



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

VICTOR LEONARDO DE OLIVEIRA SOARES

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

ARAXÁ – MG

2015

VICTOR LEONARDO DE OLIVEIRA SOARES

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

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Me. Leandro Henrique
Santos

ARAXÁ – MG

2015

VICTOR LEONARDO DE OLIVEIRA SOARES

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

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: ____/ ____/ ____

Banca Examinadora:

Leandro Henrique dos Santos – Presidente da Banca Examinadora
Professor Mestre – CEFET-MG – Orientador

Michel Melo de Oliveira
Professor Mestre – CEFET-MG

Maria Auxiliadora Mendes de Aguiar
Professora Mestre – CEFET-MG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado o que tenho de mais precioso, minha vida.

Ao Prof. Me. Leandro Henrique Santos, meu orientador, pela colaboração, paciência e seus conhecimentos repassados durante todo o desenvolvimento do trabalho.

À minha avó Estael pelas experiências e ensinamentos.

Agradeço ao meu pai, Benedito Carlos, e a minha mãe, Cristina, por seu amor, dedicação, força e perseverança. Também por serem minha referência de caráter, honestidade e trabalho. E aos meus irmãos, Hadler e Dalmer, pelo companherismo, lealdade e conselhos.

À minha namorada Jéssica, por estar sempre ao meu lado, apoiando e incentivando, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus companheiros Mariana, Rogério, Lucas, Artur e Patrick que de alguma forma auxiliaram nas práticas laboratoriais.

Ao CEFET-MG, que me proporcionou a oportunidade de desenvolver a parte prática deste trabalho, através do Laboratório de Tratamento de Minérios, no qual agradeço também ao João Vitor, técnico responsável pelo mesmo, por total disponibilidade e prontidão.

À empresa de capital australiano *Centaurus Metals* Brasil Mineração por me proporcionar a oportunidade de aperfeiçoamento e busca do conhecimento, ao ceder as amostras utilizadas no trabalho.

RESUMO

Devido à grande demanda por minério de ferro e à baixa disponibilidade deste recurso atualmente, faz-se necessário o estudo de novas técnicas no que se diz respeito aos métodos de concentração deste recurso. Dentre os métodos de concentração aplicáveis ao minério de ferro, um dos mais utilizados corresponde à flotação. O presente trabalho visa avaliar a concentração do minério de ferro pelo método da flotação direta. Na etapa de avaliação das variáveis operacionais, variou-se as dosagens de coletor (ácido graxo) entre 800, 1200 e 1600 g/t e de depressor (silicato de sódio) entre 300, 600 e 900 g/t em pH 7,00. O minério investigado é proveniente do depósito mineral ferrífero denominado Depósito Jambreiro, distante cerca de 20 km do município de Guanhães – MG. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG, Campus IV, Araxá-MG. O melhor resultado encontrado corresponde à dosagem intermediária de depressor (600 g/t) e dosagem máxima de coletor (1600 g/t), obtendo uma recuperação metalúrgica de 64,27 % com 35,61% de teor de ferro. Diante do resultado pouco expressivo, faz-se necessário o desenvolvimento de novas metodologias para a realização da flotação direta de minério de ferro.

Palavras-chave: Concentração. Minério de ferro. Flotação. Flotação direta.

ABSTRACT

Due to the high demand for iron ore and the currently low availability of this resource, it is necessary the study of new techniques relating to iron ore concentrating methods. Among the available iron ore concentrating methods, one of the most used is flotation. The main purpose of this study is to evaluate the concentration of iron ore by the method direct flotation. In the operational variables evaluation stage, it was varied the collector dosages (fatty acid) between 800, 1200 and 1600 g/t and depressant (sodium silicate) dosages between 300, 600 and 900 g/t in pH 7,00. The studied iron ore came from the mineral deposit called Jambreiro Deposit, located about 20 km from the city of Guanhães – MG. The experiments were conducted in the mineral treatment laboratory of CEFET-MG, campus IV, Araxá-MG. The best result was found for an intermediate depressant dosage of 600 g/t and a maximum collector dosage of 1600 g/t, which resulted in a metallurgical recovery of 64.27% with iron grade of 35.61%. As the result was not very significant, it is necessary the development of new methods for performing the direct flotation of iron ore.

Keywords: Concentration. Iron ore. Flotation. Direct flotation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

A) FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama de classificação das formações ferríferas e rochas relacionadas.....	16
Figura 3.2 – Distribuição espacial dos principais depósitos ferríferos de idade pré-cambriana.....	17
Figura 3.3 – Adsorção de reagentes nas interfaces.....	22
Figura 3.4 – Efeito do tipo e concentração do soluto na variação da tensão superficial.....	24
Figura 3.5 – Dupla camada elétrica.....	25
Figura 3.6 – Célula mecânica ou convencional, modelo Wemco.....	31
Figura 3.7 – Células pneumáticas fabricadas pela <i>Maelgwyn Mineral Services</i> (a) <i>V-cell</i> (b) <i>G-cell</i>	32
Figura 3.8 – Coluna de flotação.....	33
Figura 3.9 – Espuma de flotação de minério de ferro.....	34
Figura 3.10 – Fórmula estrutural geral dos ácidos carboxílicos.....	37
Figura 4.1 – Fluxograma de preparação das amostras.....	39
Figura 4.2 – Pilha cônica e pilha cônica dividida em quatro partes.....	40
Figura 4.3 – Quarteador Jones (vista superior e lateral).....	40
Figura 4.4 – Moinho de bolas.....	41
Figura 4.5 – Flotado na bandeja e afuntado na cuba (A) e espuma clara (B).....	48

B) GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Análise granulométrica da alimentação da flotação.....	51
Gráfico 5.2 – Recuperação metalúrgica, variando-se a concentração de depressor para diversas concentrações de coletor.....	52
Gráfico 5.3 – Recuperação metalúrgica, variando-se a concentração de coletor para diversas concentrações de depressor.....	53
Gráfico 5.4 – Recuperação em massa, variando-se a concentração de depressor para diversas concentrações de coletor.....	54

Gráfico 5.5 – Recuperação em massa, variando-se a concentração de coletor para diversas concentrações de depressor.....55

LISTA DE TABELAS E QUADROS

A) TABELAS

Tabela 3.1 - Flotação de minérios de ferro usando ácido oléico ou oleato de sódio e oleato de potássio como coletores.	36
Tabela 4.1 – Peneiras utilizadas na análise granulométrica das amostras.	43
Tabela 4.2 – Planejamento experimental dos testes de flotação.	44
Tabela 4.3 – Dados operacionais a serem utilizados nos testes de flotação.	45
Tabela 4.4 – Dosagem de reagentes.	46
Tabela 5.1 – Caracterização química do minério de ferro estudado.	50
Tabela 5.2 – Caracterização química (minério de ferro).	50
Tabela 5.3 – Resultados peneiramento.....	51

B) QUADROS

Quadro 3.1 – Principais minerais de ferro.	14
Quadro 3.2 - Classificação paleoambiental de Kimberley (1978).....	16
Quadro 3.3 – Principais reagentes de flotação.....	28
Quadro 3.4 – Principais reagentes utilizados em algumas empresas brasileiras.....	29
Quadro 3.5 – Principais coletores catiônicos utilizados para flotação de minério de ferro.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Geologia do minério de ferro	15
3.1.1 Depósito Jambreiro, Guanhães – MG	18
3.2 Flotação.....	19
3.2.1 Etapas da flotação.....	20
3.2.2 Química interfacial na flotação	21
3.3 Reagentes	26
3.4 Equipamentos de flotação	30
3.4.1 Células mecânicas	30
3.4.2 Células pneumáticas	31
3.4.3 Coluna de flotação	32
3.5 Flotação de minério de ferro.....	34
3.5.1 Flotação reversa.....	34
3.5.2 Flotação direta.....	35
3.6 Fluorescência de raio X.....	398
4 METODOLOGIA.....	39
4.1 Origem e preparação das amostras	39
4.1.1 Homogeneização e quarteamento	39
4.1.2 Moagem	41
4.1.3 Peneiramento	41
4.1.4 Deslamagem	42
4.1.5 Homogeneização e quarteamento (segunda etapa)	42

4.1.6 Análise química por Fluorescência de raios X.....	42
4.1.7 Análise granulométrica.....	42
4.1.8 Análise química baseada nos testes por picnometria	43
4.2 Planejamento dos experimentos	43
4.2.1 Preparação dos reagentes	45
4.2.2 Testes de flotação	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 Comparação entre os resultados da caracterização química por fluorescência de raio x e por picnometria.....	50
5.2 Resultados da análise granulométrica	51
5.3 Resultados dos testes de flotação.....	52
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	59
ANEXO – TABELAS DAS PICNOMETRIAS E ANÁLISES QUÍMICAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Os minérios de ferro são classificados como rochas a partir das quais se pode extrair o ferro metálico de maneira economicamente viável. Este metal corresponde ao quarto elemento mais abundante no planeta, estando atrás apenas do silício, alumínio e o oxigênio (DEVANEY, 1985 *apud* SOUZA, 2010). O minério de ferro pode ser empregado na fabricação de diversos materiais, além de sua aplicação nas indústrias de cimento e química. Entretanto, grande parte da produção é destinada à indústria de aço, que por si só é responsável por mais de 97% do consumo de minério de ferro (MAIA, 2011).

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, contando com uma das maiores reservas mundiais. Os depósitos nacionais apresentam elevado teor, associado a menores teores de componentes indesejados para os processos siderúrgicos (*e.g.* enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos). como por exemplo enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos. Tal cenário torna a indústria do minério de ferro no Brasil uma das mais competitivas do mundo. Em 2011, o Brasil possuía aproximadamente 18% das reservas mundiais, cerca de 29 bilhões de toneladas deste recurso. O país possui destaque mundial em relação 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).

A concentração de minérios se baseia na separação de minerais através das diversidades entre as propriedades que estes minerais apresentam entre si. Sendo as operações realizadas a úmido na maioria das vezes, o objetivo é remover a maior fração da ganga presente no minério. Dentre as principais propriedades diferenciadoras entre os minerais, destacam-se o peso específico (densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. Em várias situações, quando existem mais de um mineral de interesse, faz-se necessária a separação seletiva (LUZ *et al*, 2004).

Na concentração dos minérios de ferro podem ser utilizadas várias operações, que geralmente operam em conjunto. As características físicas, químicas e mineralógicas do minério definem a seleção do método a ser utilizado na concentração mineral. Cominuição, classificação e deslamagem são empregadas, principalmente, para a preparação/concentração de minério de alto teor. Operações de concentração, tais como flotação, são utilizadas quando o minério apresenta baixo teor, visando aumentar a proporção entre o mineral de interesse e os contaminantes SiO_2 , Al_2O_3 (NASCIMENTO, 2010).

A flotação vem sendo amplamente utilizada na concentração dos minérios de ferro. O método consiste na flutuação de um material hidrofóbico sobre uma fase líquida, enquanto o material hidrofílico se deposita no fundo do recipiente. A operação é empregada juntamente com a agitação da suspensão e borbulhamento de ar através da mesma (RABOCKAI, 1979 *apud* NASCIMENTO, 2010).

O método de flotação direta, empregando reagentes aniônicos, foi o primeiro utilizado para a concentração de minérios de ferro constituídos principalmente por óxidos (MONTES-SOTOMAYOR *et al*, 1998 *apud* SANTOS, 2010). O emprego da flotação aniônica direta é indicada para minérios de baixo teor ou rejeitos descartados para barragem. Durante a operação desta são utilizados, principalmente, os ácidos graxos como coletores. Já os depressores ainda são estudados, pois a depressão dos minerais de ganga ainda se apresenta como um desafio para a indústria mineral (ARAUJO *et al*, 2004 *apud* SANTOS, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade da concentração de minério de ferro proveniente do depósito do Jambreiro, situado em Guanhães-MG, via flotação direta.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da variável dosagem de coletor nos testes de flotação direta para minério de ferro;
- Avaliar a influência da variável dosagem de depressor nos testes de flotação direta para minério de ferro;
- Avaliar o efeito sinérgico da variação destes parâmetros, segundo o planejamento fatorial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ferro corresponde ao quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, compondo, também, parte significativa de seu núcleo. Este elemento é considerado como um dos insumos de utilização mais antiga, que data aproximadamente do período Neolítico, sendo evidenciada por artefatos de ferro encontrados em sítios arqueológicos. Acredita-se que sua obtenção não seria difundida, ocorrendo quase que exclusivamente pela aparição em meteoritos. Assim, sua utilização era evidenciada principalmente em rituais religiosos, devido à raridade de sua ocorrência (MEDEIROS, 2010).

Segundo Takehara (2004), a economicidade do aproveitamento de um mineral de ferro se deve, principalmente, ao teor deste metal no mineral e à forma de ocorrência do depósito mineral na rocha encaixante. As principais classes minerais de ferro economicamente aproveitáveis são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Os minerais mais comumente aproveitados como minerais-minério em um minério de ferro correspondem à hematita, goethita, magnetita, siderita e pirita. Os principais minerais de ferro estão listados no Quadro 3.1, juntamente com algumas de suas características.

Quadro 3.1 – Principais minerais de ferro.

Classe	Nome	Fórmula Química	Teor de Fe (%)	
Óxidos	Magnetita	Fe_2O_4	72,4	
	Hematita	F_2O_3	69,9	
	Limonita	Goethita	HFeO_2	62,8
		Lepidocrocita	FeO(OH)	62,85
Carbonato	Siderita	FeCO_3	48,2	
Sulfetos	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
Silicatos	Fayalita	$\text{Fe}^{2+}_2(\text{SiO}_4)$	54,81	
	Laihunita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_2$	47,64	
	Greenalita	$\text{Fe}^{2+}_{2,3}\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{2,2}\text{O}_5(\text{OH})_{3,3}$	44,14	
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	
	Fe-antofilita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	

Fonte: TAKEHARA, 2004 (adaptado).

As reservas mundiais de ferro constituem um volume considerável de minério, representando cerca de 170 bilhões de toneladas. As reservas brasileiras representam 13,6% das reservas mundiais, com teor médio de 49,0% de Fe. Ocorrem principalmente nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, sendo estes primeiros os principais produtores (DNPM, 2014).

3.1 Geologia do minério de ferro

Segundo Takehara (2004), os depósitos de minério de ferro podem ser classificados em cinco classes geológicas principais, de acordo com sua litologia e processo de formação. Assim, dividem-se em:

- depósitos ferríferos acamadados;
- depósitos gerados por soluções hidrotermais;
- depósitos relacionados ao vulcanismo;
- depósitos relacionados ao metamorfismo e/ou deformação;
- depósitos formados pelo intemperismo e acúmulo superficial.

Beukes (1973) *apud* Raposo (1996) diferenciou rochas sedimentares ricas em ferro (com mais de 15% de Fe) de rochas sedimentares ferrosas (com menos de 15% de Fe). Já as rochas sedimentares ricas em ferro precipitadas química ou bioquimicamente, pertencentes à família das rochas sedimentares com cherte¹ e minerais de Fe recebem um nome geral de formação ferrífera. Definiu, no mesmo artigo, uma variedade litológica comum de formação ferrífera que consiste de mesobandas de cherte se alternando ritmicamente com mesobandas de minerais de ferro como formação ferrífera bandada.

Beukes (1973) *apud* Raposo (1996) propõe, ainda, um diagrama para a classificação dos depósitos ferríferos. Tal classificação é feita com base nas proporções de minerais de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio, argilominerais coloidais e cherte, conforme mostrado pela Figura 3.1.

¹ Rocha clara, constituída por sílica criptocristalina.

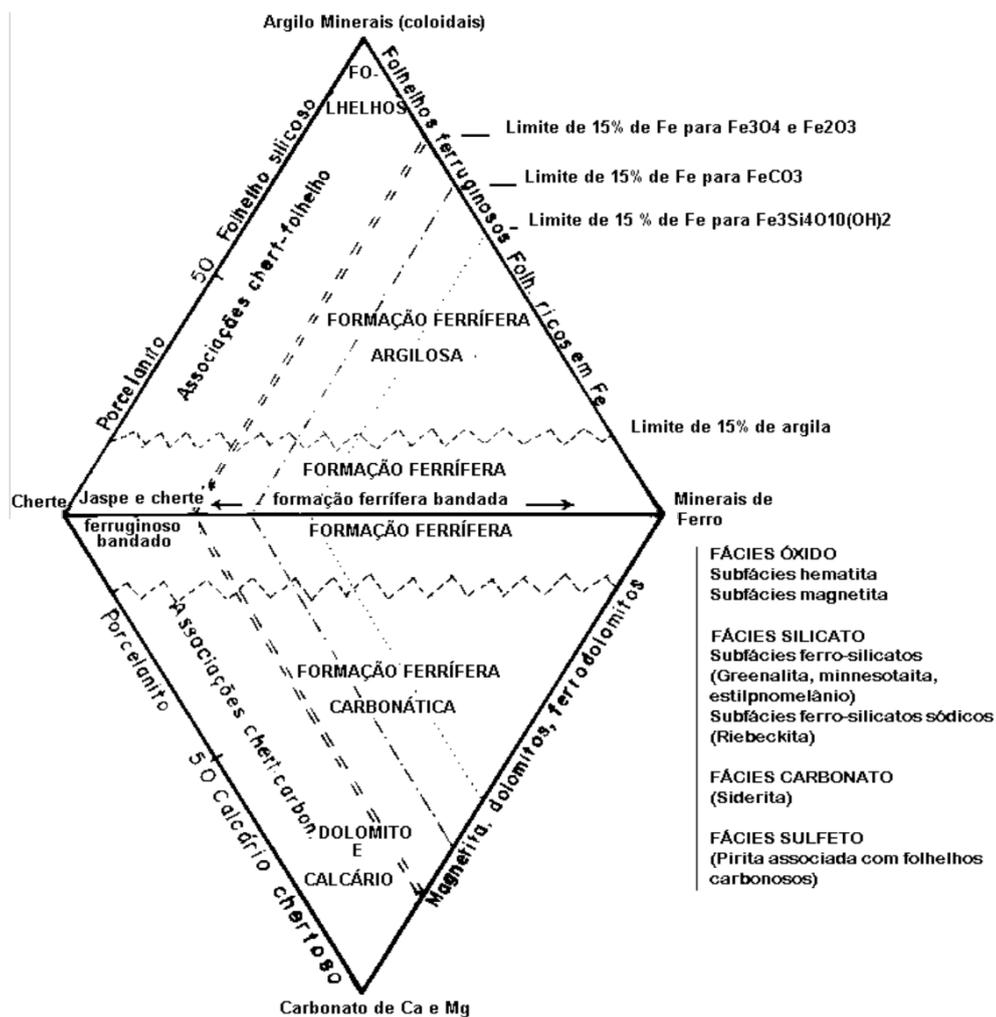


Figura 3.1 – Diagrama de classificação das formações ferríferas e rochas relacionadas.
Fonte: RAPOSO, 1996, p. 8.

Quadro 3.2 - Classificação paleoambiental de Kimberley (1978).

Nome	Características
Formações ferríferas de plataforma vulcânica rasa.	Ricas em cherte, predominantemente arqueanas e paleozóicas.
Formações ferríferas de plataforma marinha aberta, ricas em sedimentos químicos e pobres em metazoários.	Ricas em cherte, bandadas, tipo mais abundante no Proterozóico Inferior.
Formações ferríferas arenosas, argilosas e oolíticas de mar raso ponteadas de ilhas.	Pobres em cherte, predominantemente arqueanas.
Formações ferríferas de águas profundas.	Ricas em cherte, predominantemente arqueanas.
Formações ferríferas de mares rasos, arenosas e pobres em oolitos.	Pobres em cherte, ricas em glauconita, somente no Fanerozóico.
Formações ferríferas de pântanos carbonosos.	Pobres em cherte, não oolíticas, somente no Fanerozóico

Fonte: RAPOSO, 1996, p. 10, adaptado pelo autor.

Dentre tais tipos de formação ferrífera, o representante de maior viabilidade econômica corresponde às denominadas formações ferríferas bandadas ou *banded iron formations (BIF)*. Tal importância se justifica pelo porte dos depósitos minerais formados, além de teores consideravelmente altos. Além disso, sua distribuição global é ampla, como mostrado pela Figura 3.2. Estes depósitos foram formados, em sua imensa maioria, durante o período Pré-Cambriano, tendo sua deposição ocorrida em três períodos principais, sendo eles (TAKEHARA, 2004):

- Arqueano: 3400 a 3000 Ma;
- Paleoproterozóico: 2700 a 2400 Ma;
- Neoproterozóico: 1000 a 500 Ma.

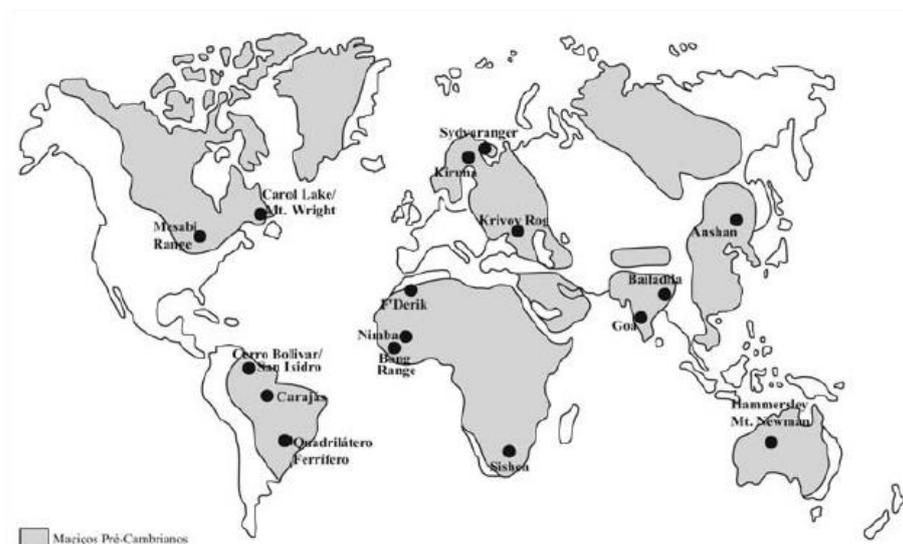


Figura 3.2 – Distribuição espacial dos principais depósitos ferríferos de idade pré-cambriana.
Fonte: TAKEHARA, 2004.

As discussões quanto à gênese destas formações ferríferas têm sido bastante controversas. O único ponto em comum acordo seria que esta esteja associada à sedimentação química das formações, denotadas pela ausência de componentes clásticos, assim como a relativa uniformidade em sua composição química (TAKEHARA, 2004).

Assume-se que as formações ferríferas bandadas tenham se formado em ambiente marinho, com metal proveniente do ferro dissolvido na água do mar em ambiente anóxico, no qual o oxigênio em qualquer de suas formas é ausente. A partir das variações da temperatura, pH e das condições de oxirredução do ambiente de formação, teria sido gerado o bandamento da rocha. Ou seja, a deposição de sedimentos portadores de ferro ou portadores de sílica. A alteração na disponibilidade de oxigênio é atribuída à multiplicação das cianobactérias no oceano e sua atividade fotossintética (BIONDI, 2003).

3.1.1 Depósito Jambreiro, Guanhães – MG

As amostras empregadas no presente trabalho foram coletadas no depósito mineral ferrífero denominado Depósito Jambreiro. Segundo Silva *et al.* (2014), este depósito está situado na localidade de São João Evangelista, distante cerca de 20 km do município de Guanhães – MG. Seus recursos minerais foram estimados em cerca de 128 milhões de toneladas de minério de ferro com teor médio de 27,2% Fe, com reservas provada e provável somando 48,5 Mt de minério com teor médio de 28,1% Fe.

Geologicamente, o depósito está inserido na Faixa de Dobramentos Araçuaí, pertencente à Província da Mantiqueira. O corpo mineralizado é parte integrante da Formação Média do Grupo Guanhães, que compõe os terrenos granito-gnáissicos do Complexo Guanhães (SILVA *et al.*, 2014).

Considera-se que o depósito apresente morfologia relativamente homogênea, com teores de Fe variando entre 25% e 35% em rocha gnáissica. Sua porção superficial foi alterada de forma significativa pelo intemperismo, até profundidades aproximadas de 60m a 80m, enriquecendo supergenicamente o minério superficial e tornando-o friável. Assim, a operação de mina é possível através de desmonte mecânico, dispensando a utilização de explosivos, vindo a ser realizada, futuramente, pela empresa de capital australiano *Centaurus Metals Brasil* Mineração (SILVA *et al.*, 2014).

3.2 Flotação

A operação de flotação apresenta desenvolvimento relativamente recente na tecnologia mineral, principalmente quando comparada aos outros métodos de concentração de minérios, tendo sido concebida no século XIX e aperfeiçoada principalmente ao longo dos séculos XX e XXI. A técnica possui grande aplicabilidade e precisão, podendo ser utilizada no tratamento de minérios mais complexos, mais finos e com teores relativamente baixos, além de poder ser utilizada em grande escala (CALDARA e CORREA, 2010).

A técnica pode ser definida, em linhas gerais, como um processo de separação realizado a partir de uma suspensão sólido-líquido denominada polpa, através da injeção de bolhas de ar, comprimido ou não, na mesma. Baseia-se nas características superficiais dos minerais a serem separados, sendo a hidrofobicidade a propriedade diferenciadora necessária para fazer com que os dois produtos, concentrado e rejeito, percorram diferentes rotas no processo industrial utilizado. Assim, a hidrofobicidade, aliada a um equipamento adequado, confere separabilidade dinâmica ao processo de flotação (OLIVEIRA e SOUZA, 2008).

A hidrofobicidade de uma partícula mineral está associada à sua molhabilidade pela água. Um mineral é tanto mais hidrofóbico quanto menos afinidade este apresentar pelo meio aquoso. Tal propriedade está associada à polaridade dos compostos envolvidos no processo, baseando-se na proposição de que compostos polares apresentam maior afinidade por compostos polares, e os apolares pelos apolares. Assim, com o aumento da apolaridade da superfície do mineral, aumenta-se a hidrofobicidade, diminuindo a afinidade pela água e aumentando a afinidade pelo ar, sendo este de caráter apolar (FAGURY NETO, 2012). Assim, na operação de flotação, partículas hidrofílicas (não-hidrofóbicas) permanecerão em suspensão na polpa, enquanto partículas hidrofóbicas serão transportadas pelas bolhas de ar que constituem o meio gasoso no processo.

A imensa maioria dos minerais apresenta características de superfície que a classificam como naturalmente hidrofílica, sendo a grafita (C), a molibdenita (MoS_2) e o talco ($\text{Mg}(\text{Si}_3\text{O}_{20})(\text{OH})_4$), alguns exemplos dos poucos minerais naturalmente

hidrofóbicos. Ainda assim, a simples passagem do fluxo de ar pela polpa não é suficiente para que ocorra a flotação efetiva destes minerais ditos naturalmente hidrofóbicos (FAGURY NETO, 2012).

Segundo Fagury Neto (2012), a adição de reagentes químicos à suspensão se faz necessária para obtenção de um efetivo controle dos parâmetros operacionais do processo. A partir da ação de tais reagentes, torna-se possível a indução do caráter hidrofóbico aos minerais naturalmente hidrofílicos, a geração de uma espuma estável para melhor transporte dos minerais coletados pelas bolhas, a supressão da hidrofobização em minerais indesejados e o controle das características físico-químicas do meio em que a flotação será realizada.

3.2.1 Etapas da flotação

Para que a flotação ocorra de maneira satisfatória, é necessário que o processo atuante sobre o material possibilite a ocorrência de três etapas, sendo estas denominadas colisão, adesão e transporte. Cada uma das etapas influencia diretamente na cinética e produtividade do processo (BALTAR, 2010).

3.2.1.1 Colisão

A colisão ocorre pelo contato efetivo da partícula sólida com a bolha de ar, podendo gerar a interface sólido-gás, na qual as partículas hidrofóbicas serão concentradas. Este fenômeno não apresenta caráter seletivo, sendo a etapa da flotação responsável pela recuperação mássica do minério (BALTAR, 2010).

A probabilidade de colisão está diretamente interligada com o aumento da turbulência da polpa e do tamanho da partícula, além da diminuição do tamanho da bolha (BALTAR, 2010).

3.2.1.2 Adesão

A adesão da partícula mineral à bolha ocorre somente se a partícula estiver devidamente hidrofobizada. A interface sólido-gás (mineral/bolha) deve surgir,

substituindo as interfaces sólido/líquido (mineral-água) e gás/líquido (bolha-água). Para que esta seja formada, é necessária a formação de um ângulo de contato θ mínimo entre o mineral e a bolha. Além disso, o tempo de contato deve ser suficiente para que haja o afinamento da película de água sobre a bolha e sua ruptura, fazendo com que a partícula mineral se acople ao meio gasoso (BALTAR, 2010).

A probabilidade de adesão aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, o aumento da velocidade de agitação da polpa (até um determinado limite prático) e da hidrofobicidade da superfície mineral, além da diminuição do tamanho das bolhas, (BALTAR, 2010).

3.2.1.3 Transporte

A etapa de transporte corresponde ao deslocamento do agregado partícula-bolha através da polpa até a zona de espuma, próxima à superfície da mesma. Para que este fenômeno ocorra satisfatoriamente, o empuxo do agregado partícula-bolha deve ser maior que o peso da partícula. Além disto, a partícula deve se manter aderida à bolha durante toda esta etapa, até que seja recuperada na zona de espuma (BALTAR, 2010).

A probabilidade de transporte aumenta com a diminuição da turbulência da polpa e do tamanho da partícula, além do aumento da hidrofobicidade da superfície mineral e tamanho da bolha (BALTAR, 2010).

3.2.2 Química interfacial na flotação

Tendo em vista que a propriedade diferenciadora do processo de concentração por flotação correspondente à característica de superfície das partículas minerais, faz-se necessário o entendimento de alguns fenômenos interfaciais para sua melhor compreensão. Fagury Neto (2012) propõe que a transição de propriedades entre duas fases acontece de maneira gradativa ao longo de uma região espacial, que apresenta uma de suas dimensões excessivamente reduzida, designada como interface.

Considerando que existem três estados físicos que compõem as fases presentes num sistema de flotação, há cinco interfaces presentes. São elas: sólido/líquido, sólido/gás, sólido/sólido, líquido/líquido e líquido/gás. Os principais fenômenos de superfície responsáveis pela geração das condições necessárias à flotação são a adsorção, a tensão superficial e o potencial zeta (FAGURY NETO, 2012).

3.2.2.1 Adsorção

A adsorção pode ser definida como a concentração de determinada espécie química em uma interface (FAGURY NETO, 2012). Na flotação, os diversos reagentes utilizados adsorvem na interface na qual devem agir. Dentre estas interações, os coletores atuam na interface sólido/líquido, espumantes na interface líquido/gás, dentre outros (Figura 3.3). Tal grandeza pode ser mensurada através das isotermas de adsorção, que medem a concentração do composto na solução a uma dada temperatura.

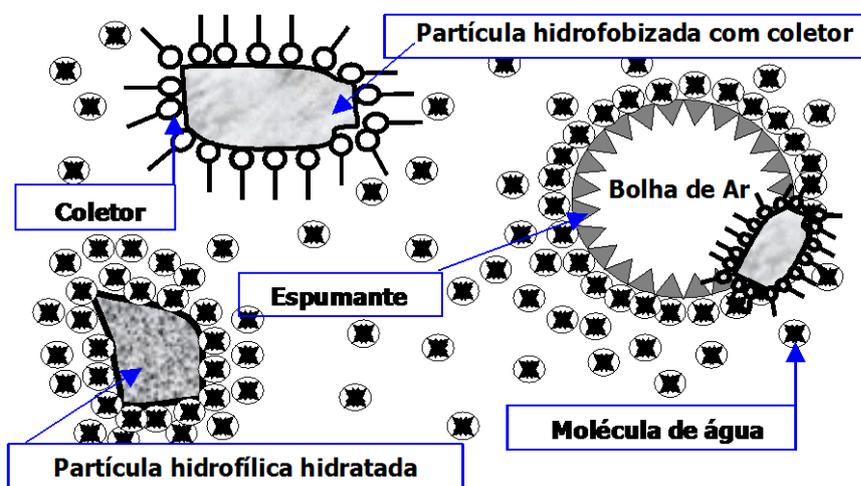


Figura 3.3 – Adsorção de reagentes nas interfaces.
Fonte: SUTULOV, 1963 *apud* OLIVEIRA e SOUZA, 2008.

O fenômeno da adsorção pode ser classificado como físico ou químico. A adsorção química é resultante da afinidade entre um íon da superfície da partícula mineral e um íon da fase líquida, de modo que ocorra uma reação química, gerando um novo composto químico na superfície mineral. Este tipo de adsorção apresenta características específicas, dentre elas, alta energia envolvida, seletividade, sendo

irreversível. Para que este tipo de interação ocorra, a mesma exige um tempo de contato mínimo entre as espécies envolvidas (FAGURY NETO, 2012).

A adsorção física corresponde àquela resultante de interações eletrostáticas (Van der Waals) entre as espécies. Assim, as espécies químicas envolvidas mantêm sua individualidade. Este tipo de adsorção se apresenta como sendo pouco energética, pouco seletiva, reversível e rápida (FAGURY NETO, 2012).

3.2.2.2 *Tensão superficial*

A tensão superficial (γ) é causada pelo desequilíbrio de forças na interface líquido/gás, sendo definida como uma força resultante, com direção perpendicular à superfície do líquido e sentido para o interior da fase gasosa. Segundo LUZ *et al.* (2004) o trabalho reversível necessário para criar uma unidade de área da superfície entre duas fases é definido termodinamicamente como tensão superficial ou interfacial γ , sendo mensurada em unidades de força por comprimento (N.m^{-1} , dinas.cm^{-1}).

Durante a operação de flotação, a tensão superficial está relacionada à superfície da bolha, no sentido de estabilizá-la para maior eficiência durante a etapa de transporte. Esta variável pode ser controlada através da adição dos reagentes denominados tensoativos ou surfactantes (e.g. espumantes) uma vez que estes agem na interface de modo a diminuir sua área superficial. Esta é fortemente influenciada pela concentração de solutos, sendo necessária atenção quanto à ação de eletrólitos, pois estes podem desestabilizar a espuma através do aumento da tensão superficial, conforme apresentado na Figura 3.4 (LUZ *et al.*, 2004).

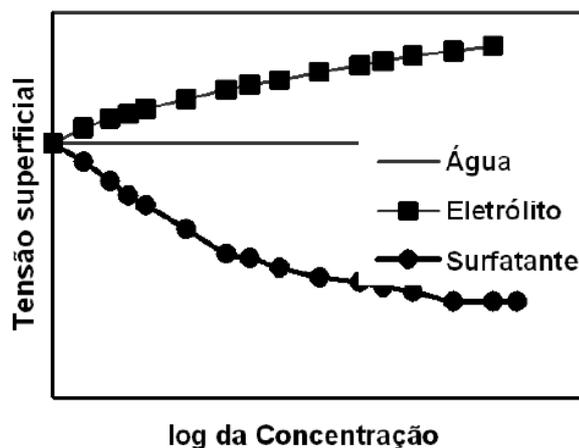


Figura 3.4 – Efeito do tipo e concentração do soluto na variação da tensão superficial.
Fonte: LUZ *et al.*, 2004.

3.2.2.3 Potencial zeta

Para subsidiar o entendimento do conceito de potencial zeta, é preciso apresentar, primeiramente, o conceito de dupla camada elétrica (DCE), utilizado para facilitar o estudo das propriedades elétricas das interfaces.

Praticamente todas as partículas minerais adquirem uma carga elétrica quando em meio aquoso como resultado da interação dos íons de sua superfície com as moléculas de água. Tal eletrização ocorre a partir dos mecanismos de ionização da superfície, dissolução de íons, adsorção de íons da solução e defeitos na rede cristalina dos minerais (LUZ *et al.*, 2004).

Assim, quando uma partícula mineral é submetida a um meio aquoso, pode ser observado um deslocamento de íons que prossegue até que seja estabelecido o equilíbrio eletroquímico do sistema. Quando este é atingido, a superfície mineral apresenta um excesso de carga elétrica, geralmente, negativa. Íons de cargas opostas são atraídos para essas superfícies, formando a dupla camada elétrica (Figura 3.5), constituída por uma superfície carregada e um meio polar no qual se distribuem os denominados contra-íons. Estes correspondem aos íons que neutralizam a carga da superfície, sendo a DCE eletricamente neutra.

Assim, o potencial zeta (ζ) está associado a atividade dos íons determinantes de potencial, e é definido por Luz *et al.* (2004) como:

[...] o potencial medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução, quando os dois estão em movimento relativo, na presença de um campo elétrico. Este deslocamento diferencial das partes da DCE leva ao aparecimento de um potencial eletrocinético, podendo ser medido por meio dos quatro fenômenos ou efeitos eletrocinéticos (Hunter, 1981): eletroforese, eletroosmose, potencial de escoamento e potencial de sedimentação. O plano de Stern é considerado por alguns autores como o plano de cisalhamento onde são efetuadas as determinações eletrocinéticas do potencial zeta (Fuerstenau, 1982b) (LUZ *et al.*, 2004, p. 379).

Ainda podem ser definidos dois outros conceitos importantes relacionados aos fenômenos elétricos na interface. São estes, o ponto isoelétrico (PIE) e o ponto de carga zero (PCZ).

O ponto isoelétrico (PIE) corresponde àquele no qual o potencial zeta apresenta valor nulo devido à compressão dos íons da camada difusa no interior da camada de Stern (Figura 3.5). Assim, o movimento da partícula no meio aquoso não gera potencial no plano de cisalhamento por não causar eletrização. Quando se encontram em seu ponto isoelétrico, as partículas não sofrem repulsão eletrostática resultante da interação dos íons da camada difusa, agregando-se com mais facilidade. Assim como o potencial zeta, o ponto isoelétrico varia sob influência dos IDP e do pH do meio (LUZ *et al.*, 2004).

Segundo Luz *et al.* (2004), o ponto de carga zero (PCZ) é aquele no qual a atividade dos IDP corresponde a uma neutralização da carga elétrica da superfície, definindo as condições nas quais não há excesso de cargas superficiais.

3.3 Reagentes

Segundo Fagury Neto (2012), os reagentes são definidos como compostos orgânicos e inorgânicos utilizados com o objetivo de controlar as características das interfaces envolvidas no processo.

O Quadro 3.3 apresenta os reagentes em flotação, sua função e seus principais tipos. Já o Quadro 3.4 ilustra os reagentes utilizados em algumas empresas brasileiras.

Quadro 3.3 – Principais reagentes de flotação.

Reagente		Função	Principais tipos		Exemplos
Coletor		Induzir a característica de superfície hidrofóbica em um mineral originalmente hidrofílico.	Aniônicos	Oxidrílicos	Ácidos carboxílicos, sulfatos, sulfonatos e sulfosuccinamatos.
				Sulfidrílicos	Xantatos e ditiofosfatos.
			Catiônicos	Aminas e seus sais.	
Espumante		Reduzir a tensão superficial na interface líquido-gás, aumentando a estabilidade das bolhas.	Alcoóis aromáticos		Óleo de pinho e ácido cresílico.
			Alcoóis alifáticos		Metil isobutil carbinol (MIBC).
			Poliglicóis		Éter glicólico polipropileno.
Depressor		Tornar o mineral hidrofílico e impedir a adsorção do coletor em sua superfície.	Inorgânicos		Silicato de sódio, sulfeto de sódio, cromato e dicromato de potássio e cianeto de sódio.
			Orgânicos		Poliglicol éter, polissacarídeos e polifenóis.
Modificador	Ativador	Intensificar a adsorção do coletor sobre o mineral que se deseja flotar.	Eletrólitos		Sulfato de alumínio.
			Outros		Sulfeto de sódio e sulfato de cobre.
	Regulador de pH	Estabilizar o pH na condição ótima para a flotação.	Ácidos		Ácidos clorídrico e sulfúrico
			Básicos		Cal, carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio.

Fonte: Fonte: BALTAR, 2010 (adaptado)

Quadro 3.4 – Principais reagentes utilizados em algumas empresas brasileiras.

Substância mineral (empresa - localização)	Coletores	Espumantes	Modificadores	Reguladores de pH	pH
Ferro (Samarco - Mariana)	Amina primária etoxilada (eteramina)		Grits de milho, tapioca e/ou amido de milho	NaOH	9.8 - 10.5
Ferro (Vale - Mariana)	Amina primária etoxilada (eteramina)		Amido de milho	NaOH	
Ferro (Vale - Itabira)	Amina primária etoxilada (eteramina)		Amido de milho	NaOH	
Ferro (Vale - Mina do Pico)	Amina primária etoxilada (eteramina)		Amido de milho	NaOH	
Ouro (RPM - Paracatu)	Amilxantato ou isobutilxantato	Poliglicol e MIBC			
Fosfato (Vale - Cajati)	Sarcosinato de sódio		Amido de milho	NaOH	10.5
Nióbio (CBMM - Araxá)	Amina primária (C-18)	Poliglicol	Ácido Fluorsílico	HCl	2.5 - 3
Cobre (Caraíba - Jaguarati)	Ditiofosfato + ditiocarbamatos	MIBC	Dextrina	Leite de cal	10.5
Chumbo (Boquira)	Amilxantato de potássio	MIBC	Cianeto de sódio (desativador), sulfato de zinco (depressor) e sulfeto de sódio (ativador)	CaO	8 - 8.5
Zinco (Boquira)	Isopril xantato de sódio	Óleo de pinho	Sulfato de cobre (ativador)	CaO	10.5 - 11
Carvão (Carbonífera - Criciúma)	Óleo diesel	Óleo de pinho			Natural
Fluorita (Mineração Santa Catarina)	Tall-oil		Silicato de sódio	Carbonato de sódio	9.5
Scheelita (Min. Tomaz Salustino - Currais Novos)	Amilxantato de sódio	Óleo de pinho		CaO	8.0

Fonte: Modificado de OLIVEIRA e SOUZA, 2008.

3.4 Equipamentos de flotação

Equipamento de flotação pode ser definido como aquele capaz de realizar a operação de concentração. Ou seja, a separação sólido-sólido, através de um meio trifásico, gerando dois produtos: o flutuado/flotado e o afundado/deprimido. Vale ressaltar que vários outros equipamentos também são capazes de realizar a operação de concentração. Para tal, o equipamento deve ser capaz de realizar certas funções concomitantes para que haja separabilidade dinâmica no processo. São elas (SILVEIRA, 2013):

- agitar a polpa de modo que as partículas se mantenham em suspensão constante. Para tal, a velocidade ascendente das partículas deve ser maior do que a velocidade de sua sedimentação;
- gerar e dispersar as bolhas de ar, de forma que estas tenham tamanhos adequados à coleta de partículas de diversos tamanhos e estejam bem distribuídas no interior da polpa, de modo a beneficiar o contato partícula-bolha;
- possibilitar a coleta seletiva e o transporte do agregado partícula-bolha até a camada de espuma.

Segundo Santana (2007) *apud* Silveira (2013), alguns parâmetros podem ser utilizados para medir a eficiência de uma máquina de flotação, como: qualidade dos produtos, teor de recuperação, consumo de energia elétrica e de reagentes, gasto com operação e gasto com manutenção em função de toneladas de material

Assim, os equipamentos de flotação podem ser classificados em três tipos principais: as células mecânicas; as células pneumáticas e a coluna de flotação.

3.4.1 Células mecânicas

A célula mecânica (Figura 3.6) corresponde ao equipamento de flotação com desenvolvimento mais antigo. Este equipamento é constituído, basicamente, por um tanque no qual se encontram três peças principais: o rotor, o dispersor e o estator.

Também há calhas para o recolhimento da espuma transbordada pelo topo do tanque (FAGURY NETO, 2012).

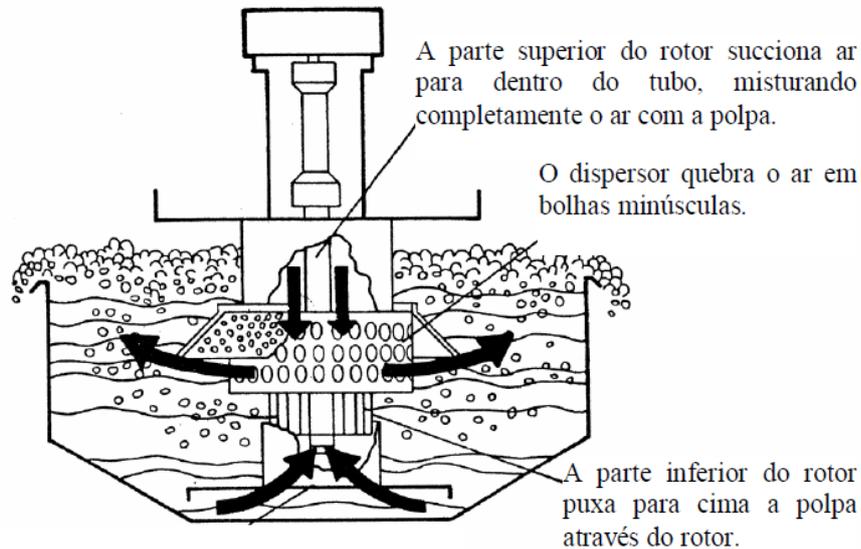


Figura 3.6 – Célula mecânica ou convencional, modelo Wemco.
Fonte: Adaptado de FAGURY NETO, 2012.

A função do rotor é manter as partículas minerais em suspensão na polpa. Já o dispersor é responsável pela geração de bolhas de tamanho adequado, quebrando o fluxo de ar que entra no equipamento. O estator é uma peça fixa, responsável pela mudança de regime de escoamento da polpa de turbulento, no fundo do tanque, para laminar, no topo do tanque.

3.4.2 Células pneumáticas

As células pneumáticas foram desenvolvidas na década de 1960, a partir da célula de flotação convencional. Nestas, a aeração é feita pela injeção de ar comprimido, responsável também pela agitação. Assim, não há peças móveis no interior do tanque. O ar é injetado com o auxílio do aerador, que consiste de um tubo ou placa porosa, com poros adequados ao diâmetro de bolha desejado para o processo (LUZ *et al.*, 2004).

Apesar do maior consumo energético, decorrente da operação dos equipamentos de injeção de ar comprimido, este tipo de equipamento apresenta algumas vantagens em relação à célula convencional. Dentre elas pode ser evidenciado o aperfeiçoamento dos aspectos de aeração e separação de espuma no

processo, gerando maior eficiência (SILVEIRA, 2013). As células pneumáticas de flotação fabricadas pela *Maelgwyn Mineral Services* são mostradas pela Figura 3.7.

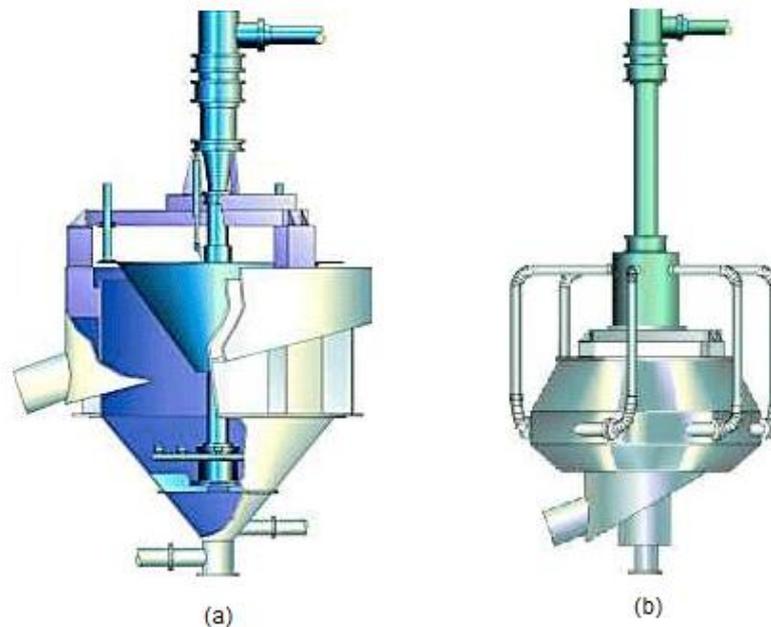


Figura 3.7 – Células pneumáticas fabricadas pela *Maelgwyn Mineral Services* (a) V-cell (b) G-cell.
Fonte: <<http://www.maelgwyn.com/portuguese/pneumaticflotation.html>>, acessado em 15 mar. 2015.

3.4.3 Coluna de flotação

Segundo Caldara e Correa (2010), as primeiras colunas de flotação a serem instaladas industrialmente foram registradas no Canadá, para flotação de molibdenita, no empreendimento *Les Mines Gaspé*, no ano de 1982. Este tipo de equipamento corresponde a um grande avanço no processo, aperfeiçoando a flotação de finos e a etapa de limpeza do concentrado.

As principais diferenças da coluna de flotação (Figura 3.8) com relação à célula convencional são:

- geometria, por possuir uma relação altura/diâmetro elevada;
- presença de água de lavagem, que contribui significativamente para a limpeza do concentrado, uma vez que a água elimina partículas mistas ou de rejeito que chegaram ao concentrado por arraste hidráulico das bolhas;
- ausência de agitação mecânica, gerando condições para o melhor transporte do agregado partícula-bolha;

- sistema de geração de bolhas, localizado no fundo da coluna, capaz de gerar bolhas menores.

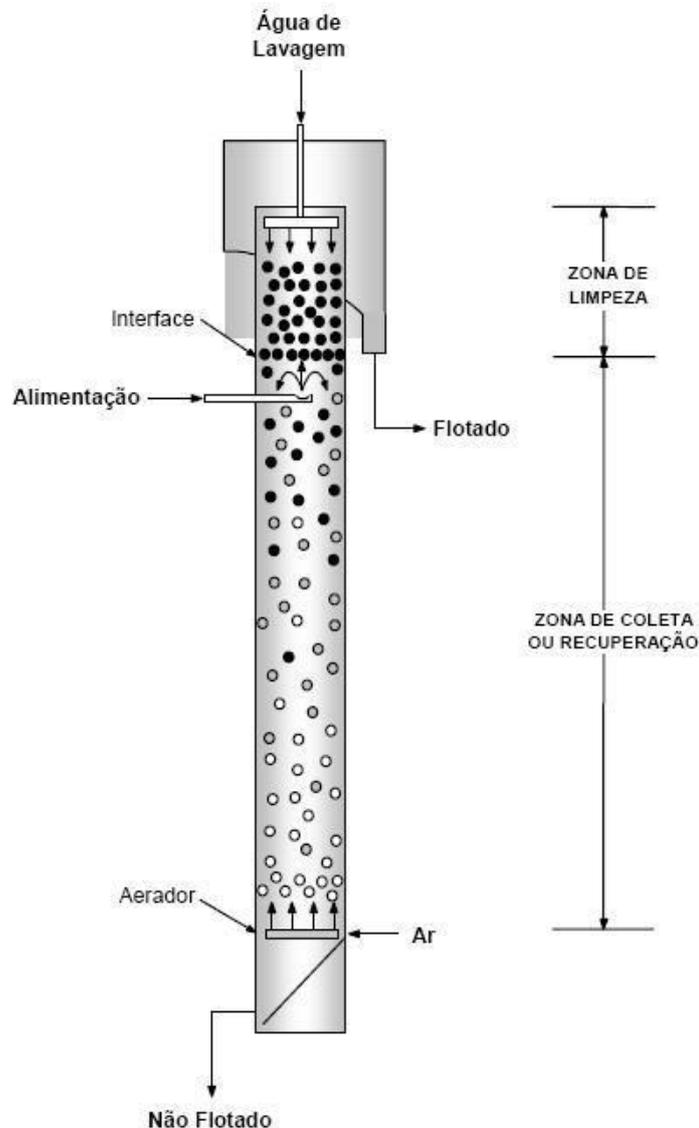


Figura 3.8 – Coluna de flotação.
 Fonte: CALDARA e CORREA, 2010.

A coluna de flotação opera no denominado regime de contracorrente, pois o fluxo de bolhas gerado é ascendente a partir do aerador, enquanto o fluxo de partículas se mostra descendente, a partir da alimentação, realizada, geralmente, a 2/3 da altura da coluna (Figura 3.8). Tal arranjo privilegia o fenômeno de colisão.

A coluna de flotação apresenta duas zonas principais: a zona de coleta ou recuperação e a zona de limpeza. A zona de coleta é assim chamada por dar lugar às etapas de colisão e adesão, favorecendo a recuperação mássica do processo. A zona de limpeza é formada pela camada de espuma, que funciona como um filtro

para as partículas hidrofílicas que porventura tenham chegado até ela, via fenômeno de arraste.

3.5 Flotação de minério de ferro

Os minerais-minério do minério de ferro são, geralmente, a hematita, magnetita, goethita e limonita. A ganga é geralmente constituída por minerais como o quartzo, caulinita e gibbsita. Segundo Ferreira (2011), a concentração de minério de ferro por flotação (Figura 3.9) pode ser feita de forma direta ou reversa, via quatro diferentes rotas de processo:

- flotação de minerais oxidados de ferro, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos e sulfatos), em pH na faixa neutra a ácida;
- flotação de quartzo/silicatos, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos) em pH alcalino, ativado por cálcio;
- flotação catiônica de minerais oxidados de ferro, utilizando aminas como coletores e ativação por flúor, em pH ácido;
- flotação catiônica de quartzo, utilizando aminas, em pH na faixa neutra e alcalina (FERREIRA, 2011, p. 34).

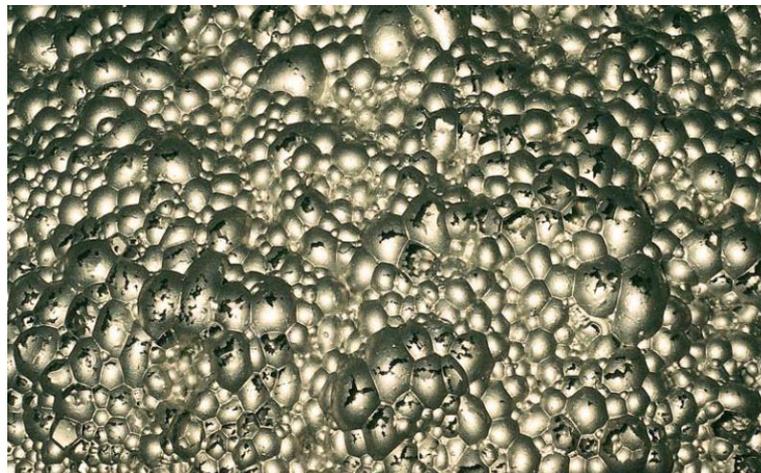


Figura 3.9 – Espuma de flotação de minério de ferro.
Fonte: LOPES, 2009.

Considera-se que a flotação catiônica reversa de quartzo seja o método mais comumente empregado.

3.5.1 Flotação reversa

A flotação reversa dos minerais silicatados pode ser realizada através da prévia depressão dos minerais ferrosos com amido de milho e seus derivados.

Posteriormente, um coletor do grupo das aminas é adsorvido na superfície dos minerais de ganga. Para que o amido possa ser utilizado como depressor, este deve estar em sua forma solúvel. Tal condição é obtida pelo processo denominado gelatinização do amido, feito através de um efeito térmico ou pela reação com soda cáustica. Após a solubilização, o amido se liga às partículas minerais por meio de interações eletrostáticas ou pontes de hidrogênio (GUEDES, 2012).

Como coletores, são utilizadas as aminas, sendo estas substâncias químicas derivadas da amônia. Há grande diversificação no tipo da amina a ser utilizada em cada processo específico de flotação de minério de ferro (LOPES, 2009). As principais variações utilizadas industrialmente são mostradas no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Principais coletores catiônicos utilizados para flotação de minério de ferro.

Coletor	Fórmula Estrutural
Sal de amina graxa primária	$\text{RNH}_3^+\text{Cl}^-$
Sal de amina graxa secundária	$\text{RR}'\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$
Sal de amina graxa terciária	$\text{R}(\text{R}')\text{NH}^+\text{Cl}^-$
Diamina graxa	$\text{R-NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Éter-diamina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Eteramina	$\text{R-O}-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}_2$
Sal de eteramina	$[\text{R-O}(\text{CH}_2)_3-\text{NH}^+][\text{CH}_2\text{COO}^-]$
Sal de amônio quaternário	$\text{R}(\text{R}')_3\text{NCl}$
Sal de sulfônico	$\text{RS}(\text{R}')_2\text{Cl}$

R= cadeia hidrocarbônica com 10 átomos de carbono; R'= cadeia alquílica curta, geralmente metil.

Fonte: LOPES, 2009.

A adsorção das aminas no quartzo apresenta caráter puramente eletrostático, sendo não específica e reversível. Assim, é possível a recuperação dos reagentes, agregando economia ao processo. Geralmente, não são adicionados reagentes espumantes à polpa, visto que a amina também tem este efeito (BALTA, 2010).

3.5.2 Flotação direta

A flotação direta de minério de ferro apresenta utilização em menor escala, geralmente em minérios de baixo teor ou para recuperação de ferro em rejeitos.

Os principais coletores utilizados são os sulfonatos de petróleo e combustíveis (querosene), os ácidos graxos, sulfonatos e ácidos graxos combinados, além dos hidroxamatos. O depressor utilizado corresponde ao silicato de sódio, dentre outros, agindo sobre as partículas de quartzo (LOPES, 2009). Os principais experimentos de flotação direta em minério de ferro e seus resultados são mostrados pela Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Flotação de minérios de ferro usando ácido oléico ou oleato de sódio e oleato de potássio como coletores.

Material	Coletor	pH ótimo	(%Fe) Alimentação	(%Fe) Concentrado	Recuperação (%)	Referência
Minério	Ácido oléico	-	17	59	74	Adams, Kobey e Sayers (1931)
Rejeitos	Ácido oléico	-	24	63	93	Searles (1938)
Rejeitos	Oleato de sódio	>8	35	59	92	Cooke e Talbot (1955)
Minério	Ácido oléico	6 a 7	20	65	90	Cooke, Iwasaki e Choi (1959)
Minério	Ácido oléico	-	36	62	78	Cooke e Nummela (1959)
Minério	Ácido oléico	6 a 7	20	62	60	Cooke, Iwasaki e Choi (1960)
Minério	Ácido oléico	7	-	66	88	Thurston, Kudo e Cooke (1962)
Rejeitos	Ácido oléico	-	49	66	87	Sorensen, Colombo e Frommer (1964)
Hematita	Ácido oléico	7,5	35	63	90	Balint e Fleming (1965)
Minério	Oleato de potássio	8,5	42	59	82	Fuerstenau, Harper e Miller (1970)
Minério	Oleato de sódio	7	38	60	70	Tripathi, Dey e Jena (1976)
Minério	Oleato de potássio	7,8	40	64	56	Kulkami (1976)
Minério	Ácido oléico	8	40	65	60	Kulkami e Somasundaran (1977)
Rejeitos	Ácido oléico	6,5 a 7	16	51	83	Meech (1981)
Minério	Ácido oléico	6,5	16	53	84	Pindred e Meech (1984)
Minério	Ácido oléico	5,5	41	67	99	Tovar, Navarro e Pastrana (1988)
Rejeitos	Ácido oléico	-	32	45	50	Klimpel e Fee (1993)
Minério	Oleato de sódio	7	32	67	91	Vieira e Salum (1994)
Mistura	Oleato de sódio	6	15	41	94	Pascoe e Doherty (1997)

Fonte: SANTANA, 2012.

3.5.2.1 Ácidos graxos

Os ácidos graxos são o grupo de ácidos carboxílicos que apresentam cadeia hidrocarbônica longa. Estes são provenientes de gorduras e óleos, tanto de origem vegetal como animal, sendo gerados a partir de sua hidrólise. Têm como característica principal a presença do grupo orgânico carboxila (Figura 3.10), responsável pela adesão do coletor à partícula mineral. O restante da molécula (cadeia hidrocarbônica) é responsável pela característica hidrofóbica induzida à partícula na qual o composto é adsorvido.

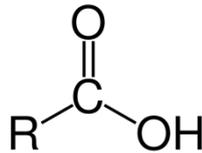


Figura 3.10 – Fórmula estrutural geral dos ácidos carboxílicos.

Fonte:

<http://webeduc.mec.gov.br/portaldoprofessor/quimica/cd2/conteudo/aulas/32_aula/recursos/11875/11875.png>, acessado em 25 mar. 2015.

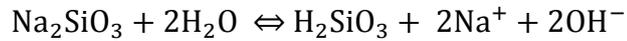
Segundo Baltar (2010), um possível empecilho à utilização dos ácidos graxos como coletores seria a baixa solubilidade da maioria de seus compostos. Tendo isso em vista, antes de ser utilizado, o ácido carboxílico deve ser submetido ao processo denominado saponificação, no qual este é convertido em um sal deste ácido, denominado carboxilato, através da adição de uma base (e.g. soda cáustica).

O coletor utilizado nos testes de flotação que compõem o presente trabalho apresenta nome comercial Hidrocol, da fabricante Hidroveg. Este reagente se trata de um ácido graxo parcialmente hidrogenado, sendo produzido a partir do óleo de soja. Apresenta fórmula química correspondente a $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$, sendo seu peso molecular igual a 268,96 g/mol (NUNES, 2009).

2.5.2.2 Silicato de sódio

Segundo Baltar (2010), o silicato de sódio (Na_2SiO_3) é um depressor inorgânico amplamente utilizado em processos de flotação para depressão de quartzo e outros silicatos, especialmente naqueles em que o tipo de coletor utilizado

corresponde ao ácido carboxílico. Quando em meio aquoso, este composto se dissocia conforme a reação química apresentada a seguir:



Assim, a adição de silicato de sódio à polpa gera um aumento no pH, devido à liberação de espécies OH^- provenientes de sua dissociação. Após alcançar certa concentração na solução, o reagente se converte em seus vários polímeros, de acordo com o pH da polpa. A máxima ação depressora ocorre na faixa de pH entre 7 e 10 (BALTAR, 2010).

3.6 Fluorescência de raio X

Esse método se baseia na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos presentes na amostra, quando corretamente excitada (BRISOLA, 2008).

Ao ser excitado, um elemento de uma amostra, tende a ejetar elétrons dos níveis mais internos do átomo. Como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios X, com energia característica e bem definida para cada elemento. De modo resumido, a análise por FRX consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção destes raios X (NASCIMENTO, 1999 apud BRISOLA, 2008).

4 METODOLOGIA

4.1 Origem e preparação das amostras

Foram utilizadas amostras de minério de ferro provenientes do depósito mineral ferrífero denominado Depósito Jambreiro, cuja granulometria inicial é de aproximadamente 1 mm, pertencente à empresa de capital australiano *Centaurus Metals* Brasil Mineração, situado na localidade de São João Evangelista, distante cerca de 20 km do município de Guanhães – MG.

Os testes foram iniciados com o intuito de alcançar uma recuperação viável através da flotação direta de minério de ferro, bem como avaliar o efeito das variações das dosagens de depressor (silicato de sódio) e de coletor (hidrocol). Para tal, foi realizada a preparação das amostras no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG (Araxá) de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.1.

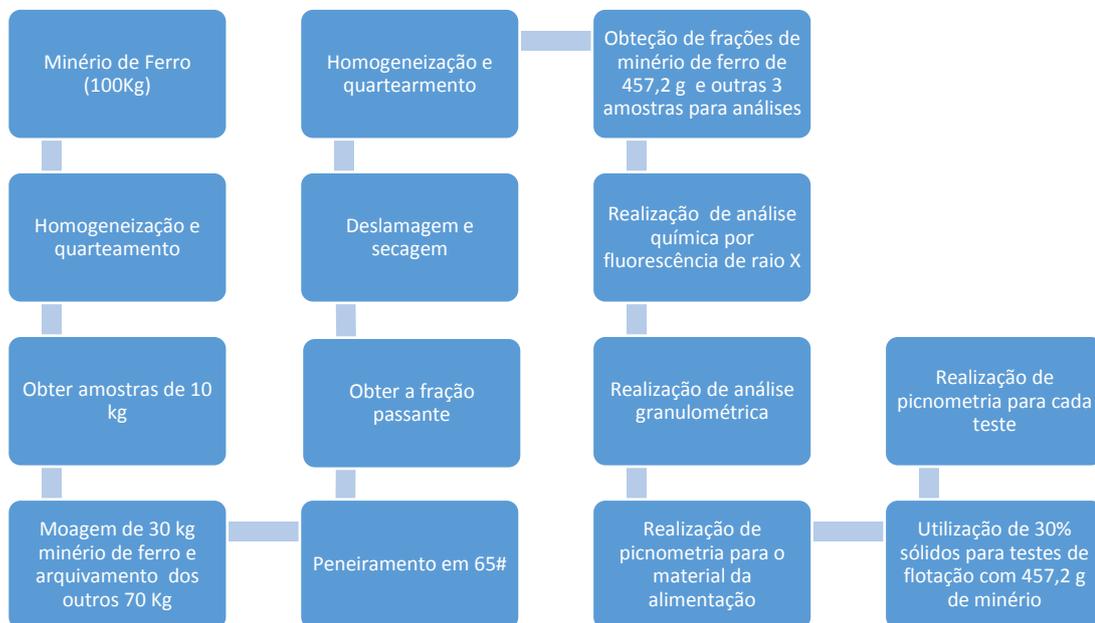


Figura 4.1 – Fluxograma de preparação das amostras.

4.1.1 Homogeneização e quarteramento

Primeiramente, foi feita a homogeneização de aproximadamente 100kg de minério de ferro com o objetivo de obter uma distribuição mais uniforme dos

constituintes. Este procedimento foi executado por tombamento, em uma lona, através da formação de uma pilha cônica, e dividindo-se a mesma em 4 partes iguais (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Pilha cônica e pilha cônica dividida em quatro partes.

Posteriormente, quarteou-se o material pertencente as partes situadas em diagonal por meio de um quarteador mecânico Jones (Figura 4.3), com o objetivo de dividir a amostra primária em alíquotas de menor massa. Esta operação foi repetida por diversas vezes, visando a obtenção de 10 amostras de aproximadamente 10Kg.



Figura 4.3 – Quarteador Jones (vista superior e lateral).

4.1.2 Moagem

Foi necessária a realização da moagem a seco do minério de ferro devido ao fato do mesmo não estar com sua granulometria adequada para a atividade proposta. A moagem foi realizada com aproximadamente 30Kg de minério de ferro em um moinho de bolas (Figura 4.4), com dimensões de 590 x 570 mm, volume de 151 L e velocidade crítica de 33 rpm, por aproximadamente 60 minutos.



Figura 4.4 – Moinho de bolas.

4.1.3 Peneiramento

Posteriormente, sua granulometria foi ajustada em uma peneira circular da marca Granutest com malha de 65# (mesh), correspondente à série Tyler (abertura de 0,212 mm). Este procedimento foi realizado manualmente obtendo-se um material com granulometria 100% inferior à 0,212 mm.

4.1.4 Deslamagem

Após a moagem, devido à redução granulométrica do material, ocorreu uma grande geração de finos. Estes finos, por recobrirem as superfícies das partículas minerais, impedem que os reagentes exerçam suas funções de maneira eficiente e prejudicam a etapa de flotação, fenômeno conhecido como *slimes coating*. Então, fez-se necessária a realização da deslamagem.

Neste processo, foram utilizados baldes com volume de 15 litros. Neles foram inseridos aproximadamente 3 kg de minério de ferro e água, até que seu volume fosse quase totalmente preenchido. Agitou-se a polpa com um agitador manual durante 5 minutos, e após o minério de ferro decantar, foi retirada a água com lama e o material levado até a estufa (100°C). A amostra foi seca na mesma por aproximadamente 15 horas, eliminando-se sua umidade. Repetiu-se este procedimento até que toda amostra tivesse sido deslamada.

4.1.5 Homogeneização e quarteamento (segunda etapa)

Após a secagem, a amostra foi desagregada em um cadinho. Com o material inferior a 0,212 mm, realizou-se a homogeneização e quarteamento pelos mesmos métodos já descritos anteriormente, e obteve-se amostras com as massas necessárias para a execução de cada teste (457,2g), além de duas amostra de aproximadamente 50 gramas para análises químicas (picnometria e Fluorescência de raios x) e 200 gramas para a análise granulométrica.

4.1.6 Análise química por Fluorescência de raios X

Por intermédio do método de Fluorescência de raio X, foi realizada a análise química da amostra da alimentação, sendo esse material conduzido à Belo Horizonte (CEFET-MG, unidade I).

4.1.7 Análise granulométrica

Foi utilizado um peneirador vibratório para a realização da análise granulométrica através do peneiramento a seco de aproximadamente 200g do material por um período de 10 minutos.

Após este tempo, anotou-se a quantidade de material retido em cada abertura. Foram utilizadas quatro peneiras da Série Tyler com suas respectivas aberturas representadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Peneiras utilizadas na análise granulométrica das amostras.

Diâmetro de abertura (mm)	Peneira Série Tyler
0,210	65#
0,149	100#
0,106	150#
0,053	270#
0,038	400#

4.1.8 Análise química baseada nos testes por picnometria

Após a deslamagem, determinou-se a densidade da amostra, através de testes de picnometria, utilizando-se cinco picnômetros de 50 mL e uma balança semi-analítica da marca Gehaka, modelo BG 2000 ($\pm 0,01$). A metodologia dos testes de picnometria foi baseada em SAMPAIO *et al.* (2007). Porém, para tal, foi necessária a calibração dos mesmos de acordo com a ABNT NBR ISSO/IEC 17025, assegurando então a eficiência da operação. Como foram realizados 5 testes de picnometria, efetuou-se a média entre os testes, excluindo os resultados discrepantes das densidades de sólidos, obtendo-se então, a densidade de sólidos para o experimento (Anexo A).

4.2 Planejamento dos experimentos

Baseando-se no trabalho realizado por NASCIMENTO (2010), selecionou-se dois níveis com resultados satisfatórios para as variáveis operacionais a serem utilizadas neste trabalho (dosagem de coletor: 1200 g/t e dosagem de depressor: 600 g/t).

A partir destas informações, definiu-se uma dosagem superior e uma dosagem inferior para cada variável ótima, segundo NASCIMENTO (2010). Com posse desses dados, foi elaborada uma matriz de planejamento experimental de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Planejamento experimental dos testes de flotação.

Teste	Matriz de planejamento		Dosagens	
	Coletor	Depressor	Coletor	Depressor
1	-1	-1	800 g/t	300 g/t
2	-1	0	800 g/t	600 g/t
3	-1	1	800 g/t	900 g/t
4	0	-1	1200 g/t	300 g/t
5	0	0	1200 g/t	600 g/t
6	0	1	1200 g/t	900 g/t
7	1	-1	1600 g/t	300 g/t
8	1	0	1600 g/t	600 g/t
9	1	1	1600 g/t	900 g/t

A partir do volume da cuba da célula de flotação disponível para utilização (1200 ml) e da porcentagem de sólidos definida para os testes (30%), foi calculada a massa de sólidos necessária à sua realização.

Calculou-se, primeiramente, a densidade da polpa através da Equação 01:

$$\%S = \frac{d_s(d_p - d_A)}{d_p(d_s - d_A)} \times 100\% \quad (01)$$

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

d_A = densidade da água, considerada como 1g/cm³;

$\%S$ = considerada como 30%.

A partir desta, obteve-se a massa de polpa, através da Equação (02):

$$m_p = V_{\text{util}} \times d_p \quad (02)$$

Onde: m_p = massa da polpa;

d_p = densidade da polpa;

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

Por fim, foi possível a determinação da massa de sólidos de cada teste, através da Equação 03:

$$m_s = \%_{\text{sólidos}} \times m_p \quad (03)$$

Os valores obtidos para cada teste estão expressos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados operacionais a serem utilizados nos testes de flotação.

Volume de Polpa (ml)	Densidade de Polpa (g/cm³)	Massa de Polpa (g)	Massa de sólidos (g)	Massa de água no teste (g)	Massa de água no condicionamento (g)
1200	1,27	1524	457,2	1066,8	457,2

4.2.1 Preparação dos reagentes

Os reagentes utilizados foram o coletor ácido graxo (hidrocol) da fabricante Hidroveg, o depressor silicato de sódio e o espumante Flotanol da fabricante Clariant.

Para a solução do coletor a ser saponificado, misturou-se em um béquer 5 g de óleo vegetal (solução a 2,5% p/p), 7,85 g de água e 7,15 g de hidróxido de sódio (solução a 10% v/v). Esta mistura foi agitada por 10 minutos no agitador magnético.

Após a agitação, houve a adição de mais 180 g de água, e sua agitação por mais 10 minutos, obtendo-se o volume de 200 ml de solução.

Para a solução do depressor a ser diluído, misturou-se em um béquer 3 g de silicato de sódio e 97 g de água. Esta mistura foi agitada com um bastão de vidro, até que se encontrasse totalmente dissolvida.

Após a preparação, e com base na massa de sólidos previamente determinada, definiu-se a quantidade de reagentes necessários aos testes, de acordo com a Equação 04.

$$m_r = \frac{(D \times m_s)}{10^4 \times C} \quad (04)$$

Onde: m_r = massa de reagente;

m_s = massa de sólidos, considerada como 457,2g;

D = dosagem dos reagentes segundo planejamento experimental;

C = concentração do reagente, considerando 2,5% p/p para coletor e 3% p/p para depressor.

Os resultados estão expressos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dosagem de reagentes.

Teste	Dosagem de coletor (g/t)	Dosagem de depressor (g/t)	Massa de sólidos (g)	Massa de solução de coletor (%)	Massa de solução de depressor (%)
1	800	300	457,2	14,6	4,6
2	800	600	457,2	14,6	9,1
3	800	900	457,2	14,6	13,7
4	1200	300	457,2	21,9	4,6
5	1200	600	457,2	21,9	9,1
6	1200	900	457,2	21,9	13,7
7	1600	300	457,2	29,3	4,6
8	1600	600	457,2	29,3	9,1
9	1600	900	457,2	29,3	13,7

4.2.2 Testes de flotação

Primeiramente, foi inserida a amostra com 457,2 g de minério de ferro juntamente com 457,2 g de água formando uma polpa com 50% de sólidos no interior da cuba da célula de flotação, a fim de realizar o condicionamento. Utilizou-se a célula de flotação do tipo CDC.

Durante o processo, o rotor da célula de flotação trabalhou a uma rotação aproximada de 1200 rpm. O pH da polpa foi regulado para 7,00 através da adição de ácido clorídrico (HCl, solução a 10% v/v) e mantido constante durante todo o procedimento. Seu monitoramento foi realizado através de um pHmetro (Analyser, modelo pH 300), equipado com um eletrodo específico (Sensoglass, modelo SC 09).

Após o ajuste do pH, o depressor foi adicionado à polpa, sendo realizado condicionamento por 6 minutos. Em seguida, o coletor foi acrescentado e foi realizado condicionamento por 3 minutos e logo em seguida adicionado uma gota do espumante Flotanol da marca Clariant. Assim, foi acrescentada a água de diluição visando a redução da porcentagem de sólidos para realização do teste de flotação. A mesma esteve com 30% de sólidos durante a prática em questão e regulou-se a válvula de vazão de ar em 10 LPM. Na execução dos testes foram mantidos parâmetros operacionais similares aos empregados no trabalho de NASCIMENTO (2010).

O material flotado foi coletado até que a espuma apresentasse uma coloração mais clara, isenta de sólidos (Figura 4.5-B). O material flotado, assim como o afundado (Figura 4.5-A), foi seco em estufa e teve sua massa aferida em uma balança semi-analítica.



Figura 4.5 – Flotado na bandeja e afuntado na cuba (A) e espuma clara (B).

O procedimento citado foi realizado para todos os outros testes, variando-se as dosagens de coletor e de depressor de acordo com o planejamento experimental.

A partir da densidade dos sólidos calculada para cada teste, calculou-se a recuperação metalúrgica, considerando que a amostra é constituída basicamente por dois minerais, hematita e quartzo. Para tal, inicialmente, calcula-se o teor de hematita presente no minério, através da Equação 05 apresentada a seguir:

$$\%MM = \frac{d_{mm}(d_s - d_g)}{d_s (d_{mm} - d_g)} \quad (05)$$

Onde: %MM: porcentagem de mineral minério.

d_{mm} : densidade do mineral minério (hematita), considerada 5,01 g/cm³.

d_s : densidade do sólido (minério);

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

De posse do valor do teor de hematita presente, e sabendo que a hematita é constituída de 69,96% de conteúdo metálico, torna-se possível obter o teor de ferro (%Fe) no concentrado de cada teste, a partir da Equação 06:

$$\%Fe = \%MM \times 0,6996 \quad (06)$$

Onde: %Fe: porcentagem de ferro.

Em seguida, determina-se a recuperação metalúrgica de cada teste, a partir da Equação 07:

$$R.met = \frac{(C \times \%Fe)}{((C + R) \times a)} \quad (07)$$

Onde: R. met: recuperação metalúrgica;

C: massa do concentrado;

R: massa do rejeito;

a: teor da alimentação, considerado 31,82%.

Também calculou-se a recuperação em massa para cada teste de acordo com a Equação 08:

$$R.massa = \frac{C}{(C + R)} \quad (08)$$

Onde: R. massa: recuperação em massa.

Os resultados de todos os testes e da alimentação seguem no Anexo A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Comparação entre os resultados da caracterização química por fluorescência de raio x e por picnometria

A Tabela 5.1 mostra os resultados da caracterização química do minério de ferro objeto deste estudo, realizada através de Fluorescência de raios X.

Tabela 5.1 – Caracterização química do minério de ferro estudado.

MINERAL	TEOR (%)
SiO ₂	52,33
Fe ₂ O ₃	46,46
SO ₃	0,61
K ₂ O	0,31
CaO	0,22
MnO	0,06

Fonte: Laboratório de FRX, CEFET-MG, 2015.

Observa-se que o somatório dos teores dos elementos SO₃, K₂O, CaO e MnO representaram apenas 1,2% do valor total da amostra. Portanto, por se tratar de um valor muito baixo, estes elementos foram desconsiderados durante a análise por picnometria, sendo analisados somente SiO₂ (quartzo) e Fe₂O₃ (hematita), que revelaram ser os constituintes principais da amostra em questão. Os resultados seguem conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Caracterização química (minério de ferro).

MINERAL	TEOR (%)
SiO ₂	54,47
Fe ₂ O ₃	45,53
SO ₃	-
K ₂ O	-
CaO	-
MnO	-

Após as duas análises realizadas, e os resultados comparados, nota-se que os teores de Fe₂O₃ e SiO₂ por ambos os métodos de análise química apresentaram resultados similares, apresentando variação de, aproximadamente, dois pontos

percentuais. Tal cenário valida o emprego da técnica de picnometria para obtenção dos teores de ferro nas amostras. Ou seja, os resultados deste procedimento apresentaram um nível de confiabilidade elevado. Este resultado foi bastante importante para o presente trabalho, pois a ideia inicial era realizar análise química por Fluorescência de raios X para todos os testes realizados. Porém, por questões de tempo e logística, este método foi inviabilizado. Assim, a alternativa mais viável para análise foi a picnometria, que se mostrou eficiente.

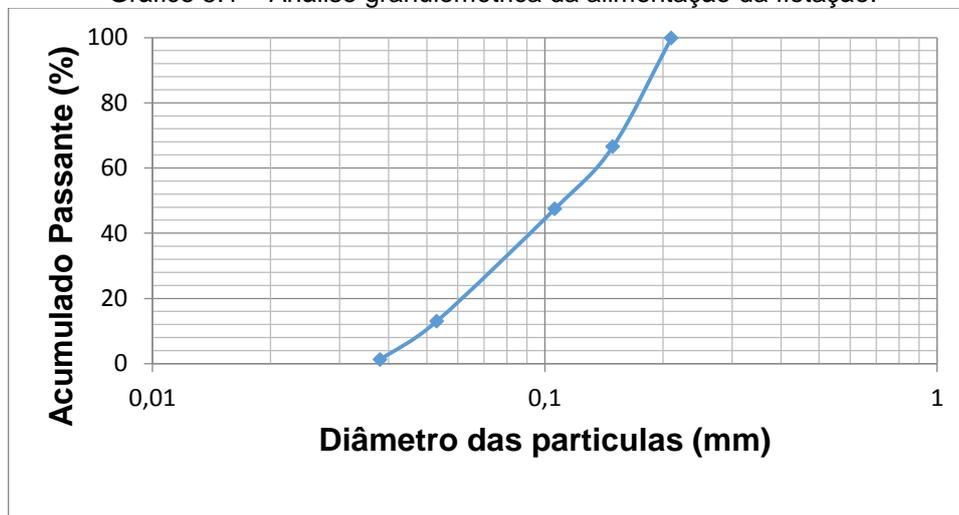
5.2 Resultados da análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra de minério de ferro é apresentada na tabela 5.3 e no Gráfico 5.1. Considerando-se que os finos são representados pela fração inferior ao tamanho de 38 μm , observa-se que a presente amostra apresentou apenas 1,21% de lama. Assim, pode-se considerar que a etapa de deslamagem foi eficiente.

Tabela 5.3 – Resultados peneiramento.

Diâmetro de abertura (mm)	Peneira Série Tyler	Massa retida (g)
0,210	65#	0,44
0,149	100#	66,24
0,106	150#	37,96
0,053	270#	68,55
0,038	400#	23,38
Fundo	-	2,41

Gráfico 5.1 – Análise granulométrica da alimentação da flotação.

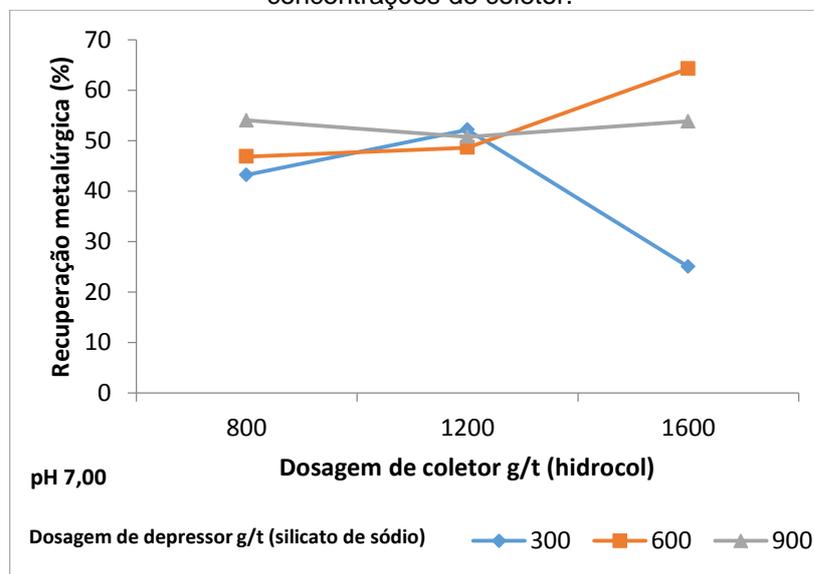


Após a análise observou-se um $d_{50} = 0,11$ mm e um $d_{80} = 0,18$ mm característico para esta análise.

5.3 Resultados dos testes de flotação

Para a análise mais precisa dos resultados encontrados, foram confeccionados quatro gráficos: dois abordando a recuperação metalúrgica obtida (Gráficos 5.2 e 5.3), e outros dois abordando a recuperação em massa (Gráficos 5.4 e 5.5), de acordo com os testes realizados.

Gráfico 5.2 – Recuperação metalúrgica, variando-se a concentração de depressor para diversas concentrações de coletor.



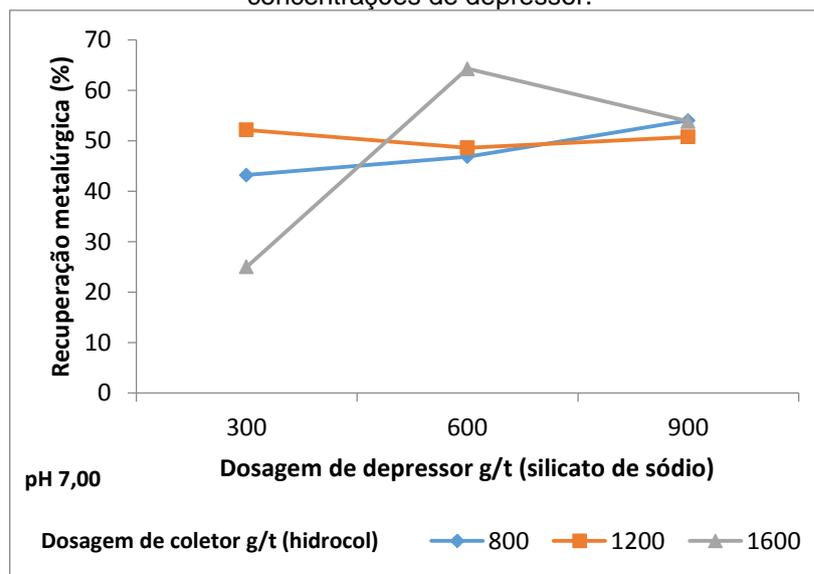
Como podemos observar, para uma dosagem máxima de depressor (900 g/t), a variação nas dosagem de coletor não afeta significativamente a recuperação metalúrgica. Ou seja, se mantém praticamente constante em aproximadamente 53%, não justificando o aumento de seu consumo.

Já para uma dosagem mínima de depressor (300 g/t), a variação na dosagem de coletor (de 800 g/t para 1200 g/t) resulta em um aumento de 43% para 52% na recuperação metalúrgica. Em compensação, quando se aumenta a dosagem de coletor para 1600 g/t ocorre uma queda brusca para 25%. Esse resultado não condiz com os demais testes, logo pode ter ocorrido um erro operacional durante a

execução do mesmo. Devido à falta de tempo, não foi possível repetir o ensaio. Logo este resultado foi desconsiderado na análise deste trabalho.

Para uma dosagem intermediária de depressor (600 g/t), com o aumento na dosagem de coletor (de 800 g/t para 1200 g/t) a recuperação metalúrgica se manteve praticamente constante. Porém, ao elevar a dosagem de coletor para 1600 g/t, a recuperação metalúrgica aumenta significativamente (64%). Tal cenário pode ser atribuído ao fato de que, mesmo aumentando a dosagem de coletor, a dosagem de depressor é suficiente para manter o quartzo deprimido. Logo, a quantidade adicional de coletor está executando a função de coletar principalmente as partículas de hematita.

Gráfico 5.3 – Recuperação metalúrgica, variando-se a concentração de coletor para diversas concentrações de depressor.



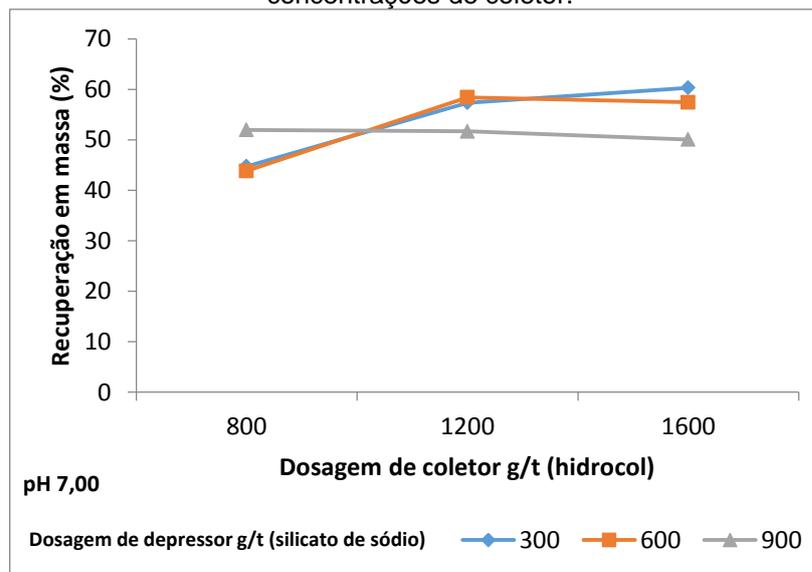
Como pode ser observado a partir do Gráfico 5.3, para uma dosagem mínima de coletor (800g/t), a medida que se aumenta a dosagem de depressor durante a bateria de testes, a recuperação metalúrgica sofre um crescimento. Assim, evidencia-se uma relação diretamente proporcional entre estas variáveis. Ou seja, quanto maior a dosagem de depressor maior sua eficiência na depressão do quartzo, favorecendo a coleta de partículas de hematita. Logo, a recuperação metalúrgica se mostra potencializada.

Já para uma dosagem intermediária de coletor (1200 g/t), com o aumento das dosagens de depressor, não ocorre uma variação significativa na recuperação metalúrgica, ou seja, ela permanece praticamente constante, sugerindo que a dosagem mínima de depressor (300 g/t) seria suficiente para deprimir a maior quantidade de ganga.

É possível observar que, para uma dosagem máxima de coletor (1600g/t), o acréscimo na dosagem de depressor (de 600 g/t para 900 g/t) há uma redução na recuperação metalúrgica, o que mostra que, para dosagens altas de depressor, este reagente está atuando, provavelmente, tanto na depressão do quartzo como da hematita. Com isto, a recuperação metalúrgica experimenta um sensível decréscimo. Vale ressaltar que o teste empregando a dosagem mínima de depressor (300g/t) e dosagem máxima de coletor (1600 g/t) foi desconsiderado como discutido anteriormente.

O melhor teste apresentou uma recuperação metalúrgica de 64%, com a dosagem máxima de coletor (1600 g/t) e dosagem intermediária de depressor (600 g/t).

Gráfico 5.4 – Recuperação em massa, variando-se a concentração de depressor para diversas concentrações de coletor.



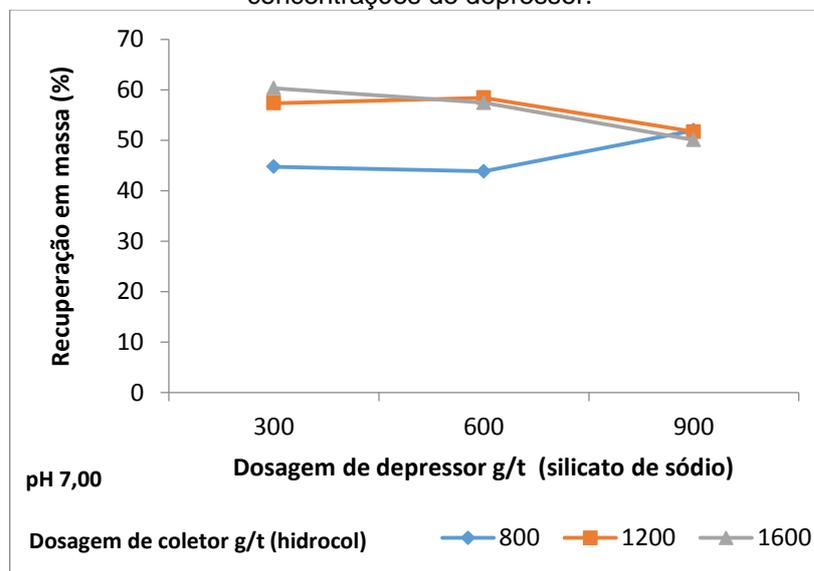
Pela análise do Gráfico 5.4, para as dosagens mínima (300 g/t) e intermediária (600 g/t) de depressor, respectivamente, ao se variar as dosagens de

coletor, a recuperação mássica de ambas respondem praticamente da mesma maneira. Ou seja, primeiramente, com o aumento da dosagem de coletor de 800 g/t para 1200 g/t, observa-se um aumento de 44% para 58%, aproximadamente. Tal fato evidencia que, ao aumentar a dosagem de coletor, mais material passa a ser flotado. Posteriormente, ao aumentar novamente a dosagem de coletor (1600 g/t), os valores se mantêm praticamente constantes, mostrando que não houve ganho significativo na massa flotada, mesmo com o aumento de dosagem de coletor.

No entanto, para a dosagem máxima de depressor (900g/t), o aumento da dosagem de coletor praticamente não influenciou na recuperação mássica. Ou seja, a partir da dosagem mínima de coletor, ao se elevar a dosagem do mesmo, não foram observadas variações significativas na massa de material flotado. Na verdade, pode ser observado sutil decréscimo da mesma.

Percebe-se uma relação geral em relação aos testes, segundo a qual, quando se aumenta a concentração de coletor mais material é flotado.

Gráfico 5.5 – Recuperação em massa, variando-se a concentração de coletor para diversas concentrações de depressor.



Como pode ser observado no Gráfico 5.5, para as dosagens intermediárias (1200 g/t) e máxima de coletor (1600 g/t), respectivamente, a evolução da recuperação mássica apresenta o mesmo padrão. Primeiramente, permanecendo constante com o aumento da dosagem de depressor (de 300g/t para 600 g/t).

Quando ocorre o aumento desta dosagem para 900 g/t, pode ser observada uma redução na recuperação mássica. Isso se deve ao fato de que para dosagens maiores de depressor, este deprime também a hematita, reduzindo a ação de coleta do reagente coletor sobre estas partículas. Conseqüentemente, a massa de material flotado apresenta uma redução.

No entanto, para a dosagem mínima de coletor (800 g/t), ao variar a dosagem de depressor (de 300 g/t para 600 g/t), a recuperação mássica permanece praticamente constante, aumentando quando eleva-se a dosagem de depressor para 900 g/t. Tal comportamento não condiz com os resultados anteriores.

O melhor teste apresentou uma recuperação mássica de 60%, utilizando-se uma dosagem mínima de depressor (300 g/t) e uma dosagem máxima de coletor (1600 g/t). Vale ressaltar que para uma dosagem máxima de coletor (1600 g/t) e intermediária de depressor (600 g/t) o valor da recuperação mássica se mostra bastante próximo.

Para a dosagem máxima de coletor (1600 g/t) e intermediária de depressor (600 g/t) obteve-se uma recuperação metalúrgica de 64% e uma recuperação em massa de 57%.

Vale ressaltar que, até o presente momento, este minério não havia sido submetido a nenhum teste de flotação. Foram executados testes de concentração gravítica pela empresa, empregando-se espirais concentradoras, para uma granulometria mais grosseira. Nestes testes foram alcançados resultados mais satisfatórios em relação ao presente estudo. Para recuperação mássica, foi atingido o valor de 40%, aproximadamente. Segundo nomenclatura adotada para os testes para o concentrado fino (abaixo de 1 mm) foi atingido teor de ferro igual a 66%. Já para o concentrado grosso (entre 8 mm e 1 mm), o teor de ferro alcançou 58%.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho dedicou-se ao desenvolvimento de novas técnicas de concentração, por flotação direta, de minério de ferro de baixo teor. Estudos envolvendo a assimilação desse processo são de extrema importância para a definição de uma alternativa eficiente para o processo produtivo de concentrado de ferro. A obtenção de um concentrado com teores de ferro que atenda às necessidades das empresas, através de uma metodologia economicamente viável, pode representar uma inovação nas atividades de mineração.

A análise química baseada nos dados de picnometria se mostrou eficiente, visto que, apesar de suas dificuldades operacionais, apresentou resultado semelhante ao do realizado por Fluorescência de raios X.

Para dosagens fixas de depressor, foi observada uma relação direta entre o aumento da dosagem de coletor e a recuperação mássica do teste. Isso pode ser explicado devido ao fato ter ocorrido uma maior coleta de partículas devido ao excesso de coletor no sistema. Tal fato não está relacionado com a seletividade da operação, uma vez que podem estar sendo coletadas partículas de quartzo juntamente com partículas de hematita.

Pode ser observado, tanto para análise em relação ao depressor quanto para o coletor, que não houve uma tendência geral de variação da recuperação metalúrgica, ou seja, os resultados variaram de modo aleatório.

Após a análise dos resultados, conclui-se que o teste que apresentou melhor resultado corresponde ao que foi utilizado uma dosagem máxima de coletor (1600 g/t) e uma dosagem intermediária de depressor (600 g/t). Esta afirmação é baseada no fato de que, além de flotar uma quantidade satisfatória de material (57% de recuperação mássica), conseguiu recuperar a maior quantidade de mineral útil (64% de recuperação metalúrgica).

Enfim, o presente trabalho não apresentou resultados satisfatórios, pois o coletor utilizado não se mostrou seletivo para a flotação da hematita, tendo como

melhor resultado um concentrado com 35,61% de teor de ferro, e uma recuperação metalúrgica de 64,27%, a partir de uma alimentação contendo, aproximadamente, 32% de teor ferro. Lembrando que, até o presente momento este minério não havia sido submetido a nenhum teste de flotação. A partir de testes em espirais concentradoras, foi atingida recuperação mássica de 40%. Para o concentrado fino (abaixo de 1 mm) foi atingido teor de ferro igual a 66%. Já para o concentrado grosso (entre 8 mm e 1 mm), o teor de ferro alcançou 58%.

Buscando sua aplicação na indústria mineral, novos estudos com outras metodologias devem ser realizados buscando uma técnica que maximize a recuperação da hematita, bem como minimize a coleta conjunta das partículas quartzo. Também devem ser analisadas questões econômicas da metodologia desenvolvida devido ao baixo valor agregado desta *commodity* quando comparada a outras, como o ouro, cobre, níquel, etc.

REFERÊNCIAS

- BALTAR, C. A. M. **Flotação no tratamento de minérios**. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010. 238 p.
- BIONDI, J.C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 528p.
- BRISOLA, D. F.; FERNANDES, T. L. A. P. **Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios X**. XVI Jornada de Iniciação Científica do CETEM. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.
- CALDARA, J. A.; CORREA, J. C. G. **Abordagem sobre a aplicação da flotação em coluna em beneficiamento mineral**. Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Ferro – Sumário Mineral 2014**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014/view>>. Acesso m 13 fev. 2015.
- FAGURY NETO, E. **Flotação**. Belém, PA, 2012. 29 p.
- FERREIRA, D. H. O. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. 2011. 50 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- GUEDES, T. S. **Estudo sobre coletores na flotação catiônica reversa de minérios de ferro itabiríticos**. 2012. 80 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867 p.
- LOPES, G. M. **Flotação direta de minério de ferro**. 2009. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2009.
- MAIA, E. S. **Pelotização e Redução de Concentrado Magnetítico**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio, 2011. 144 p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos).
- MEDEIROS, M. A. Ferro. **Revista Química Nova na Escola**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, v. 32, n. 3, ago., 2010. 3 p.
- NASCIMENTO, D. R. **Flotação aniônica de minério de ferro**. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2010.
- NUNES, A. P. L. **Flotação de fosfatos presentes nos minérios de ferro brasileiros**. 2009. 184 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

OLIVEIRA, M. S. SOUZA, M. D. **Tratamento de Minério I**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Araxá. 2008. 219 p.

PORTES, A. M. C. **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).

RAPOSO, F. O. **Formações ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e suas relações com níveis rudáceos**. 1996. 86 p. Dissertação (Pós-Graduação em Geociências) – Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1996.

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

SANTANA, P. P. **Flotação direta de minério de ferro itabirítico**. 2012. 163 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

SOUZA, N. A. F. **Análise Crítica de Rotas de Processamento de Minérios de Ferro**. 107 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

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

SILVEIRA, J. P. B. **Cinética de flotações e equipamentos: conceitos e comparações**. 2013. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Goiás, Catalão. 2013.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração SinterFeed**. 2004. 421 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

ANEXO A – TABELAS DAS PICNOMETRIAS E ANÁLISES QUÍMICAS

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

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,38	33,95	32,29	32,48	31,57
Mpic. + amostra + água (g)	83,52	83,9	82,35	82,6	82,95
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,54	2,54	2,66	2,55	2,59
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,14	49,95	50,06	50,12	51,38
Volume de água (cm ³)	49,30	50,11	50,22	50,28	51,55
Volume de sólidos (cm ³)	0,79	0,72	0,83	0,77	0,82
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,20	3,52	3,19	3,30	3,15
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,34				

Massa Alimentação (g)	441,2
Massa Concentração (g)	197,4
Massa Rejeito (g)	243,8
R _{massa}	44,74
R _{metalúrgica}	43,19
C _{Fe3O2} (%)	43,90
C _{Fe} (%)	30,72

Dosagens	
800 g/t	300 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 2

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	35,05	34,65	33,13	33,15	33,2
Mpic. + amostra + água (g)	83,97	84,39	82,99	83,11	84,12
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	3,21	3,24	3,5	3,22	4,22
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	48,92	49,74	49,86	49,96	50,92
Volume de água (cm ³)	49,08	49,90	50,02	50,12	51,09
Volume de sólidos (cm ³)	1,01	0,93	1,03	0,93	1,28
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,17	3,47	3,39	3,45	3,29
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,44				

Massa Alimentação (g)	435,8
Massa Concentração (g)	191
Massa Rejeito (g)	244,8
R _{massa}	43,83
R _{metalurgica}	46,85
C _{Fe3O2} (%)	48,62
C _{Fe} (%)	34,02

Dosagens	
800 g/t	600 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 3

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,78	34,72	32,63	32,93	31,88
Mpic. + amostra + água (g)	83,79	84,38	82,6	82,96	83,25
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,94	3,31	3	3	2,9
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,01	49,66	49,97	50,03	51,37
Volume de água (cm ³)	49,17	49,82	50,13	50,19	51,54
Volume de sólidos (cm ³)	0,92	1,01	0,92	0,86	0,83
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,19	3,27	3,25	3,48	3,48
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,41				

Massa Alimentação (g)	446,3
Massa Concentração (g)	231,9
Massa Rejeito (g)	214,4
R _{massa}	51,96
R _{metalurgica}	54,00
C _{Fe3O2} (%)	47,26
C _{Fe} (%)	33,07

Dosagens	
800 g/t	900 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 4

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,83	34,39	32,65	32,94	32,03
Mpic. + amostra + água (g)	83,75	84,07	82,62	82,92	83,31
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,99	2,98	3,02	3,01	3,05
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	48,92	49,68	49,97	49,98	51,28
Volume de água (cm ³)	49,08	49,84	50,13	50,14	51,45
Volume de sólidos (cm ³)	1,01	0,99	0,92	0,91	0,92
Densidade do sólido (g/cm ³)	2,95	3,00	3,27	3,30	3,30
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,29				

Massa Alimentação (g)	444,8
Massa Concentração (g)	255
Massa Rejeito (g)	189,8
R _{massa}	57,33
R _{metalurgica}	52,14
C _{Fe3O2} (%)	41,37
C _{Fe} (%)	28,94

Dosagens	
1200 g/t	300 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 5

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,92	34,51	32,7	33	32,06
Mpic. + amostra + água (g)	83,83	84,13	82,65	82,93	83,31
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	3,08	3,1	3,07	3,07	3,08
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	48,91	49,62	49,95	49,93	51,25
Volume de água (cm ³)	49,07	49,78	50,11	50,09	51,42
Volume de sólidos (cm ³)	1,02	1,05	0,94	0,96	0,95
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,01	2,94	3,26	3,19	3,23
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,23				

Massa Alimentação (g)	431,3
Massa Concentração (g)	251,9
Massa Rejeito (g)	179,4
R _{massa}	58,40
R _{metalurgica}	48,61
C _{Fe3O2} (%)	37,85
C _{Fe} (%)	26,48

Dosagens	
1200 g/t	600 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 6

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	35,15	35,01	32,95	33,28	32,3
Mpic. + amostra + água (g)	84,12	84,57	82,81	83,12	83,53
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	3,31	3,6	3,32	3,35	3,32
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	48,97	49,56	49,86	49,84	51,23
Volume de água (cm ³)	49,13	49,72	50,02	50,00	51,40
Volume de sólidos (cm ³)	0,96	1,11	1,03	1,05	0,97
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,44	3,23	3,21	3,18	3,41
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,36				

Massa Alimentação (g)	450,6
Massa Concentração (g)	231,8
Massa Rejeito (g)	218,8
R _{massa}	51,44
R _{metalurgica}	50,76
C _{Fe3O2} (%)	44,88
C _{Fe} (%)	31,40

Dosagens	
1200 g/t	900 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 7

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	35,45	35,07	33,26	33,53	32,61
Mpic. + amostra + água (g)	84,1	84,33	82,84	83,16	83,63
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	3,61	3,66	3,63	3,6	3,63
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	48,65	49,26	49,58	49,63	51,02
Volume de água (cm ³)	48,81	49,42	49,74	49,79	51,19
Volume de sólidos (cm ³)	1,28	1,41	1,31	1,26	1,18
Densidade do sólido (g/cm ³)	2,81	2,59	2,76	2,85	3,07
Densidade média do sólido (g/cm ³)	2,91				

Massa Alimentação (g)	441,3
Massa Concentração (g)	266,2
Massa Rejeito (g)	175,1
R _{massa}	60,32
R _{metalurgica}	25,03
C _{Fe3O2} (%)	18,87
C _{Fe} (%)	13,20

Dosagens	
1600 g/t	300 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 8

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,34	34,05	32,06	32,33	31,42
Mpic. + amostra + água (g)	83,55	83,93	82,21	82,55	82,91
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,5	2,64	2,43	2,4	2,44
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,21	49,88	50,15	50,22	51,49
Volume de água (cm ³)	49,37	50,04	50,31	50,38	51,66
Volume de sólidos (cm ³)	0,72	0,79	0,74	0,67	0,71
Densidade do sólido (g/cm ³)	3,46	3,33	3,27	3,57	3,43
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,49				

Massa Alimentação (g)	442,8
Massa Concentração (g)	254,3
Massa Rejeito (g)	188,5
R _{massa}	57,43
R _{metalurgica}	64,27
C _{Fe3O2} (%)	50,90
C _{Fe} (%)	35,61

Dosagens	
1600 g/t	600 g/t
Coletor	Depressor

TESTE 9

TESTES DE PICNOMETRIA

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Mpic. Seco (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Mpic. + amostra (g)	34,32	34,12	32,08	32,44	31,86
Mpic. + amostra + água (g)	83,4	84,02	82,26	82,59	83,09
Mpic. + água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Volume do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

M _{sólido} (g)	2,48	2,71	2,45	2,51	2,88
M _{água} (g)	49,93	50,67	50,89	50,89	52,2
Dens.água (g/cm ³)	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
massa água (amostra)	49,08	49,90	50,18	50,15	51,23
Volume de água (cm ³)	49,24	50,06	50,34	50,31	51,40
Volume de sólidos (cm ³)	0,85	0,77	0,71	0,74	0,97
Densidade do sólido (g/cm ³)	2,91	3,51	3,44	3,38	2,96
Densidade média do sólido (g/cm ³)	3,44				

Massa Alimentação (g)	444,9
Massa Concentração (g)	222,7
Massa Rejeito (g)	222,2
R _{massa}	50,06
R _{metalurgica}	53,82
C _{Fe3O2} (%)	48,90
C _{Fe} (%)	34,21

Dosagens	
1600 g/t	900 g/t
Coletor	Depressor

VICTOR LEONARDO DE OLIVEIRA SOARES

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

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais /
Campus IV – Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 14 / 08 / 2015

Banca Examinadora:

Leandro Henrique dos Santos

Leandro Henrique dos Santos – Presidente da Banca Examinadora
Professor Mestre – CEFET-MG – Orientador

Michel Melo de Oliveira

Michel Melo de Oliveira
Professor Mestre – CEFET-MG

Maria Auxiliadora Mendes de Aguiar

Maria Auxiliadora Mendes de Aguiar
Professora Mestra – CEFET-MG