução dos testes proposto de flotação reversa, FIG. 4.2.

Figura 4.2 – Pilha de homogeneização e quarteamento



4.2.2 Caracterização da Amostra

4.2.2.1 *Granulométrica*

A análise foi feita pelo método do peneiramento a seco, com massa de 200g

de minério de ferro, e tempo de 10 minutos . As peneiras utilizadas e suas respectivas aberturas estão apresentadas na TAB. 4.1. Decorrido o tempo, retirou-se o conjunto e fez-se a pesagem do material retido em cada peneira e no fundo desse conjunto para poder avaliar a quantidade de material passante.

Tabela 4.1 – Peneiras utilizadas

Diâmetro de abertura (mm)	Peneira Série Tyler
0,210	65#
0,149	100#
0,106	150#
0,053	270#
	FUNDO

4.2.2.2 *Caracterização Química*

O material da alimentação foi enviado para o CEFET-MG, campus I, em Belo Horizonte. A caracterização da amostra foi feita através do método de fluorescência de raio X para a determinação das espécies químicas presentes na amostra.

Após a incidência dos raios-X, os átomos constituintes da amostra são excitados, que por sua vez emitem linhas espectrais com energia característica de cada elemento presente na amostra e suas intensidades estão diretamente ligadas com suas concentrações. Resumidamente, este método consiste em três etapas básicas: excitação dos elementos presentes na amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e a detecção desses raios-X. São vários os equipamentos que executam este método (IAEA, 1999 *apud* SANTOS *et al.*, 2013, p. 3416).

4.3 **Planejamento dos experimentos**

Conforme descrito anteriormente o objetivo do trabalho é avaliar a flotação reversa de minério de ferro, investigou-se as variáveis operacionais como: dosagem de coletor e dosagem de depressor, de acordo com um planejamento experimental apresentado na TAB. 4.2.

Tabela 4.2 – Matriz de Planejamento

TESTE	MATRIZ DE PLANEJAMENTO		Dosagens	
	1	-1	-1	25 g/t
2	0	-1	75 g/t	200 g/t
3	1	-1	150 g/t	200 g/t
4	-1	0	25 g/t	400 g/t
5	0	0	75 g/t	400 g/t
6	1	0	150 g/t	400 g/t
7	-1	1	25 g/t	800 g/t
8	0	1	75 g/t	800 g/t
9	1	1	150 g/t	800 g/t
	Coletor	Depressor	Coletor	Depressor

Os níveis definidos para as variáveis operacionais foram baseados no trabalho (GILMARA *et al.*, 2009).

4.4 Teste de Flotação Reversa

Alguns parâmetros operacionais, foram mantidos constantes em todos os testes de flotação reversa, eles estão apresentados na TAB. 4.3:

Tabela 4.3 – Parâmetros operacionais constantes

VARIÁVEL	VALOR
Densidade da amostra (alimentação)	3,37 g/cm ³
% sólidos no condicionamento	50%
% sólidos na flotação	40%
Rotação do rotor ou impelidor	1200 rpm
Ph	10
Volume da célula de flotação	1200 ml
Massa de sólidos	652,8 g
Regulador de pH	NaOH
Tempo de condicionamento do depressor	5 min
Tempo de condicionamento do coletor	2 min
Vazão de gás	8 l/min

A partir do volume disponível da célula de flotação do tipo CDC, e da porcentagem de sólidos, definidas para os testes, foi calculada a massa de sólido alimentada na célula. A escolha dos valores foi baseada nos resultados apresentados por GILMARA *et al.* (2009).

Inicialmente, calcula-se a densidade da polpa, através da Equação (1).

$$\%S = \frac{d_s(d_p - d_a)}{d_p(d_s - d_a)} \times 100\% \quad (1)$$

Onde: d_s = densidade do sólido, considerada como 3,37 g/cm³;

d_A = densidade da água;

$\%S$ = considerada como 40%.

De posse do valor da densidade da polpa é possível calcular a massa de polpa (m_p) a partir da Equação (2):

$$m_p = v_{\text{útil}} \cdot d_p \quad (2)$$

Onde: m_p = massa da polpa;

d_p = densidade da polpa;

$v_{\text{útil}}$ = volume útil da cuba.

Em seguida, determina-se a massa de sólidos necessária para cada teste, a partir da Equação (3):

$$m_s = \%_{\text{sólidos}} \times m_p \quad (3)$$

A massa de sólidos é usada para calcular a massa de reagente necessária para execução dos testes, conforme dosagens especificadas.

4.5 Preparação dos Reagentes

Posteriormente, procedeu-se à preparação dos reagentes, sendo estes o coletor flotigam EDA (fornecida pela empresa Clariant), e o depressor amido de milho. Foi feita a pesagem dos compostos químicos necessários a cada solução. O

método de preparação do depressor foi o processo de gelatinização, e para o coletor efetuou-se somente a diluição a 1%.

A gelatinização foi feita usando a proporção de amido:soda de 4:1. Na preparação do depressor a ser gelatinizado, misturou-se em um béquer 5 g de fubá, 45 g de água e 12,5 g de hidróxido de sódio (solução a 10%). Esta mistura foi agitada por 10 minutos no agitador magnético. Após a agitação, houve a adição de mais 104,16 g, e sua agitação por mais 10 minutos, obtendo-se o volume de 200 mL de solução.

Considerando a massa de minério da alimentação, as dosagens de coletor e depressor e a concentração das soluções, calculou-se a massa de solução de coletor e depressor para os respectivos testes, de acordo com a Equação (4).

$$m_r = \frac{(D \times m_s)}{10^4 \times C} \quad (4)$$

Onde: m_r = massa de reagente;

m_s = massa de sólidos;

D = dosagem dos reagentes segundo planejamento experimental;

C = concentração do reagente empregada, considerando 1% para coletor e 2,5% para depressor.

4.6 Teste de Flotação

Para o início do teste, inseriu-se a amostra no interior da cuba, juntamente com a água, formando-se uma polpa com 50% de sólidos. Ligou-se o rotor, a uma rotação aproximada de 1200 rpm, de modo a homogeneizar a polpa. Regulou-se o pH em 10 através da adição de hidróxido de sódio (solução a 10%), sendo executada a aferição esta variável a partir de um pHmetro (Analyser, modelo ph300), equipado com um eletrodo. O monitoramento do pH foi realizado ao longo de todo o teste. Adicionou-se o depressor, mantendo-se a polpa condicionada por cinco minutos. Posteriormente, adicionou-se o coletor, mantendo-se a polpa condicionada

por mais dois minutos. Após a adição dos reagentes, adicionou-se a água de diluição para ajuste de porcentagem de sólidos para 40%.

Ligou-se o sistema de injeção de ar, dando início ao processo de flotação. Recolheu-se a espuma, contendo o material flotado (rejeito) até completa exaustão da mesma. O material flotado assim como o afundado, foram coletados conforme mostrada na FIG. 4.3.

Figura 4.3 – Material flotado e material afundado respectivamente



Os produtos da flotação foram mantidos em estufa a 100°C por, aproximadamente, 24 horas. Após secos, foram pesados em balança semi-analítica.

O procedimento citado foi realizado para os demais testes, variando-se a dosagem do coletor e dosagem do depressor.

4.7 Cálculo da densidade da amostra

A determinação da densidade da amostra, após a flotação reversa, foi realizada utilizando picnômetros de 50 mililitros e balança semi-analítica.

A técnica utilizada para o cálculo da densidade dos sólidos foi a picnometria, apresentada em SAMPAIO *et al.* (2007). As memórias de cálculo, podem ser observadas nas tabelas descritas no ANEXO 1.

Esses picnômetros (Gay-Lussac) possuem volume de 50 ml, e exigem balança com precisão de duas casas decimais. Para assegurar sua eficiência, os picnômetros foram calibrados de acordo com a ABNT NBR ISSO/IEC 17025.

A partir da densidade de sólido calculada, o teor foi obtido através do peso específico, conforme Equação (5). Visto que a partir de uma amostra que basicamente é composta por dois minerais, a densidade média é proporcional ao teor de cada mineral na mistura.

$$\%MM = \frac{d_{mm}(d_m - d_g)}{d_m(d_{mm} - d_g)} \quad (5)$$

Onde: %MM= porcentagem mineral minério;

d_{mm} = densidade do mineral minério (hematita), considerada como 5,01;

d_m = densidade do minério;

d_g = densidade da ganga (quartzo), considerada como 2,65 g/cm³.

De posse do valor do teor de hematita presente na amostra de minério de ferro, e considerando que hematita é constituída de 69,96% de ferro, é possível calcular o teor de ferro (%Fe) no concentrado de cada teste, a partir da Equação 6.

$$\%Fe = 0,699 \times \%MM \quad (6)$$

Para avaliar o desempenho do processo de flotação, há necessidade do cálculo da recuperação metalúrgica bem como o cálculo da recuperação mássica que são apresentas nas Equações 7 e 8, respectivamente.

$$Rec_{met} = \frac{(C * \%Fe)}{((C+R) * a)} \times 100 \quad (7)$$

$$R_{massa} = \frac{C}{(C+R)} \times 100 \quad (8)$$

Onde: R_{massa} = recuperação mássica;

Rec_{met} = recuperação metalúrgica;

C = massa do concentrado;

R = massa do rejeito;

a = teor da alimentação, considerado com 31,82%;

$\%Fe$ = porcentagem de ferro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Química

A TAB. 5.1 apresenta os teores médios dos principais elementos que compõem o minério de ferro, feito através da fluorescência de raio-X. A porcentagem do mineral hematita é 46,46% (Fe_2O_3), que corresponde a um teor de Fe de 32,48%

Tabela 5.1 – Caracterização química (minério de ferro)

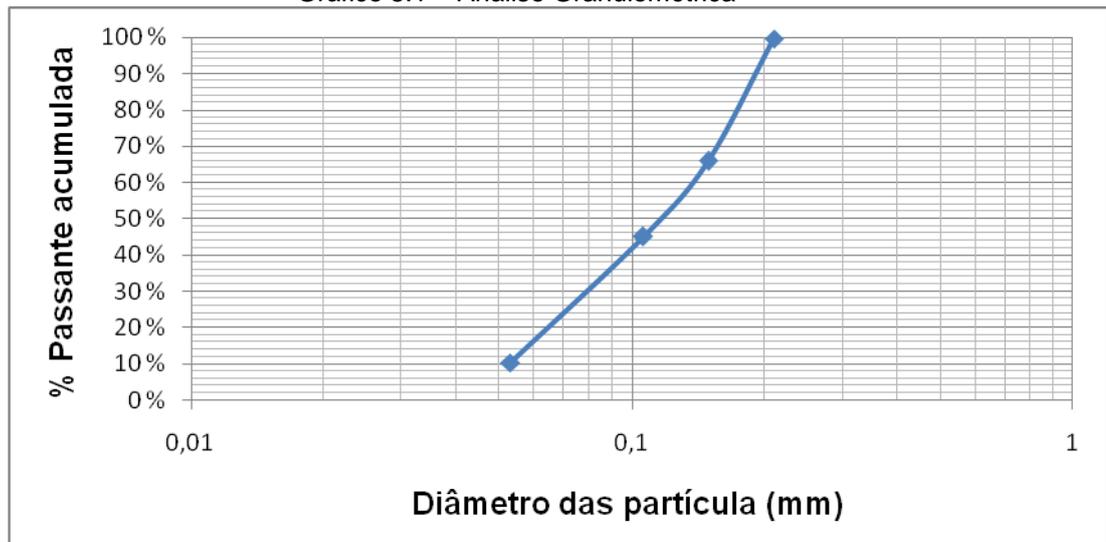
MINERAL	TEOR (%)
SiO_2	52,330
Fe_2O_3	46,461
SO_3	0,607
K_2O	0,309
CaO	0,223
MnO	0,061

Através do método da picnometria o teor alcançado foi de 45,53% de hematita (Fe_2O_3), calculada mediante a Equação (5). Devido a pequena diferença de valor obtido em relação ao método de fluorescência de raio-X esta técnica foi utilizada para a obtenção dos resultados de teor de Fe para os demais testes, considerando que a amostra é composta basicamente por dois minerais: hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2), e que os demais minerais presentes compõem apenas 1,2% do total da amostra sendo então desconsiderados durante a análise da picnometria.

5.2 Distribuição Granulométrica

A análise granulométrica da amostra de minério de ferro é apresentada no GRÁF. 5.1, onde observou-se um $D_{50} = 0,12$ mm e um $D_{80} = 0,18$ mm característico para esta análise, correspondente a 50% da amostra passante na peneira de abertura igual a 0,12mm indicando que metade da amostra é menor que este diâmetro, além de representar 80% da amostra passante na peneira de abertura igual a 0,18 mm.

Gráfico 5.1 – Análise Granulométrica



5.3 Resultados dos Testes de Flotação

A TAB. 5.2 apresenta os resultados de recuperação mássica e o teores de Fe obtidos nos experimentos, de acordo com o planejamento mostrado na TAB. 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados de recuperação e teor dos testes de flotação

Teste	Dosagem do coletor (g/t)	Dosagem do depressor (g/t)	Recuperação Mássica (%)	Teor Fe (%)
Alimentação				31,82
1	25	200	95,84	32,14
2	75	200	93,45	35,73
3	150	200	81,18	39,70
4	25	400	93,02	33,74
5	75	400	87,08	36,18
6	150	400	77,41	35,60
7	25	800	92,14	34,01
8	75	800	86,85	32,20
9	150	800	79,25	33,65

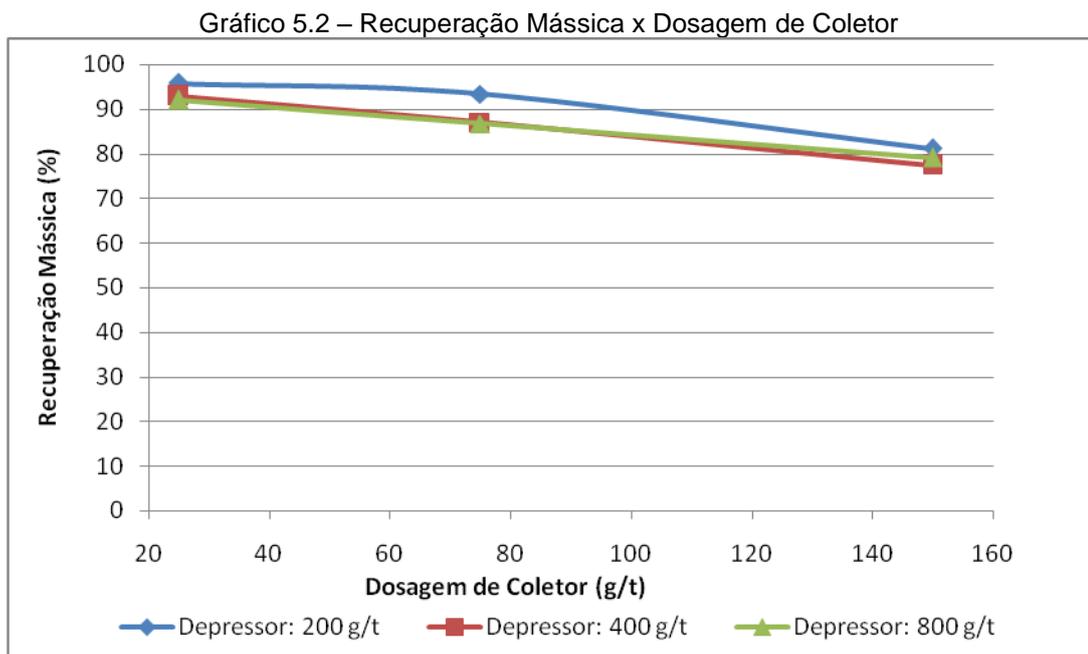
Observou-se que com o aumento da dosagem de coletor recupera-se mais SiO_2 (flotado), obtendo maior massa do flotado, ou seja, menor massa de Fe_2O_3 (afundado) como consequência, terá uma diminuição da recuperação mássica. Em contrapartida terá um teor maior, pois a ganga tende a sair mais no flotado.

Nota-se que as alterações no valor da dosagem de coletor provocaram maior variação no teor obtido no concentrado que as modificações na dosagem de

depressor, o coletor apresentou maior influência. A melhor recuperação mássica foi alcançada no teste 1, 95,84% de concentrado, onde a dosagem de coletor foi 25g/t e de depressor foi de 200 g/t.

O melhor teor encontrado no concentrado em comparação com todos os testes efetuados ocorreu na dosagem de 150 g/t de coletor e 200 g/t de depressor (teste 3).

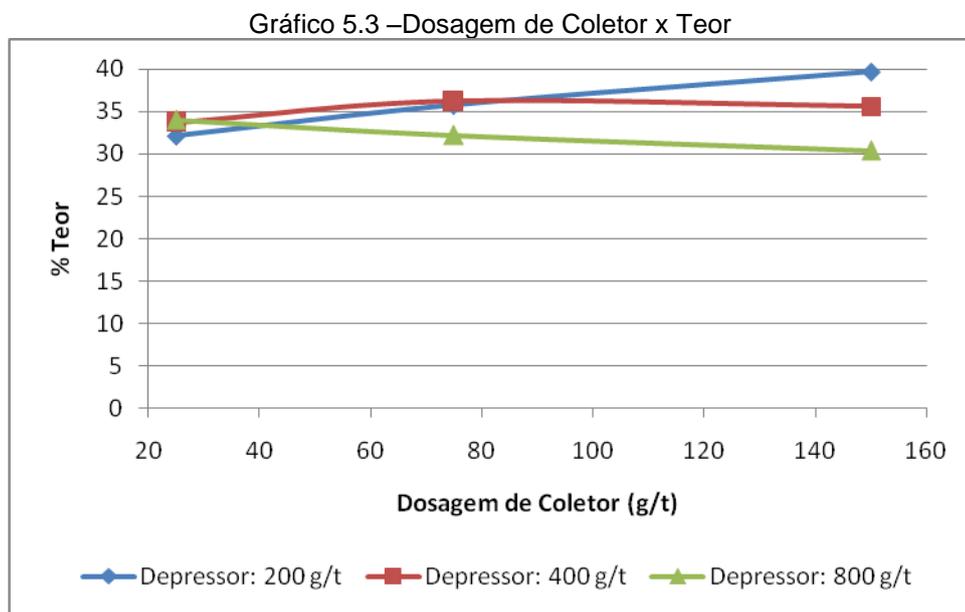
De acordo com o GRÁF. 5.2, observa-se que com o aumento da dosagem de coletor tem-se uma diminuição na recuperação mássica. Notou-se que a curva da dosagem de depressor de 200g/t foi a de maior destaque por possui maior recuperação mássica em relação às outras duas dosagens em toda a faixa de dosagem de coletor.



Com relação às dosagens de depressor de 400 g/t e 800 g/t observou-se que elas seguem um mesmo padrão para toda a faixa de dosagem de coletor. Porém, esperava-se que a curva de dosagem de depressor de 800g/t atingisse a maior recuperação mássica, uma vez que a alta quantidade de depressor utilizada deveria ter deprimido uma maior massa de concentrado de ferro. Isso se deve ao fato de que a dosagem de 200 g/t já é suficiente para a depressão do minério de ferro. A

variação da dosagem do depressor não mostrou-se significativa em relação a recuperação mássica.

O GRÁF. 5.3 indica para a curva de dosagem de depressor de 200 g/t, que houve uma depressão apenas da hematita, e quanto maior a dosagem dos coletores, flota-se mais o que diminui a recuperação mássica. O quartzo por sua vez, que não se encontra deprimido é flotado aumentando assim o teor final do concentrado.



Para a curva de dosagem de depressor de 400 g/t, notou-se uma aumento no teor de Fe em toda a faixa de dosagem de coletor até o valor de 75 g/t. A partir deste ponto, manteve-se praticamente constante apresentando pouca oscilação, considerando que a partir desta faixa de dosagem de coletor não há mais seletividade na coleta, e por isso o teor se mantém semelhante ao de 150 g/t.

Contudo, para a dosagem de depressor de 800 g/t houve uma queda significativa do teor da amostra, isto se deve ao fato de ter uma maior depressão tanto de hematita quanto de quartzo numa quantidade expressiva, perdendo assim seletividade, e por isso há uma diminuição no teor.

Observa-se, portanto que o aumento do teor é acompanhado de uma diminuição na recuperação.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentado mostrou que é possível atingir uma boa recuperação mássica assim como um aumento de teor, através da flotação reversa de minério de ferro do depósito de Jambreiro, com a utilização de amido de milho como depressor e Flotigam EDA (eteramina) como coletor.

A análise feita pelo método da picnometria se mostrou eficiente, visto que o resultado de teor obtido através da fluorescência de raio-X se mostrou semelhante ao encontrado neste método.

O melhor resultado de teor (39,70% de Fe) foi alcançado com a dosagem de coletor de 150 g/t e dosagem de depressor de 200 g/t. Este resultado se deve ao fato de nesta condição haver uma maior depressão do mineral útil (hematita) e flotabilidade seletiva do mineral de ganga (quartzo).

A melhor recuperação alcançada 95,84% de concentrado foi com dosagem de 25g/t e 200 g/t de coletor e depressor, respectivamente. Porém o teor obtido neste ensaio foi de 32,14%, um enriquecimento de 1,01, considerado inviável para utilização do método de flotação.

Comparando-se com os resultados fornecidos pela empresa Centaurus Metals, que obtiveram por concentração gravítica em espirais uma recuperação mássica total de 38 a 40 % e teor para concentrado fino (-1mm) de 66% e concentrado grosso (-8+1mm) de 58%, pode-se concluir que o processo avaliado por este trabalho não é uma rota alternativa interessante, visto que o método de concentração gravítica para o mesmo minério é satisfatório e com custos de processo menores.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados alcançados sugerem a realização dos seguintes estudos futuros:

- Realização dos testes na célula de flotação DENVER, pois a utilização da célula CDC se mostrou ineficiente devido a cuba não ter dimensões apropriadas para o rotor utilizado.
- Avaliar o efeito da agitação, alterando a frequência do rotor (rpm) nos resultados da flotação, pois a agitação utilizada demonstrou visualmente um grande arraste das partículas de minério de ferro.
- Estudar condições operacionais da flotação buscando um aumentar no teor de ferro.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Armando Correa de.; PERES, Antônio Eduardo Clarck.; VIANA, Paulo Roberto de Magalhães.; OLIVEIRA, José Farias de. Flotação de Minérios de Ferro. In: CHAVES, Arthur Pinto. **A flotação no Brasil**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 13, p. 317-330.
- AZEVEDO, Úrsula Ruckkys de.; MACHADO, Maria Márcia Magela.; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim.; RENGER, Friedrich Ewald.; TREVISOL, Andréa.; BEATO, Décio Antônio Chaves. Geoparque do Quadrilátero Ferrífero – proposta. In: SILVA, Cássio Roberto da. **Geoparques do Brasil – propostas**. 1 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Cap. 7, p. 183-220.
- BATISTELI; Geraldo Magela Braga. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2007. 93 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).
- CARVALHO, Pedro Sergio Landim de.; SILVA, Marcelo Machado da.; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho.; MOSZKOWICZ, Jacques. Minério de Ferro. In: AMBROZIO, Antônio Marcos Hoelz. **BNDES Setorial 39**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2014. Cap. 6, p. 197-234.
- COSTA, Jesrael Luciano. **Seletividade na flotação de minérios ferríferos dolomíticos**. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2009. 123 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).
- COSTA, Samuel Ângelo Diógenes da. **Caracterização Química, Física, Mineralógica e Classificação de Solos Ricos em Ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Viçosa: Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, 2003. 71 p. (Dissertação, Mestrado, *Magister Scientiae*).
- FERREIRA, Gilson Ezequiel. **A competitividade da mineração de ferro no Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 54 p. (Série Estudos e Documentos, 50)
- IBRAM. Ferro. In: IBRAM. **Informação e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 7 ed. Brasília: IBRAM, 2012. Cap. 7, p. 32-37.
- JÚNIOR, Gerson Martins Bastos. **Uso de Analisadores Químicos Online para Controle de Processos na Concentração de Minérios de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2010. 85 p. (Dissertação, Especialização, Tratamento de Minérios).

LOPES, Gilmara Mendonça. **Flotação Direta de Minério de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2009. 176 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios e Resíduos).

LOPES, Gilmara Mendonça.; LIMA, Rosa Malena Fernandes. **Flotação inversa x flotação direta na concentração de minério de ferro**. In: BRUM, Antônio Schadach de.; SAMPAIO, Carlos Hoffmann. XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Gramado, 2009. v. 1, p. 345-352.

LOPES, Gilmara Mendonça.; LIMA, Rosa Malena Fernandes.; GONTIJO, Carlos de Figueiredo. **Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minérios de ferro de baixos teores, do Quadrilátero Ferrífero-MG**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo.v. 8, n. 2, p. 126-131, abr 2011.

MAZON, Ricardo. **Efeito do Tempo de Residência sobre a Recuperação Metálica da Flotação Colunar Reversa de Minério de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2006. 133 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).

MOREIRA, Albina da Silva. **Biossorção utilizando Alga Marinha (Sargassum sp.) Aplicada em Meio Orgânico**. Natal: Departamento de Engenharia Química, 2007. 103 p. (Dissertação, Doutorado, Engenharia Química).

NASCIMENTO, Débora Rosa. **Flotação Aniônica de Minério de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2010. 115 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).

PORTES, Andréa Mírian Costa. **Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 154 p. (Dissertação, Mestrado, Geotecnia).

ROSIÈRE, Carlos A.; JÚNIOR, Farid Chemale. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão**. Geonomos. Belo Horizonte. v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA; Sílvia Cristina.; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de minérios – Prática laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 570 p.

SANTOS, Elenir Souza; GAMA, Edinilton Moreira; FRANÇA, Robson Silva da; SOUZA, Anderson Santos; MATOS, Roberta Pereira. **Espectrometria de**

fluorescência de raios-X na determinação de espécies químicas. Enciclopédia Biosfera. Bahia. v. 9, p. 3413-3432, 2013.

SANTOS, Everton Pedroza dos. **Alternativa para o Tratamento de Ultrafinos de Minério de Ferro da Mina do Pico/MG por Flotação em Coluna.** Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2010. 136 f. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa).

SCNELLRATH, Juren; MONTE, Mariza Bezerra de Mello; SAMPAIO, João Alves; CUZZUOL, José Rômulo; PEREIRA, Antônio Maurício Gomes; PINTO, Alfredo Fodelis de Magalhães. **Ferro – Mina Fábrica - FERTECO.** Rio de Janeiro: CETEM/CTEC, 2002. 14 p.

SILVA, A. J. C. A.; MONTRESOR, G. C.; FITZHARDINGE, R. J.; MULLATI, J. C.; VERDE, D. C. S. **Mineralização em Ferro do Depósito Jambreiro, Guanhães-MG.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 47, 2014, Salvador.

SILVA, João Pedro da. **Caracterização dos Hidrociclones utilizados nas Etapas de Classificação dos Concentradores I e II da Samarco Mineração.** Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2014. 88 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).

SOUZA, Natasha Almeida Fernandes de. **Análise Crítica de Rotas de Processamento de Minérios de Ferro.** 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VERAS, Moacir Medeiros. **Influência do Tipo de Espumante nas Características de Espuma produzida na Flotação.** Recife: Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, 2010. 64p. (Dissertação, Mestrado, Minerais Industriais).

ANEXO A– Resultado dos testes de Flotação Reversa

ALIMENTAÇÃO

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,83	31,40	29,64	29,92	28,98
Mpic. + amostra (g)	33,88	33,43	31,65	32,36	31,00
Mpic. + amostra + água (g)	83,13	83,44	81,90	82,47	82,56
Mpic. + água (g)	81,71	82,03	80,49	80,75	81,13
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,05	2,03	2,01	2,44	2,02
M _{água} (g)	49,88	50,63	50,85	50,83	52,15
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996
Massa água (amostra)	49,25	50,01	50,25	50,11	51,56
Volume de água (cm ³)	49,46	50,21	50,45	50,33	51,78
Volume de sólidos (cm ³)	0,63	0,62	0,60	0,72	0,59
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,24	3,26	3,34	3,37	3,41
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,37				

C _{Fe3O2} (%)	45,53
C _{Fe} (%)	31,82

TESTE 1

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,83	31,41	29,65	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,01	33,47	31,82	31,96	31,58
Mpic. + amostra + água (g)	83,25	83,51	82,05	82,24	82,98
Mpic. + água (g)	81,76	82,09	80,56	80,79	81,13
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,18	2,06	2,17	2,03	2,6
M _{água} (g)	49,93	50,68	50,91	50,86	52,15
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,996	0,996
massa água (amostra)	49,24	50,04	50,23	50,28	51,40
Volume de água (cm ³)	49,40	50,19	50,37	50,47	51,62
Volume de sólidos (cm ³)	0,69	0,64	0,68	0,58	0,75
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,15	3,21	3,18	3,49	3,45
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,38				

Massa Alimentação (g)	629,91
Massa Concentração (g)	603,69
Massa Rejeito (g)	26,22
R _{massa}	95,84
R _{metalúrgica}	96,81
C _{Fe3O2} (%)	45,99
C _{Fe} (%)	32,14

Dosagens	
25 g/t	200 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
1,63 g	5,22 g
Coletor	Depressor

TESTE 2

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,83	31,4	29,63	29,92
Mpic. + amostra (g)	33,99	33,55	31,75	31,98
Mpic. + amostra + água (g)	83,26	83,57	82,02	82,27
Mpic. + água (g)	81,72	82,05	80,61	80,78
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,16	2,15	2,12	2,06
M _{água} (g)	49,89	50,65	50,98	50,86
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,999	0,996
Massa água (amostra)	49,27	50,02	50,27	50,29
Volume de água (cm ³)	49,47	50,20	50,34	50,48
Volume de sólidos (cm ³)	0,62	0,63	0,71	0,57
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,47	3,40	2,98	3,60
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,49			

Massa Alimentação (g)	648,83
Massa Concentração (g)	606,32
Massa Rejeito (g)	42,51
R _{massa}	93,45
R _{metalurgica}	104,93
C _{Fe3O2}	51,11
C _{Fe}	35,73

Dosagens	
75 g/t	200 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
4,90 g	5,22 g
Coletor	Depressor

TESTE 3

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,84	31,4	29,65	29,94
Mpic. + amostra (g)	33,99	33,48	31,83	32
Mpic. + amostra + água (g)	83,24	83,5	82,1	82,25
Mpic. + água (g)	81,7	82,02	80,49	80,77
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,15	2,08	2,18	2,06
M _{água} (g)	49,86	50,62	50,84	50,83
Dens.água (g/cm ³)	0,995	0,996	0,996	0,996
massa água (amostra)	49,250	50,020	50,270	50,250
Volume de água (cm ³)	49,48	50,23	50,48	50,47
Volume de sólidos (cm ³)	0,61	0,60	0,57	0,58
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,51	3,45	3,81	3,54
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,62			

Massa Alimentação (g)	645,42
Massa Concentração (g)	523,98
Massa Rejeito (g)	121,44
R _{massa}	81,18
R _{metalurgica}	101,28
C _{Fe3O2}	56,79
C _{Fe}	39,70

Dosagens	
150 g/t	200 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
9,79 g	5,22 g
Coletor	Depressor

TESTE 4

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,84	31,4	29,65	29,93
Mpic. + amostra (g)	33,91	33,58	31,75	31,96
Mpic. + amostra + água (g)	83,18	83,56	81,99	82,19
Mpic. + água (g)	81,71	82,03	80,49	80,76
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,07	2,18	2,1	2,03
M _{água} (g)	49,87	50,63	50,84	50,83
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,996	0,996
massa água (amostra)	49,270	49,980	50,240	50,230
Volume de água (cm ³)	49,49	50,18	50,45	50,45
Volume de sólidos (cm ³)	0,60	0,65	0,60	0,60
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,43	3,34	3,49	3,37
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,43			

Massa Alimentação (g)	638,57
Massa Concentração (g)	593,97
Massa Rejeito (g)	44,6
R _{massa}	93,02
R _{metalúrgica}	98,62
C _{Fe3O2}	48,26
C _{Fe}	33,74

Dosagens	
25 g/t	400 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
1,63 g	10,44 g
Coletor	Depressor

TESTE 5

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,82	31,4	29,63	29,92
Mpic. + amostra (g)	33,84	33,54	31,66	32,95
Mpic. + amostra + água (g)	83,16	83,55	81,91	82,92
Mpic. + água (g)	81,71	82,03	80,45	80,77
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,02	2,14	2,03	3,03
M _{água} (g)	49,89	50,63	50,82	50,85
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,995	0,996
massa água (amostra)	49,320	50,010	50,250	49,970
Volume de água (cm ³)	49,52	50,21	50,48	50,17
Volume de sólidos (cm ³)	0,57	0,62	0,57	0,88
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,53	3,44	3,55	3,43
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,50			

Massa Alimentação (g)	641,9
Massa Concentração (g)	558,99
Massa Rejeito (g)	82,91
R _{massa}	87,08
R _{metalurgica}	99,01
C _{Fe3O2}	51,76
C _{Fe}	36,18

Dosagens	
75 g/t	400 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
4,90 g	10,44 g
Coletor	Depressor

TESTE 6

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,83	31,4	29,64	29,93
Mpic. + amostra (g)	33,96	33,75	31,73	32,98
Mpic. + amostra + água (g)	83,22	83,68	81,97	82,93
Mpic. + água (g)	81,71	82,02	80,46	80,76
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,13	2,35	2,09	3,05
M _{água} (g)	49,88	50,62	50,82	50,83
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,995	0,996
massa água (amostra)	49,260	49,930	50,240	49,950
Volume de água (cm ³)	49,47	50,14	50,47	50,17
Volume de sólidos (cm ³)	0,62	0,69	0,58	0,88
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,42	3,39	3,59	3,45
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,49			

Massa Alimentação (g)	650,28
Massa Concentração (g)	503,36
Massa Rejeito (g)	146,92
R _{massa}	77,41
R _{metalurgica}	86,60
C _{Fe3O2}	50,93
C _{Fe}	35,60

Dosagens	
150 g/t	400 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
9,79 g	10,44 g
Coletor	Depressor

TESTE 7

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,84	31,39	29,62	29,91
Mpic. + amostra (g)	33,69	33,16	31,61	31,92
Mpic. + amostra + água (g)	83,14	83,26	81,84	82,17
Mpic. + água (g)	81,73	82,07	80,53	80,81
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	1,85	1,77	1,99	2,01
M _{água} (g)	49,89	50,68	50,91	50,9
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,450	50,100	50,230	50,250
Volume de água (cm ³)	49,65	50,25	50,37	50,40
Volume de sólidos (cm ³)	0,44	0,58	0,68	0,65
Densidade do sólido (g/cm ³)	4,19	3,04	2,92	3,08
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,44			

Massa Alimentação (g)	631,93
Massa Concentração (g)	582,23
Massa Rejeito (g)	49,7
R _{massa}	92,14
R _{metalurgica}	98,47
C _{Fe3O2}	48,65
C _{Fe}	34,01

Dosagens	
25 g/t	800 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
1,63 g	20,89 g
Coletor	Depressor

TESTE 8

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,82	31,4	29,63	29,93
Mpic. + amostra (g)	34,05	33,56	31,66	31,95
Mpic. + amostra + água (g)	83,31	83,58	81,95	82,22
Mpic. + água (g)	81,73	82,05	80,53	80,81
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,23	2,16	2,03	2,02
M _{água} (g)	49,91	50,65	50,9	50,88
Dens.água (g/cm ³)	0,996	0,996	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,260	50,020	50,290	50,270
Volume de água (cm ³)	49,44	50,20	50,44	50,44
Volume de sólidos (cm ³)	0,65	0,63	0,61	0,61
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,42	3,42	3,32	3,30
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,38			

Massa Alimentação (g)	648,82
Massa Concentração (g)	563,53
Massa Rejeito (g)	85,29
R _{massa}	86,85
R _{metalurgica}	87,88
C _{Fe3O2}	46,06
C _{Fe}	32,20

Dosagens	
75 g/t	800 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
4,90 g	20,89 g
Coletor	Depressor

TESTE 9

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Mpic. Seco (g)	31,83	31,41	29,65	29,93
Mpic. + amostra (g)	34,01	33,47	31,82	32,04
Mpic. + amostra + água (g)	83,28	83,61	82,05	82,31
Mpic. + água (g)	81,8	82,13	80,6	80,75
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05

M _{sólido} (g)	2,18	2,06	2,17	2,11
M _{água} (g)	49,97	50,72	50,95	50,82
Dens.água (g/cm ³)	0,998	0,998	0,998	0,995
massa água (amostra)	49,270	50,140	50,230	50,270
Volume de água (cm ³)	49,39	50,25	50,33	50,50
Volume de sólidos (cm ³)	0,70	0,58	0,72	0,55
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,11	3,54	3,01	3,82
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,49			

Massa Alimentação (g)	643,92
Massa Concentração (g)	510,33
Massa Rejeito (g)	133,59
R _{massa}	79,25
R _{metalurgica}	83,81
C _{Fe3O2}	48,14
C _{Fe}	33,65

Dosagens	
150 g/t	800 g/t
Coletor	Depressor

Massa adicionada	
9,79 g	20,89 g
Coletor	Depressor