



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**

**THALIA LOPES DE SOUSA**

**FLOTAÇÃO ANIÔNICA DIRETA DE MINERAIS PORTADORES DE FERRO COM  
ÁCIDO GRAXO SAPONIFICADO COMO COLETOR**

**CRATEÚS**

**2022**

THALIA LOPES DE SOUSA

FLOTAÇÃO ANIÔNICA DIRETA DE MINERAIS PORTADORES DE FERRO COM  
ÁCIDO GRAXO SAPONIFICADO COMO COLETOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Ma. Tiany Guedes Cota

Coorientador: Dr. Hudson Jean Bianchini Couto

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S698f Sousa, Thalia Lopes de.

Flotação aniônica direta de minerais portadores de ferro com ácido graxo saponificado como coletor /  
Thalia Lopes de Sousa. – 2022.  
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de  
Engenharia de Minas, Crateús, 2022.

Orientação: Profa. Ma. Tiany Guedes Cota.

Coorientação: Prof. Dr. Hudson Jean Bianquini Couto.

1. Flotação. 2. Minério de ferro. 3. Flotação aniônica direta. 4. Coletor saponificado de ácido graxo. 5.  
Concentração de minério de ferro. I. Título.

CDD 622

---

THALIA LOPES DE SOUSA

FLOTAÇÃO ANIÔNICA DIRETA DE MINERAIS PORTADORES DE FERRO COM  
ÁCIDO GRAXO SAPONIFICADO COMO COLETOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia de  
Minas do Campus de Crateús da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do grau de bacharel em Engenharia  
de Minas.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Tiany Guedes Cota (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Hudson Jean Bianchini Couto (Coorientador)  
Centro de Tecnologia Mineral – CETEM

---

Prof. Me. Kennedy Ramos  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ma. Amanda Soares de Freitas  
Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

À minha família, por me apoiar em todas as minhas conquistas. A mim mesma, por nunca desistir e buscar o meu melhor todos os dias. Ao meu caríssimo amigo Luiz Felipe, que me ajudou nessa jornada, e sempre esteve ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

A Prof<sup>ª</sup>. Ma. Tiany Guedes Cota por toda a dedicação e paciência, e por me orientar no meu trabalho de conclusão de curso.

A toda a equipe do CETEM, por todo o apoio, conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Ao Dr. Hudson Jean Bianchini Couto por aceitar me orientar e pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Elves Matiolo, por me dar a oportunidade de fazer meu trabalho de conclusão de curso sobre este tema e pelas orientações.

Aos membros da banca, Ma. Amanda Soares de Freitas e Me. Kennedy Ramos, muito obrigada pelos seus comentários e avaliações.

Ao CETEM pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

“Um pássaro sem asas dorme ao vento.”  
(Tennessee Williams)

## RESUMO

A demanda pelo minério de ferro cresce cada dia mais no mercado, e devido à exaustão de reservas com teores mais altos, surge a necessidade de beneficiamento de minérios de ferro com baixos teores, incluindo rejeitos. O minério de ferro que contém quartzo como seu principal mineral de ganga pode ser flotado de três maneiras distintas: flotação aniônica direta dos óxidos de ferro em pH neutro; flotação aniônica reversa de quartzo ativado com íons cálcio em pH alcalino; flotação catiônica reversa em pH alcalino. Uma alternativa que vem sendo estudada é a flotação aniônica direta, pois é uma técnica indicada para minérios de baixo teor ou rejeitos descartados em barragens. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de reagentes que possam aumentar a eficiência da flotação de minerais portadores de ferro de duas amostras: alimentação da flotação (teor de Fe de 52,1% e SiO<sub>2</sub> de 22,9%) e rejeito da separação magnética (teor de Fe de 6,6% e SiO<sub>2</sub> de 90,2%), provenientes de uma mina no Quadrilátero Ferrífero, por meio da flotação aniônica direta, utilizando ácido graxo saponificado como coletor e silicato de sódio como depressor. Os ensaios foram realizados na mini usina piloto do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), localizado no Rio de Janeiro/RJ. As dosagens de ácido graxo saponificado e silicato de sódio foram de 200 g/t a 600 g/t e 800 g/t, respectivamente, para as amostras da alimentação da flotação e de 75 g/t a 150 g/t e 600 g/t, respectivamente, para as amostras do rejeito CMAI, em pH entre 7,2 e 10,0. O melhor resultado foi obtido para a amostra da alimentação da flotação, com dosagem de coletor de 500 g/t, sem depressor, gerando um concentrado com teores de Fe e SiO<sub>2</sub> iguais a 61,5% e 10,5% respectivamente, com recuperação metalúrgica de ferro igual a 91,4%. Diante do alto valor obtido de SiO<sub>2</sub> faz-se necessário o planejamento de novos ensaios para adequar o produto às especificações químicas exigidas pelo mercado.

**Palavras-chave:** Flotação. Minério de ferro. Flotação aniônica direta. Coletor saponificado de ácido graxo. Concentração de minério de ferro.

## ABSTRACT

The demand for iron ore grows every day in the market, and due to the depletion of reserves with higher grades, the need arises for processing low grade iron ores, including tailings. Iron ore that contains quartz as its main gangue mineral can be floated in three different ways: direct anionic flotation of iron oxides at neutral pH; reverse anionic flotation of activated quartz with calcium ions at alkaline pH; reverse cationic flotation at alkaline pH. An alternative that has been studied is direct anionic flotation, as it is a technique indicated for low-grade ores or tailings discarded in dams. The objective of this work is to evaluate the performance of reagents that can increase the efficiency of the flotation of iron-bearing minerals from two samples: flotation feed (Fe of 52.1% e SiO<sub>2</sub> of 22.9%) and magnetic separation tailings (Fe of 6.6% e SiO<sub>2</sub> of 90.2%), from a mine in the Iron Quadrangle, by means of direct anionic flotation, using saponified fatty acid as collector and sodium silicate as depressant. The tests were carried out in the mini pilot plant of CETEM (Mineral Technology Center), located in Rio de Janeiro-RJ. The fatty acid and sodium silicate dosages were 200 g/t to 600 g/t and 800 g/t respectively for the flotation feed samples and 75 g/t to 150 g/t and 600 g/t respectively for the samples from the flotation. CMAI waste, at pH between 7.2 and 10.0. The best result was obtained with a collector dosage of 500 g/t, without depressant, generating a concentrate with Fe and SiO<sub>2</sub> contents equal to 61.5% and 10.5%, respectively, with metallurgical iron recovery equal to 91.4 %. Given the high value of SiO<sub>2</sub> obtained, it is necessary to plan new tests to adapt the product to the chemical specifications required by the market.

**Keywords:** Flotation. Iron ore. Direct anionic flotation. Saponified fatty acid collector. Iron ore concentration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção Mundial de Aço Bruto de setembro de 2015 a fevereiro de 2017 .....	19
Figura 2 – Demanda Mundial de Aço Bruto 1950-2015 .....	20
Figura 3 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero .....	21
Figura 4 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição granulométrica dos produtos .....	23
Figura 5 – Estágios de fragmentação de acordo com sua granulometria .....	24
Figura 6 – Contato bolha de ar/superfície do mineral em um sistema com e sem coletor .....	26
Figura 7 – Tipos de aminas utilizadas na flotação de ferro. R= cadeia hidrocarbônica com 10 átomos de C e R´= cadeia alquílica curta .....	28
Figura 8 – Estrutura Química do Ácido Oleico .....	29
Figura 9 – Especificação do ácido sílico em função do pH da solução .....	32
Figura 10 – Fluxograma esquemático do circuito adotado na concentração de ferro da mina tratada neste estudo .....	33
Figura 11 – Fluxograma simplificado do estudo experimental .....	34
Figura 12 – Célula de bancada tipo <i>Denver</i> para os ensaios de em escala de laboratório .....	35
Figura 13 – Análise mineralógica da amostra da alimentação da flotação .....	39
Figura 14 – Teor versus recuperação de Fe para a amostra da alimentação da flotação .....	45
Figura 15 – Teor versus recuperação de Fe para a amostra do rejeito CMAI .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais de ferro .....	16
Tabela 2 – Produção Mundial de Ferro 2019 e estimativa para 2020 / Reservas Mundiais em 2019 - Valores em Mt. <sup>e</sup> =Estimado e NA=não disponível .....	18
Tabela 3 – Resumo dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI.....	36
Tabela 4 – Etapas dos testes de flotação .....	37
Tabela 5 – Análise química da amostra da alimentação da flotação e do rejeito .....	39
Tabela 6 – Resultados de recuperação mássica e metalúrgica e da análise química dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI (concentrado e rejeito final).....	41
Tabela 7 – Resultados de recuperação mássica e metalúrgica e da análise química dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação (rejeito <i>rougher</i> , rejeito <i>cleaner</i> e rejeito <i>re-cleaner</i> ).....	42
Tabela 8 – Resultados do índice de Gaudin e eficiência da separação.....	43
Tabela 9 – Comparação entre os resultados dos estudos de flotação aniônica direta .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS

BDMG	Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais S.A
BIFs	Banded Iron Formations
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CMAI	Concentração Magnética de Alta Intensidade
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
FFB	Formação Ferrífera Bandada
FRX	Fluorescência de Raio X
UNCTAD	United Nations Conference on Trade And Development
USGS	United States Geological Survey

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos.....	15
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	Minérios de ferro .....	16
2.2	Minerais de ganga.....	17
2.3	Mercado de minério de ferro .....	18
2.4	Quadrilátero Ferrífero .....	20
2.5	Processamento de minério de ferro.....	22
2.6	Flotação .....	25
2.6.1	Flotação de minério de ferro .....	26
2.6.2	Flotação aniônica reversa de minério de ferro.....	27
2.6.3	Flotação catiônica reversa de minério de Ferro.....	28
2.6.4	Flotação direta de minério de ferro .....	29
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1	Materiais.....	33
3.2	Reagentes.....	33
3.3	Recebimento e preparação de amostras .....	34
3.4	Ensaio de flotação .....	35
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
4.1	Caracterização química e mineralógica .....	39
4.2	Ensaio de flotação .....	40
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é de suma importância no cotidiano humano, pois dá origem a todos os objetos que contém ferro em sua composição, como aparelhos eletrônicos, casas, carros, entre outros. Ele também é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo muito comum em minerais formadores de rochas. Segundo Weeks (1968) embora haja evidências de sua utilização há 5.000 anos a.C, foi por volta de 1.200 a.C que o ferro ficou mais conhecido, dando início à Idade do Ferro, substituindo a idade do Bronze. Esta substituição se deu de forma lenta, já que naquela época havia uma certa dificuldade para localizar, extrair, fundir e forjar o ferro.

O ferro pode ser utilizado em sua forma pura ou na forma de liga metálica, que neste caso passa a ser chamado de aço. Na natureza, o ferro não é encontrado na sua forma pura, mas sim em minerais, sendo os principais minerais portadores de ferro: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Para a obtenção do ferro puro a partir do minério destes minerais-minério, é necessário que estes passem por várias etapas de concentração e metalurgia (HOFFBRAND, 2004).

Uma das principais técnicas de concentração destes minerais na etapa de beneficiamento é a flotação. Segundo Numela e Iwasaki (1986), a flotação permite a concentração de minérios de ferro por duas maneiras, pela flotação do mineral-minério (flotação direta), ou pela flotação da ganga (flotação reversa), além de permitir a remoção de sílica abaixo de 0,044 mm dos concentrados magnéticos, e de reduzir os níveis de impurezas, como fósforo, enxofre e sódio.

O minério de ferro que contém o quartzo como seu principal mineral de ganga pode ser processado de três maneiras distintas: por flotação aniônica direta dos óxidos de ferro em pH neutro, onde se utiliza geralmente ácidos graxos; por flotação aniônica reversa de quartzo ativado com íons cálcio em pH alcalino, onde se faz uso de ácidos graxos e depressores, e por fim, flotação catiônica reversa em pH alcalino, utilizando aminas como coletores do quartzo e utilizando depressores para o óxido de ferro, em especial amidos. Dentre essas opções, a flotação catiônica reversa é a técnica mais utilizada atualmente em aplicações industriais, devido à sua alta seletividade e altas taxas de produção (ARAÚJO, 2005).

Um fato observado no Quadrilátero Ferrífero, local onde se situa a mina tratada neste estudo, é uma presença maior de itabirito pobre no depósito. Sendo assim, devido à exaustão

de reservas com teores mais altos, surge a necessidade de beneficiamento de minérios de baixos teores e com liberação em faixas granulométricas mais finas, além da necessidade do reaproveitamento ou reprocessamento do rejeito gerado no processo.

Uma alternativa que vem sendo estudada é a flotação aniônica direta, pois de acordo com Araújo (2006), esta é uma técnica indicada para minérios de baixo teor ou rejeitos descartados para barragem. Dessa forma, fica evidente a importância da realização de um estudo que possibilite a concentração do minério de ferro com baixo teor por meio de flotação, de maneira eficiente e tecnicamente viável.

O objetivo deste trabalho é avaliar a concentração dos minerais portadores de ferro do minério proveniente de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero, por meio da flotação aniônica direta, utilizando ácido graxo saponificado como coletor. Além disso, será avaliada a necessidade de aplicação de depressor para obtenção de um melhor desempenho metalúrgico nos testes de flotação.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência da concentração de duas amostras de minério de ferro de um depósito itabirítico de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero, com teores de ferro de 52,1% (alimentação da flotação) e 6,6% (rejeito CMAI), através da flotação aniônica direta utilizando um coletor biodegradável a base de ácido graxo saponificado e depressor a base de silicato de sódio.

Os objetivos específicos são:

- Efetuar ensaios de flotação, em escala de bancada utilizando célula mecânica com a amostra da alimentação da flotação, apenas com coletor, e com coletor e depressor, variando suas concentrações;
- Efetuar ensaios de flotação, em escala de bancada utilizando célula mecânica com a amostra que representa o rejeito do separador magnético, apenas com coletor, e com coletor e depressor, variando suas concentrações;
- Avaliar a performance da flotação em termos de teor e recuperação de Fe e dos principais contaminantes ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para as dosagens testadas de ácido graxo saponificado como coletor e silicato de sódio como depressor;
- Avaliar se os concentrados gerados com a amostra da alimentação da flotação estão dentro das especificações químicas de produtos tipo *pellet feed* (~ 60 % Fe).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Minérios de ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, e há aproximadamente 300 minerais catalogados que possuem ferro em sua composição (CAXITO e DIAS, 2018), porém, para serem considerados minerais-minério devem ser economicamente e tecnicamente viáveis de serem explorados, sendo analisada a quantidade de ferro presente nos minerais ou a concentração destes minerais nas rochas constituintes.

Um exemplo de minerais de ferro são os óxidos hematita e magnetita (Tabela 1). O ferro ainda pode ocorrer na forma de hidróxidos goethita e limonita, sulfetos (pirita, calcopirita e pirrotita), carbonatos (siderita e ankerita) e em silicatos (greenalita, riebeckita e grunerita) (CAXITO e DIAS, 2018).

Tabela 1 – Principais minerais de ferro

Nome, Fórmula	Cor	Dureza	Densidade	Brilho	Sistema cristalino	Transparência	Fratura
Goethita, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	preto amarronzado, amarelado ou avermelhado	5,0-5,5	4,0-4,4	Adamantino	ortorrômbico	opaco	fibrosa, quebradiça
Hematita, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	cinza a preto	5,5-6,5	4,9-5,3	metálico (terroso quando amorfo)	hexagonal	opaco	Subconchoidal ou irregular
Magnetita, $\text{Fe}_2\text{O}_4$	preto	6,0	5,2	metálico ou submetálico	cúbico	opaco	Subconchoidal
Siderita $\text{FeCO}_3$	amarelo pálido ou amarelo amarronzado e preto a vermelho amarronzado	3,5-4,5	3,7-3,9	perláceo ou vítreo	hexagonal	opaco, raramente translúcido	irregular, quebradiça

Fonte: Adaptado de Cristie e Brathwaite (1997).

A hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pode apresentar cores que variam desde vermelho-sangue, cinza metálico ou preto. Possui um sistema cristalino trigonal e pode apresentar hábito romboédrico, tabular, granular, laminar, botroídal ou compacto. Sua densidade varia de 4,9  $\text{g/cm}^3$  a 5,3  $\text{g/cm}^3$ , e sua dureza encontra-se entre 5,5 e 6,7. Uma das suas principais características é o brilho metálico. A hematita possui 70% de ferro em sua composição e é o

principal mineral de ferro economicamente lavrável em rochas como o itabirito (KLEIN, 2012).

A magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) é composta por 72,4% de ferro e 26,7% de oxigênio. Ela apresenta forma cristalina isométrica, geralmente octaédrica. Sua dureza pode variar de 5,5 a 6,7. Possui uma cor preta ou acinzentada e brilho metálico. A sua densidade varia de  $5,15 \text{ g/cm}^3$  a  $5,18 \text{ g/cm}^3$ . Uma das suas principais características é ser altamente magnética (KLEIN, 2012).

A goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) é um óxido de ferro hidratado que possui em sua composição 10% de  $\text{H}_2\text{O}$  e 90%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sendo destes 62,8% de teor de Fe em massa. Sua cor pode variar entre vermelho, preto, amarelo e marrom. Sua dureza pode ser de 5 a 5,5 e possui uma densidade entre  $3,3 \text{ g/cm}^3$  a  $4,3 \text{ g/cm}^3$ . Geralmente está associada à hematita, pirita, gibbsita, caulinita (KLEIN, 2012).

## 2.2 Minerais de ganga

Ganga é um mineral que não possui nenhum interesse econômico, e ocorre associada com minério. A ganga diminui o teor do mineral-minério no minério e dificulta o beneficiamento do mesmo, portanto é prejudicial à economia da lavra (WINGE, 2018).

Um dos principais minerais de ganga dos minérios de ferro é o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Ele é um dos minerais mais abundante da crosta terrestre. Sua cor pode variar bastante dependendo da sua composição química, mas as mais comuns são a cor branca e transparente. Possui um sistema cristalino hexagonal e hábito maciço ou em agregados com granulação variada. Seu peso específico é de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  e possui uma dureza igual a 7 na escala de Mohs (KLEIN, 2012).

Outro mineral de ganga importante é a caulinita ( $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ) um mineral hidratado, que possui dureza baixa variando de 2 a 2,5. A sua densidade é de aproximadamente  $2,6 \text{ g/cm}^3$ . É formada por processos de alteração hidrotermal ou intemperismo de silicatos de alumínio. É comumente associada ao quartzo, óxidos de ferro, moscovita, pirita, siderita ou outros minerais argilosos. Sua cor mais comum é branca, porém devido a impurezas esta pode variar. Sua composição é de 46,5% de sílica, 39,5% de alumínio e 14% de água (KLEIN, 2012).

Assim como a caulinita, a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) também é um mineral que possui alumínio em sua composição, tratando-se de um hidróxido de alumínio. Ela pode se formar por processo supergênico. Seu brilho é geralmente vítreo e suas placas de cristal possuem um brilho nacarado. Sua coloração é geralmente incolor ou branca, e pode ser transparente ou

translúcida. Sua dureza é de 2,5 a 3 e sua densidade varia entre 2,3 g/cm<sup>3</sup> a 2,4 g/cm<sup>3</sup>. Ela é composta por 65,43% de alumina e 34,47% de água (KLEIN, 2012).

A dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) é um mineral de ganga muito comum nos depósitos tipo Itabirito carbonático. Ela é um mineral de carbonato de cálcio e magnésio. Possui um sistema cristalino trigonal, e apresenta cor acinzentada e brilho vítreo. Sua dureza varia entre 3,5 e 4,0 na escala de Mohs. Sua densidade está entre 2,86 g/cm<sup>3</sup> e 3,10 g/cm<sup>3</sup> (KLEIN, 2012).

### 2.3 Mercado de minério de ferro

O Brasil detém cerca de 19% das reservas mundiais de minério de ferro, logo atrás da Austrália, e juntos dominam a produção mundial de ferro, detendo cerca de um terço das exportações mundiais cada. Brasil e Austrália foram responsáveis por produzir cerca de 60% de todo o minério de ferro no mundo em 2019 (Tabela 2) (USGS, 2021). Os outros países que possuem grandes depósitos de ferro são Canadá, África do Sul e Rússia.

Tabela 2 - Produção Mundial de Ferro 2019 e estimativa para 2020 / Reservas Mundiais em 2019 - Valores em Mt. <sup>e</sup>=Estimado e NA=não disponível

	Produção da mina				Reservas	
	Minério utilizável		Ferro contido		Minério Bruto	Ferro contido
	2019	2020 <sup>e</sup>	2019	2020 <sup>e</sup>		
Estados Unidos	46.900	37.000	29.800	24.000	3.000	1.000
Austrália	919.000	900.000	569.000	560.000	50.000	24.000
<b>Brasil</b>	<b>405.000</b>	<b>400.000</b>	<b>258000</b>	<b>252.000</b>	<b>34.000</b>	<b>15.000</b>
Canadá	58500	57.000	35.200	34.000	6.000	2.300
Chile	13.100	13.000	8.430	8.000	NA	NA
China	351.000	340.000	219.000	210.000	20.000	6.900
Índia	238.000	230.000	148.000	140.000	5.500	3.400
Iran	33.100	32.000	21.700	21.000	2.700	1.500
Cazaquistão	22.000	21.000	6.150	5.900	2.500	900
Peru	15.100	15.000	10.100	10.000	NA	1.500
Rússia	97.500	95.000	64.300	63.000	25.000	14.000
África do Sul	72.400	71.000	41.200	40.000	1.000	640
Suécia	35.700	35.000	22.100	22.000	1.300	600
Turquia	16.400	16.000	9.110	8.900	NA	NA
Ucrânia	63.200	62.000	39.500	39.000	6.500	2.300
Outros países	67.700	75.000	39.000	43.000	18.000	9.500
Total mundial (aproximadamente)	2.450.000	2.400.000	1.520.000	1.500.000	180.000	84.000

Fonte: Adaptado de USGS (2021).

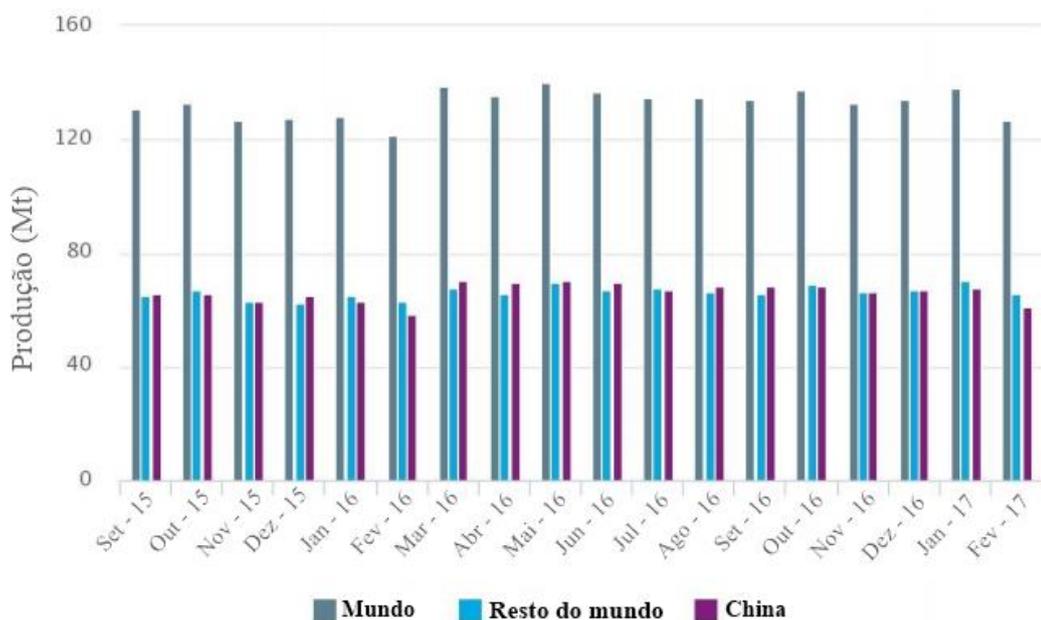
É possível observar na Tabela 2 que, embora a China ocupe o quarto lugar, o teor contido de ferro de suas reservas é muito baixo, ao contrário das reservas da Austrália, Brasil e Rússia.

O Brasil também ocupa o segundo lugar no ranking de maior exportador de ferro do mundo, e isto se deve ao fato de não somente possuir grandes reservas, mas também, como mencionado anteriormente, o alto teor de ferro presente nos minérios, acima de 62%, enquanto a média mundial é de aproximadamente 51,6% (BDMG, 2002).

As principais empresas produtoras de minério de ferro no Brasil são: Vale, Samarco Mineração S/A, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, V & M Mineração Ltda., Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (USIMINAS), Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A. e Gerdau Açominas S.A. (CAXITO e DIAS, 2018).

O principal consumo do minério de ferro é na produção de aço. Aproximadamente 90% da produção de ferro tem como finalidade a fabricação de ferro reduzido e aço bruto (CARVALHO, 2014). A demanda mundial de minério de ferro segue a de aço bruto, fazendo disto uma estreita relação entre consumo de minério de ferro e produção de aço. Sendo a China o maior produtor de aço do mundo, e conseqüentemente o maior consumidor de minério de ferro, ela é responsável por produzir cerca de metade de todo o aço bruto fabricado mundialmente (*World Steel Association*, 2017), como é possível ver na Figura 1.

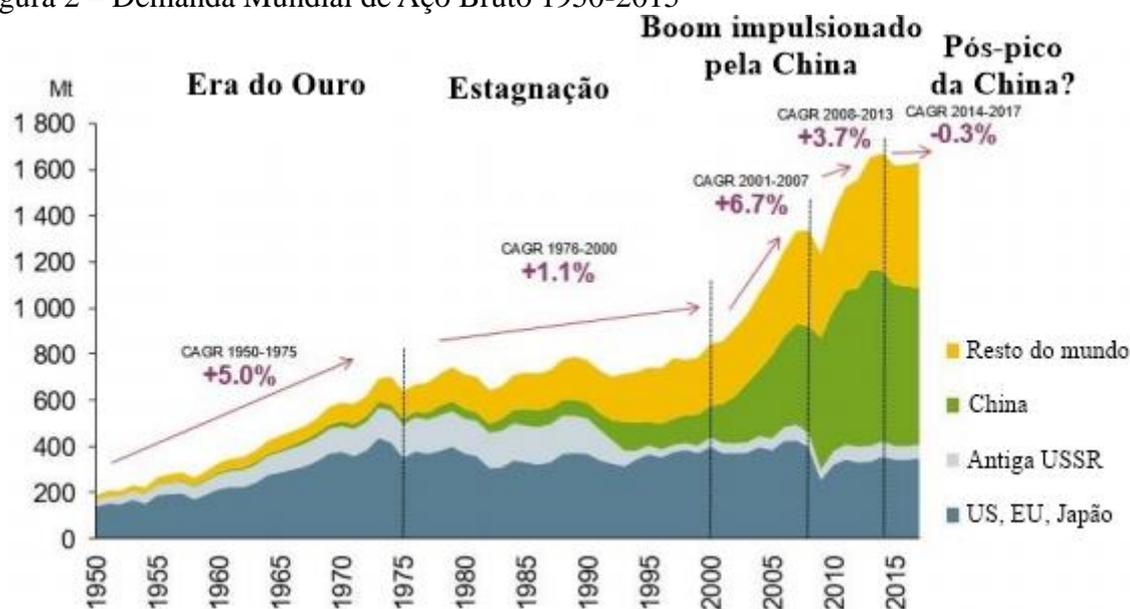
Figura 1 – Produção Mundial de Aço Bruto de setembro de 2015 a fevereiro de 2017



Fonte: Adaptado de World Steel Association (2017).

Dados mostram que, comparado com os valores de 2014, a demanda de aço bruto até 2017 caiu 0,3%, porém, há uma tendência de aumento, que pode ser observado em meados de 2015, conforme mostra a Figura 2 (CARVALHO, 2017).

Figura 2 – Demanda Mundial de Aço Bruto 1950-2015



Fonte: Carvalho (2017).

Houve uma redução na produção de minério de ferro na China (UNCTAD, 2016), e a previsão é que a demanda por aço bruto se mantenha estável pelos próximos anos (CARVALHO, 2017). Este fato traz consigo a possibilidade de aumento de demanda por minério de ferro da Austrália e do Brasil. As maiores mineradoras de ambos como a Vale, BHP, Rio Tinto e Fortescue já começaram a ampliar a sua participação no mercado por meio de estratégias como a diminuição dos custos de produção acrescido do aumento de produção com nível de exigência superior ao da atual demanda (UNCTAD, 2016).

## 2.4 Quadrilátero Ferrífero

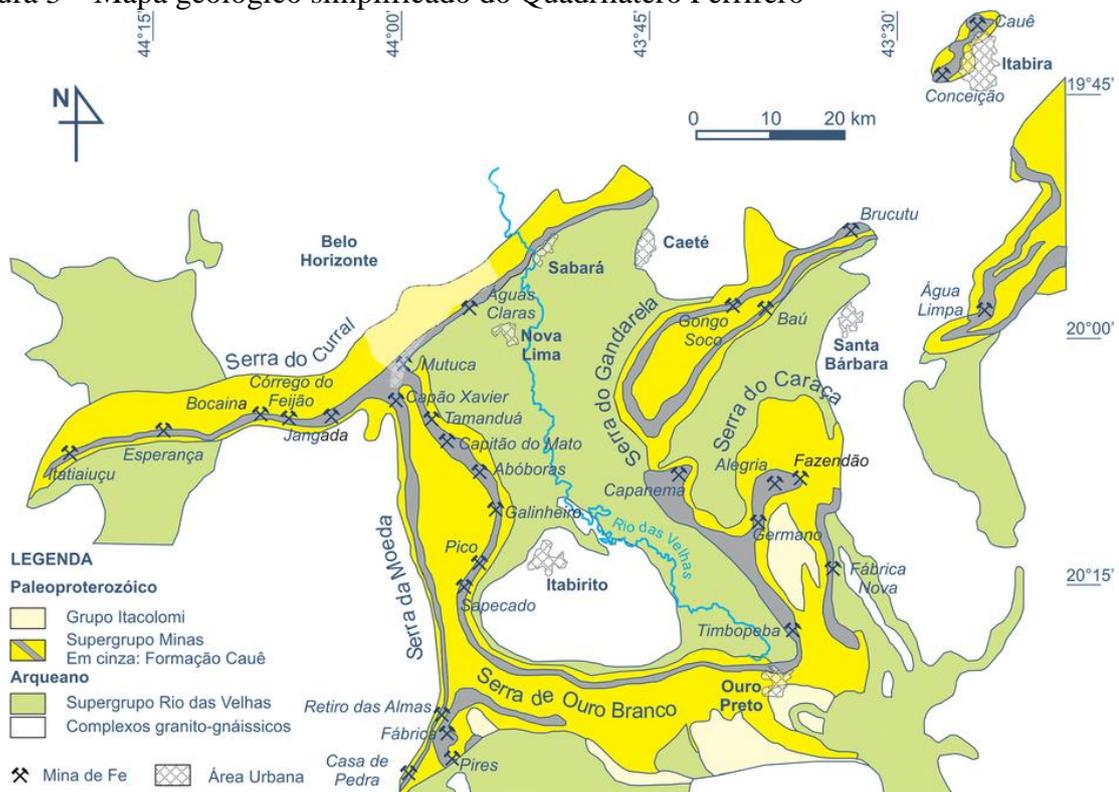
O Quadrilátero Ferrífero é uma região que possui uma área de aproximadamente 7000 km<sup>2</sup>. Está localizada no centro sul do estado de Minas Gerais, Brasil. As atividades mineradoras de ouro e ferro nesta região datam de mais de três séculos atrás, e por este motivo ela teve um destaque, e é uma das áreas mais estudadas no país com relação a cartografia geológica (CAXITO e DIAS, 2018).

A província mineral do Quadrilátero Ferrífero se localiza na borda sul do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1997), e trata-se de uma das mais bem expostas e estudadas

unidade tectônica do embasamento da plataforma sul-americana, abrangendo os estados de Minas Gerais e Bahia. O Quadrilátero representa uma notável área do pré-Cambriano, e as sequências nesta crosta são divididas em quatro principais unidades (Figura 3):

1. Complexos metamórficos arqueanos: formado por gnaisses, migmatitos e granitóides;
2. Supergrupo Rio das Velhas: Idade arqueana (2,7 Ga). Sequência do tipo greenstone belt;
3. Supergrupo Minas: datada da idade paleoproterozóica. Pacote metassedimentar predominantemente clástico, intercalado com rochas sedimentares químicas (FFBs e carbonatos). Metamorfismo de baixo a médio grau;
4. Grupo Itacolomi: Sequência clástica formada por conglomerados e arenitos.

Figura 3 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Caxito e Dias (2018).

Cerca de 60% da produção nacional de ferro vem do Quadrilátero Ferrífero. O Quadrilátero abriga diversos tipos de depósitos de ferro, tendo como principais os depósitos com litotipos de itabiritos, característico da região e associados à Formação Cauê (CAXITO e DIAS, 2018).

O ferro contido neste tipo de depósito possui elevados valores de teor, que podem variar de 50% a 65%. Os depósitos de itabiritos também são conhecidos como Formações

Ferríferas Bandadas (Banded Iron Formations - BIFs), e se caracterizam como "Rocha sedimentar ou metassedimentar química ou vulcanoquímica finamente estratificada, apresentando camadas de óxidos, carbonatos ou silicatos de ferro ritmicamente alternadas com camadas diferenciadas destas (quartzosas, anfibólicas, quartzo cloríticas)", segundo o Glossário Geológico da CPRM (WINGE, 2018).

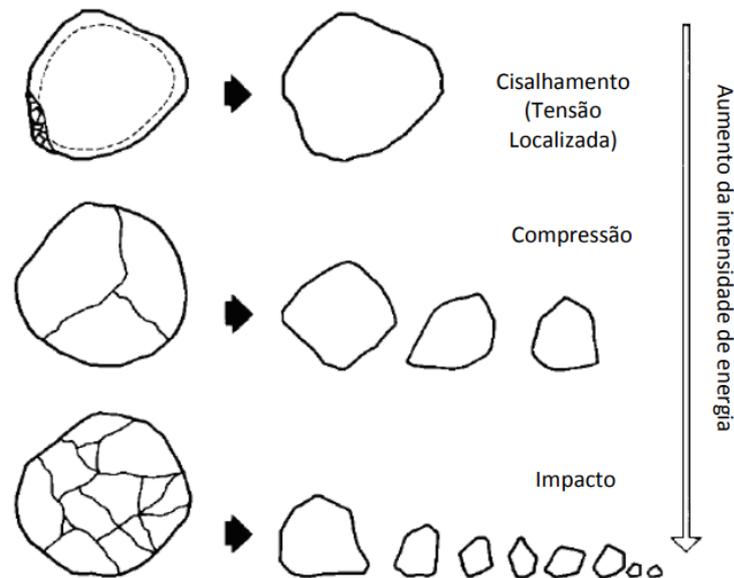
## **2.5 Processamento de minério de ferro**

Em geral, o processamento do minério de ferro se dá pelas seguintes etapas: cominuição, separação por tamanho, concentração e separação sólido-líquido. A configuração destas etapas pode mudar de acordo com o teor e a granulometria do minério, por exemplo, os minérios de alto teor dispensam a etapa de concentração, os de baixo teor com granulometria grossa necessitam apenas de concentração gravítica, já os com baixo teor e granulometria natural fina tem a necessidade de serem concentrados por separação magnética de alta intensidade a úmido e de flotação (LUZ, 2010).

As operações de cominuição podem ser resumidas em desmonte de rocha, britagem e moagem, sendo que o que irá determiná-las é a faixa granulométrica em que elas se aplicam.

A cominuição ou fragmentação é o processo onde os blocos têm sua granulometria reduzida. Ela é realizada por três mecanismos que envolvem energia mecânica: compressão, impacto e cisalhamento (BERALDO, 1987). São estes mecanismos que irão determinar o uso dos equipamentos de britagem e moagem. A Figura 4 exemplifica a energia envolvida nesses mecanismos.

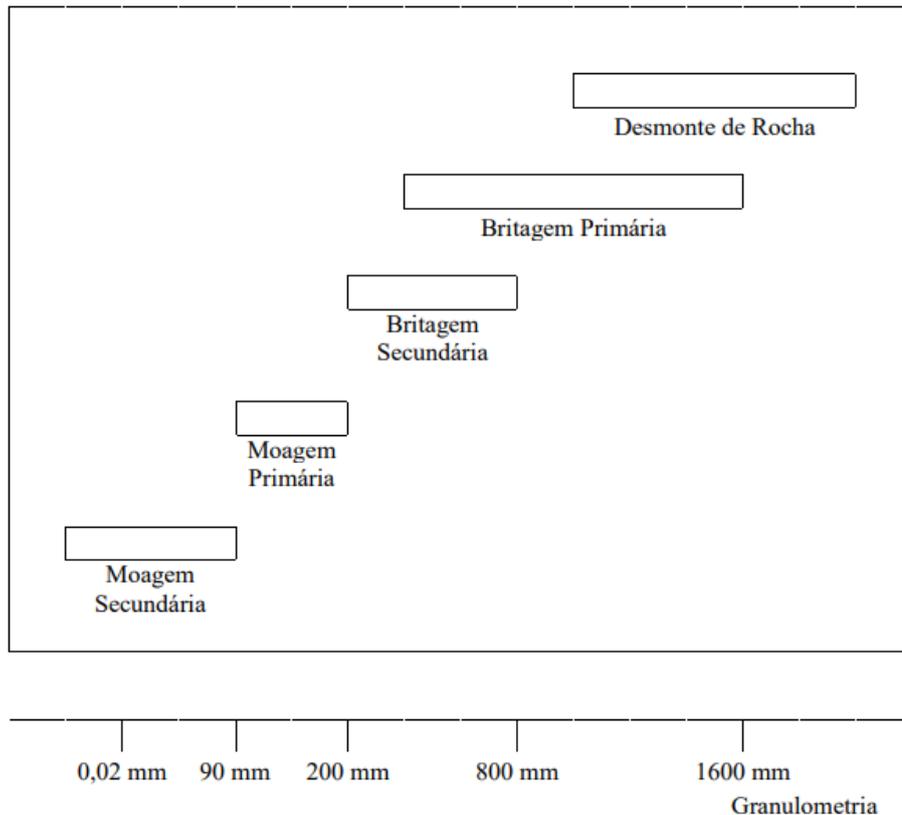
Figura 4 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição granulométrica dos produtos



Fonte: Adaptada de Kelly e Spottiswood (1982).

No cisalhamento a força aplicada não é suficiente para que haja a fatura da partícula, neste caso apenas ocorre uma concentração de forças marginais que provoca pequenas fraturas superficiais, e isso gera partículas finas, quase não ocorrendo redução da partícula original. Já no mecanismo de compressão a força aplicada é lenta e progressiva, isso permite um alívio do esforço com o surgimento de uma fratura. A força aplicada é inferior à resistência da rocha ou partícula, e produz partículas grossas e finas. O mecanismo de impacto é o contrário ao de compressão, já que ele ocorre quando o esforço de fragmentação é aplicado rápido e com intensidade muito maior que a da resistência da rocha ou particular. Nesse mecanismo há uma predominância de partículas com granulometrias mais finas (KELLY e SPOTTISWOOD, 1982). Estes mecanismos são observados em diversas operações e produzem distribuição granulométrica específica para cada uma, como é exemplificado na Figura 5.

Figura 5 – Estágios de fragmentação de acordo com sua granulometria



Fonte: Ferreira (2011).

A separação por tamanho ocorre quando se deseja separar o minério em faixas granulométricas distintas, e geralmente é feita por peneiramento industrial ou classificação em meio fluído. O peneiramento industrial trabalha com faixas granulométricas que variam de  $37\mu\text{m}$  até aproximadamente  $250.000\mu\text{m}$ , e pode ser a seco ou a úmido. Já a classificação em meio fluído trabalha com faixas mais finas ( $2000\mu\text{m}$  a  $2\mu\text{m}$ ) e por este motivo, é muito utilizada como etapa de deslamagem, para a retirada dos finos ou lamas (NASCIMENTO, 2014). A deslamagem é uma etapa essencial quando tratamos de flotação, pois os finos são um problema no processo de flotação. A hidrociclonação é muito utilizada para a classificação anterior ao processo de flotação.

A etapa de concentração utiliza alguma característica física e/ou físico-química do mineral para realizar a separação. Os tipos de concentração mais utilizados para minério de ferro são concentração gravítica (utiliza a densidade como propriedade diferenciadora), a concentração magnética (propriedade diferenciadora é a susceptibilidade magnética) e flotação (utiliza características superficiais como propriedade diferenciadora) (LUZ, 2010).

A separação sólido-líquido se faz muito necessária no final da etapa de concentração, pois o material concentrado se encontra na forma de polpa, ou seja, com uma grande

quantidade de água em mistura com os sólidos. Esta etapa consiste em realizar a separação do líquido e do sólido, deixando o produto final com uma baixa umidade, ou ainda com uma certa quantidade de água, dependendo do seu destino final (LUZ, 2010).

## 2.6 Flotação

A flotação baseia-se na incorporação de bolhas de ar em uma mistura de partículas sólidas com água, chamada de polpa. A polpa deve ser mantida sempre em agitação, para que as partículas sólidas fiquem em suspensão, a fim de garantir que todas as partículas tenham contato com os reagentes e bolhas. As partículas hidrofílicas interagem com a água e constituem o afundado. Já as partículas hidrofóbicas irão se aderir às bolhas e formam uma espuma que é removida quando chega à superfície (MASSI *et al.*, 2008). A seletividade deste processo se baseia principalmente no grau de hidrofobicidade das partículas, que pode ser natural ou induzida, e pode ser influenciada também em outras características operacionais do processo.

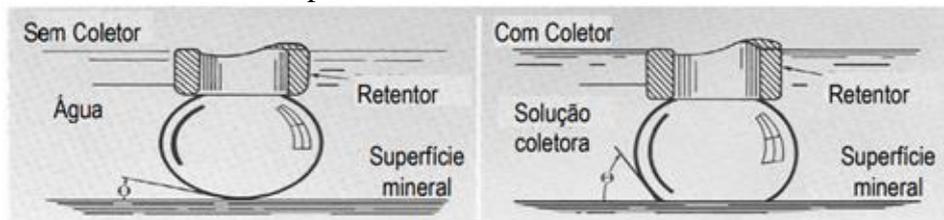
Para que ocorra a seletividade, é necessária a adição de reagentes à polpa. Há diversos reagentes que podem ser adicionados de acordo com a necessidades do processo. O principal objetivo da adição dos reagentes é viabilizar a separação, atuando para aumentar ou reduzir a flotabilidade e fornecer maior seletividade na separação dos minerais (FERREIRA, 2011).

Os reagentes de flotação podem ser classificados atualmente baseando-se nas funções específicas de cada um, e se dividem em coletores, espumantes e modificadores (LUZ, 2010).

Os coletores são compostos orgânicos utilizados para tornar a superfície de um mineral hidrofóbica, reduzindo a tensão superficial do meio e aumentando o ângulo de contato da bolha de ar com a superfície mineral (Figura 6), o que favorece as condições para que a partícula mineral se torne hidrofóbica e seja flotada (LUZ, 2010).

Sua composição molecular é formada por uma parte apolar e outra polar, podendo ser classificados como catiônicos (carga positiva) e aniônicos (carga negativa).

Figura 6 – Contato bolha de ar/superfície do mineral em um sistema com e sem coletor



Fonte: LUZ (2010).

Os espumantes são utilizados para garantir que a espuma fique estável, embora muitos coletores possam assumir essa função, como é o caso dos ácidos graxos.

Os agentes modificadores intensificam a ação dos coletores, e podem ser classificados como ativadores, reguladores de pH, dispersantes ou depressores. Os depressores têm como função inibir a ação do coletor (LUZ, 2010).

### 2.6.1 Flotação de minério de ferro

A flotação de óxidos de ferro por meio da flotação direta (deprimindo a sílica e flotando o minério de ferro) começou a ser pesquisada por volta do ano 1931, e as primeiras plantas industriais também utilizavam esta técnica (HOUOT, 1983). Inicialmente foram testados reagentes aniônicos, onde os mais utilizados eram sulfonatos de petróleo, óleo combustível (querosene), ácidos graxos e hidroxamatos.

Com o passar dos anos foram realizados mais estudos com o intuito de otimizar a flotação do minério de ferro. As rotas testadas foram a flotação aniônica de sílica ativada e a flotação catiônica da sílica.

Segundo Araújo (2006), a flotação aniônica de sílica, ou flotação aniônica reversa de quartzo era empregada em uma época onde as aminas estavam indisponíveis para serem aplicadas no beneficiamento de minérios.

Com a então disponibilidade das aminas, a flotação catiônica da sílica passou a ser a técnica mais eficaz, e hoje é a mais empregada na flotação de minério de ferro. Neste tipo de flotação o quartzo é flotado utilizando éter aminas que são parcialmente neutralizadas com ácido acético, já o ferro é deprimido por amidos não modificados (ARAÚJO *et al*, 2005).

### 2.6.2 Flotação aniônica reversa de minério de ferro

Um das vantagens observada neste tipo de flotação é a tolerância dos finos. As lamas ( $< 10 \mu\text{m}$ ) são um grande problema na flotação, já que a sua quantidade ocasiona o aumento do consumo de reagentes na flotação, pois uma maior quantidade de finos implica no aumento das dosagens de coletor e depressor, devido a maior área de superfície, porém, dependendo da quantidade de finos, chega um ponto em que o aumento das dosagens não surtirá efeito no excesso de lama. Por este motivo é necessário que haja uma etapa de deslamagem antes da etapa de flotação, para que possa ocorrer a remoção desses finos. Na flotação aniônica reversa de quartzo é interessante fazer uma deslamagem prévia quando se trata de uma quantidade muito elevada de finos (MA, 2012).

Segundo Houot (1983), essa tolerância a finos apresentada na flotação aniônica reversa é dada pelo aumento das cargas superficiais dos óxidos quando se encontram em um pH entre 11 e 12. Neste nível de pH as forças eletrostáticas repulsivas existentes entre as lamas e as partículas grossas são mais fortes, dispensando eventualmente uma etapa prévia de deslamagem.

Para que ocorra flotação da sílica neste tipo de flotação, é necessário que primeiramente o quartzo seja ativado com íons de cálcio. Esta etapa é essencial, já que na faixa de pH entre 11 e 12 as cargas superficiais do quartzo e da hematita são negativas. Quando adicionados à polpa, os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  fazem com que a carga superficial do quartzo se torne positiva. Dessa forma os coletores (ácidos graxos) se adsorvem a superfície do quartzo (MA, 2012). Geralmente utiliza-se cloreto de cálcio ou cal como ativadores, este último sendo mais utilizado por ser mais barato.

Os coletores utilizados na flotação aniônica reversa são os coletores aniônicos como os ácidos graxos e seus sais sódicos, sendo os mais utilizados o *Tall Oil* e o oleato de sódio. Os ácidos graxos são amplamente utilizados na flotação de minerais oxidados e não metálicos. Possuem uma cadeia com comprimentos que variam entre 8 e 18 carbonos. São de origem vegetal e sua saponificação é feita com hidróxido de sódio (NaOH). Os depressores utilizados para deprimir a hematita são os amidos, como o amido de milho, e também pode-se utilizar gomas, quebracho (derivado do ácido tânico) e dextrinas (NASCIMENTO, 2010). No Brasil o amido de milho é predominante utilizado como depressor de óxidos de ferro.

### 2.6.3 Flotação catiônica reversa de minério de Ferro

Na flotação de minérios de ferro, o método mais utilizado é a flotação catiônica reversa em pH alcalino, utilizando aminas como coletores do quartzo e amidos como depressores para os minerais de ferro. Esta técnica é utilizada atualmente em aplicações industriais, e isto se deve ao fato de que na flotação reversa há uma alta seletividade obtida, utilizando apenas dois reagentes (coletor e depressor), embora possa utilizar outros tipos de reagentes, dependendo de diversos fatores. Neste tipo de flotação as aminas também atuam tanto como coletores quanto como espumantes (LUZ, 2010).

O pH neste tipo de flotação deve-se manter alcalino (em torno de 10 a 11) para assegurar uma maior diferença entre as cargas superficiais da hematita e do quartzo, a fim de aumentar a seletividade (BATISTELI, 2007). Outro ponto importante de manter o pH nesta faixa é que assim ele permite que a amina atue tanto como coletor quanto como espumante, já que dessa maneira 50% dela se encontra na forma iônica, atuando como coletor, e o restante na forma molecular, atuando como espumante (VIANA, 2006).

Como já mencionado, os coletores catiônicos mais utilizados neste tipo de flotação são do grupo das aminas (CASSOLA e BARTALINI, 2010). Não existe uma amina universal devido ao fato que a composição dos minerais muda para cada depósito (FILIPPOV, 2014). Leja (1982) listou os principais tipos de aminas que podem ser utilizados na flotação catiônica reversa de 21 tipos de minério de ferro, que podem ser observados na figura 7.

Figura 7 – Tipos de aminas utilizadas na flotação de ferro. R= cadeia hidrocarbônica com 10 átomos de C e R´= cadeia alquílica curta

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	$\text{R}(\text{R}')_2\text{NH}^+\text{Cl}^-$
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 sulfônio	$\text{RS}(\text{R}')_2\text{Cl}$

Fonte: Leja (1982).

O depressor universal para os óxidos de ferro são os amidos. Ele pode ser extraído de vários tipos de vegetais, como milho, trigo, arroz, mandioca, batata e outros (RESENDE,

2013). Por possuir uma baixa solubilidade em água fria, o amido não modificado deve passar por uma gelatinização, que pode ser feita por efeito térmico ou adicionando-se soda cáustica, que é o método mais utilizado no Brasil (BATISTELI, 2007).

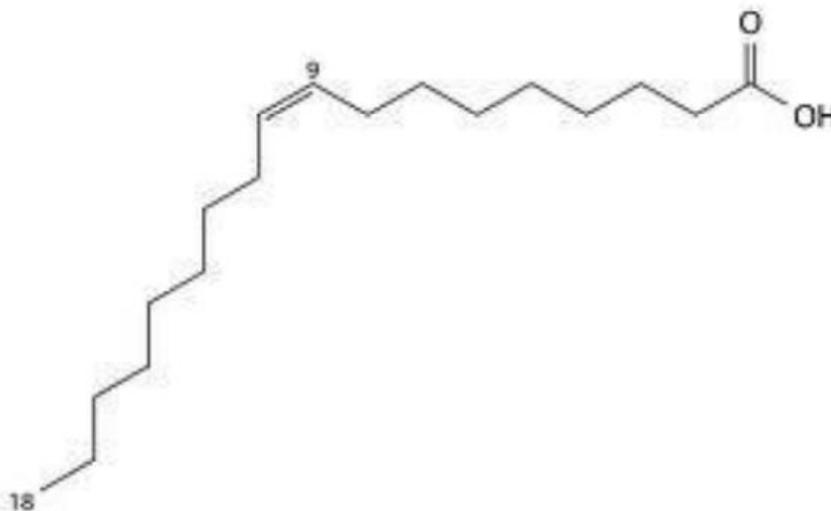
#### 2.6.4 Flotação direta de minério de ferro

Embora a concentração do minério de ferro tenha se iniciado com a flotação direta de minério de ferro, ela foi ultrapassada pela flotação catiônica reversa por esta apresentar maior seletividade, tornando a flotação direta um método pouco utilizado atualmente (COSTA, 2009).

Na flotação direta de ferro são utilizados coletores aniônicos, como por exemplo os sulfonatos de petróleo, ácidos graxos e hidroxamatos (HOUOT, 1983). Destes, os mais amplamente estudados são os ácidos graxos, em especial o ácido oleico (Figura 8) e seu sal oleato de sódio, utilizado como coletor para flotação de hematita (SHIBATA, 2003).

Um fator que deve ser observado na seleção de um ácido graxo é a sua solubilidade em água, sendo aceitáveis ácidos com cadeias que variam de 5 a 18 carbonos.

Figura 8 – Estrutura Química do Ácido Oleico



Fonte: Lopes (2009).

Os ácidos graxos podem se adsorver na superfície da hematita de duas maneiras, química ou fisicamente, sendo na literatura a adsorção química a mais aceita. E além destas

duas, estudos com infravermelho constataram a adsorção do oleato de sódio na superfície da hematita por meio de precipitação superficial (MA, 2012).

Diversos estudos foram realizados para comprovar a eficiência dos ácidos graxos e seus sais como coletores na flotação aniônica direta de minérios de ferro.

Vieira (1994) realizou um estudo de bancada para concentração de um itabirito com teor de ferro de 46%, oriundo da mina de Conceição da empresa Vale S.A. Foi utilizado oleato de sódio como coletor e silicato de sódio como depressor. Foram realizados testes com e sem a presença de silicato de sódio. O melhor resultado foi obtido sem a utilização de depressor e com uma dosagem de coletor igual a 30 g/t em pH 7. O concentrado de ferro nessa condição obteve um teor igual a 65,5% e uma recuperação metalúrgica de 78,46% e teor de sílica de 4,7%. Vieira (1994) também realizou testes com flotação reversa, a fim de comparar os resultados, e nesta obteve teor de ferro igual a 67% e uma recuperação metalúrgica de 91,45% e teor de sílica de 4,46%, comprovando maior eficiência do processo quando se utiliza a flotação com configuração reversa.

Lopes (2009) avaliou a possibilidade de concentração de minério de ferro da Serra da Serpentina por meio de flotação aniônica direta em escala de bancada. O estudo se baseou na avaliação dos coletores oleato de sódio, AERO 6493 (hidroxamato) e AERO 825 (sulfonato) e utilizou o silicato de sódio como depressor. Preliminarmente, realizou-se estudos de microflotação em tubo de Hallimond de amostras minerais puras (hematita e quartzo) a fim de determinar qual faixa de pH levaria à melhor seletividade na separação da hematita e do quartzo. Posteriormente, foram realizados ensaios de bancada utilizando flotação reversa de minério de ferro utilizando amido de milho como depressor e amina EDA como coletor. O melhor resultado destes ensaios foi obtido com as concentrações de amido e amina iguais a 200 g/t e 150 g/t, respectivamente, atingindo um concentrado com teor de ferro igual a 66,41% e 3,8% de teor de SiO<sub>2</sub> e recuperação metalúrgica de 75,8%. Também foram realizados ensaios de flotação direta, onde os melhores resultados obtidos utilizando o oleato de sódio e o depressor foram com dosagens de 1200 g/t e 600 g/t, respectivamente, em pH 7. Neste teste obteve-se um concentrado contendo 58,1% de Fe e 9,8% de SiO<sub>2</sub>, com uma recuperação metalúrgica de 88%. No ensaio utilizando o hidroxamato com uma dosagem de 1200 g/t e 1500 g/t de silicato de sódio o teor de ferro no concentrado foi 61,5% e o SiO<sub>2</sub> de foi 9,8% com uma recuperação metalúrgica de ferro igual a 77,9%. O melhor resultado com a utilização do sulfonato foi nas dosagens de 1200 g/t e 2100 g/t de do depressor silicato de sódio, onde foram obtidos teores de Fe e SiO<sub>2</sub> de, respectivamente, 57,9% e 13,3% com uma recuperação metalúrgica de 89,9%. A partir destes ensaios Lopes (2009), concluiu-se que

embora as recuperações de ferro na flotação direta tenham sido maiores do que na flotação reversa, os teores de ferro na flotação reversa foram maiores, assim como os teores de  $\text{SiO}_2$  foram bem menores.

Santana (2012) utilizou em seu estudo um minério itabirítico com um teor de 26% de Fe, proveniente do Quadrilátero Ferrífero, com fração passante em  $150\mu\text{m}$ . Foram realizados testes de bancada utilizando os coletores ácido oléico, óleo graxo vegetal industrial, flotin FS-1 e flotin FS-2. Foi feito ainda uma investigação acerca do uso de silicato de sódio como depressor, além de espumante e dispersante. Foram investigadas as dosagens, pH, tempo de condicionamento dos reagentes, agitação da polpa e porcentagem de sólidos. O melhor resultado obtido foi utilizando o ácido oleico de forma isolada com uma dosagem de 300,0 g/t. O concentrado *rougher* deste teste foi submetido a várias etapas de limpeza. Utilizando duas etapas de limpeza obteve-se um índice de seletividade Gaudin de 31,2, uma recuperação metalúrgica de ferro de 90,85%, com um concentrado contendo 1,67% de  $\text{Si}_2\text{O}$  e 3,77% de teor de ferro no rejeito. Utilizando três etapas de limpeza conseguiu chegar a um índice de seletividade de Gaudin igual a 40, uma recuperação metalúrgica de ferro de 90,09%, com um concentrado contendo 0,95% de  $\text{Si}_2\text{O}$  e 4,04% de teor de ferro no rejeito. Os resultados mostraram que há viabilidade na concentração de minério de ferro itabirítico de baixo teor por meio de flotação direta, para uso do concentrado em alto fornos ou fornos de redução.

Nascimento, Souza & Lima (2014) em seu estudo, mostraram a importância da porcentagem de sólidos na flotação de minério de ferro em pH neutro (7,0). Foram efetuados ensaios de flotação em escala de bancada utilizando minério de ferro especularítico, com teores de 35,34% de Fe e 48,02% de  $\text{SiO}_2$ , empregando oleato de sódio como coletor e silicato de sódio como depressor. Nos testes foram analisados a porcentagem de sólidos, a deslamagem prévia do minério, a interação entre deslamagem do minério e dosagem de meta-silicato de sódio a fim de avaliar a recuperação de ferro. Analisando os teores de Fe e  $\text{SiO}_2$  nos concentrados, observou-se que o único fator significativo na recuperação de ferro da amostra foi a porcentagem de sólidos, onde o melhor resultado obtido foi com uma porcentagem de sólidos de 60%, obtendo os teores de ferro e sílica no concentrado de 58,1% e 14,1% respectivamente, utilizando dosagem de silicato de sódio igual a 600 g/t e 1200 g/t de oleato de sódio.

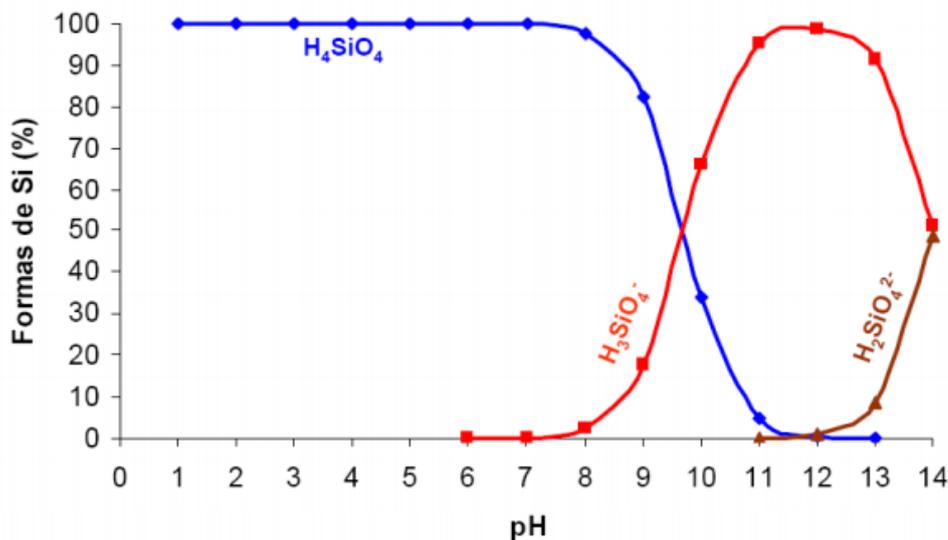
Soares (2015) realizou um estudo de flotação aniônica direta de um minério de ferro do depósito mineral Ferrífero Depósito Jambeiro, em Minas Gerais, que possuía um teor médio de 31,82% de ferro. Ele utilizou ácido graxo saponificado como coletor com dosagens de 800, 1200 e 1600 g/t, e silicato de sódio como depressor, com dosagens de 300, 600 e 900

g/t, em pH neutro (7,0). O melhor resultado obtido foi nas dosagens de 1600 g/t de coletor e 600 g/t de depressor, obtendo uma recuperação metalúrgica de ferro de 64,27% e um teor de Fe igual a 35,61 %. Os resultados obtidos mostram os desafios da flotação direta de ferro e a necessidade de novas metodologias para melhorar esta rota.

Para atuar como depressor de oximinerais, são utilizados aditivos inorgânicos, como os silicatos de sódio, polifosfatos de cálcio e sais de alumínio (LOPES, 2009). Dentre estes, o silicato de sódio é o mais utilizado, principalmente na flotação de minerais não sulfetados como depressor de ganga silicatada e carbonatos.

O silicato de sódio possui uma proporção  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  que varia bastante de acordo com o produto comercializado. Quanto maior esta proporção, mais efetivo este composto é como depressor, por conta de uma maior proporção de íons silicato e da formação dessas espécies. Devido à sua natureza química, o silicato de sódio é efetivo apenas em estreitas faixas de pH, apresentando baixa efetividade como depressor em  $\text{pH} < 6$  (assume a forma de ácido silícico), e mostrando-se efetivo em  $\text{pH} > 10$ , pois a sua proporção de  $\text{Na}_2\text{O}$  aumenta. A Figura 9 exemplifica o diagrama de espécies do ácido sílico em função do pH da solução (FIGUEIREDO, 2007).

Figura 9 – Especiação do ácido sílico em função do pH da solução



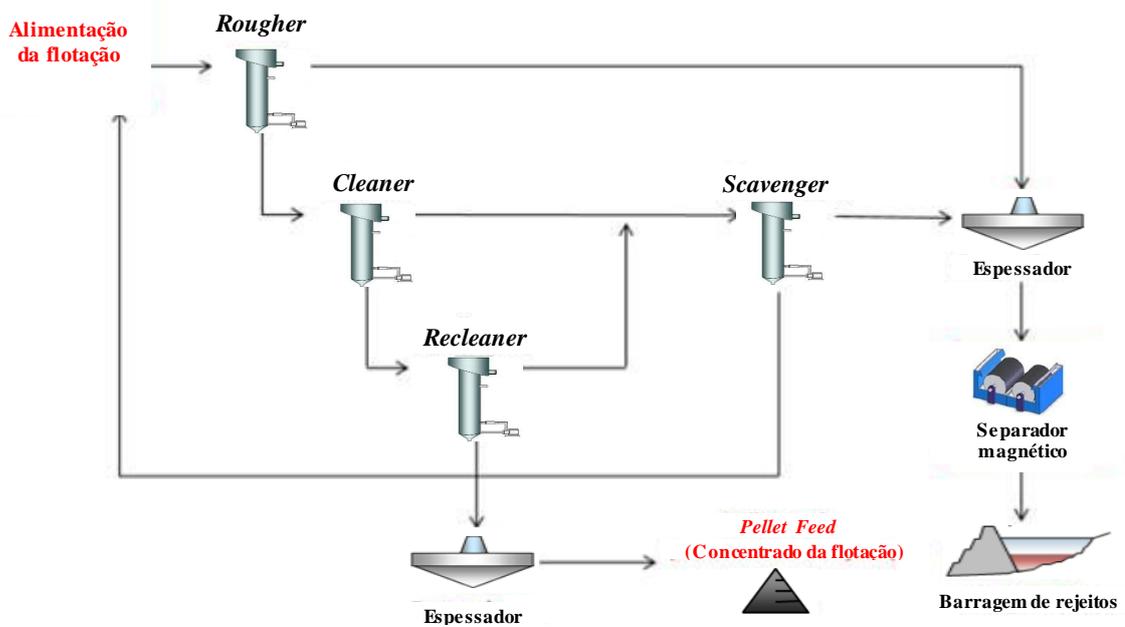
Fonte: Figueiredo (2007).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais

As amostras de minério de ferro itabiríticos utilizadas neste estudo são oriundas de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero. Foram recebidos um total de 60 kg base seca da amostra de minério de ferro da alimentação da flotação com teores de Fe e SiO<sub>2</sub> iguais a 52,1% e 22,9% respectivamente, e 10 kg base seca da amostra de minério de ferro do rejeito da separação magnética (CMAI), com teores de Fe e SiO<sub>2</sub> iguais a 6,6% e 90,2 respectivamente, que foram destacados na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma esquemático do circuito adotado na concentração de ferro da mina tratada neste estudo



Fonte: Adaptado de Marrocos (2018).

#### 3.2 Reagentes

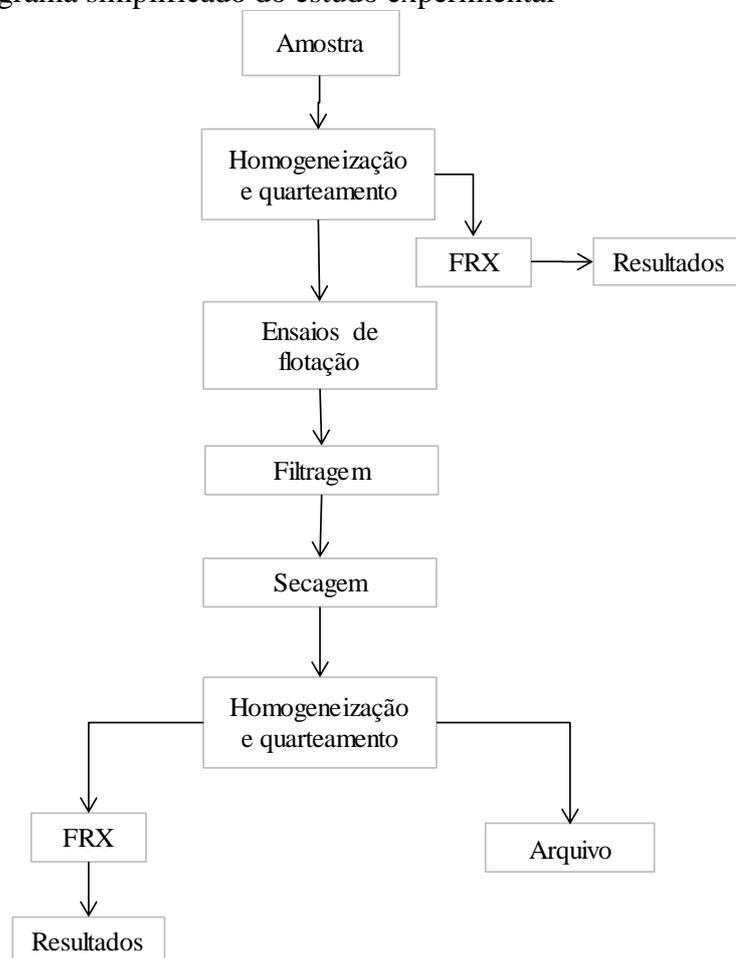
Os reagentes utilizados foram coletor a base de ácido graxo, silicato de sódio como depressor e hidróxido de sódio para realizar o ajuste de pH e a saponificação do ácido graxo.

Para as amostras da alimentação da flotação as dosagens de coletor variaram de 200 g/t a 600 g/t e foi feito apenas um teste utilizando depressor com uma dosagem de 800 g/t. Para as amostras do rejeito CMAI as dosagens de coletor variaram de 75 g/t a 150 g/t e também foi feito apenas um teste utilizando depressor, cuja dosagem foi de 600 g/t.

### 3.3 Recebimento e preparação de amostras

Os ensaios foram realizados na mini usina piloto do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), localizada no Rio de Janeiro, RJ, e a rota do processo adotado pode ser observada na Figura 11, sendo que o fluxograma dos experimentos foi o mesmo para a amostra da alimentação da flotação e do rejeito da separação magnética, com exceção que após a primeira etapa de homogeneização e quartejamento retirou-se uma pequena alíquota da alimentação da flotação para fazer análise mineralógica.

Figura 11 – Fluxograma simplificado do estudo experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

Após recebidas, para cada amostra foi feito homogeneização e confecção de pilha alongada, posteriormente, foi realizado o quartejamento até obtenção de alíquotas de aproximadamente 1 a 2kg. Ainda foram retiradas pequenas alíquotas para realizar FRX de ambas as amostras e análise mineralógica da amostra da alimentação da flotação. As análises

químicas das amostras foram realizadas utilizando a técnica de fluorescência de Raios X para os compostos Fe, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 3.4 Ensaio de flotação

Os testes de flotação foram realizados em célula mecânica em escala de bancada e tiveram por objetivo avaliar o efeito da dosagem de coletor, depressor e pH de flotação considerando o circuito na configuração *rougher*, *rougher/ cleaner*, e *rougher/ cleaner/ recleaner*. Foram utilizadas cubas de 1,3 litros e 3 litros. A Figura 12 apresenta a célula de flotação tipo *Denver* (modelo D12) que foi utilizada nos estudos. Os ensaios foram realizados no laboratório da mini usina piloto do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), localizada no Rio de Janeiro, RJ.

Figura 12 – Célula de bancada tipo *Denver* modelo D12, para os ensaios de flotação em escala de laboratório



Fonte: cedida pelo CETEM.

A porcentagem de sólidos adotada no condicionamento foi de 60% para as amostras da alimentação da flotação e 54% para as amostras do rejeito CMAI, e na flotação foi de 27% para ambos.

A vazão de ar utilizada foi de 3 l/min, controlado por um rotâmetro da marca *OMEL*. O pH na alimentação variou de 7,2 a 10. O tempo de condicionamento para todas as amostras foi de 5 minutos para cada reagente. O tempo de flotação variou em todas as amostras, sendo registrado até o momento em que ocorria a exaustão do flotado.

Foram realizados ao todo 14 testes, destes, 11 utilizando as amostras da alimentação da flotação e 3 utilizando as amostras do rejeito CMAI (Tabela 3).

Para as amostras da alimentação da flotação as dosagens de coletor variaram de 200 g/t a 600 g/t e foi feito apenas um teste utilizando depressor com uma dosagem de 800 g/t. Para as amostras do rejeito CMAI as dosagens de coletor variaram de 75 g/t a 150 g/t e também foi feito apenas um teste utilizando depressor, cuja dosagem foi de 600 g/t.

O tempo de condicionamento foi mantido o mesmo para todas as amostras (5 minutos para cada reagente).

Tabela 3 – Resumo dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI

Amostra	Teste	<i>Rougher</i>		<i>Cleaner</i>		<i>ReCleaner</i>		Reagente (g/t)	
		pH	T <sub>flot.</sub> (min)	pH	T <sub>flot.</sub> (min)	pH	T <sub>flot.</sub> (min)	Coletor: Ácido graxo saponificado	Depressor: Silicato de sódio
Alimentação da flotação	1	7,5	8,0	-	-	-	-	201	-
	2	7,2	9,0	-	-	-	-	499	-
	3	7,2	8,0	-	-	-	-	303	-
	4	7,9	7,5	-	-	-	-	403	-
	5	7,2	5,5	-	-	-	-	604	-
	6	7,2	7,0	-	-	-	-	201	-
	7	7,2	6,5	7,5	5,0	-	-	404	-
	8	7,2	5,0	7,5	6,0	-	-	499	-
	9	10,0	5,0	-	-	-	-	408	817
	10	9,0	8,4	8,5	8,0	8,0	9,0	606	-
	11	8,7	10,0	7,0	8,0	7,7	7,0	505	-
Rej. CMAI	1	7,5	7,0	-	-	-	-	100	-
	2	7,9	6,0	-	-	-	-	76	-
	3	10,0	2,0	-	-	-	-	151	604

Fonte: Elaborado pela autora.

Dos testes utilizando as amostras da alimentação da flotação, todos passaram pela etapa *rougher*, quatro passaram pela etapa *cleaner* (testes 7, 8, 10 e 11) e dois passaram pela etapa *reCleaner* (testes 10 e 11). Os testes com as amostras do rejeito CMAI passaram apenas pela etapa *rougher*. Dos testes com ambas amostras, apenas um teste da amostra da

alimentação da flotação (teste 9) e um do rejeito CMAI (teste 3) foi utilizado depressor. O resumo das etapas dos testes pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Etapas dos testes de flotação

Amostra	Teste	Etapas		
		<i>Rougher</i>	<i>Cleaner</i>	<i>Recleaner</i>
Alimentação da flotação	1	✓		
	2	✓		
	3	✓		
	4	✓		
	5	✓		
	6	✓		
	7	✓	✓	
	8	✓	✓	
	9	✓	✓	
	10	✓	✓	✓
Rej. CMAI	1	✓		
	2	✓		
	3	✓		

Fonte: Elaborado pela autora.

Foi realizada a análise química das amostras, dando ênfase aos elementos Fe, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Com o valor das massas e dos teores de cada produto foi possível obter os valores dos seguintes critérios de avaliação de desempenho dos testes experimentais, recuperação mássica (equação 1), recuperação metalúrgica (equação 2), Índice de Seletividade GAUDIN modificado (equação 3) e Eficiência da separação (equação 4), cujas fórmulas são apresentadas abaixo:

Recuperação em massa:

$$Y = \frac{C}{A} \times 100 \text{ ou } Y = \frac{a-e}{c-e} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Y = Recuperação em massa;

C = Massa do concentrado;

A = Massa da alimentação;

a = Teor da alimentação;  
 e = Teor do rejeito;  
 c = Teor do concentrado.

Recuperação metalúrgica:

$$R = \frac{Cc}{Aa} \times 100 \text{ ou } R = \frac{c(a-e)}{a(c-e)} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

R = Recuperação Metalúrgica.

Índice de Seletividade GAUDIN modificado:

$$IS = \sqrt{\frac{\%Fe \text{ concentrado} \times \%SiO_2 \text{ rejeito}}{\%Fe \text{ rejeito} \times \%SiO_2 \text{ concentrado}}} \quad (3)$$

Eficiência da separação (Schulz):

$$ES = \frac{100C}{A} \left[ \frac{c}{a} - \frac{(cm-c)}{(cm-a)} \right] \quad (4)$$

Onde:

cm = teor máximo de elemento útil (químico ou mineralógico).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização química e mineralógica

De início foi feita análise química das amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI para os elementos Fe, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 5).

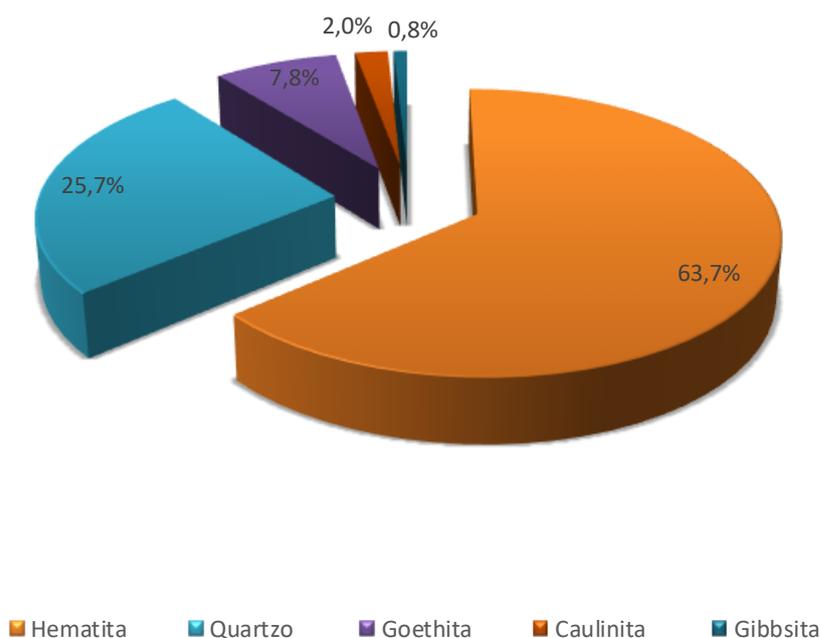
Tabela 5 – Análise química da amostra da alimentação da flotação e do rejeito

Amostra	Teores (%)		
	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Alim. da flotação</b>	52,1	22,9	0,7
<b>Rej. CMAI</b>	6,6	90,2	0,8

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 13 apresenta os principais minerais presentes na amostra da alimentação da flotação. Pode-se observar que os minerais de ferro (hematita e goethita) representam 71,5% do total, enquanto a ganga corresponde 28,5% da amostra, tendo o quartzo como principal contaminante.

Figura 13 – Análise mineralógica da amostra da alimentação da flotação



Fonte: Elaborado pela autora.

## **4.2 Ensaio de flotação**

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos testes de flotação, mostrando as análises químicas dos produtos gerados, a recuperação mássica e a recuperação metalúrgica. A tabela 8 apresenta o índice de Gaudin e eficiência da separação (Schulz).

Tabela 6 - Resultados de recuperação mássica e metalúrgica e da análise química dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI (Concentrado e rejeito final)

Amostra	Teste	Concentrado							Rejeito Final						
		Rec. Más. (%)	Teor			Recuperação Met.			Rec. Más. (%)	Teor			Recuperação Met.		
			Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Alimentação da flotação	1	13,2	67,6	2,3	0,6	17,2	1,4	11,9	86,8	49,5	25,1	0,7	82,8	98,6	88,1
	2	88,3	56,3	18,1	0,6	96,4	64,8	71,8	11,7	16,0	74,2	1,8	3,6	35,2	28,2
	3	67,6	63,0	7,6	0,6	82,5	21,6	50,6	32,4	27,9	57,5	1,2	17,5	78,4	49,4
	4	76,5	59,4	12,9	0,5	87,9	41,7	56,0	23,5	26,7	58,8	1,4	12,1	58,3	44,0
	5	93,0	54,3	18,9	0,7	97,6	78,0	81,5	7,0	18,0	71,2	2,1	2,4	22,0	18,5
	6	43,3	66,1	4,0	0,6	55,0	7,9	32,9	56,7	41,3	35,7	0,9	45,0	92,1	67,1
	7	68,1	63,9	7,5	0,6	83,2	21,9	53,3	68,1	27,5	56,8	1,2	16,8	78,1	46,7
	8	74,6	63,9	7,5	0,6	87,0	28,2	61,4	74,6	28,1	55,9	1,2	13,0	71,8	38,6
	9	16,6	68,6	0,9	0,4	22,0	0,7	9,8	83,4	48,3	26,1	0,7	78,0	99,3	90,2
	10	87,0	57,1	16,9	0,6	96,1	60,1	71,8	13,0	15,4	75,5	1,6	3,9	39,9	28,2
	11	77,7	61,5	10,5	0,6	91,4	34,8	61,8	22,3	20,1	68,7	1,4	8,6	65,2	38,2
Rej. CMAI	1	5,8	27,7	53,9	3,0	24,0	3,5	22,0	94,2	5,4	92,1	0,7	76,0	96,5	78,0
	2	5,8	30,5	50,7	2,7	26,8	3,3	18,9	94,2	5,2	92,5	0,7	73,2	96,7	81,1
	3	5,2	53,5	19,1	1,1	43,3	1,1	7,7	94,8	3,8	94,6	0,7	56,7	98,9	92,3

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 - Resultados de recuperação mássica e metalúrgica e da análise química dos testes de flotação das amostras da alimentação da flotação (Rejeito *rougher*, rejeito *cleaner* e rejeito *re cleaner*)

Amostra	Teste	Rejeito <i>Rougher</i>							Rejeito <i>Cleaner</i>							Rejeito <i>ReCleaner</i>							
		Rec Más. (%)	Teor			Recuperação Met.			Rec Más. (%)	Teor			Recuperação Met.			Rec Más. (%)	Teor			Recuperação Met.			
			Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Alimentação da flotação	1	86,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	11,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	32,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4	23,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	6	56,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	7	18,8	20,5	68,2	1,4	7,4	55,3	32,9	13,1	37,6	40,4	0,9	9,4	22,7	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	14,2	20,5	68,2	1,4	5,3	48,9	26,2	11,2	37,6	40,4	0,9	7,7	22,9	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	83,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	4,2	13,9	76,9	2,3	1,1	13,3	13,2	4,1	15,5	75,6	1,5	1,2	12,7	7,9	4,6	16,8	74,0	1,2	1,5	13,9	7,1	
	11	8,3	13,8	77,8	1,6	2,2	27,4	17,1	6,0	16,9	73,3	1,3	1,9	18,7	9,9	8,0	29,1	55,9	1,1	4,5	19,2	11,2	

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 - Resultados do índice de Gaudin e eficiência da separação

Amostra	Teste	Índice de Gaudin	Eficiência da separação (Schulz)
Alimentação da flotação	1	3,84	15,31
	2	3,79	27,96
	3	4,14	55,35
	4	3,18	41,75
	5	3,37	15,22
	6	3,76	45,48
	7	4,20	60,42
	8	4,13	66,15
	9	6,56	20,46
	10	4,07	32,86
	11	4,47	54,66
Rej. CMAI	1	2,95	20,65
	2	3,28	23,30
	3	8,32	40,58

Fonte: Elaborado pela autora.

O teste utilizando silicato de sódio (teste 9) apresentou no concentrado teor de ferro de 68,6% e 0,9% de SiO<sub>2</sub>, porém os valores de recuperação mássica e metalúrgica de ferro foram baixos, sendo, respectivamente, 16,6% e 22%. A recuperação metalúrgica de Fe e SiO<sub>2</sub> no rejeito final foram altas, sendo 78,0% e 99,3%, respectivamente, o que indica que na amostra da alimentação da flotação o depressor silicato de sódio foi efetivo na depressão da sílica, mas também da hematita, indicando que esse reagente pode não ser um depressor seletivo no sistema hematita/quartzo quando o ácido graxo saponificado é usado como coletor. Outro fator reforça esta conclusão foi a baixa eficiência da separação (20,46%). Isto também pode indicar a necessidade de realização de mais ensaios com o silicato de sódio para otimização da sua dosagem visando melhores eficiências de recuperações e seletividade do processo. Este também foi o teste que apresentou maior liberação do mineral quartzo da amostra da alimentação da flotação, de acordo como índice de Gaudin, sendo igual a 6,56.

Os melhores resultados observados da amostra da alimentação da flotação foram os testes 3, 7, 8 e 11, cujas dosagens variaram de 300 a 500 g/t, com teores de Fe entre 61,5% e 63,9%, teores de SiO<sub>2</sub> entre 7,5% e 10,5%, com recuperação mássica variando de 67,6% a 77,7% e recuperação metalúrgica de Fe entre 82,5% a 91,4%. O valor de eficiência da

separação comprova o fato dos altos teores, já que todos obtiveram valores de ES acima de 54%. Estes testes também apresentaram índice de Gaudin acima de 4,0. O teste 10 também apresentou índice de Gaudin superior a 4,0, porém a %Fe no concentrado foi abaixo de 60% e o alto teor de SiO<sub>2</sub> (16,9%), que é justificado pelo baixo valor de eficiência da separação, que foi de apenas 32,86%.

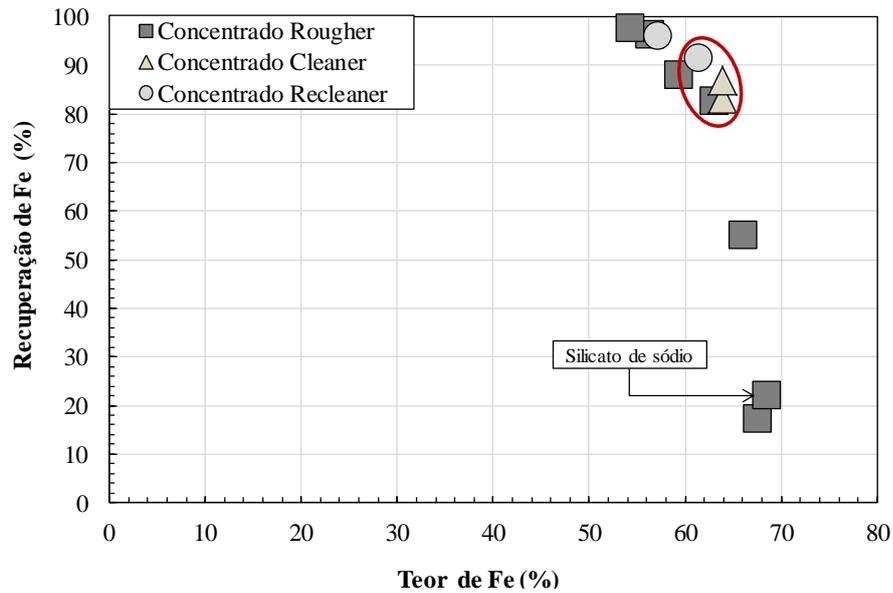
Realizando uma comparação com os dados obtidos industrialmente na flotação reversa da mina tratada neste estudo pode-se observar que os teores de Fe e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> estão dentro do esperado, porém os teores de SiO<sub>2</sub> estão acima. Neste sentido, acredita-se ser necessária a realização de mais ensaios, com utilização de novas combinações de dosagem entre depressor e coletor e, assim como de outros depressores que possam melhorar o processo. Vale ressaltar também que a planta de concentração deste minério utiliza flotação em colunas, que geralmente é um processo mais seletivo que a flotação em células mecânicas, realizada neste trabalho.

Na amostra do rejeito da separação magnética (CMAI) nenhum teste apresentou teor de Fe acima de 60%. O melhor resultado observado desta amostra foi o teste 3, que foi adicionado silicato de sódio e apresentou teor de ferro de 53,5% com um teor de SiO<sub>2</sub> de 19,1%, e o índice de Gaudin deste teste foi o maior de todos os testes, sendo igual a 8,32, enquanto para os demais testes do rejeito CMAI foram iguais a 2,95 e 3,28. O valor de ES do teste também foi o mais elevado (40,58%), enquanto os dos demais testes foram abaixo de 23%, o que indica que para a amostra do rejeito CMAI a separação foi mais seletiva e eficiente comparada aos outros testes com essa mesma amostra.

Apesar de não ter alcançado valores de teor de ferro acima de 60%, o resultado obtido neste teste foi satisfatório, já que o teor inicial era de apenas 6,6% de Fe e foram usadas dosagens pequenas de coletor.

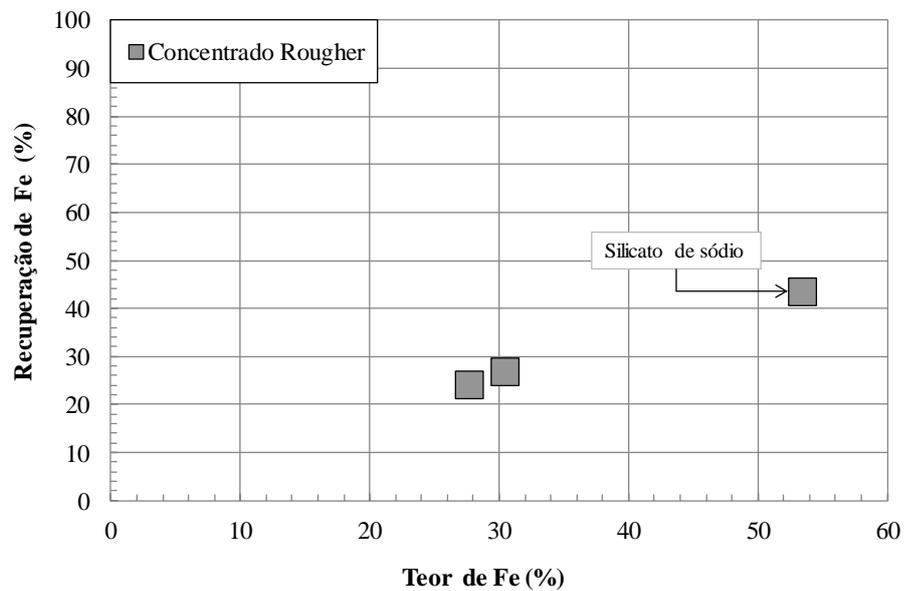
As Figuras 14 e 15 mostram os gráficos de teor *versus* recuperação de ferro para os testes com as amostras da alimentação da flotação e do rejeito CMAI. O círculo da figura 14 mostra os quatro melhores testes (testes 3, 7, 8 e 11).

Figura 14 - Teor *versus* recuperação de Fe para a amostra da alimentação da flotação



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 - Teor *versus* recuperação de Fe para a amostra do rejeito CMAI



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 9 apresenta uma comparação deste estudo com outros relacionados à flotação aniônica direta, sendo possível observar que na amostra da alimentação da flotação conseguiu-se chegar a valores próximos de teor de ferro utilizando dosagens menores de coletor, e a um maior valor de recuperação metalúrgica.

Tabela 9 – Comparação entre os resultados dos estudos de flotação aniônica direta

<b>Autor (a)</b>	<b>Conc. inicial de Fe (%)</b>	<b>pH</b>	<b>Coletor</b>	<b>Dosagem</b>	<b>Depressor</b>	<b>Dosagem</b>	<b>Conc. Final de Fe (%)</b>	<b>Rec. metalúrgica (%)</b>
Vieira, 1994	46	7,0	Oleato de sódio	30 g/t	Silicato de sódio	Não foi utilizado	65,5	78,46
Lopes, 2009	Não informado	7,0	Aero 825	1200 g/t	Silicato de sódio	2100 g/t	57,9	89,9
Santana, 2012	26	7,0	Ácido oléico	300 g/t	Silicato de sódio	Não foi utilizado	66,12	90,09
Nascimento, Souza & Lima, 2014	35,34	9,0	Oleato de sódio	1200 g/t	Silicato de sódio	600 g/t	58,1	Não informado
Soares, 2015	31,82	7,0	Ácido graxo saponificado	1600 g/t	Silicato de sódio	600 g/t	35,61	64,27
Alimentação da flotação Rej. da sep. magnética (CMAI)	52,1	8,7	Ácido graxo saponificado	500 g/t	Silicato de sódio	Não foi utilizado	61,5	91,4
	6,6	10,0	Ácido graxo saponificado	150 g/t	Silicato de sódio	600 g/t	53,5	43,3

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5. CONCLUSÃO

A partir deste estudo pôde-se concluir que os ensaios de a flotação direta de minério de ferro da amostra da alimentação da flotação com utilização do ácido graxo saponificado como coletor gerou resultados positivos, uma vez que estes se aproximaram dos obtidos industrialmente na flotação reversa do processo da mina tratada neste estudo, com relação ao teor de Fe e  $Al_2O_3$ , exceto o teor de  $SiO_2$ , que ficou mais alto nos testes realizados.

Apesar dos teores de Fe e  $Al_2O_3$  da amostra da alimentação da flotação estarem de acordo com as especificações para os produtos tipo *pellet feed*, os teores de  $SiO_2$  ficaram altos para os testes com recuperações metalúrgicas de Fe acima de 80%. Diante deste resultado e do alto teor de  $SiO_2$  da amostra do rejeito CMAI, faz-se necessário o desenvolvimento de novos métodos para adequar os produtos às especificações químicas exigidas pelo mercado.

Embora se tenha chegado a um teor de 53,5% de ferro a partir da amostra do rejeito da separação magnética (CMAI) cujo teor inicial era de 6,6% houve uma baixa recuperação metalúrgica (43,3%) e uma baixa recuperação mássica (5,2%), além de um teor elevado de  $SiO_2$  (19,1%) o que indica que a eficiência na flotação foi menor do que esperado. Melhores resultados com relação à eficiência da flotação poderão ser obtidos no futuro com o planejamento de novos ensaios, o que não foi possível realizar para este trabalho por limite de quantidade de amostra.

Para finalizar, ressalta-se neste trabalho a importância do uso de ácido graxo saponificado como coletor. O ácido graxo utilizado neste estudo é constituído a partir da sinergia de óleos vegetais, e tem como característica apresentar pequena solubilidade em água, sendo ainda considerado biodegradável à vista disso menos agressivo ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco**. Revista Brasileira de Geociências, vol. 7, nº 4, 1997, p. 349–364.

ARAÚJO, A. C. VIANA, P. R. M., PERES, A. E. C. **Reagents in iron ore flotation**. Minerals Engineering. Vol. 18, p.219–224, 2005.

ARAÚJO, A.C., Peres, A.E.C., Viana, P.R.M., Oliveira, J.F.. Flotação de minérios de ferro. In: Chaves, Arthur Pinto (Organizador). **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Flotação – O Estado da Arte no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, 2006, pp.01-29.

BATISTELI, G.M.B. (2007) **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BDMG – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS S.A. 2002. **Minas Gerais do Século XXI. Consolidando posições na mineração / Banco do Desenvolvimento de Minas Gerais**. Editora Rona. Belo Horizonte, v 5, 159 p.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1987, cap.2, p. 14.

CARVALHO, P. S. L.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ J. **Minério de ferro**. BNDES Setorial 39, p. 197-234, 2014.

CARVALHO, V.V; **Mercado internacional de minério de ferro**. 2017. 35 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CASSOLA, M. S., BARTALINI, N. M.. **Comportamento de coletores para o tratamento dos minérios de ferro através da flotação reversa**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 4, 2010, pp. 215-219.

CAXITO, F., DIAS, T. G., **Recursos Minerais de Minas Gerais – Ferro**. On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas gerais / Pedrosa-Soares, Antônio Carlos; VOLL, Eliane; Cunha, Edson Campos (coordenadores). Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE) - 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/#>. Acesso em: 3 de maio. 2021.

COSTA, J.L., **Seletividade na flotação de minério ferríferos dolomíticos**. Ouro Preto: Escola de Engenharia de Minas da UFOP, 2009. 136p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas).

CRISTIE, T., BRATHWAITE, B. (1997) **Mineral commodity report 15 - iron**. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.

DORR J.V.N. II 1969. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** U.S.Geological Survey Professional Paper, 641-A, 117 p.

FERREIRA, D.H.O. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero.** [Monografia de Pós-Graduação]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Belo Horizonte; 2011.

FIGUEIREDO, F.C. **Nutrição, proteção e qualidade da bebida do café sob pulverização de silicato de potássio líquido solúvel.** Lavras, MG. (Tese, Doutorado, Universidade Federal de Lavras, 2007). p 20.

FILIPPOV, L. O., SEVEROV, V. V., FILIPPOVA, I. V. **An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation.** Int. J. Miner. Process. 127, p. 62-69, 2014.

HOFFBRAND, A. V.; PETTIT, J. E.; MOSS, P. A. H. **Fundamentos em hematologia.** Porto Alegre: Artmed, 2004.

HOUOT, R. **Beneficiation of iron ore by flotation** – Review of industrial and potential applications. International Journal of Mineral Processing, 10(3), pp.182-204 (1983).

KELLY, E.G., SPOTTISWOOD, D.J. **Introduction to mineral processing.** Nova York: Wiley Interscience Inc., 1982. cap. 17, p. 327-342

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais.** 23a ed., Porto Alegre, Artmed Editora S.A. 2012. 706 p.

LEJA, J. Flotation surfactants. In: **Surface chemistry of froth flotation.** Springer, Boston, MA, 1982. p. 205-339.

LOPES, G.M. **Flotação direta de minério de ferro.** Ouro Preto. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Minas] - Universidade Federal de Ouro Preto; 2009.

LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. FRANÇA, S.C., **Tratamento de Minérios,** 5º Edição, Rio de Janeiro, 2010.

MA, M. **Froth Flotation of Iron Ores** Int. J. of Mining Eng. and Miner. Process. 1(2), p. 56-61, 2012.

MARROCOS, T. L. **Otimização do circuito de aeração nas colunas de flotação da Planta Central Usina.** 2018. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MASSI, L. *et al.* **Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas.** Química nova na escola, São Paulo, n. 28, p.20-23, mai. 2008. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc28/05-CCD-7106.pdf>>. Acesso em: 24 de fevereiro. 2021.

NASCIMENTO, D. R. (2010). **Flotação aniônica de minério de ferro.** Dissertação de mestrado. Ouro Preto.

NASCIMENTO, D. R., SOUZA, T. F. e LIMA, R. M. F. **Flotação de minério de ferro com oleato de sódio e silicato de sódio**. HOLOS, Ano 30, Vol. 4, p. 110-117. Junho, 2014. Disponível em: [http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1872/pdf\\_55](http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1872/pdf_55). Acesso em: 2 de abril. 2021.

NASCIMENTO, H. N. (2014). **Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte.

NUMELA, W., IWASAKI, I. Iron ore flotation. In: SOMASUNDARAN, P. **Advances in mineral processing**. Littleton, Colorado: SME, 1986. 756p. cap. 18, p.308-342.

RESENDE, T.M. **Uso de biopolímero sustentável como depressor da hematita na flotação de minério de ferro**. 2013. 83f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2013.

SANTANA, P. P. **Flotação direta de minério de ferro itabirítico**. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

SHIBATA, J., FUERSTENAU, D. W., **Flocculation and flotation characteristics of fine hematite with sodium oleate**. Int. J. Miner. Process. 72, p.25-32, 2003.

SOARES, V. L. O. **Flotação direta de minério de ferro proveniente do depósito Jambreiro da região de Guanhães-MG**. Tese de Conclusão de Curso –Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV. Araxá, p. 72. 2015.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT; **The Iron Ore Market 2016**. UNCTAD, 2016.

USGS – United States Geological Survey, 2021. Global iron ore production data. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>. Acesso em 04/04/2021.

VIANA, P. R. M. **Flotação de espodumênio, microclina, muscovita e quartzo com coletores aniônicos, catiônicos, anfotéricos e mistura de coletores**. Doctoral Tesis. Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte, 2006.

VIEIRA, A. M. **Estudo da viabilidade técnica da concentração de um minério de ferro de baixo teor**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. 174p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

WEEKS, M. E; Leichester, Henry M. (1968). **Elements Known to the Ancients. Discovery of the Elements**. Easton, PA: Journal of Chemical Education. pp. 29–40.

WINGE, M. et. al. 2001 - 2018 . **Glossário Geológico Ilustrado**. Disponível na Internet em 01 de agosto de 2018 no site <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>.

WORLD STEEL ASSOCIATION; **February 2017 crude steel production** – Press Release. World Steel Association, 2017. Disponível em: < <https://www.worldsteel.org/media->

centre/press-releases/2017/february-2017- crude-steel-production0.html>. Acesso em  
04/04/2021.