



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



RODRIGO MOREIRA VALÉRIO

FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO DE FERRO DOLOMÍTICO

OURO PRETO

Fevereiro/2023

RODRIGO MOREIRA VALÉRIO

FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO DE FERRO DOLOMÍTICO

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

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

Coorientadora: MSc. Tamíris Fonseca de Souza

OURO PRETO

Fevereiro/2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V164f Valério, Rodrigo Moreira.
Flotação direta de minério de ferro dolomítico. [manuscrito] / Rodrigo
Moreira Valério. - 2023.
45 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Rosa Malena Fernandes Lima.
Coorientadora: Ma. Tamiris Fonseca de Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Minério de ferro. 4.
Compostos de sódio. I. Lima, Rosa Malena Fernandes. II. Souza, Tamiris
Fonseca de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.765

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo Moreira Valério

Flotação direta de minério de ferro dolomítico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 15 de fevereiro de 2023

Membros da banca

Prof^a. Dr^a. Rosa Malena Fernandes Lima - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. Tamiris Fonseca Souza- Co-orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Letícia Maria de Melo Silva Cheloni - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Mariana Caroline Andrade Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof^a. Rosa Malena Fernandes Lima, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Rosa Malena Fernandes Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2023, às 20:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0483208** e o código CRC **7D00CC50**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Rosa Malena Fernandes Lima e à Msc. Tamiris Fonseca de Souza pela orientação, disponibilidade e dedicação em ensinar e acompanhar a realização de todas as etapas desse trabalho.

Ao Luiz Cláudio do Sacramento, à Mônica Suede Santos Silva e ao Flávio Martins pela prontidão em realizar as análises e pelas conversas, conselhos e incentivos.

Ao meu companheiro Lucas R. D. Sousa pelo carinho, compreensão e confiança creditada.

Aos meus amigos, sobretudo, José Matheus, Thais Pereira, Lourena Tomazelli e Thais Helena pelos momentos de descontração e companheirismo não só durante o período da realização deste trabalho, mas durante toda a minha graduação.

Aos meus familiares, sobretudo, à minha mãe Maria de Lourdes, ao meu pai Agnaldo, à minha irmã Vanessa, a minha avó Tanica (*in memoriam*), à minha tia Alessandra e ao meu tio Paulo André pelo incentivo, carinho e apoio durante esta fase e toda a minha jornada acadêmica até aqui.

RESUMO

À medida que as jazidas de minério de ferro de elevados teores ($\text{Fe} > 64\%$) se exaurem e a demanda pelo metal cresce mundialmente, tem se observado um crescente interesse pela exploração de minérios itabiríticos de baixos teores de ferro ($\text{Fe} < 50\%$), como, por exemplo, os itabiritos dolomíticos e itabiritos silicosos. No caso de itabiritos dolomíticos, a complexa composição químico-mineralógica, prejudica a sua concentração por flotação catiônica convencional e, por conseguinte, dificulta o seu aproveitamento econômico. O presente trabalho teve como objetivo analisar a possibilidade de aplicação de flotação aniônica direta para a concentração de um itabirito dolomítico, proveniente de uma frente de lavra de uma mina do Quadrilátero Ferrífero (MG). Os minerais identificados na amostra por difratometria de raios X foram: dolomita (fase majoritária), hematita (fase secundária), quartzo e talco (fases minoritárias). A massa específica, determinada por picnometria a gás, foi de $3,450 \text{ g/cm}^3$, a área superficial específica, determinada por BET, foi de $1,023 \text{ m}^2/\text{g}$ e o tamanho médio de poros foi de $2,29 \cdot 10^1 \text{ \AA}$. Nos ensaios de flotação de bancada em pH 7 foi utilizado um planejamento fatorial de experimentos a dois níveis, com réplica, onde foram investigados os fatores: dosagem de depressor (metassilicato de sódio: 150 e 600 g/t) e dosagem de coletor (oleato de sódio: 750 e 1500 g/t). Os ensaios de flotação em pH 9 foram realizados fixando a dosagem do coletor oleato de sódio em 1500 g/t e variando a dosagem do depressor silicato de sódio (150 e 600 g/t). Nos ensaios em pH 7 foram obtidos os rejeitos com menor massa específica ($3,50 \text{ g/cm}^3$) para as dosagens de 600 g/t de metassilicato de sódio e 750 g/t de oleato de sódio. A maior recuperação mássica (73,9%) e o concentrado de maior massa específica ($3,29 \text{ g/cm}^3$) obtidos, para os ensaios em pH 7, foram utilizando 150 g/t de metassilicato de sódio e 1500 g/t de oleato de sódio. Nos testes realizados em pH 9 foram obtidos maior recuperação mássica (86,64%) e concentrado com maior massa específica ($3,33 \text{ g/cm}^3$) para dosagens de 1500 g/t de coletor e 150 g/t de depressor.

Palavras-chave: Minério de ferro dolomítico. Flotação aniônica. Oleato de sódio. Metassilicato de sódio.

ABSTRACT

As deposits of high-grade iron ore ($\text{Fe} > 64\%$) are depleted and the demand for the metal grows worldwide, there has been a growing interest in exploiting itabirite ores with low iron grades ($\text{Fe} < 50\%$), such as, for example, dolomitic itabirites and siliceous itabirites. In the case of dolomitic itabirites, the complex chemical-mineralogical composition impairs its concentration by conventional cationic flotation and, therefore, makes its economic use difficult. This work aimed to analyze the possibility of applying direct anionic flotation for the concentration of a dolomitic itabirite from a mine in the “Quadrilátero Ferrífero”, state of Minas Gerais. The minerals identified in the sample by X-ray diffraction were dolomite (majority phase), hematite (secondary phase), quartz and talc (minority phases). The specific mass, determined by gas pycnometry, was 3.450 g/cm^3 , the specific surface area, determined by BET, was $1.023 \text{ m}^2/\text{g}$ and the mean pore size was $2.29 \cdot 10^1 \text{ \AA}$. In the bench scale flotation tests at pH 7, a factorial design of experiments at two levels was used, with replication, where the following factors were investigated: depressant dosage (sodium metasilicate: 150 and 600 g/t) and collector dosage (oleate of sodium: 750 and 1500 g/t). The flotation tests at pH 9 were carried out by setting the dosage of the sodium oleate collector at 1500 g/t and varying the dosage of the sodium silicate depressant (150 and 600 g/t). In the tests at pH 7, the rejects with the lowest specific mass (3.50 g/cm^3) were obtained for the dosages of 600 g/t of sodium metasilicate and 750 g/t of sodium oleate. The highest mass recovery (73.9%) and the concentrate with the highest specific mass (3.29 g/cm^3) obtained, for the tests at pH 7, were obtained using 150 g/t of sodium metasilicate and 1500 g/t of sodium oleate. In the tests carried out at pH 9, higher mass recovery (86.64%) and concentrate with higher specific mass (3.33 g/cm^3) were obtained for dosages of 1500 g/t of collector and 150 g/t of depressant.

Keywords: Dolomitic iron ore. Anionic flotation. Sodium Oleate. Sodium metasilicate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de hidrofobização das superfícies minerais realizada pelos coletores. 16	16
Figura 2 - Estrutura molecular química de uma molécula de ácido oleico. 18	18
Figura 3 - Diagrama das espécies do ácido oleico ($3 \times 10^{-5} \text{M}$) em função do pH (temperatura de 25 °C)..... 19	19
Figura 4 - Diagrama de espécies do silicato de sódio em função do pH..... 20	20
Figura 5 – Exemplo de amostras de itabirito dolomítico..... 21	21
Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos experimentais empregados neste trabalho. 23	23
Figura 7 - Homogeneização e quarteamento do material no quarteador Carrossel..... 24	24
Figura 8 - Pilha alongada (a), série de peneiras (b) e peneiramento a úmido (c) da amostra de itabirito. dolomítico 25	25
Figura 9 - Ensaio de solubilidade da dolomita e do itabirito dolomítico. 28	28
Figura 10 - Remoção da espuma resultante da flotação do itabirito dolomítico. 30	30
Figura 11 - Distribuição granulométrica da amostra de itabirito dolomítico. 31	31
Figura 12 - Distribuição granulométrica da amostra após etapa de peneiramento a seco. 32	32
Figura 13 - Difratoograma de raios X da amostra de itabirito dolomítico. 33	33
Figura 14 - Variação do pH em função do tempo para dolomita pura (-212 + 38 μm) condicionado com água destilada e metassilicato de sódio a 1200 g/t..... 34	34
Figura 15 - Variação do pH em função do tempo para itabirito dolomítico (-212 + 38 μm) condicionado com água destilada, metassilicato de sódio e silicato de sódio (módulo 3,33) a 1200 g/t..... 34	34
Figura 16 - Variação do pH em função do tempo para itabirito dolomítico condicionado com água destilada e metassilicato de sódio (1200 g/t). 35	35
Figura 17 - Gráficos de Pareto para as variáveis resposta recuperação mássica e massas específicas de concentrados, nível de confiança de 95..... 36	36
Figura 18 - Gráficos dos efeitos principais sobre as dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis resposta: recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e rejeitos para nível de confiança de 95%, para um nível de confiança de 95%. 37	37
Figura 19 - Gráficos de interações dos efeitos principais referentes à influência das dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis respostas: recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e dos rejeitos para nível de confiança igual a 95%. 38	38

Figura 20 - Gráficos de cubo referente à influência das dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis resposta recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e dos rejeitos para nível de confiança igual a 95%.....	39
Figura 21 - Resultados dos ensaios de flotação em pH 9 e dosagem de oleato de sódio de 1500 g/t.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas dos silicatos de sódio.....	20
Tabela 2 - Composição química por fração granulométrica de uma amostra de itabirito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero.	22
Tabela 3 - Materiais utilizados neste trabalho.	23
Tabela 4 - Parâmetros adotados nos ensaios de flotação direta da amostra de itabirito dolomítico.....	29
Tabela 5 - Planejamento fatorial 2 ² com duplicata para os ensaios em pH 7 e ensaios em pH 9 com melhor dosagem de coletor.	30
Tabela 6 - Massa específica, área superficial e tamanho médio dos poros de itabirito dolomítico.	32
Tabela 7 - Resultados do planejamento de experimentos dos ensaios de flotação em bancada.	36

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 FLOTAÇÃO.....	16
3.1.1 Ácidos graxos (coletores)	17
3.1.2 Depressor silicato de sódio	19
3.2 ITABIRITO DOLOMÍTICO.....	21
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	23
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	24
4.2.1 Análise granulométrica.....	24
4.2.2 Massa específica	25
4.2.3 Área superficial específica e porosidade	26
4.2.4 Remoção de finos e ultrafinos	26
4.3 IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA	26
4.4 PREPARAÇÃO DOS REAGENTES	27
4.4.1 Solução de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl)	27
4.4.2 Solução de metassilicato de sódio (3% p/v)	27
4.4.3 Solução de oleato de sódio (3% p/v)	27
4.5 ENSAIOS DE SOLUBILIDADE.....	27
4.6 ENSAIOS DE FLOTAÇÃO EM BANCADA.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	31
5.1.1 Análise granulométrica.....	31

5.1.2 Massa específica, área superficial e porosidade	32
5.2 ANÁLISE MINERALÓGICA	33
5.3 ENSAIOS DE SOLUBILIDADE.....	33
5.4 FLOTAÇÃO EM BANCADA	36
6 CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

A economia brasileira é altamente dependente da produção e das exportações minerais, sobretudo, do minério de ferro, que representa cerca de 75% das exportações minerais do país. Em 2021, as exportações brasileiras de minério de ferro somaram 357,7 milhões de toneladas, 4,5% maior do que as exportações de 2020, decorrente da alta do dólar e da valorização das *commodities* (Gandra, 2022). Neste sentido, para manter elevados a produção e a arrecadação dos próximos anos, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que viabilizem o aproveitamento dos minérios de ferro de teores < 50% (Lopes, 2009).

Os itabiritos de ganga silicosa, comuns na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), são concentrados por flotação catiônica reversa em pH alcalino (10 a 10,5), que é a condição mais difundida mundialmente para a flotação desse tipo de minério de ferro. Neste cenário, são empregadas as aminas como coletores de quartzo e o amido gelatinizado como depressor dos minerais de ferro (Iwasaki *et al.*, 1960, Houot, 1983 e Araujo *et al.*, 2005).

A crescente demanda por minério de ferro e a exaustão das reservas de alto conteúdo metálico, tem levado ao aumento do interesse pela exploração de minérios com maiores proporções de ganga silicatada e carbonatada (Lelis *et al.*, 2019 e Veloso *et al.*, 2018). Segundo Houot (1983), uma alternativa para a concentração desses minérios seria a aplicação de coletores aniônicos na flotação direta, utilizando ácidos graxos, sulfonatos e hidroxamatos, já que, neste caso, a flotação catiônica convencional se mostra pouco eficiente e economicamente inviável.

A flotação é altamente influenciada pelas características da polpa no que diz respeito às espécies químicas presentes nos minérios e às suas interações com os reagentes e as partículas minerais (Sayilgan e Arol, 2004). A calcita e a dolomita, por exemplo, presentes nos minérios de ferro de ganga carbonatada, tornam a flotação significativamente mais complexa, visto que os carbonatos se solubilizam em meio aquoso liberando cátions metálicos Ca^{2+} e Mg^{2+} , que se hidrolisam, formando diversas espécies no meio. A presença desses cátions e de seus produtos de hidrólise modifica a forma de atuação dos reagentes e, por conseguinte, interfere na seletividade da flotação reversa convencional de minério de ferro.

Com o avanço da mineração sobre os itabiritos silicosos e carbonatados, tem-se observado um aumento progressivo do consumo de reagentes, sobretudo, da amina, que, segundo Batisteli (2007), pode representar até 48% dos custos totais de reagentes na flotação convencional. Diante disso, enfatiza-se a necessidade de desenvolvimento de rotas alternativas

para a concentração de minérios de baixos teores de ferro, como, por exemplo, as que empregam a flotação direta, usando coletores aniônicos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicação da flotação aniônica direta para concentrar uma amostra de itabirito dolomítico proveniente de uma mina do Quadrilátero Ferrífero.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a amostra de minério de ferro dolomítico (análise granulométrica, determinação da massa específica, área superficial específica e porosidade e análise mineralógica);
- Realizar ensaios de solubilização da dolomita contida no minério de ferro estudado sem reagente e na presença de metassilicato de sódio e silicato de sódio de módulo 3,33;
- Realizar ensaios de flotação de bancada em pH alcalino, utilizando como coletor o oleato de sódio e como depressor o metassilicato de sódio.

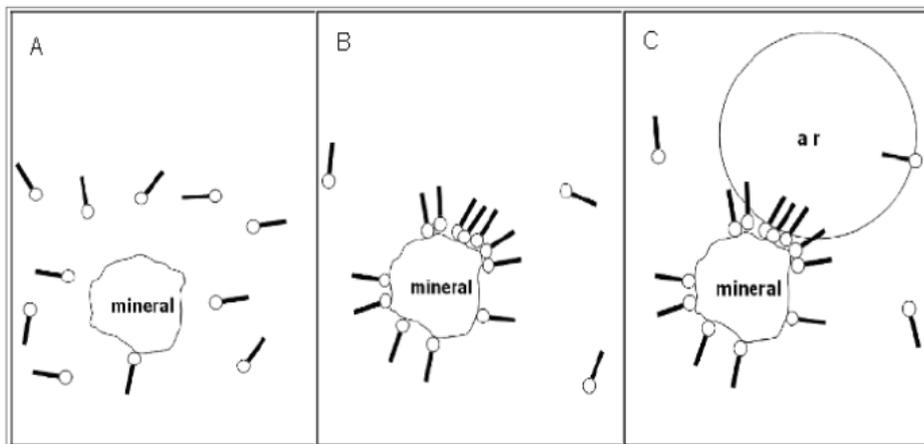
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FLOTAÇÃO

A flotação é um método de concentração de minérios que se baseia nas diferenças das propriedades superficiais dos minerais (hidrofobicidade/hidrofilicidade). O processo consiste na injeção de um fluxo de bolhas de ar através de uma polpa de minério, previamente condicionada com reagente(s) (modificadores e coletores) e na granulometria coerente para o processo (entre 0,010 e 0,150 mm). Tantos os depressores quanto os coletores atuam nas interfaces sólido/líquido dos minerais presentes na polpa. Para que ocorra seletividade na separação entre as espécies minerais, faz-se necessário induzir uma hidrofobicidade seletiva, isto é, modificar o grau de afinidade que determinados minerais presentes na polpa apresentam com a fase líquida. Dessa forma, os minerais hidrofóbicos se aderem nas bolhas de ar, migram para a superfície e são removidos, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem no meio aquoso (Baltar, 2010).

Os coletores são reagentes responsáveis por hidrofobizar as superfícies minerais. Esses reagentes interagem com a superfície mineral criando o equivalente a uma película impedindo, assim, que a partícula se ligue à molécula de água (Luz *et. al.*, 2010). Isso é explicado pelo fato dos coletores apresentarem um grupo polar ligado a uma cadeia hidrocarbônica apolar, sendo a parte polar atraída e adsorvida na superfície dos sólidos, enquanto a parte apolar se liga na fase gasosa (Arantes, 2009), conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismo de hidrofobização das superfícies minerais realizada pelos coletores.



Fonte:(Gupta e Yan, 2006 *apud* Arantes, 2012)

Alguns coletores tendem a hidrofobizar de forma não seletiva todos os minerais presentes na polpa. Neste caso, é necessário o emprego de reagentes modificadores, denominados depressores, responsáveis por inibir a atuação do coletor nas partículas minerais que se deseja manter hidrofílicas e, por conseguinte, devem ser condicionados a polpa de minério antes dos coletores (Luz *et al.*, 2010).

Para os minérios de ferro brasileiros de ganga silicatada, é comum o emprego da flotação catiônica reversa em pH alcalino. São utilizados como coletores de quartzo as aminas, sobretudo, o acetato de eteramina (Batisteli, 2007; Mamed, 2016) e o amido gelatinizado como depressor dos minerais de ferro (Iwasaki *et al.*, 1960; Araujo *et al.*, 2005; Nakhaei, Irannajad, 2018).

Para minérios que apresentam ganga carbonatada e silicatada pode ser aplicada a flotação por processo duplo, a qual é caracterizada pela flotação em dois estágios: são flotados, primeiro, os carbonatos e depois os óxidos de ferro. Pode ser utilizado o sulfonato de petróleo (R 899) para a coleta dos carbonatos e dos óxidos de ferro, respectivamente, em pH alcalino e em pH 3, ou pode-se usar um ácido graxo em pH levemente ácido para a flotação dos óxidos de ferro (Houot, 1983).

Uma alternativa que oferece elevada seletividade para minérios silicatados são os sistemas de flotação aniônicos que utilizam os coletores da família dos hidroxamatos. Lopes (2009) realizou ensaios de flotação direta para a concentração de uma amostra de minério de ferro, cujos teores eram 35,34% de Fe e 48,02% de SiO₂, fornecida pela empresa Vale S.A. Foi empregado o AERO 6493 (hidroxamato), 1200 g/t, como coletor dos óxidos de ferro e o silicato de sódio, 1500 g/t, como depressor de quartzo e, nestas condições, foram obtidos concentrados com teor de ferro de 61,5%, teor de SiO₂ de 9,8% e recuperação metalúrgica de 77,9%.

3.1.1 Ácidos graxos (coletores)

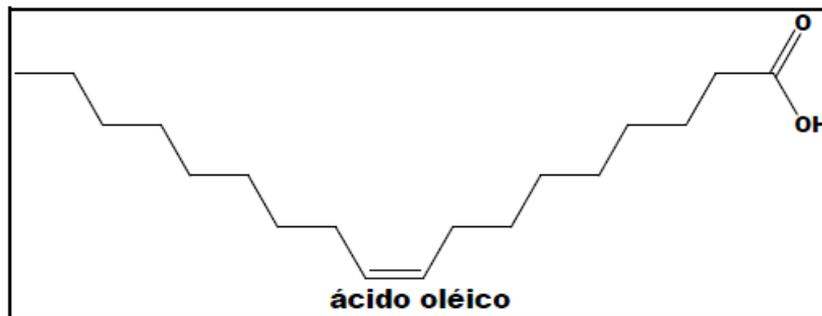
Ácidos graxos são aplicados na flotação de minérios não-sulfetados como coletores-espumantes. Esses reagentes caracterizam-se por cadeia carbônica longa saturada ou insaturada, elevada solubilidade em meio aquoso, sobretudo, quando em forma de sais. As espécies químicas provenientes da dissolução destes reagentes dependem do pH do sistema (Rao, 2004). Os ácidos graxos proporcionam uma maior flotabilidade em pH neutro (Kulkarni, Somasundaran, 1975; Luz, 1996; Lopes, 2009; Klimpel *et al.*, 1991).

Para a aplicação dos ácidos graxos como coletores faz-se essencial a deslamagem do minério para remoção de partículas com granulometria inferior a 15 µm além de polpa com

elevado teor de sólidos (entre 60 e 70% de sólidos) condicionada por 5 a 8 minutos, permitindo assim, a obtenção de altas recuperações com baixa dosagem de coletor. O controle da espuma é efetuado pelo uso de um espumante MIBC. Ademais, é importante a não utilização de água fria ou realização dos testes em dias muito frios, visto que baixas temperaturas provocam quedas no rendimento da flotação (Houot, 1983; Uwadiale, 1992).

A Figura 2 mostra a estrutura química molecular do ácido oleico, que devido a sua solubilidade, eficiência elevada e ao baixo custo, é o ácido graxo insaturado mais aplicado como coletor dos óxidos de ferro.

Figura 2 - Estrutura molecular química de uma molécula de ácido oleico.

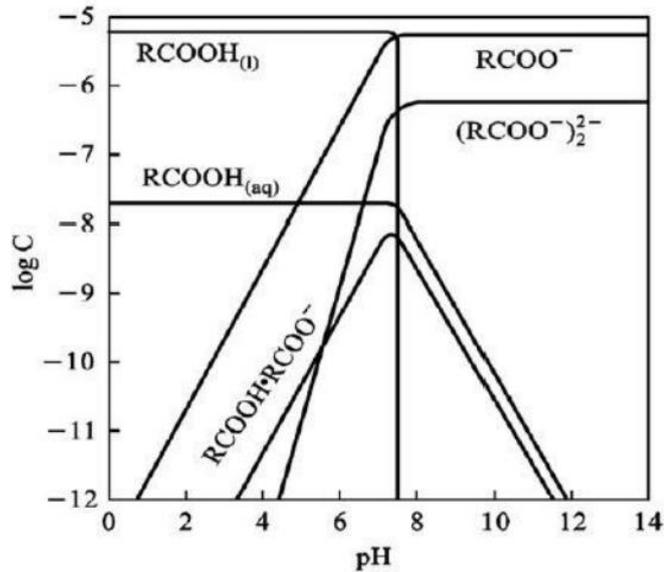


Fonte: (Rao, 2004 *apud* Lopes, 2009)

A Figura 3 mostra o diagrama de especiação em meio aquoso do ácido oleico (3×10^{-5} M) em função do pH. As espécies presentes em meio aquoso são importantes para a compreensão da ação coletora do ácido oleico e, conseqüentemente, na sua influência na flotação.

Como pode ser observado pela Figura 3, em pH ácido, são predominantes as moléculas neutras $[ROOH_{(l)}]$ e $[RCOOH_{(aq)}]$. Em valores de pH básicos, as espécies predominantes são $RCOO^-$ e $(RCOO^-)_2^{2-}$. Em pH intermediário (6 e 8), a atividade de um complexo iônico-molecular $(RCOOH.RCOO^-)$ é máxima, sendo responsável pela ação coletora-espumante do ácido oleico (Rao, 2004 *apud* Lopes, 2009).

Figura 3 - Diagrama das espécies do ácido oleico ($3 \times 10^{-5} \text{M}$) em função do pH (temperatura de 25°C).



Fonte: (Somasundaran, 1984 *apud* Ferreira, 2018)

Vieira e Salum (1995) estudaram a aplicação de flotação direta em um itabirito oriundo da mina de Conceição da Vale em Itabira, Minas Gerais. Nos ensaios foram utilizados como coletor o oleato de sódio e o silicato de sódio como depressor, dos quais foram investigadas as dosagens de reagentes e o pH de flotação. O melhor resultado foi o obtido (recuperação metalúrgica de ferro de 78,46% e concentrados com 67% de Fe e 4,5% de SiO_2), utilizando 30 g/t de ácido oleico saponificado, em pH 7 e sem o uso de depressor.

Lopes (2009) realizou testes de flotação direta utilizando o oleato de sódio como coletor e silicato de sódio como depressor em pH 7. Os ensaios foram realizados para um minério silicatado de baixo teor de ferro (35,34% de Fe_2O_3 e 48,02 de SiO_2). O melhor resultado (concentrado de 58,1% de Fe, 14,4% de SiO_2 e 88% de recuperação metalúrgica) foi obtido nas seguintes condições: pH 7, 600 g/t de depressor (silicato de sódio) e 1200 g/t de oleato de sódio.

3.1.2 Depressor silicato de sódio

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) é amplamente utilizado como agente depressor de carbonatos (dolomita e calcita) na flotação de minérios oxidados. No entanto, pode atuar também como dispersante. Os silicatos de sódio disponíveis no mercado, geralmente, diferenciam-se pela composição química, isto é, apresentam diferentes proporções de

$\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$, entre outros constituintes químicos, conforme mostrado na Tabela 1 (Arantes, 2012). O silicato de sódio de sódio módulo 1 é conhecido como metassilicato de sódio.

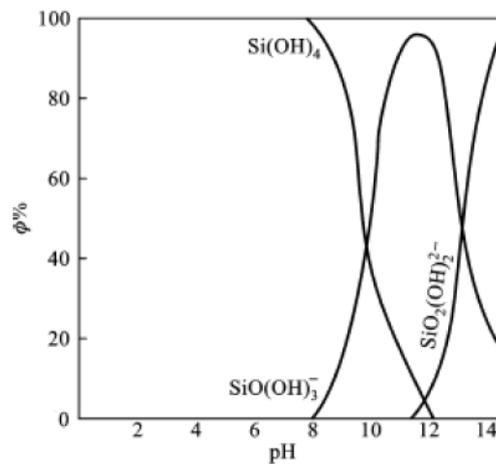
Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas dos silicatos de sódio.

Modulo	SiO_2	Na_2O	Sólidos	H_2O	Densidade	Viscosidade
			(%)	(%)	(g/L)	(cP)
1	28,76	28,76	57,55	42,45	-	-
2,26	33,28	14,7	47,98	52,02	1,574	1350
3,33	29,8	8,934	38,73	61,27	1,397	540

Fonte: Arantes, 2012

A atuação do silicato de sódio é complexa, pois sua hidrólise em meio aquoso, dependendo do pH e da concentração de SiO_2 , pode produzir diferentes espécies iônicas, que, por sua vez, está ligada a eficiência do silicato de sódio como agente depressor (Fuerstenau e Palmer, 1976). A Figura 4 mostra o diagrama de dissociação do silicato de sódio em função do pH.

Figura 4 - Diagrama de espécies do silicato de sódio em função do pH.



Fonte: Somasudaran, 2006 *apud* Duarte, 2021

Arantes (2012) realizou ensaios de flotação em bancada com uma amostra minério de ferro silicatado (43,63 % de Fe e 35,02 % de SiO_2), proveniente da mina de Fábrica Nova da Vale, usando silicato de sódio de diferentes módulos (1, 2,26 e 3,33) e oleato de sódio como coletor. Os melhores resultados foram obtidos nas seguintes condições: 1200 g/t de coletor, 25 g/t de depressor (silicato de sódio de módulo 3,33), percentagem de sólidos 60 % e pH 7,

que gerou um concentrado com teor de 59,96% de Fe, 19,93% de SiO₂ e uma recuperação de ferro de 96,79%.

Abdel-Klalek *et. al.* (2014) empregaram a flotação direta, utilizando uma mistura de oleato de sódio e óleo combustível (coletor) e silicato de sódio (depressor) para a concentração de um minério fosfático de ganga carbonatada. Foram estudados a influência da dosagem dos reagentes e modificadores de pH (HCl, NaOH e Na₂CO₃). Verificou-se que o silicato de sódio apresentou elevada eficiência na depressão de silicatos e calcita em pH 9,5. Após uma etapa *cleaner* foi obtido um concentrado final com 29,5 % de P₂O₅ e recuperação metalúrgica de 68,06%.

3.2 ITABIRITO DOLOMÍTICO

Os itabiritos dolomíticos apresentam bandas de dolomita, quartzo, óxidos de ferro, e outros minerais, como a calcita, clorita e anfibólios. Geralmente, são minérios de baixo teor de ferro, apresentando em média 41,07% de Fe₂O₃, elevado teor de SiO₂ e, devido à presença dos carbonatos, apresentam teores consideráveis de CaO e MgO. A Figura 5 mostra um itabirito dolomítico, no qual é possível observar uma coloração caracterizada pelos tons rosados da dolomita, contrastando com os tons escuros dos óxidos de ferro (Costa, 2013).

Figura 5 – Exemplo de amostras de itabirito dolomítico.



Fonte: Costa, 2013

Gonçalves e Peres (2015) efetuaram caracterização tecnológica de uma amostra de itabirito dolomítico proveniente do Quadrilátero Ferrífero. Nestes estudos, constatou-se que o teor de SiO₂ era de 28 % e Fe de 12,6 % da amostra global. Ademais, verificou-se que o SiO₂ e o Fe se concentravam nas frações + 0,075 mm, enquanto o CaO e MgO nas frações - 0,045

mm. A Tabela 2 mostra os resultados da análise química por fração granulométrica e da amostra global de itabirito dolomítico analisada pelos pesquisadores.

Tabela 2 - Composição química por fração granulométrica de uma amostra de itabirito dolomítico do Quadrilátero Ferrífero.

Amostra	Fração (mm)	Retido simples (%)	Composição Química (%)								
			Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC
ID	-1,0+0,15	10,53	16,95	40,95	0,025	0,84	0,128	0,04	9,592	7,674	15,94
	-0,15+0,075	19,91	14,54	43,9	0,019	0,44	0,123	0,018	10,83	6,935	17,18
	-0,075+0,045	27,26	11,12	27,83	0,019	0,3	0,183	0,009	17,66	9,827	28,08
	-0,045	42,3	11,15	16,44	0,031	0,7	0,226	0,025	20,77	12,09	33,12
	Global	100	12,58	28,01	0,025	0,63	0,177	0,021	16,47	9,942	26,44

Fonte:(Gonçalves e Peres, 2015 *apud* Cruz, 2020)

Costa (2013) caracterizou um itabirito dolomítico, proveniente da mina de Conceição da Vale, em Itabira, considerado estéril e descartado em pilhas permanentes, devido à baixa seletividade na flotação atribuído aos elevados teores de CaO, MgO, P e Al₂O₃. A caracterização química do material indicou teores de 52,35% Fe, 1,67% SiO₂, 7,22% CaO, 4,35% MgO, 0,49% Al₂O₃, 0,07% P e 11,47% de PPC. Segundo o autor, devido ao elevado teor de contaminantes, o material poderia ser aplicado para o processo produção de sinter e/ou pelotas ou como fundente na carga do alto-forno. Entretanto, o seu aproveitamento como minério dependeria do desenvolvimento de reagentes mais seletivos para que viabilize a aplicação de flotação catiônica reversa.

Cruz (2020) realizou testes de flotação catiônica reversa em bancada em pH 10,5 para a concentração de um itabirito dolomítico artificial, contendo uma proporção de 2,5% de dolomita 43,6% de Fe, 31,0% de SiO₂ e 3,8% de PPC. Para dosagem de 200 g/t de amido e de 150 g/t de amina foi obtido um concentrado com teores de 62,63% de Fe, 3,30% de SiO₂ e 83,56% de recuperação metalúrgica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais, as etapas de preparação, a caracterização física e mineralógica da amostra de itabirito dolomítico, os reagentes e a metodologia aplicada nos ensaios de solubilidade e nos ensaios de flotação de bancada.

A Tabela 3 mostra os materiais utilizados para a realização deste trabalho.

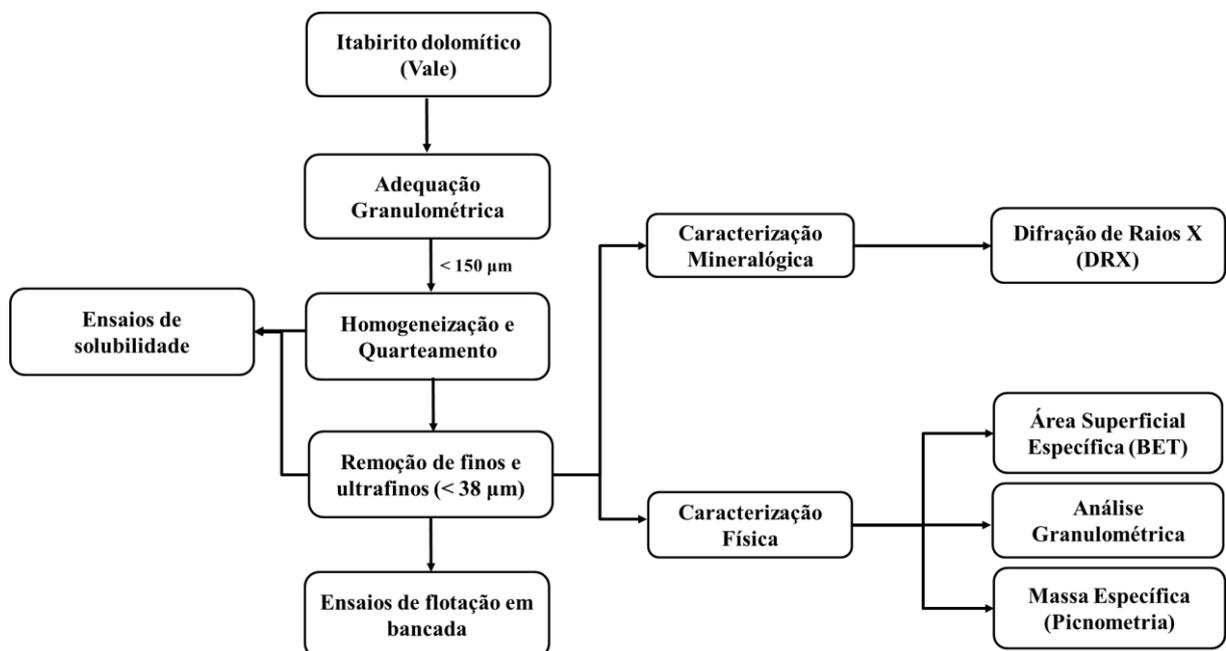
Tabela 3 - Materiais utilizados neste trabalho.

Minério	53 Kg de itabirito dolomítico (-300 μm) da mina de Capão Xavier (Vale)
Depressores	Metassilicato de sódio
	Silicato de sódio (módulo 3,33)
Reguladores de pH	NaOH e HCl
Coletor	Oleato de sódio

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A Figura 6 mostra o fluxograma das etapas experimentais realizadas neste trabalho.

Figura 6 - Fluxograma dos procedimentos experimentais empregados neste trabalho.



A adequação granulométrica da amostra de minério consistiu na moagem e na classificação granulométrica a seco abaixo de 150 μm (peneiras de 100 #). Para a cominuição do material, foi utilizado um moinho de bolas de volume de, aproximadamente, 1,26 m^3 preenchido por uma polpa com 50% de sólidos, massa de corpo moedor de 9,4 Kg, rotação de 65 rpm e tempo de ciclo, de aproximadamente, 3 minutos. Após a etapa de adequação granulométrica, a amostra foi homogeneizada e quarteada no quarteador Carrossel (Figura 7).

Figura 7 - Homogeneização e quarteamento do material no quarteador Carrossel.

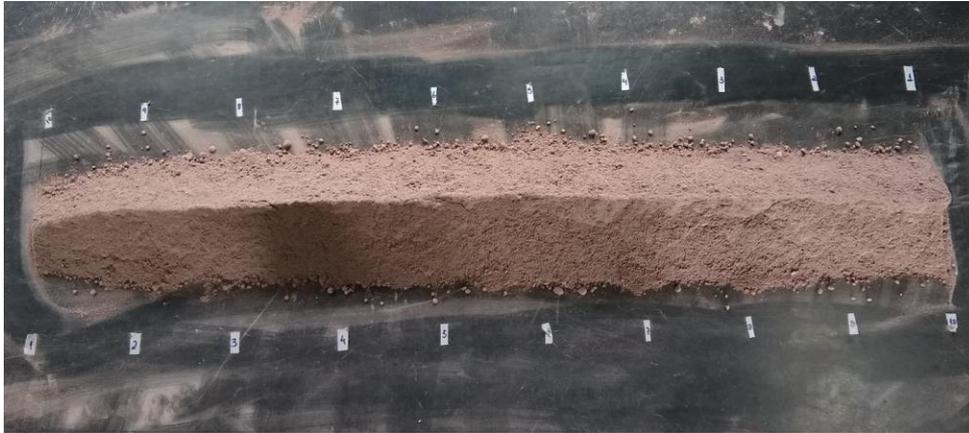


4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra de itabirito dolomítico foi realizada, em duplicata, por peneiramento a úmido, utilizando um conjunto de peneiras da série Tyler (48 - 400 #), pertencente ao Laboratório de Tratamentos de Minérios do DEMIN/UFOP. O material de granulometria - 37 μm (400 #) foi analisado pelo granulômetro a laser (CILAS 1064) do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP. A Figura 8 mostra a pilha alongada construída para a geração das alíquotas para a análise granulométrica, o conjunto de peneiras Tyler de aberturas 300 a 38 μm utilizadas no peneiramento a úmido e a execução do peneiramento a úmido.

Figura 8 - Pilha alongada (a), série de peneiras (b) e peneiramento a úmido (c) da amostra de itabirito.



(a)



(b)



(c)

4.2.2 Massa específica

As massas específicas da amostra de itabirito dolomítico e dos produtos dos ensaios de flotação foram determinadas, em triplicata, por picnômetro a gás hélio (*Ultrapyc 1200e da Quantachrome*) do Laboratório de Propriedades Interficiais do DEMIN. Para determinação da massa específica das amostras preencheu-se 70% do volume total do porta amostra de tamanho médio com o material à temperatura ambiente e tempo de equilíbrio automático ao longo do processo. A pressão alvo foi de 117,2 kPa (17psi) e o tempo de purga de 4 minutos. Ao final da

análise, a massa específica da amostra foi determinada através da média aritmética dos valores da triplicata.

4.2.3 Área superficial específica e porosidade

A área superficial específica e o tamanho de poros da amostra de itabirito dolomítico foram medidos pelo analisador de superfície específica BET 1200 da *Quantachrome Instruments* do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP. Durante a preparação das amostras a desgaseificação foi realizada a uma temperatura de 195°C e a um tempo de duração de 2 horas. A análise teve um tempo total de 40,7 minutos e isoterma com 8 pontos. O software utilizado para a interpretação dos dados foi o NOVAA, que operou com as condições de atraso térmico de 180s a fim de estabilizar a medição antes da captura do primeiro ponto da isoterma de adsorção-dessorção. As condições de equilíbrio foram ajustadas entre 60s e 120s, para as quais se tem o mínimo e o máximo de tempo, respectivamente, de flutuação da pressão relativa antes de sua tomada como ponto da isoterma de adsorção-dessorção.

4.2.4 Remoção de finos e ultrafinos

Para remoção dos finos da amostra foi realizada uma etapa de peneiramento a seco do itabirito dolomítico no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN-UFOP, utilizando peneiras da série Tyler de abertura de 38 µm (400 #). Em seguida, o material retido foi homogeneizado e quarteado no quarteador Carrossel.

4.3 IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA

A determinação da composição mineralógica da amostra de itabirito dolomítico foi realizada por difratometria de raios X no Laboratório de Microscopia Ótica/Difratometria de raios X do DEMIN/UFOP. Foi utilizado o difratômetro de raios X *X³ pert Powder da Panalytical* equipado com tubo de cobre (radiação Cu-K α com $\lambda = 1,5405\text{\AA}$). O equipamento foi configurado para performar uma varredura em arranjo 2 θ no intervalo de 2,5° até 90°, uma diferença de potencial de 45 kV entre as placas e uma corrente de 40mA. A identificação dos minerais foi realizada via *software High Score Plus*, usando o banco de dados PDF-2.

4.4 PREPARAÇÃO DOS REAGENTES

4.4.1 Solução de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl)

As soluções de NaOH, 10 % p/v, foram preparadas por meio da dissolução da massa 10 g de NaOH em um béquer com água destilada e sob agitação. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL e completou-se o volume com água destilada. As soluções de HCl, v/v, foram preparadas pela solubilização de 10 mL de ácido em água destilada para volume total de 100 mL.

4.4.2 Solução de metassilicato de sódio (3% p/v)

A solução de metassilicato de sódio, foi preparada a 3% p/v. Pesou-se em um béquer 3 g de metassilicato de sódio, foram adicionadas 30 mL de água destilada e levou-se ao agitador magnético. Por fim, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL e completou-se com água destilada.

4.4.3 Solução de oleato de sódio (3% p/v)

A solução de oleato de sódio, preparada a 3% p/v, foi obtida por meio da saponificação do ácido oleico com solução de NaOH. Pesou-se em um béquer 3 g de ácido oleico com posterior adição de 30 mL de água destilada e levou-se ao agitador magnético, adicionou-se 5,1 mL de solução de NaOH (10% p/v), acrescentou-se mais 30 mL de água destilada e, sob agitação, esperou-se até a obtenção de uma solução de cor amarelada límpida. Por fim, transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 100 mL e completou-se com água destilada.

4.5 ENSAIOS DE SOLUBILIDADE

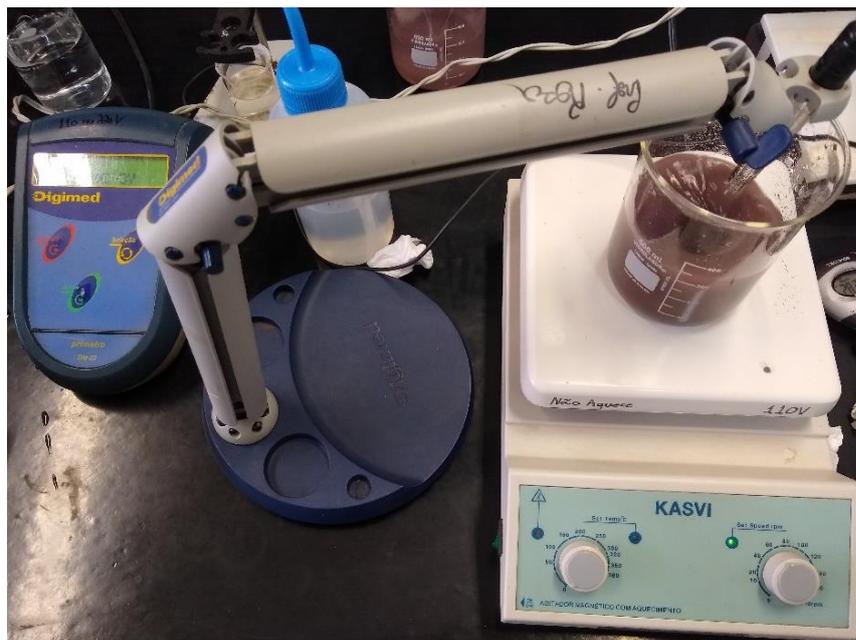
Foram realizados testes qualitativos de solubilidade da amostra de dolomita pura e amostra de itabirito dolomítico na faixa granulométrica de $-212 + 38 \mu\text{m}$, de acordo com a metodologia utilizada por Cruz (2020). Para a amostra de itabirito dolomítico, também, foi analisada uma amostra na faixa granulométrica de $-212 \mu\text{m}$, a fim de se avaliar a influência das partículas finas e ultrafinas (lama) na solubilidade do minério. Os testes foram realizados, em duplicata, em água destilada e soluções a 1200 g/t de metassilicato de sódio (silicato de módulo 1) e silicato de sódio (módulo 3,33).

Para os ensaios de solubilização foram utilizadas amostras de dolomita e de minério de ferro dolomítico de, aproximadamente, 2,5 g e o volume final da solução foi de cerca de 250 mL. Cada solução foi submetida a agitação de 600 rpm, à temperatura ambiente próxima de 20 °C. Com o auxílio de um pHmetro mediram-se os valores de pH da água destilada e/ou solução de silicato de sódio, antes da adição dos sólidos (dolomita e/ou minério), e após a adição do material, até a estabilização do pH e na seguinte frequência:

- a cada 1 minuto, até 10 minutos;
- a cada 2 minutos, até 20 minutos;
- a cada 5 minutos, até 40 minutos;
- a cada 10 minutos, até 60 minutos.

A Figura 9 mostra a montagem utilizada na realização do teste de solubilidade da amostra de dolomita e de itabirito dolomítico.

Figura 9 - Ensaio de solubilidade da dolomita e do itabirito dolomítico.



4.6 ENSAIOS DE FLOTAÇÃO EM BANCADA

Os parâmetros dos ensaios de flotação direta da amostra de itabirito dolomítico em escala de bancada, utilizando metassilicato de sódio como depressor e oleato de sódio como coletor, foram definidos de acordo com os estudos realizados por Lopes (2009), Arantes (2012) e Cruz (2020). A Tabela 4 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios de flotação direta da amostra de itabirito dolomítico.

Tabela 4 - Parâmetros adotados nos ensaios de flotação direta da amostra de itabirito dolomítico.

Parâmetros	Valores
pH	7 e 9
Percentual de sólidos (%)	45
Dosagens de depressor (g/t)	150 e 600
Dosagens de coletor (g/t)	750 e 1500
Tempos de condicionamento (min)	6 (depressor) e 4 (coletor)
Rotação (RPM)	1200
Massa alimentação (g)	992
d ₈₀ alimentação (µm)	150
Volume de polpa (mL)	1500

Sabe-se que, para sistemas, que usam oleato de sódio como coletor, a hematita apresenta elevada flotabilidade em pH entre 4 e 9 (Lopes, 2009). Ademais, Vieira (1994) encontrou máxima flotabilidade da hematita em pH 7, usando oleato de sódio como coletor. Por tais motivos, fixou-se o pH 7 e 9 como os pHs ótimos da flotação.

Neste trabalho, em uma primeira fase, foi empregado um planejamento fatorial de 2 níveis (2^2) com réplica, variando as concentrações de oleato de sódio em 750 e 1500 g/t e metassilicato de sódio em 150 e 600 g/t, para os ensaios em pH 7, conforme mostrado na Tabela 5. Posteriormente, foram efetuados ensaios de flotação em pH 9 fixando a dosagem de coletor em 1500 g/t e variando as dosagens de depressor (150 e 600 g/t).

Tabela 5 - Planejamento fatorial 2² com duplicata para os ensaios em pH 7 e ensaios em pH 9 com melhor dosagem de coletor.

Ensaio	Ordem	pH	Dosagens de reagentes (g/t)	
			Metassilicato de sódio	Oleato de sódio
1	1	7	150	750
2	6	7	150	750
3	3	7	150	1500
4	7	7	150	1500
5	2	7	600	750
6	8	7	600	750
7	4	7	600	1500
8	5	7	600	1500
9	9	9	150	1500
10	10	9	150	1500
11	11	9	600	1500
12	12	9	600	1500

O procedimento experimental empregado para a realização dos ensaios de flotação direta em bancada consistiu na calibração do pHmetro para a faixa básica em dois pontos de pH 7 e pH 10. Em seguida, foi adicionada a água, a massa de minério à cuba de 2000 mL e ajustou-se o pH da polpa, usando solução de HCl para os testes em pH 7 e solução de NaOH para os testes em pH 9. Ademais, ajustou-se a rotação do rotor em 1200 rpm e condicionou-se a polpa com solução de metassilicato de sódio (depressor) e oleato de sódio (coletor) por 6 e 4 minutos, respectivamente. Após o condicionamento, abriu-se o registro de sucção de ar da célula de flotação, e removeu-se totalmente a espuma. Por fim, foram filtrados, secados, pesados, homogeneizados e quarteados os concentrados e os rejeitos para a geração de alíquotas para a determinação da massa específica com o intuito de avaliar a seletividade da concentração. A Figura 10 mostra a etapa de remoção da espuma resultante da flotação direta da amostra de itabirito dolomítico.

Figura 10 - Remoção da espuma resultante da flotação do itabirito dolomítico.



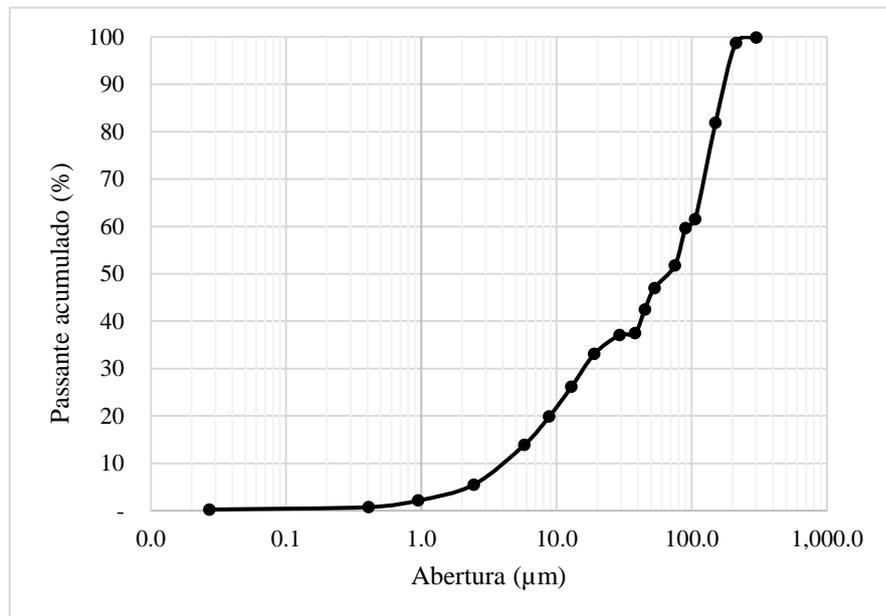
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

5.1.1 Análise granulométrica

A Figura 11 mostra a curva de distribuição granulométrica da amostra de itabirito dolomítico. Pode-se observar que o d_{80} encontrado foi de, aproximadamente, 150 μm , o d_{50} foi de 75 μm e o d_{25} foi de $\sim 10 \mu\text{m}$.

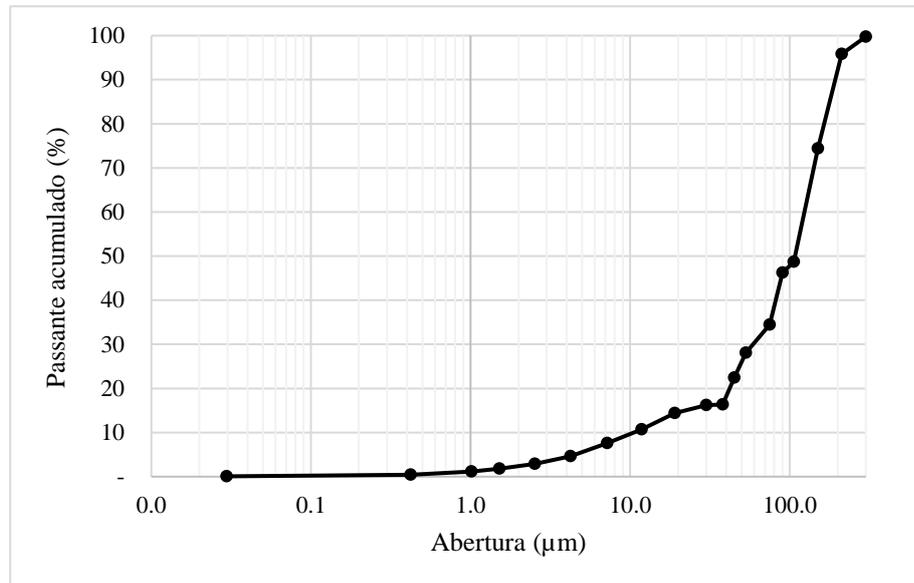
Figura 11 - Distribuição granulométrica da amostra de itabirito dolomítico.



A distribuição granulométrica indicou que, devido a elevada proporção de finos e ultrafinos ($d_{25} \sim 10 \mu\text{m}$), a amostra não se encontrava na granulometria adequada para os testes de flotação em bancada (0,010 mm e 0,150 mm). Por conseguinte, foi realizada uma etapa de remoção das partículas finas para a geração das amostras para os ensaios de flotação em bancada.

A Figura 12 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de itabirito dolomítico após a etapa de peneiramento a seco. Observa-se uma redução significativa da quantidade de lama das amostras ($d_{10} = 10 \mu\text{m}$) em relação ao material não deslamado, mostrado na Figura 11.

Figura 12 - Distribuição granulométrica da amostra após etapa de peneiramento a seco.



5.1.2 Massa específica, área superficial e porosidade

A Tabela 6 mostra a massa específica, a área superficial específica e o tamanho médio dos poros de itabirito dolomítico após remoção de finos e ultrafinos. O valor relativamente baixo da massa específica de itabirito dolomítico, $3,45 \text{ g/cm}^3$, comparado à massa específica da maioria dos minérios de ferro de ganga silicatada, como é o caso do minério de Serra Serpentina (Vale), que apresentou massa específica de $3,75 \text{ g/cm}^3$ (Lopes, 2009), está associado à elevada proporção de dolomita (fase majoritária) no minério, indicada pela difração de raios X, cuja massa específica é entre $2,8$ e $2,9 \text{ g/cm}^3$ (Dana, 1864). Por outro lado, Costa (2013) encontrou uma massa específica de $3,69 \text{ g/cm}^3$ para o itabirito dolomítico da mina de Conceição da Vale, que apresentava hematita em uma porcentagem estimada de 70%, em massa.

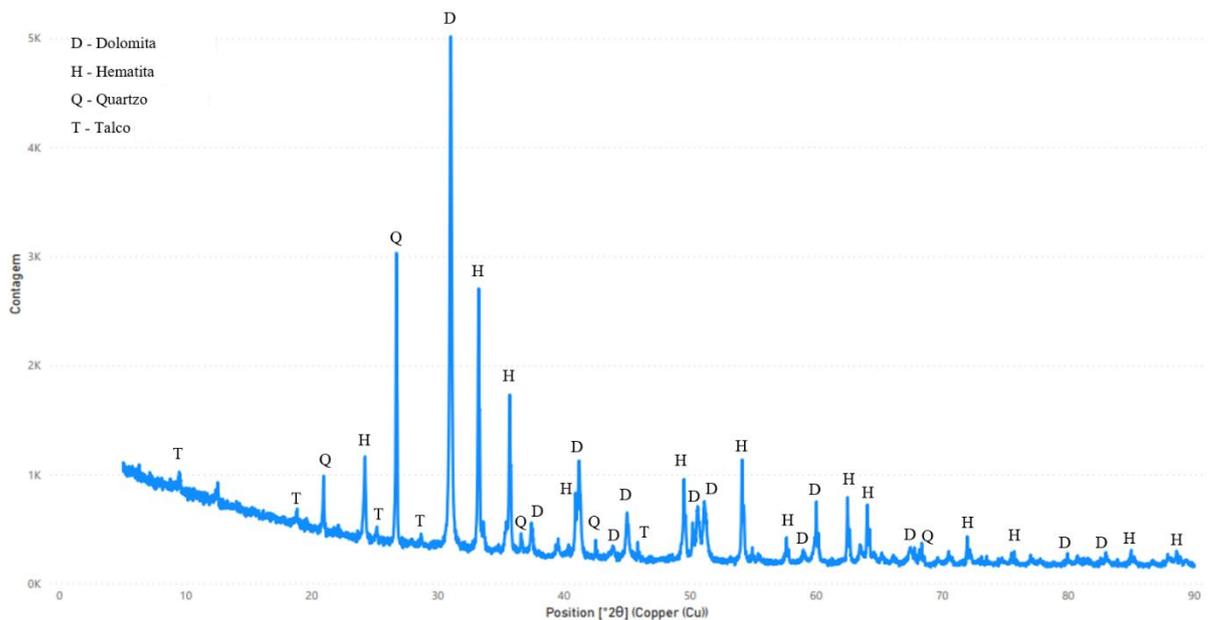
Tabela 6 - Massa específica, área superficial e tamanho médio dos poros de itabirito dolomítico.

Massa Específica (g/cm^3)	Área superficial específica (m^2/g)	Tamanho médio de poros (Å)
3,450	1,023	$2,29 \cdot 10^1 \text{ Å}$

5.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

A Figura 13 mostra o difratograma de raios X da amostra de itabirito dolomítico, utilizada na alimentação da flotação. Como pode ser observado, foram detectados os minerais: hematita (Fe_2O_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Pela intensidade relativa dos picos do difratograma, pode-se afirmar que a dolomita é o mineral mais abundante no minério, seguido da hematita, quartzo e talco.

Figura 13 - Difratograma de raios X da amostra de itabirito dolomítico.

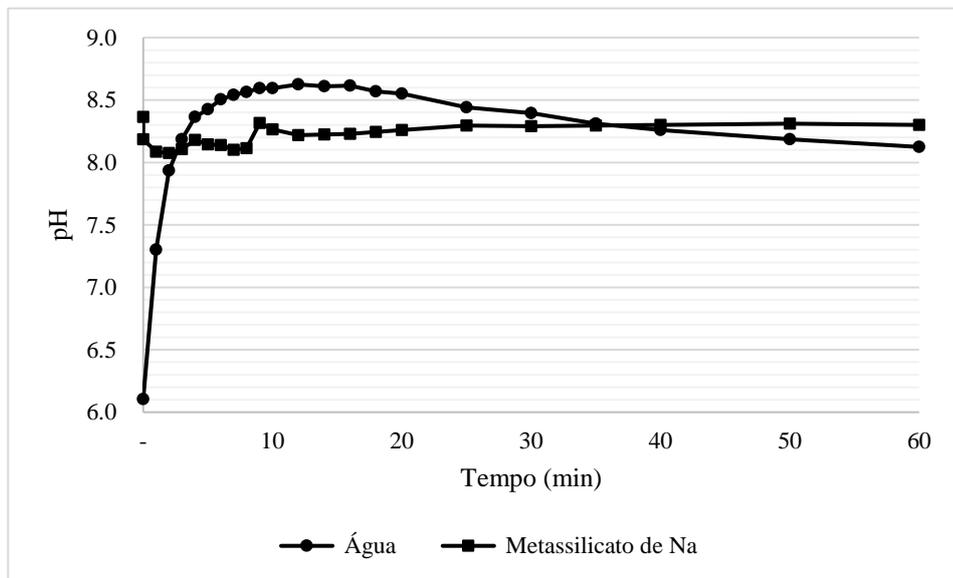


5.3 ENSAIOS DE SOLUBILIDADE

Os resultados mostrados na Figura 14, para os ensaios de solubilidade realizados com a amostra de dolomita (faixa granulométrica entre 38 e 212 μm) em água destilada, apresentaram um crescimento significativo dos valores de pH nos 10 minutos iniciais, igualmente observado para o minério, em água destilada, nesta faixa granulométrica (Figura 15). Ademais, o pH da suspensão em água destilada diminuiu a partir de 20 minutos, sugerindo uma queda na taxa de solubilização da dolomita. Cruz (2020) e Matis e Gallios (1989) verificaram em ensaios de solubilização da dolomita em água destilada uma estabilização do pH a partir de 30 minutos e 5 minutos, respectivamente. Uma explicação para essa diferença pode estar relacionada ao tipo de amostra de dolomita utilizada nos ensaios. Por outro lado, em solução de metassilicato de

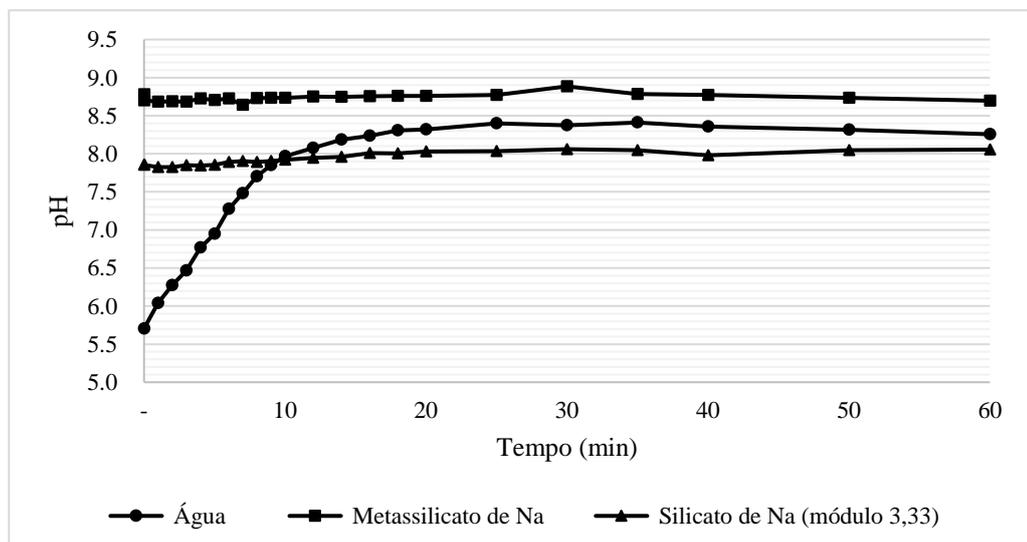
sódio, a variação do pH é pequena, o que comprova a adsorção do metassilicato de sódio na dolomita, evitando a solubilidade da mesma.

Figura 14 - Variação do pH em função do tempo para dolomita pura (-212 + 38 μm) condicionado com água destilada e metassilicato de sódio a 1200 g/t.



Pela análise do gráfico da Figura 15, observa-se um comportamento semelhante quando comparados aos ensaios da amostra de minério de granulometria - 212 μm (Figura 16). Os testes com água destilada mostraram um aumento menos acentuado do pH da suspensão, sobretudo, nos 10 minutos iniciais, crescimento de 5,7 para 7,9, quando comparada ao teste com o minério

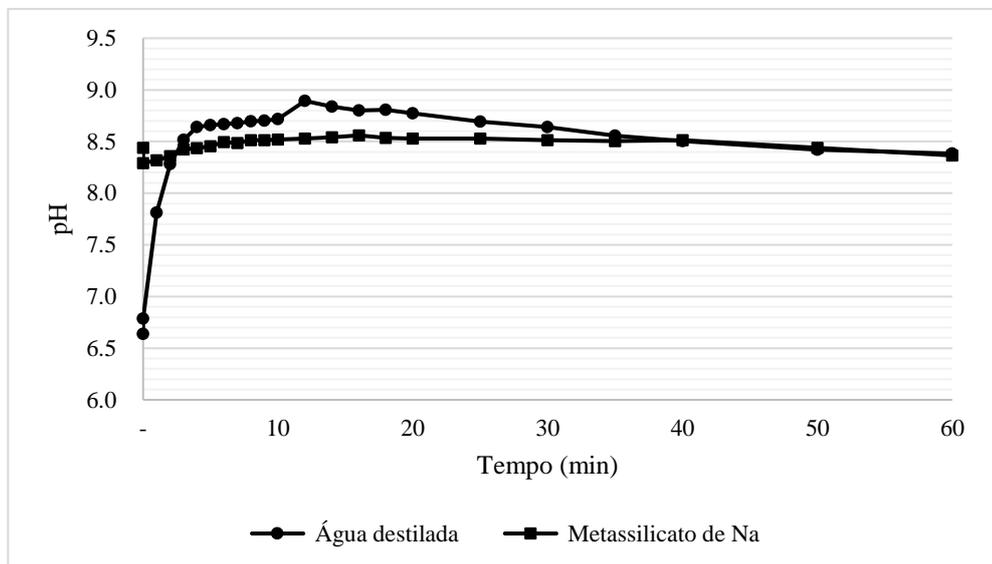
Figura 15 - Variação do pH em função do tempo para itabirito dolomítico (-212 + 38 μm) condicionado com água destilada, metassilicato de sódio e silicato de sódio (módulo 3,33) a 1200 g/t.



na fração -212 μm , que está relacionado com a maior solubilidade de partículas finas. Os reagentes metassilicato de sódio e silicato de sódio de módulo 3,33 complexaram os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} na superfície da dolomita, evitando a solubilidade da mesma, o que é evidente pela baixa alteração do pH.

Pela análise da Figura 16, verifica-se um aumento do pH da suspensão analisada na presença de água destilada para faixas levemente básicas, sobretudo, nos primeiros 10 minutos da análise, aumentando de 6,6 para 8,7, o que pode ser explicado pela elevada solubilidade da dolomita neste meio.

Figura 16 - Variação do pH em função do tempo para itabirito dolomítico condicionado com água destilada e metassilicato de sódio (1200 g/t).



À medida que a dolomita se solubiliza, são liberadas, no meio aquoso, espécies iônicas Ca^{2+} e Mg^{2+} , presentes no mineral, que, ao se hidrolisarem, são responsáveis pelo aumento do pH da solução. Por outro lado, quando se analisa a variação do pH da solução na presença de metassilicato de sódio, não é observado uma variação significativa, o que sugere que o reagente forma complexo com os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} no mineral, evitando a solubilização do mesmo.

5.4 FLOTAÇÃO EM BANCADA

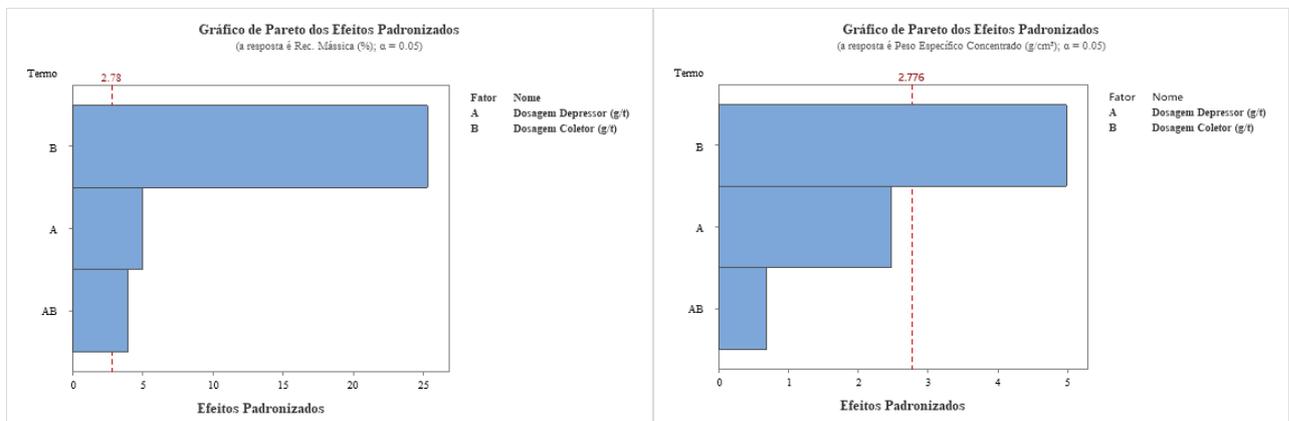
Na Tabela 7 estão apresentados os resultados do planejamento de experimentos dos ensaios de flotação em bancada.

Tabela 7 - Resultados do planejamento de experimentos dos ensaios de flotação em bancada.

Ensaio	Ordem	pH	Fatores		Variáveis respostas		
			Metassilicato de sódio (g/t)	Oleato de sódio (g/t)	Rec. Mássica (%)	Massa específica do concentrado (g/cm ³)	Massa específica do rejeito (g/cm ³)
1	1	7	150	750	40,63	3,24	3,61
2	6	7	150	750	37,90	3,16	3,50
3	3	7	150	1500	72,45	3,29	3,66
4	7	7	150	1500	75,41	3,30	3,71
5	2	7	600	750	26,76	3,13	3,50
6	8	7	600	750	22,73	3,14	3,50
7	4	7	600	1500	70,63	3,24	3,79
8	5	7	600	1500	73,76	3,26	3,78

Na Figura 17 estão apresentados os gráficos de Pareto relativos às variáveis resposta dos ensaios de flotação: recuperação mássica e massa específica do concentrado (flotado). As análises foram realizadas para um nível de confiança de 95%. Pela análise dos gráficos de Pareto, observa-se que todos os fatores testados tiveram efeito significativo sobre a recuperação mássica bem como o efeito conjunto dos dois. No entanto, o fator dosagem de coletor teve maior efeito do que a dosagem de depressor. Em termos de massa específica, somente a dosagem de coletor foi significativa para o flotado (concentrado).

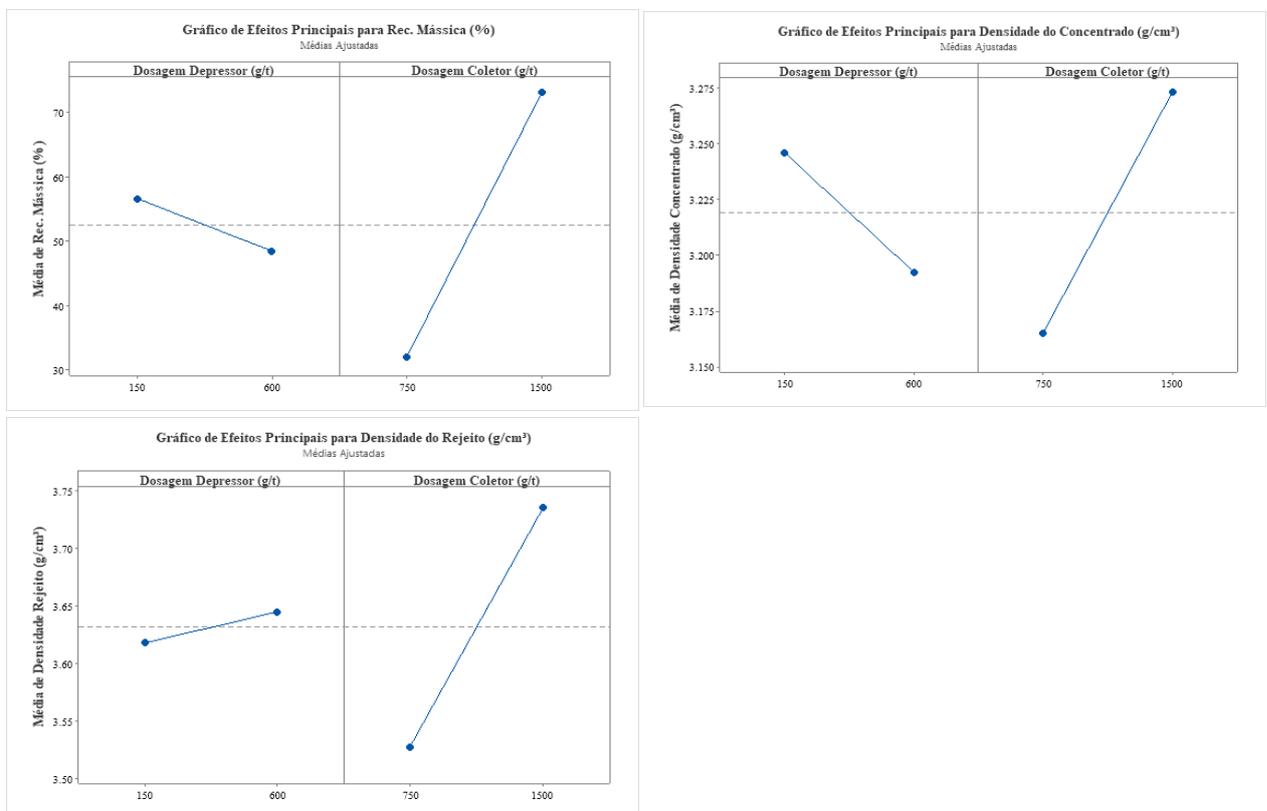
Figura 17 - Gráficos de Pareto para as variáveis resposta recuperação mássica e massas específicas de concentrados, nível de confiança de 95.



A Figura 18 mostra os gráficos dos efeitos principais dos fatores dosagem de metassilicato de sódio (depressor) e dosagem de oleato de sódio (coletor) sobre as variáveis resposta analisadas em pH 7: recuperação mássica, massa específica do concentrado e do rejeito, para um nível de confiança de 95%.

Observa-se pela análise dos gráficos de efeitos principais que a dosagem de coletor é o fator de maior influência sobre as variáveis resposta em análise. O aumento da dosagem de coletor afetou, de modo a aumentar a recuperação mássica bem como a massa específica dos concentrados. A dosagem de depressor, por sua vez, afetou pouco as variáveis recuperação mássica e massas específicas do concentrado e do rejeito. No entanto, o aumento da dosagem de depressor apresentou um efeito significativo na massa específica do concentrado, de modo a diminuí-lo.

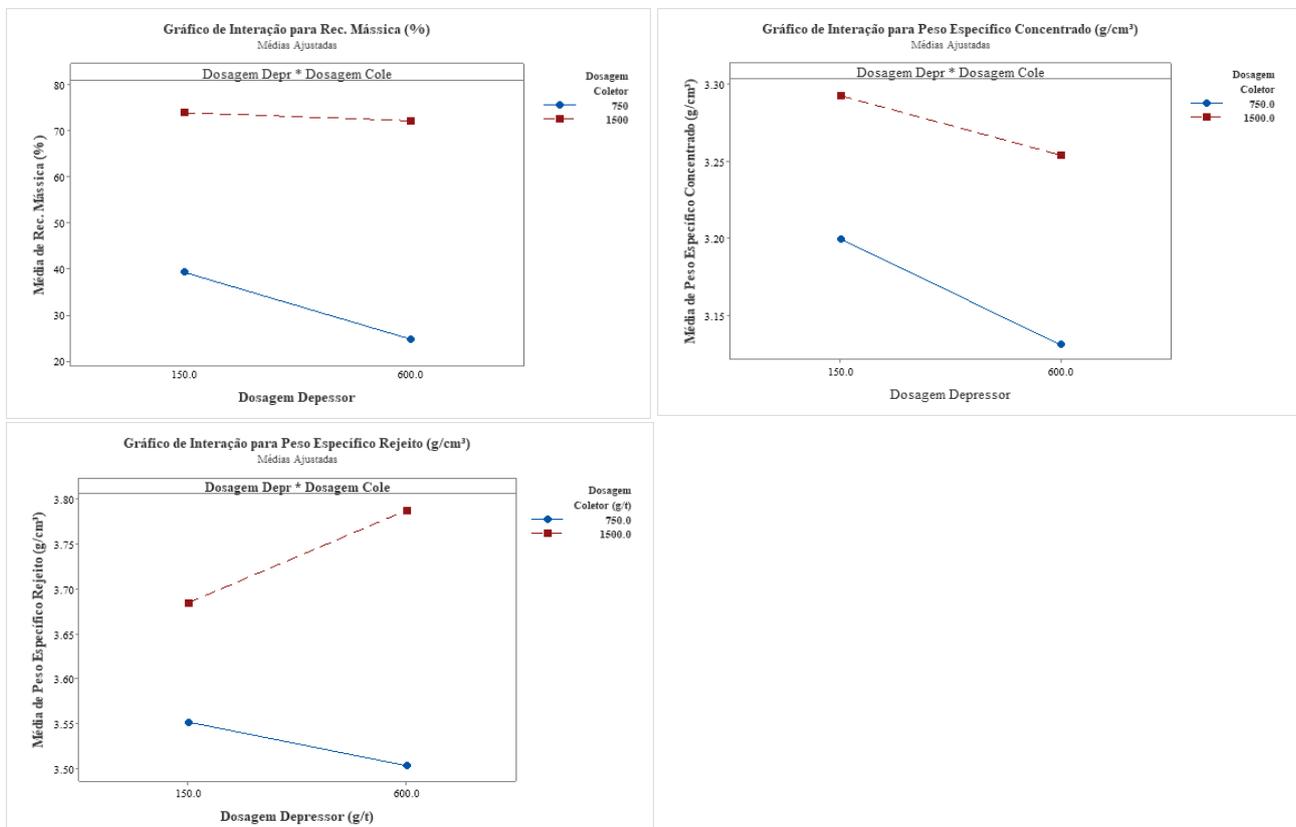
Figura 18 - Gráficos dos efeitos principais sobre as dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis resposta: recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e rejeitos para nível de confiança de 95%, para um nível de confiança de 95%.



Os gráficos de interação da dosagem de metassilicato de sódio (depressor) e dosagem de oleato de sódio (coletor) sobre as variáveis respostas analisadas (recuperação mássica, massas específicas do concentrado e do rejeito) nos ensaios de flotação em pH 7 estão apresentados nas Figuras 19.

Pela Figura 19 observa-se ligeira interação entre as dosagens de oleato de sódio e metassilicato de sódio para as variáveis respostas analisadas. No entanto, a relação entre a dosagem de depressor e a massa específica do rejeito depende da dosagem de oleato de sódio empregada. O aumento da dosagem de depressor em relação cada dosagem de coletor analisada, diminuiu a recuperação mássica e a massa específica do concentrado. No caso da massa específica do rejeito, o aumento da dosagem de depressor levou a sua diminuição para a menor dosagem de coletor (750 g/t), e o seu aumento, quando empregada a maior dosagem de coletor (1500 g/t).

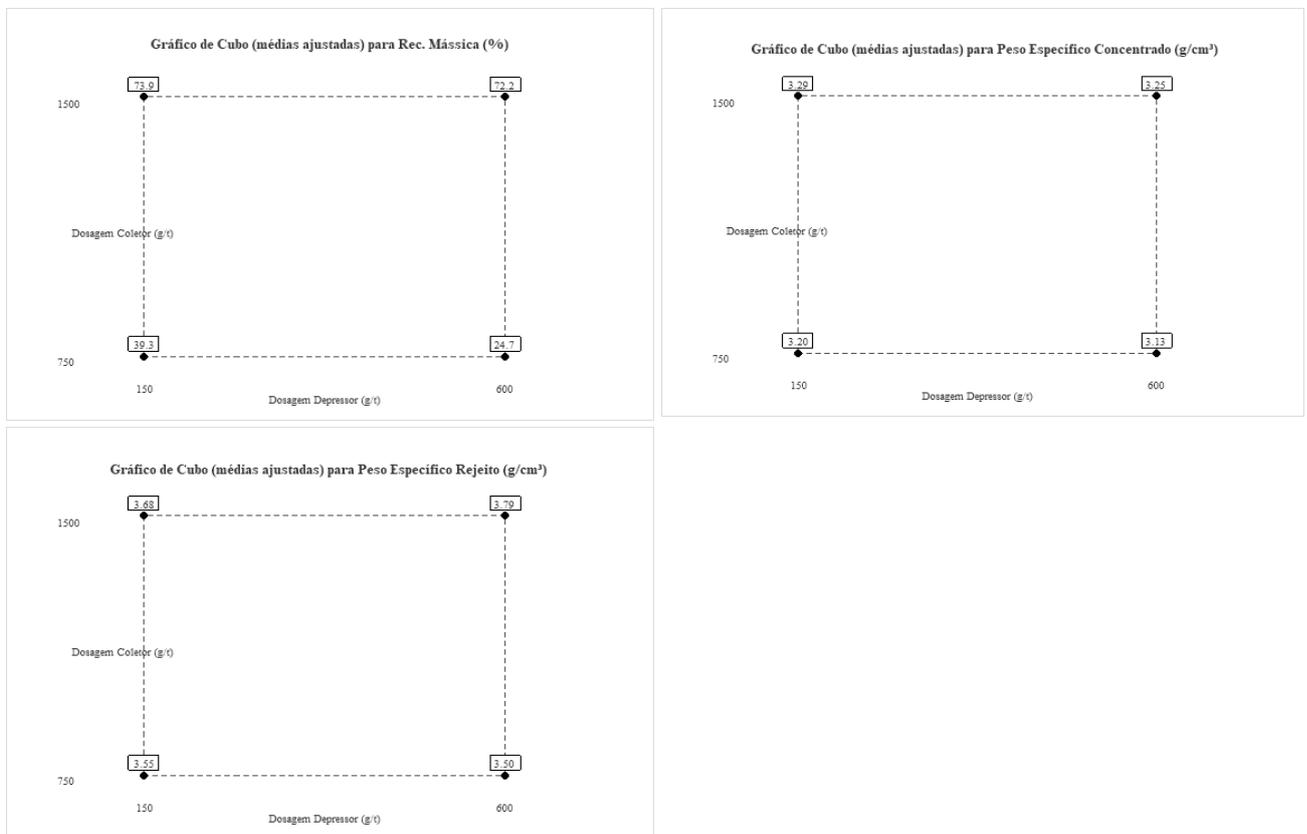
Figura 19 - Gráficos de interações dos efeitos principais referentes à influência das dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis respostas: recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e dos rejeitos para nível de confiança igual a 95%.



Os gráficos de cubo dos efeitos dos fatores dosagem de metassilicato de sódio (depressor) e oleato de sódio (coletor) sobre as variáveis respostas: recuperação mássica, massa específica do concentrado e do rejeito para um nível de confiança de 95%, estão mostrados na Figura 20.

Pelos gráficos de cubo (Figura 20) observa-se que, para maior dosagem de oleato de sódio (1500 g/t) e menor dosagem de metassilicato de sódio (150 g/t), foram obtidas maiores recuperações mássicas e maiores massas específicas nos concentrados. Enquanto, para menor dosagem de oleato de sódio (750 g/t) e maior dosagem de metassilicato de sódio (600 g/t), foram obtidas menores recuperações mássicas e menores massas específicas nos concentrados e nos rejeitos. De maneira geral, pode-se dizer que houve diferença significativa nos valores das variáveis respostas analisadas: recuperações mássicas (diferença 49,2%), massa específica do concentrado (diferença de 0,16) e rejeito (diferença de 0,29). Logo, faz-se necessário em trabalhos futuros, mudar os níveis dos fatores testados, especialmente da dosagem de metassilicato de sódio para maiores concentrações.

Figura 20 - Gráficos de cubo referente à influência das dosagens de metassilicato de sódio e oleato de sódio sobre as variáveis resposta recuperação mássica, massas específicas dos concentrados e dos rejeitos para nível de confiança igual a 95%.

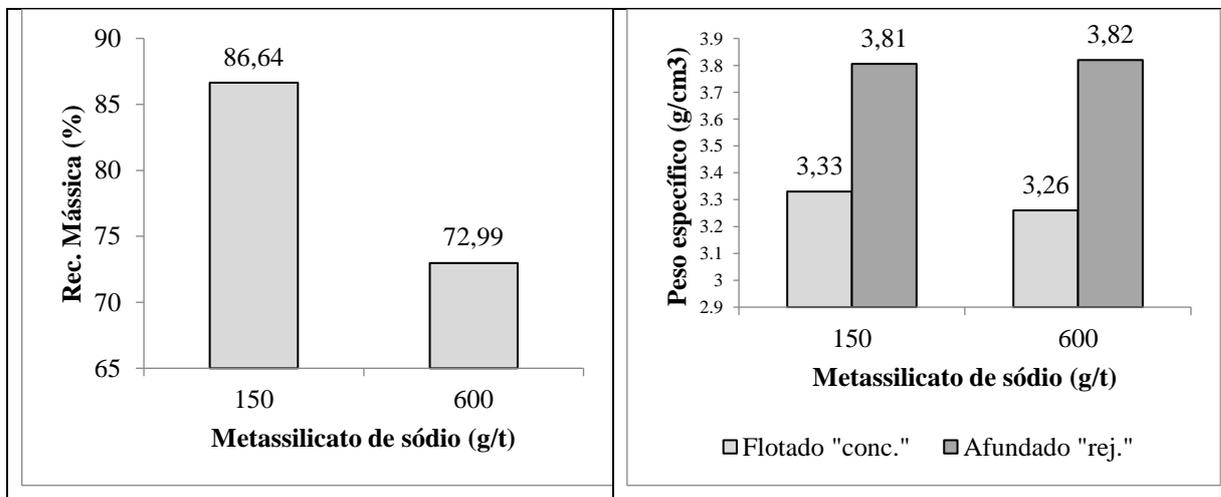


Comparando-se as massas específicas dos concentrados e dos rejeitos obtidos, conforme mostrado na Tabela 7, com a massa específica da alimentação, verificou-se que os concentrados apresentaram menores massas específicas que a alimentação ($3,45 \text{ g/cm}^3$), enquanto os rejeitos apresentaram maiores massas específicas que a alimentação. As menores massas específicas dos concentrados, quando comparadas com a alimentação e com o rejeito, indicaram que os mesmos apresentaram menores teor de Fe que a alimentação e que os rejeitos. Logo, a flotação direta da amostra de itabirito dolomítico estudada, utilizando o sistema oleato de sódio/metassilicato de sódio, apresentou baixa seletividade na separação entre a hematita e os minerais de ganga.

Os resultados dos ensaios realizados em pH 9, apresentados na Figura 21, mostram que foram obtidos maiores valores para recuperação mássica e massas específicas do concentrado (flotado) e do rejeito (afundado) para as duas dosagens estudadas em pH 9 (150/1500 e 600/1500 g/t de depressor/coletor) quando comparados com os resultados dos testes realizados com as mesmas dosagens em pH 7. Tais resultados indicam que, para os ensaios em pH 9, foram obtidos rejeitos com teores de Fe ainda maiores e concentrados com teores de Fe ligeiramente maiores quando comparados com os valores alcançados em pH 7.

Pela Figura 21, observa-se que foi obtida maior recuperação mássica para menor dosagem de metassilicato de sódio (150 g/t). Esse efeito, provavelmente, está relacionado com a flotação de dolomita, uma vez que a dosagem de depressor testada foi insuficiente para depressão da mesma.

Figura 21 - Resultados dos ensaios de flotação em pH 9 e dosagem de oleato de sódio de 1500 g/t



Diante deste cenário apresentado anteriormente, visando a obtenção de concentrados de itabirito dolomítico com maiores teor de Fe, sugere-se a realização dos ensaios empregando maiores dosagens de metassilicato de sódio e a realização de estudos, com a aplicação do sistema oleato de sódio/silicato de sódio, utilizando outros tipos de silicatos de sódio (módulo 2,22 e 3,33) como depressor em diferentes dosagens.

6 CONCLUSÕES

A caracterização física da amostra indicou que o d_{80} foi de 150 μm , o d_{50} foi de 75 μm e o d_{25} foi de 10 μm , a massa específica do minério de 3,45 g/cm^3 , a área superficial específica de 1,023 m^2/g e o tamanho médio dos poros de $2,29 \cdot 10^1 \text{ \AA}$. Após etapa de remoção finos e ultrafinos obteve-se um d_{10} de 10 μm .

Os minerais identificados por difração de raios X foram: dolomita, hematita, quartzo e talco.

Os ensaios de solubilidade indicaram que o minério apresentou elevada solubilidade em água em pH neutro e que os reagentes metassilicato de sódio e silicato de sódio (módulo 3,33), ao adsorverem no mineral, impedem a solubilização do mesmo.

Os níveis testados dos fatores dosagem de metassilicato de sódio e oleato de sódio não deram resultados satisfatórios na recuperação mássica e, provavelmente, nos teores dos concentrados obtidos, pois não se verificou mudanças significativas das massas específicas tanto do flotado (concentrado) como do rejeito (afundado).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-KHALEK, Nagui; SELIM, Khaled; ABDALLAH, Mahmoud; El-bellihi, A., BAYOUMY, W.A. *Flotation of Egyptian Newly Discovered Fine Phosphate Ore of Nile Valley*. 2014.

ARANTES, R, S. Influência de silicato de sódio de diferentes módulos e fluorsilicato de sódio na flotação direta de minério de ferro. 2012. 150f. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

ARAUJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. *Reagents in iron ores flotation. Minerals Engineering*, 18(2), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.023>. 2005.

BALTAR, C. A. M. Flotação no tratamento de minérios. 2. ed. Recife: Universitária da UFPE, 2010.

BATISTELI, G.M.B. Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

COSTA, J. C. V. Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CRUZ, D. G. Estudos de complexação dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} na flotação catiônica de minério de ferro. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

DANA, J. D. *Manual of Mineralogy*. 1. ed. Paris. 1864.

FERREIRA, P. H. T. Flotação de minério de zinco oxidado com oleato de sódio e amina. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

FUERSTENAU, M. C.; PALMER, B. R. *Anionic Flotation of oxides and silicates in Flotation*. In: GAUDIN, A. M. Flotation. v. 1. *New York: American Institute of Mining Engineers*, 552 p., cap. 7, p 148 – 196. v. 1. 1976.

GANDRA, A. Produção do setor mineral cresce 7% em 2021 e faturamento aumenta 62%. Agência Brasil, 2022. Disponível em <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-02/producao-do-setor-mineral-cresce-7-em-2021-e-faturamento-aumenta-62>>. Acesso em: 07/10/2022.

GONÇALVES, T. A. R.; PERES, A. E. C. Técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura automatizada (QEMSCAN) aplicadas a diferentes tipologias de minério de ferro. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 342-349, 2015.

GUPTA, A.; YAN, D. S., 2006 *apud* ARANTES, R, S. Influência de silicato de sódio de diferentes módulos e fluorsilicato de sódio na flotação direta de minério de ferro. 150f. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

HOUOT, R. *Beneficiation of iron ore by flotation - Review of industrial and potential applications. International Journal of Mineral Processing*, 10(3), 183–204. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(83\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0301-7516(83)90010-8). 1983.

IWASAKI, I.; COOKE, S. R. B.; COLOMBO, A. F.. *Flotation Characteristics of Goethite*. 25 p. *Report of Investigations 5593*. Washington, *United States of the Interior, Bureau of Mines*. 1960.

KLIMPEL, R. R; LEONARD, D. E.; HANSEN; R. D.; FEE, B. S. *Depression of the flotation of silica or siliceous gangue in mineral flotation*. US 5057209, 23 fev. 1990, 15 out. 1991.

KULKARNI, R. D.; SOMASUNDARAN, P. *Kinetics of oleate adsorption at the liquid/air interface and its role in hematite flotation*. *AIChE Symp*, v 71, p. 124-133, 1975.

LELIS, D. F.; DA CRUZ, D. G.; LIMA, R. M. F. *Effects of calcium and chloride ions in iron ore reverse cationic flotation: fundamental studies. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(6), 402–409. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1666122>. 2019.

LOPES, G. M. Flotação direta de minério de ferro. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

LUZ, J. A. M. Flotação aniônica de rejeito itabirítico: estudo de reagentes alternativos e modelamento polifásico do processo. 574 p. Tese (doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

LUZ, A, B; SAMPAIO, J, A; ALMEIDA, S, L, M. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de janeiro: CETEM/MCT. 2010.

MAMED, C. R. S. Mitigação dos efeitos de cátions Ca^{2+} na flotação catiônica reversa de minério de ferro. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MATIS, K. A.; GALLIOS, G. P. *Anionic flotation of magnesium carbonates by modifiers*. *Int. J. Miner. Process.*, Amsterdam, v. 25, p. 261-274, 1989.

NAKHAEI, F.; IRANNAJAD, M. *Reagents Types in Flotation of Iron Oxide Minerals: A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39, 89-124. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1391245>. 2018.

RAO, S.R. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. 2ª edição. *New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers*, 744 p. 2004.

SAYILGAN, A.; AROL, A. I. *Effect of carbonate alkalinity on flotation behavior of quartz. International Journal of Mineral Processing*, v. 74, p. 233-238, 2004.

SOMASUNDARAN, 2006 *apud* DUARTE, G. M. P. Efeito dos reagentes utilizados na flotação catiônica de minério oxidado de zinco de ambrósia norte em óxido de ferro e quartzo. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

SOMASUNDARAN, 1984 *apud* FERREIRA, P. H. T. Flotação de minério de zinco oxidado com oleato de sódio e amina. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

UWADIALE, G. G. O. O. *Flotation of iron oxides and quartz: a review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 11, p 129-161, 1992.

VELOSO, C. H.; FILIPPOV, L. O.; FILIPPOVA, I. V.; OUVRARD, S.; ARAUJO, A. C. *Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores. Minerals Engineering*, 125, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.031>. 2018.

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

VIEIRA, A. M.; SALUM, M. J. G. Estudo Comparativo de Aproveitamento de um Itabirito de Baixo Teor em Ferro por Flotação Direta e Reversa. In: Anais do XVI Encontro Nacional de Minérios e Hidrometalurgia. Rio de Janeiro. v 1, p. 397-407. 1994.