



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

---

**SOFIA LELIS SOARES E SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ÓLEO AMAZÔNICO NA  
FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO  
FATORIAL**

**ARAXÁ-MG**  
**2023**

**SOFIA LELIS SOARES E SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ÓLEO AMAZÔNICO NA  
FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO  
FATORIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Henrique Santos  
Coorientadora: Eng. Adriele Mercia Alves Santos

**ARAXÁ-MG  
2023**

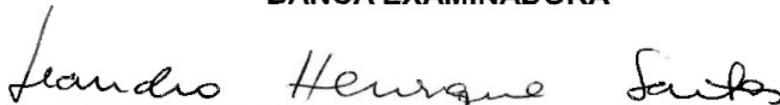
**SOFIA LELIS SOARES E SOUZA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ÓLEO AMAZÔNICO NA  
FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO  
FATORIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 05 de julho de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**



**Presidente e Orientador:** Prof. Dr. Leandro Henrique Santos  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

ADRIELE MERCIA ALVES SANTOS

Data: 09/07/2023 18:56:39-0300

Verifique em <https://validar.rti.gov.br>

**Coorientador:** Eng. Adriele Mercia Alves Santos  
Vale S.A.

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

NATAL JUNIO PIRES

Data: 10/07/2023 09:10:38-0300

Verifique em <https://validar.rti.gov.br>

**Membro Titular:** Prof. Dr. Natal Junio Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular:** Prof. Me. (a) Kelly de Souza Pires  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Lucília Lelis e Gilberto Aguiar,  
e à minha irmã Bianca Lelis que nunca  
mediram esforços para a realização dos  
meus sonhos. E a todos os meus amigos e  
professores, que sempre estiveram ao meu  
lado ao longo deste percurso.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus, pela força e por me conceder a oportunidade de alcançar mais um marco importante em minha jornada.

À minha família e em especial minha mãe Lucília e meu pai Gilberto, que me apoiaram e me encorajaram desde o início da faculdade, sempre presentes nos momentos felizes e nos mais difíceis.

À minha irmã Bianca pela amizade, companheirismo, incentivo e por sempre se disponibilizar a me ouvir quando mais necessito.

Aos meus amigos, por terem sido minha família durante estes anos em Araxá e em especial à Geovanna, Marynnara, Natalia, Nivia e Thaís por todo o incentivo, paciência, apoio e principalmente pelo companheirismo.

Ao meu orientador Leandro Henrique que me deu suporte, me ensinou e ajudou nas pesquisas e no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por sua paciência e disponibilidade para o acompanhamento dos testes laboratoriais.

À minha coorientadora Adriele Mércia, por ter me dado a oportunidade de auxiliá-la em seu projeto como inicianda científica. E por ter acreditado no meu potencial para dar continuidade nesta pesquisa, no qual contribuiu para o presente trabalho.

À Maria Gabriela e ao Lucas Cardoso, por terem se disponibilizado e me auxiliado durante toda a execução prática do trabalho. Assim como o estagiário de laboratório Victor Diniz, que me orientou durante a realização dos testes.

Ao CEFET Araxá e a todos aqueles que diretamente ou indiretamente estiveram comigo durante essa caminhada e me deram forças para concluir este ciclo, contribuindo para minha formação acadêmica.

*“Desistir... eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que o cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos, do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.”*

CORA CORALINA

## RESUMO

Ao longo dos anos é observado um grande aumento na produção de alimentos, possibilitado pelo uso de fertilizantes, inclusive fosfatados, na produção agrícola, que garantiu ao país destaque mundial como potência na agricultura. A principal fonte de matéria-prima desse insumo são as rochas fosfáticas, fornecedoras de fósforo para a síntese desse tipo de fertilizante químico. O beneficiamento deste minério é realizado por flotação, a operação de concentração mais utilizada pela indústria mineral. Porém, esse método apresenta baixa eficiência diante de gangas carbonáticas devido à dificuldade de seletividade na separação das espécies minerais por causa da similaridade da superfície dos minerais apatita, calcita e dolomita. Com isso, há uma busca, através de estudos e pesquisas, por reagentes e condições ideais de operação buscando alcançar essa seletividade. Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a influência das variáveis de pH (6 a 9), e dosagens de coletor (200g/t a 500g/t) e depressor (100g/t a 350g/t), utilizando o óleo de Andiroba (origem amazônica) como fonte graxa para o coletor, além de fubá como depressor, na flotação aplicada a minério fosfático proveniente de uma jazida localizada em Tapira-MG. Para isso, a amostra de minério fosfático foi preparada, caracterizada física e quimicamente, e empregada nos ensaios de flotação em bancada. Foi utilizado o planejamento fatorial completo com dois níveis e ponto central como método de planejamento de experimentos, finalizando o estudo com a avaliação qualitativa das variáveis, onde foram avaliados os efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre as variáveis respostas, finalizando com a análise das condições ótimas de operação. De acordo com os resultados obtidos foi visto que os testes em que se utilizaram dosagens maiores de coletor e depressor, apresentaram um resultado mais favorável, e concluiu-se que para obter maior recuperação mássica do minério fosfático, foi encontrada a condição ótima para a dosagem de coletor igual a 500 (g/t) e a dosagem de depressor igual a 350 (g/t) com pH 6.

**Palavras-Chave:** Minério fosfático. Flotação. Reagentes. Planejamento fatorial.

## ABSTRACT

Over the years, there has been a significant increase in food production facilitated by the use of fertilizers, including phosphates, in agricultural practices, which has positioned the country as a global powerhouse in agriculture. The primary raw material for these fertilizers is phosphate rock, which supplies phosphorus for the synthesis of such chemical fertilizers. The beneficiation of this ore is achieved through flotation, a concentration process widely employed in the mining industry. However, this concentration method exhibits low efficiency when dealing with carbonate gangue minerals due to the difficulty of achieving selectivity in the separation of mineral species, given the similarities between apatite, calcite, and dolomite minerals. As a result, there is a constant pursuit through studies and research for suitable reagents and operating conditions that can provide the desired selectivity and yield satisfactory operational results. Therefore, the main objective of this present study was to evaluate the influence of pH values (ranging from 6 to 9) and the dosage of collector and depressant reagents, specifically using a locally sourced Amazonian oil called andiroba as the collector and cornmeal (fubá) as the depressant, in the direct anionic flotation of apatite obtained from a deposit located in Tapira-MG. To accomplish this, the phosphate ore sample was prepared, physically and chemically characterized, and used in bench-scale flotation tests. A complete factorial design with two levels and a central point was employed as the experimental design method, along with a statistical analysis tool. The study was finalized by conducting a qualitative evaluation of the variables, assessing the main effects and interactions of the input variables on the response variables, and concluding with the analysis of the optimal operating conditions. Based on the results obtained, it was observed that tests using higher dosages of the collector and depressant yielded more favorable outcomes. It was concluded that, in order to achieve a higher mass recovery of the phosphate ore, the optimal conditions were determined to be a collector dosage of 500 (g/t), a depressant dosage of 350 (g/t), and a pH of 6.

**Keyword:** Fertilizer. Phosphate ore. Flotation. Reagents. Factorial design.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação entre a importação e a produção de fertilizantes no Brasil. ....	17
Figura 2: Cadeia produtiva dos fertilizantes. ....	18
Figura 3: Principais jazimentos minerais de fosfato com origem magmática no Brasil. .....	20
Figura 4: Complexo de Tapira – arcabouço geológico baseado em testemunhos de sondagem. ....	21
Figura 5: Processo de flotação com representação de partículas hidrofóbicas e hidrofílicas. ....	22
Figura 6: Característica da molécula heteropolar do coletor. ....	23
Figura 7: Representação do comportamento das partículas hidrofóbicas, na sua adesão nas bolhas, e da permanência das partículas hidrofílicas em suspensão....	23
Figura 8: Ação do espumante na interface gás-líquido. ....	25
Figura 9: Estruturas moleculares da amilose e amilopectina. ....	26
Figura 10: Variáveis no processo de flotação e sua interação. ....	28
Figura 11: Modelo genérico de um processo. ....	30
Figura 12: Peneira com abertura de 65# no agitador de peneiras. ....	32
Figura 13: (a) Deslamagem do passante em 65#. (b) Material após ser deslamado. .....	32
Figura 14: Quarteamento por pilha alongada para a retirada das alíquotas para caracterização. ....	33
Figura 15: Picnometria. (a) Picnômetro vazio, (b) Picnômetro com minério fosfático, (c) Picnômetro com minério fosfático e água, (d) Picnômetro com água. ....	34
Figura 16: Análise granulométrica a úmido no peneirador suspenso. ....	35
Figura 17: (a) Preparação do depressor no agitador mecânico, (b) Fubá gelatinizado. .....	36
Figura 18: Preparação do coletor no agitador magnético. ....	37
Figura 19: (a) Célula de flotação de bancada C.D.C., (b) Cuba de 1200ml usada nos testes. ....	39
Figura 20: (a) Amostra flotada, (b) Amostra afundada. ....	40
Figura 21: Moinho pulverizador de panela utilizado. ....	40
Figura 22: ARL™ QUANT'X - Thermo Scientific™. ....	41
Figura 23: Curva granulométrica da amostra. ....	44

Figura 24: Formação de bolhas em um dos ensaios de flotação realizado. ....	49
Figura 25: Comparação dos dados obtidos após os ensaios de flotação. ....	50
Figura 26: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre o teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . .....	52
Figura 27: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação mássica.....	52
Figura 28: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação metalúrgica. ....	53
Figura 29: Efeitos principais para Recuperação Metalúrgica. ....	54
Figura 30: Efeitos de interação para Recuperação Metalúrgica. ....	54
Figura 31: Cenários obtidos para otimização das respostas.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do mineral apatita. ....	19
Tabela 2: Planejamento dos testes de flotação. ....	38
Tabela 3: Variáveis utilizadas nos ensaios de flotação. ....	39
Tabela 4: Resultados dos ensaios de picnometria. ....	43
Tabela 5: Resultados da análise granulométrica a úmido. ....	44
Tabela 6: Análise química da amostra de minério fosfático. ....	45
Tabela 7: Massa dos produtos e perdas de massa por ensaio. ....	46
Tabela 8: Resultados de recuperação mássica, metalúrgica e razão de enriquecimento. ....	46
Tabela 9: Resultados das análises químicas dos concentrados. ....	51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.</b>	<b>Fertilizantes.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.</b>	<b>Mineral apatita .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.</b>	<b>Depósito do minério fosfático .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.</b>	<b>Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5.</b>	<b>Flotação .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.1.</b>	<b>Coletores .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.2.</b>	<b>Espumantes.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.3.</b>	<b>Modificadores .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6.</b>	<b>Flotação de minério fosfático.....</b>	<b>26</b>
<b>2.7.</b>	<b>Variáveis de flotação .....</b>	<b>27</b>
<b>2.8.</b>	<b>Óleo amazônico de Andiroba (<i>Carapa guianensi</i>).....</b>	<b>29</b>
<b>2.9.</b>	<b>Planejamento Fatorial.....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.</b>	<b>Obtenção das amostras .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.</b>	<b>Preparação da amostra .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.</b>	<b>Picnometria .....</b>	<b>33</b>
<b>3.4.</b>	<b>Análise granulométrica a úmido .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5.</b>	<b>Preparação dos reagentes .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6.</b>	<b>Planejamento fatorial.....</b>	<b>38</b>

<b>3.7. Ensaio de flotação .....</b>	<b>38</b>
<b>3.8. Análise dos resultados.....</b>	<b>41</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1. Picnometria.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2. Análise granulométrica a úmido .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3. Caracterização química da alimentação .....</b>	<b>45</b>
<b>4.4. Ensaio de flotação .....</b>	<b>45</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>57</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo existe com certa abundância na natureza, sendo o décimo elemento químico mais comum. Seus minérios são rochas naturais formadas em diversos ambientes geológicos. Eles geralmente contêm vários tipos de fosfatos, sendo os mais comuns os fosfatos de cálcio, do grupo da apatita. Esses minérios em quantidade e concentração suficientes, formam depósitos de valor econômico e podem ser aplicados como estão (*in natura*) ou após serem beneficiados para produzir *commodities*. Seu principal emprego é como fertilizante na agricultura (Santos, 2018).

Porém, a maioria dos solos brasileiros é altamente intemperizada e, de modo geral, deficiente em fósforo. Em razão disso, há necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes fosfatados nesse tipo de solo para manter e proporcionar o desenvolvimento de plantas (NOVAIS *et al.*, 2007).

Diante disso, o fertilizante é um elemento estratégico e de suma importância na agricultura brasileira, contudo, 80% da sua demanda é atendida pela importação, uma vez que o país não é autossuficiente em fertilizantes. Esse choque entre a demanda e oferta oferecida pelo país é ocasionada pela competitividade do setor agrícola, bem como restrições industriais na produção do insumo (EPE, 2019; BENITE, 2015).

Essa produção de fertilizantes no Brasil segundo o ranking mundial é baixa e insuficiente para suprir toda a demanda nacional. Dessa forma, 85% dos fertilizantes que é consumido no país para a sua agricultura é importado (SERRANO, 2022). Segundo o professor Paulo Sérgio (2022), com investimentos pesados dentro de 6 a 8 anos, o Brasil poderia quase ser autossuficiente e produzir quase todo o fosfatado. Porém, pelas projeções e pelas políticas que existem no Brasil, a possibilidade de isso ocorrer é pequena.

A principal matéria-prima para a produção destes fosfatados é proveniente da rocha fosfática, contida em depósitos minerais. O processo de concentração desse minério, de acordo com Oliveira e Peres (2010), é geralmente realizado através da flotação, alcançando a separação dos minerais constituintes do minério fosfático (apatita/silicatos e carbonatos).

Porém, o Brasil, diferente dos demais depósitos mundiais que são sedimentares, apresenta minérios fosfatados de origem ígnea que são difíceis de beneficiar por apresentarem uma mineralogia complexa, apresentando baixo teor de

apatita e elevado teor de carbonatos que acarretam problemas em seu aproveitamento global, causando perdas de fósforo.

Diante disso, é necessário que seu processo de concentração seja submetido por constantes aprimoramentos para que haja um melhor aproveitamento dessas reservas mineralógicas, e assim, proporcionar um aumento no concentrado fosfático, que por sua vez proporcionará um aumento da produção nacional de fertilizantes.

Seu processo de concentração que é a flotação, utiliza vários tipos de reagentes que auxiliam na operação, e alguns deles são os óleos vegetais sob a forma de sabões, que atuam como coletores na concentração de oxi-minerais. Essa possibilidade de utilização de óleos vegetais incentivou muitos trabalhos científicos, verificando o potencial de vários desses óleos como matérias-primas para coletores, com base nos seus ácidos graxos constituintes (BRANDÃO *et al.*, 1994; GUIMARÃES *et al.*, 2005).

A partir deste cenário, esse trabalho possui o objetivo de avaliar a eficiência de diferentes reagentes na flotação, entre eles, o óleo amazônico Andiroba saponificado, resíduo de um processo industrial, avaliando suas dosagens e valores de pH da operação utilizando o minério fosfático proveniente de uma jazida localizada em Tapira-MG. Como método estatístico de reprodutibilidade dos ensaios, será utilizado o planejamento fatorial completo com ponto central.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo deste tópico serão abordados temas de importante relevância para o entendimento do presente trabalho. Eles estão divididos entre a situação dos fertilizantes no Brasil, a geologia do Complexo Alcalino Carbonatítico de Tapira e do depósito do minério fosfático, e alguns conceitos sobre o método de beneficiamento do minério fosfático.

### 2.1. Fertilizantes

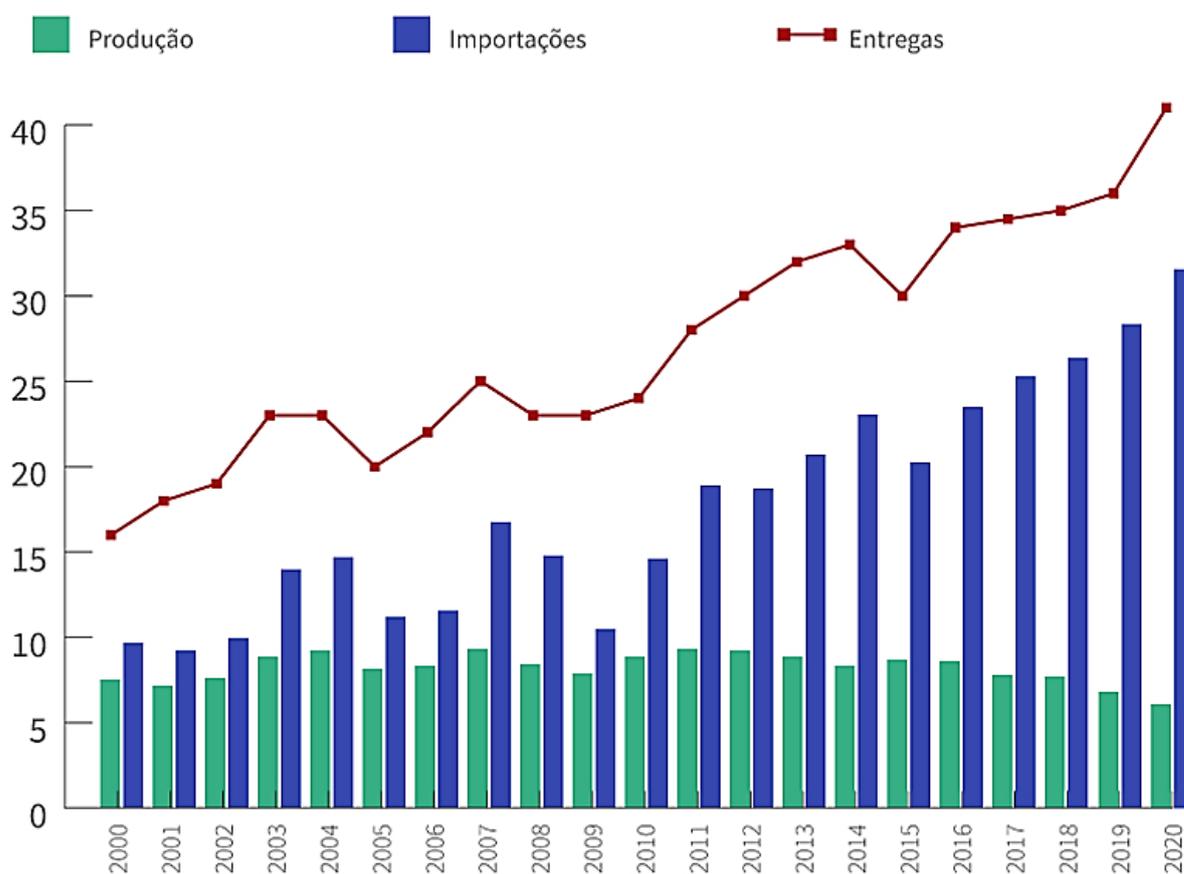
Os fertilizantes são substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes vegetais. Eles são um dos indispensáveis insumos agrícolas, que contribuem na reposição dos elementos que são retirados do solo, com a finalidade de aumentar sua fertilidade. Para a indústria de fertilizantes, os principais macronutrientes (NPKs) são o grupo mais importante. Os outros elementos químicos restantes, embora biologicamente básicos, não têm valor comercial apreciável, pois são utilizados em pequenas quantidades (DIAS e FERNANDES, 2006).

Se eles não fossem usados, a produção dos alimentos básicos seria reduzida drasticamente e, portanto, seriam necessárias mais áreas florestais para atender às necessidades desta indústria (DIAS e FERNANDES, 2006).

A chegada dos fertilizantes no Brasil, ocorreu em 1895, na região de Campinas (SP), marcada pelo cultivo do café no século XIX, mas sua introdução no mercado brasileiro foi tardia porque os agricultores não viam mais o porquê de pagar por mais um produto já que suas terras eram férteis para se produzir café. Até a década de 1960, estimava-se que apenas 30 terras agrícolas no país utilizavam esterco ou fertilizante (MAFRA, 2022).

Hoje, segundo os dados do Sindicato Nacional das Indústrias de Matérias-primas para Fertilizantes, o Brasil é o quarto maior produtor mundial de grãos. As empresas brasileiras são responsáveis por 11,6% do potássio, fósforo e nitrogênio usados na agricultura do país, o restante é importado. Na Figura 1 é possível ver a relação entre a produção e a importação dos fertilizantes no Brasil, sendo evidente o quanto a importação é maior que a produção nacional (ALMEIDA, 2022).

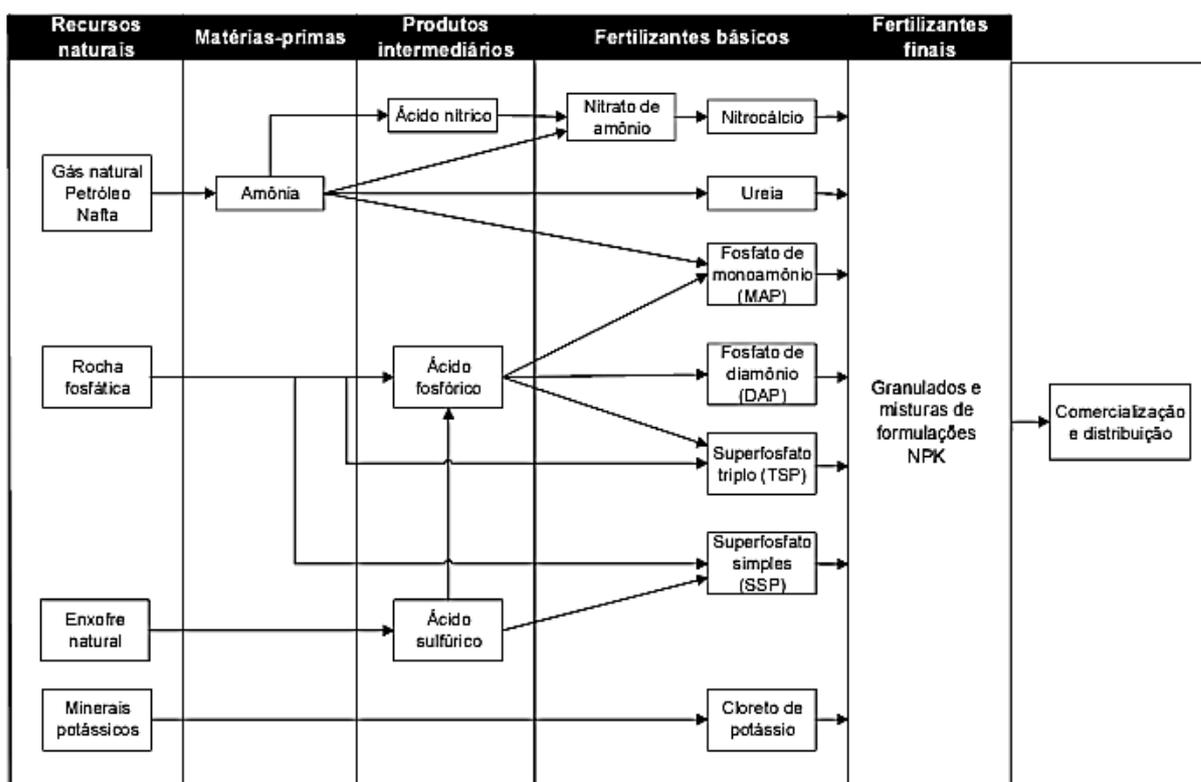
Figura 1: Relação entre a importação e a produção de fertilizantes no Brasil.



Fonte: IFA, COMEXSTAT (2019).

Segundo Costa e Silva (2012), o setor da mineração é responsável pela extração e fornecimento de recursos naturais básicos para produzir fertilizantes, incluindo o gás natural, petróleo, nafta, enxofre e as rochas fosfáticas e potássicas. Na indústria de químicos inorgânicos há a fabricação das matérias primas e dos produtos intermediários a partir de insumos obtidos na etapa anterior, como a amônia e os ácidos nítrico, fosfórico e sulfídrico (Figura 2). Em seguida, vem a etapa que abrange a indústria de fertilizantes propriamente dita, ela resulta em: nitrato de amônio, ureia, fosfato de monoamônio, fosfato de diamônio, superfosfato simples, superfosfato triplo e o cloreto de potássio. Ao final da cadeia, com os processos de granulação e mistura dos compostos, originam-se os fertilizantes finais, que são comercializados e distribuídos para a aplicação agrícola.

Figura 2: Cadeia produtiva dos fertilizantes.



Fonte: ANDRADE (1995).

Conforme Andrade (1995), a cadeia no início, que engloba a fabricação das matérias-primas básicas, é caracterizada por altos investimentos e baixos retornos, o que explica o número elevado de empresas públicas neste segmento no Brasil. Entretanto, no término da cadeia, nas atividades de formulação e distribuição dos fertilizantes, há uma maior concentração de empresas menores, que enfrentam a sazonalidade do setor.

## 2.2. Mineral apatita

O fósforo, de símbolo químico “P”, é um elemento pertencente ao grupo dos metaloides e integrante do grupo V da Tabela Periódica dos Elementos, apresentando número atômico 15. Ele está contido em muitos minerais, mas apenas as apatitas são minerais de minério. As apatitas apresentam fórmula geral  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$  de acordo com o constituinte presente, cloro, flúor ou hidroxila, podem ser classificadas respectivamente por cloroapatita, fluorapatita e hidroxiapatita (OLIVEIRA, 2007).

A fluorapatita, hidroxiapatita e variantes menos comuns de cloroapatita são encontradas principalmente em rochas de origem ígnea, como o carbonatito. No entanto, na maioria dos depósitos sedimentares, dominam as variedades carbonateapatita e carbonateapatita-fluoroapatita-francolita (MCCLELLAN E KAUVENBERGH, 1990; ZAPATA E ROY, 2004).

A mineralogia da apatita é extremamente diversificada e complexa, e pode ocorrer em qualquer ambiente geológico. No entanto, em termos de importância econômica, os minérios associados a ambientes sedimentares são os mais relevantes (COUTINHO, 2016).

A apatita possui uma densidade que varia entre 3,1 e 3,2 g/cm<sup>3</sup>, e é diferenciada por seus cristais, sua cor e dureza, conforme mostrado na Tabela 1 (SANTOS, 2010).

Tabela 1: Propriedades do mineral apatita.

Sistema Cristalino	Cor	Hábitos	Clivagem
Hexagonal bipiramidal.	Incolor, branco, amarelo, marrom, cinza, rosa, violeta, azul, verde, verde-mar, verde-azulado. Zonado.	Cristais hexagonais tabulares ou prismáticos.	{0001} má, {10-10} má.
<b>Tenacidade</b>		Maciço, granular, acicular, estalagmítico, terroso, botrioidal.	
Quebradiça.			
<b>Maclas</b>	<b>Fratura</b>	<b>Dureza Mohs</b>	<b>Partição</b>
Raras, de contato.	Conchoidal a irregular	5	não
<b>Traço</b>	<b>Brilho</b>	<b>Diafaneidade</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Branco.	Vítreo a subresinoso.	Transparente.	3,1 – 3.25

Fonte: UFRGS (2021).

Além desses minerais serem usados na produção de ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) para a fabricação de fertilizantes, os sais fosfatados são usados também na fabricação de detergentes sintéticos (polifosfato de sódio) e em cremes dentais (fosfato de cálcio). Os fosfatos condensados ainda são utilizados no tratamento de água, principalmente para fins industriais (OLIVEIRA, 2007).

### 2.3. Depósito do minério fosfático

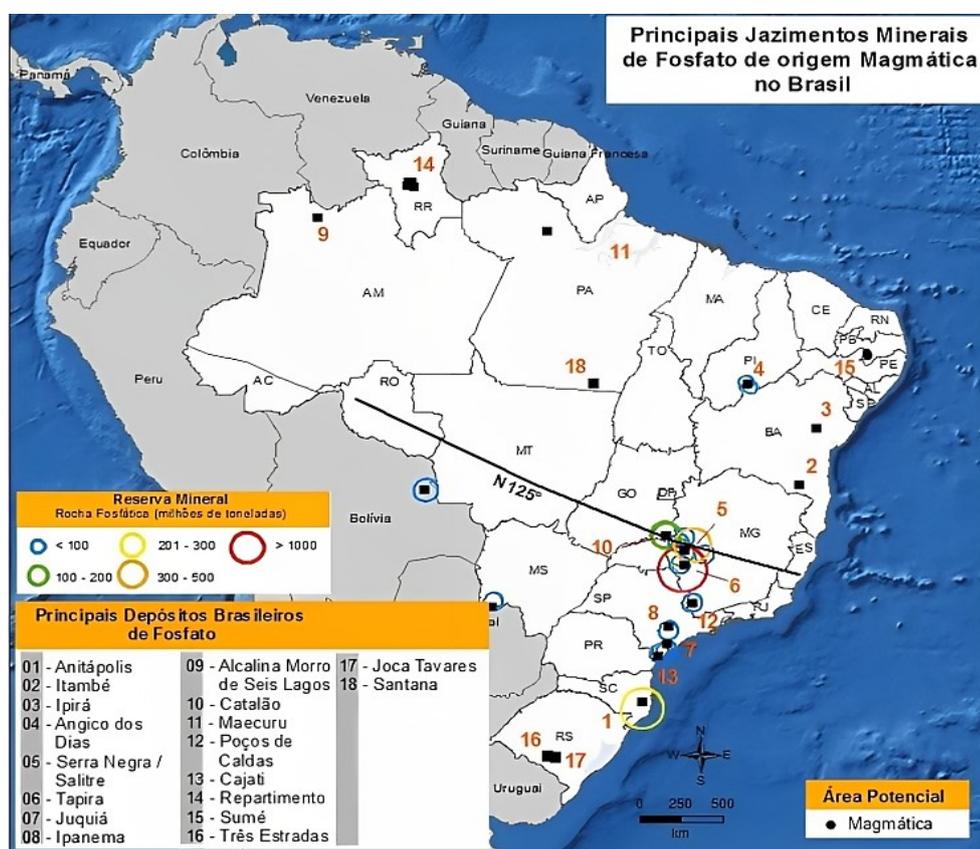
Os depósitos de fosfato são a maior fonte de fósforo presente no mundo, e as fosforitas são minerais autigênicos (formados no processo de sedimentação das rochas) relacionados a elevados níveis de matéria orgânica nos sedimentos de fundo.

Os depósitos estão relacionados ao clima, às convergências de correntes oceânicas e às baixas taxas de sedimentação terrígena (RIGGS e BURNETT, 1990).

Os depósitos de fosfato podem ser classificados de acordo com sua formação geológica, sendo de origem sedimentar, ígnea ou biogenética (ZHANG et al., 2006; SOUZA, 2001). A maior parte dos concentrados provenientes do minério fosfático é produzida a partir de rochas de origem sedimentares. Os minérios sedimentares geralmente precipitam-se em sedimentos ricos em matéria orgânica que acumulam em locais de correntes ascendentes costeiras ativas. Eles surgem onde as correntes da plataforma concentram hidraulicamente precipitados fosfatados recentes em depósitos granulares (RIGGS e BURNETT, 1990).

É possível observar que em países como o Brasil, a Rússia e a África do Sul, existe a predominância dos depósitos de origem ígnea, associados a rochas de composições ultrabásicas e alcalinas. Essas, são formadas pela lenta cristalização de minerais decorrentes do resfriamento do magma. Na Figura 3 é possível ver os principais depósitos magmáticos no Brasil, sendo Minas Gerais o estado com a maior presença dos mesmos (PUFAHL, 2010).

Figura 3: Principais jazimentos minerais de fosfato com origem magmática no Brasil.



Fonte: PUFAHL (2010).

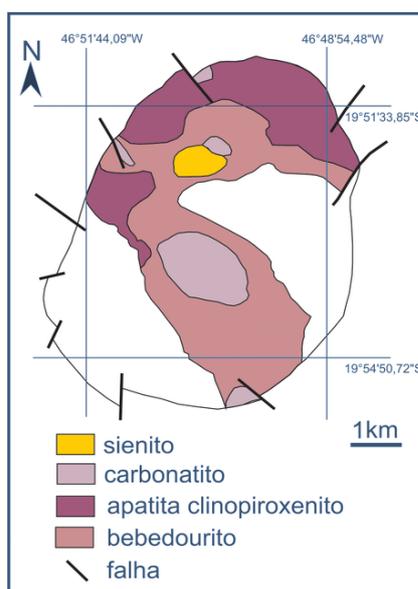
## 2.4. Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira

No Brasil, um dos maiores depósitos de minério fosfático é o Complexo de Mineração de Tapira que está localizado no município de Tapira-MG e pertence à microrregião de Araxá, na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto do Paranaíba. Geologicamente, essa jazida pertence ao complexo alcalino carbonático de Tapira, que faz parte da Província Ígnea do Alto Paranaíba e são reunidas rochas magmáticas alcalinas de idade Neocretácea que ocorrem na margem nordeste da Bacia do Paraná (BROD, 2004).

Esse complexo é considerado um dos maiores da América Latina, e possui reservas de minério da ordem de 265 milhões de toneladas. O minério atualmente lavrado nele é o manto de intemperismo, onde ocorre o aumento dos teores de titânio, fosfato, nióbio, terras raras e vermiculita, porém, atualmente são minerados apenas o fosfato e titânio, e somente o fosfato apresenta um aproveitamento comercial (BROD *et al.*, 2004).

Os fenômenos geológicos lá, formaram dois grupos distintos de minérios: um minério friável que é um material alterado pelo intemperismo físico-químico onde predomina os minerais de ganga silicatados e o minério granulado, material duro e compacto, no qual os principais contaminantes são os minerais carbonatados que constituem a ganga (Figura 4) (BROD *et al.*, 2004).

Figura 4: Complexo de Tapira – arcabouço geológico baseado em testemunhos de sondagem.



Fonte: BROD (2004).

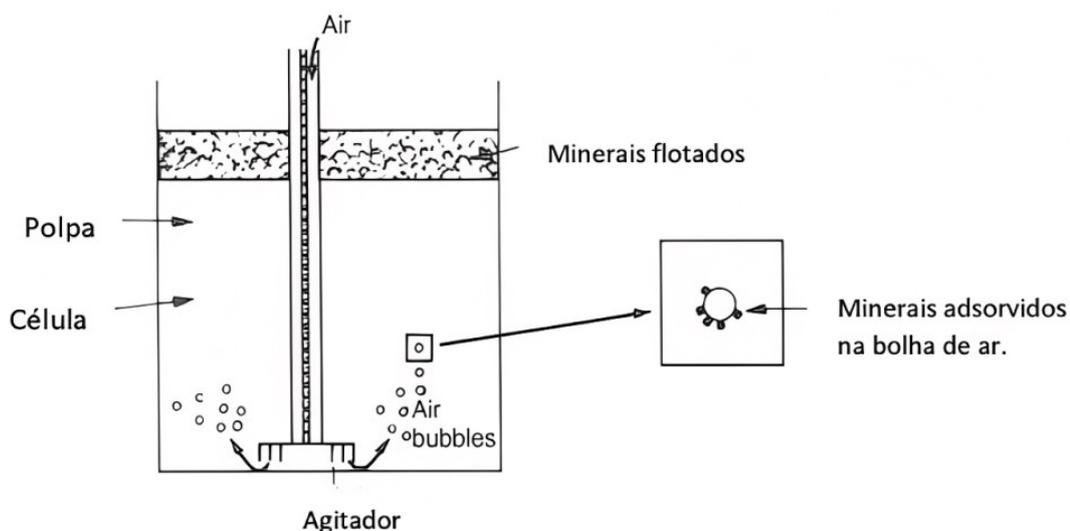
## 2.5. Flotação

O beneficiamento é classificado como operações destinadas a modificar o minério de sua forma original. Ele tem como objetivo alterar o tamanho das partículas, a concentração relativa das espécies presentes ou a forma para se obter o concentrado final adequado para o uso nos processos industriais (LUZ *et al.*, 2010; SANTANA, 2011).

Para os minérios fosfáticos, a principal operação utilizada para a concentração das espécies minerais é a flotação. De maneira geral e no âmbito da mineração, a flotação é o termo designado para se referir ao processo de separação de minerais no meio aquoso e de bolhas de ar. Este processo utiliza as características de hidrofobicidade e hidrofilicidade para separar a partícula mineral de interesse da ganga (SANTOS, 2010).

No momento da operação de flotação, são formadas bolhas de ar que possuem a tarefa de carregar as partículas hidrofóbicas/hidrofobizadas, enquanto as demais continuam em suspensão na fase líquida (SANTANA, 2007). A Figura 5 representa a realização deste processo.

Figura 5: Processo de flotação com representação de partículas hidrofóbicas e hidrofílicas.



Fonte: WILLS e NAPIER-MUNN (2006).

Nesse processo também ocorre adição de alguns reagentes, podendo ser compostos orgânicos ou inorgânicos. Eles são utilizados a fim de controlar as características das interfaces presentes no sistema (ASSIS, 2014). Nos próximos tópicos serão abordados em mais detalhes tais reagentes.

### 2.5.1. Coletores

Os coletores são substâncias surfactantes que possuem moléculas heteropolares (Figura 6), uma parte da molécula é inorgânica e a outra orgânica apolar, com capacidade de adsorção na interface do mineral/solução para induzir ou intensificar sua hidrofobicidade. Com o emprego dessa classe de reagentes, seria possível a separação dos minerais em fase aquosa (polpa) pela utilização de bolhas de ar, sendo que as partículas hidrofóbicas se aderem as bolhas e as hidrofílicas permanecem em suspensão (Figura 7) (PAIVA, 2011).

Figura 6: Característica da molécula heteropolar do coletor.

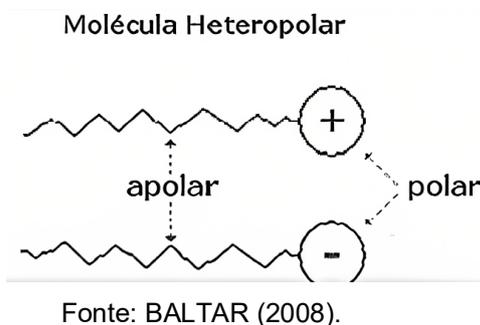
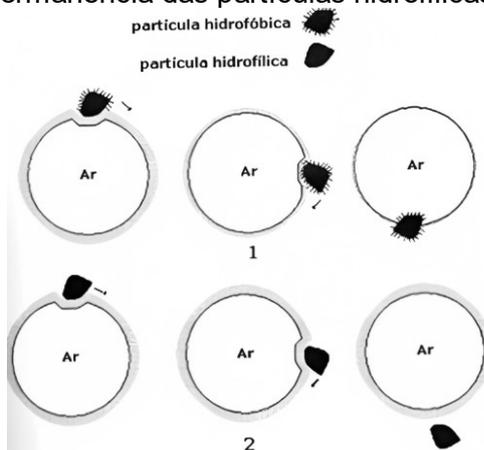


Figura 7: Representação do comportamento das partículas hidrofóbicas, na sua adesão nas bolhas, e da permanência das partículas hidrofílicas em suspensão.



Fonte: BALTAR (2008).

A classificação dos coletores pode se basear em sua carga iônica em catiônicos e aniônicos. Essa classificação leva em consideração a carga elétrica da porção polar, oriunda da ionização da estrutura (CHAVES, FILHO E BRAGA, 2018).

- Catiônicos: corresponde ao grupo das aminas e seus acetatos. Eles são adsorvidos e desorvidos de forma fácil e rápida. São mais afetados por modificadores de coleta e menos seletivos que os coletores aniônicos. Sua aplicação típica é na flotação de não-metálicos.
- Aniônicos: eles se subdividem de acordo com a função química correspondente, em: ácidos graxos e seus sabões, tiocarbonatos ou xantatos, sulfatos de alcoila ou arila, tióis (álcoois de enxofre) ou mercaptanas, tiouréias, ditiofosfatos ou aerofloats, tiocarbamatos.

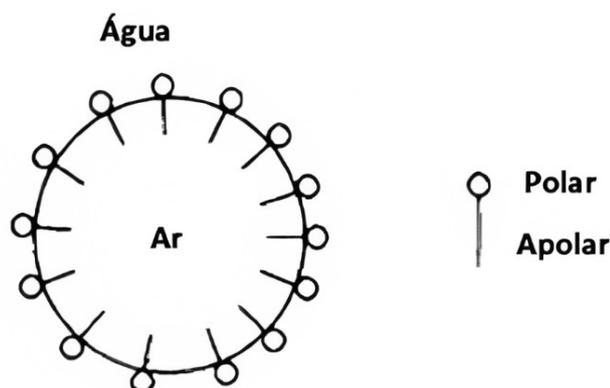
### **2.5.2. Espumantes**

Os espumantes, são substâncias utilizadas para diminuir a tensão interfacial ar/solução com o intuito de criar condições favoráveis à geração de espuma. Além disso, eles contribuem na cinética de interação entre bolhas e partícula. Os espumantes são indispensáveis para a etapa de transporte da flotação (PAIVA, 2011).

Eles são reagentes tensoativos não iônicos, heteropolares e surfactantes; e geralmente pertencem à classe dos álcoois, éteres e seus derivados. Esses compostos possuem um grupo polar e uma cadeia hidrocarbônica que causam a redução da tensão superficial da bolha. Esse reagente é adicionado na flotação para formar uma bolha estável sob a polpa ou para controlar o tamanho da bolha, de maneira que a partícula de interesse possa ser arrastada mais facilmente para zona de coleta. Alguns coletores também possuem a propriedade de poder espumante, como é o caso dos ácidos graxos, aminas e oleatos. (OLIVEIRA, 2004; WILLS, 2006; CHAVES *et al.*, 2010).

A Figura 8 apresenta como é a ação dos espumantes na interface entre a bolha de ar e água.

Figura 8: Ação do espumante na interface gás-líquido.



Fonte: WILLS e NAPIER-MUNN, 2006, p. 277.

### 2.5.3. Modificadores

Os reagentes modificadores são utilizados na flotação para aumentar ou diminuir a flotabilidade de determinada espécie mineral ou elevar a seletividade do processo. Desta forma, sua função é o controle do pH, densidade de carga nas interfaces, estado de oxidação dos íons na polpa e concentração de íons metálicos que estejam na polpa e nas interfaces (OLIVEIRA e SOUZA, 2012; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

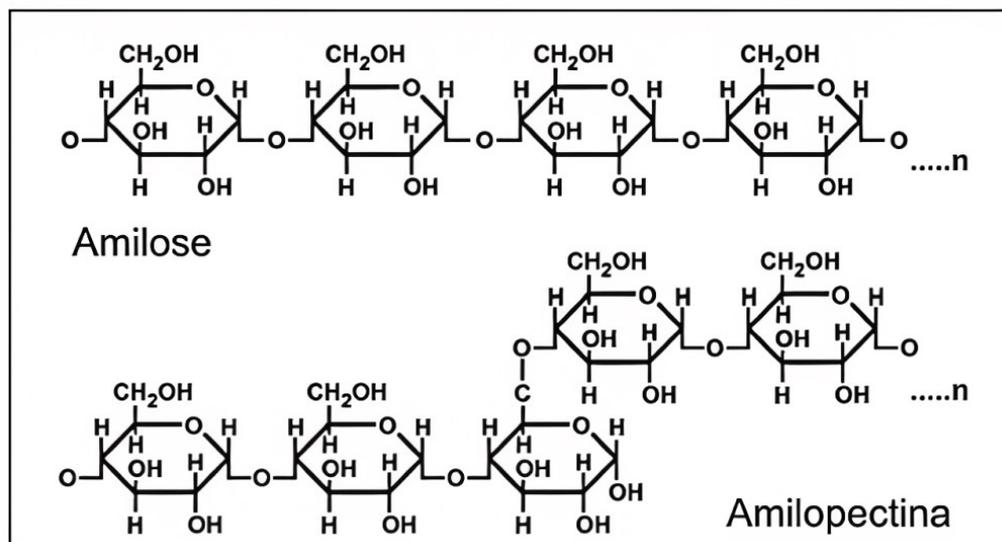
Os reagentes modificadores são divididos em três classes principais (CHAVES, FILHO e BRAGA; 2010):

**Os depressores** apresentam a função de impedir que os coletores se adsorvam a certos minerais e evitar a hidrofobização superficial de minerais que não se destinam a flutuar. Eles podem ser de origem inorgânica ou orgânica. O fubá, que foi o utilizado nos ensaios, se destaca entre os inibidores orgânicos e é utilizado na flotação de apatita para redução de carbonatos e minerais ferrosos. Entre as substâncias inorgânicas, o silicato de sódio e o sulfeto de sódio são os mais comumente usados. Como a função do depressor é suprimir a ação do coletor, é necessário adicionar o depressor antes do coletor na operação de flotação.

O amido, ou fase amilácea, é composto por amilose e amilopectina, estes componentes são os principais responsáveis pela ação de depressão do amido. A amilopectina é uma molécula ramificada, como é mostrado na Figura 9, e é considerada o depressor mais eficiente de minerais de ferro se confrontada com a amilose, molécula essencialmente linear (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Já para a flotação de minérios fosfáticos, os polissacarídeos utilizados como agentes depressores possuem diversas vantagens em comparação com os reagentes inorgânicos. Isso se deve ao fato de serem mais estáveis, mais econômicos, biodegradáveis e não tóxicos (HANNA e SOMASUNDARAN, 1976; LIU *et al.*, 2000).

Figura 9: Estruturas moleculares da amilose e amilopectina.



Fonte: NUNES e PERES (2011).

**Os ativadores** são adicionados com a finalidade de aumentar o poder de adsorção do coletor aos minerais suspensos. Usado quando o aumento da extração mineral é necessário. O ativador é de natureza inorgânica e solúvel em água, e o sulfato de cobre é um exemplo de ativador usado na indústria mineral para ativar diafragmas (ZnS) na flotação de xantato.

**Os reguladores de pH** são reagentes inorgânicos usados para controlar o pH de um sistema para aumentar a eficiência do processo. Estes podem ser ácidos, geralmente sulfúricos e/ou clorídricos, ou bases como hidróxidos de cálcio, magnésio, sódio, etc. Os modificadores de pH não só contribuem para a dissociação do reagente, mas também causam a hidratação da superfície das partículas.

## 2.6. Flotação de minério fosfático

Na indústria de fertilizantes é necessário que os minérios de fosfato tenham teor acima de 30% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Caso isso não ocorra, é necessário remover suas impurezas pelo beneficiamento. Alguns minerais semi-solúveis, como a fluorita,

apatita, calcita, barita e magnesita, são hidrofílicos, e o uso seletivo de reagentes para tornar esses minerais hidrofóbicos faz parte da eficiência para seu processo de separação (SIS e CHANDER, 2003).

Essa separação tem sido eficiente pelo método de flotação. No entanto, a separação entre esses minerais apresenta dificuldades devido às propriedades químicas semelhantes das superfícies minerais. Na flotação de minério fosfatado, reagentes de diversos tipos e estruturas são utilizados como coletores, depressores e reagentes auxiliares para flotação direta e reversa desses minérios (SIS e CHANDER, 2003).

Em relação à apatita, assim como a maior parte do minério fosfatado brasileiro, seu processo de concentração é realizado utilizando ácidos graxos como coletor e amido de milho como depressor. Como modificadores de pH, Barros (2013) menciona a soda cáustica como a mais utilizada nesse processo.

As diferentes estruturas e composições das apatitas fazem com que a adsorção dos ácidos graxos seja bastante variada. Entre os fatores que afetam a adsorção de coletores e, conseqüentemente, a flotação são (HANNA e SOMASUNDARAN, 1976):

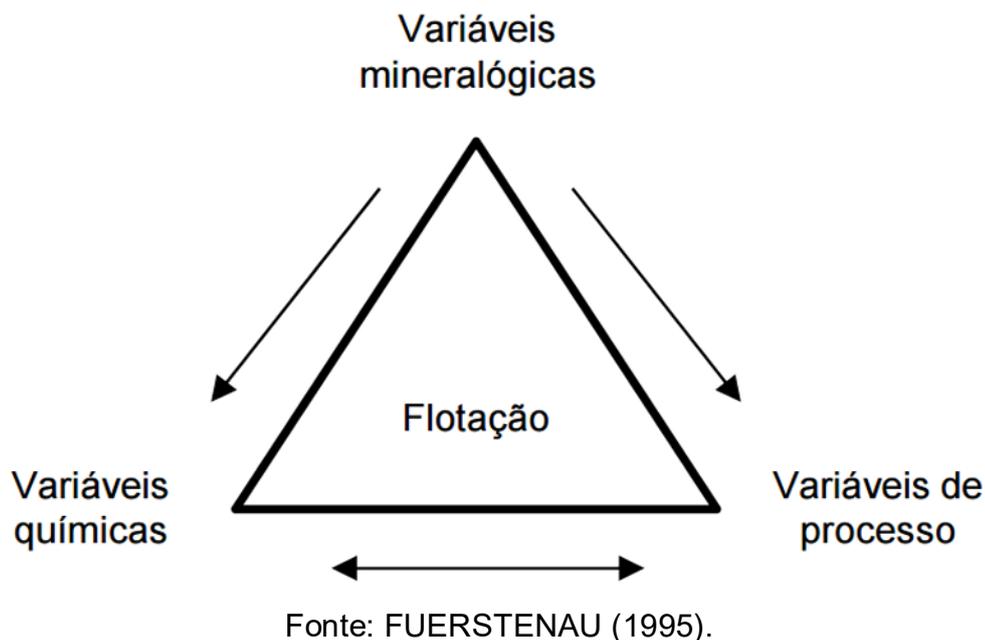
- Propriedades da superfície do mineral (incluindo características, composição química e estrutura cristalina);
- Características do coletor (como grupos funcionais, comprimento da cadeia carbônica e concentração);
- Composição do íon molecular da fase aquosa, que depende de outras propriedades relevantes da solução como temperatura, pH, força iônica, presença de várias espécies minerais dissolvidas e íons do coletor em solução.

## **2.7. Variáveis de flotação**

A flotação é um processo delicado, pois diversos fatores como a solubilidade do minério e a variedade de reagentes utilizados no processo produzem uma série de reações que podem interferir no resultado final (MARTINS, 2017).

Conforme Fuerstenau (1995), a operação de flotação engloba diversas variáveis, tanto mineralógicas, quanto químicas e de processo, e elas interagem conforme exposto na Figura 10.

Figura 10: Variáveis no processo de flotação e sua interação.



As variáveis mineralógicas abrangem a composição das fases minerais, características como porosidade, grau de liberação e forma. As variáveis de processo constituem o desenho dos equipamentos e os parâmetros operacionais. Já as variáveis químicas se dão de acordo com os reagentes que podem se apresentar continuamente alterados conforme mudanças nas variáveis de processo e mineralógicas (FUERSTENAU, 1995). Diante disso, as variáveis mais importantes envolvidas são:

- Composição mineralógica;
- Propriedades da polpa (densidade, % de sólidos);
- Taxa de alimentação da polpa;
- Potencial eletroquímico;
- Reagentes químicos e taxa de dosagem dos mesmos (espumantes, coletores, depressores, ativadores, etc.);
- Nível da polpa;
- Taxa de aeração da célula;
- Propriedades das partículas (distribuição de tamanho, grau de liberação);
- Propriedades da flotação (velocidade, tamanho da bolha, distribuição, estabilidade).

## 2.8. Óleo amazônico de Andiroba (*Carapa guianensi*)

Segundo Santos (2022), a região amazônica é rica em recursos vegetais, incluindo frutas e oleaginosas, cuja exploração comercial desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico e social das comunidades locais. Esses recursos têm sido amplamente estudados para compreender sua composição e encontrar aplicações adequadas para eles. Muitos estudos têm se concentrado na caracterização deles, analisando sua composição em ácidos graxos e outros componentes. Suas aplicações incluem desde os fins medicinais, cosméticos, culinários, até a produção do biodiesel devido ao seu potencial antioxidante.

Os ácidos graxos mais expressivos nesses óleos são o ácido oleico e o ácido linoleico, no qual, a alta concentração de ácidos graxos insaturados confere a esses óleos propriedades interessantes para o uso industrial (Santos, 2022).

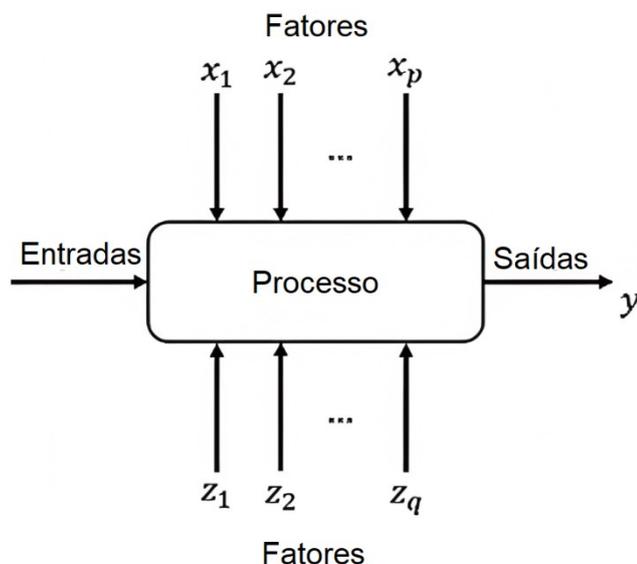
O óleo da andiroba (*Carapas Guianensis*) é extraído das sementes dessa árvore nativa das florestas úmidas da América do Sul, encontrada em toda a região amazônica. O óleo se solidifica em temperaturas abaixo de 25°C e se torna rançoso rapidamente após a extração. Ele é composto por uma fração saponificável, que é principalmente composta pelos ácidos graxos oleico (57%), palmítico (25%) e esteárico (10%) (Santos, 2022).

Este será o óleo de estudo do presente trabalho, que foi baseado em trabalhos científicos, como “Avaliação de Reagentes na Flotação Direta de Minério Fosfático, Utilizando Planejamento Fatorial Completo” (Santos, 2021) e “Minérios Fosfáticos Ígneos com Ganga Carbonática: Estudos Fundamentais” (Santos, 2022), no qual eles também foram empregados para a realização de testes.

## 2.9. Planejamento Fatorial

Montgomery (2013, p.13) define experimento como “[...] teste ou série de execuções em que mudanças propositadas são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema para que possamos observar e identificar as razões para mudanças que podem ser observadas nas respostas de saída. [...]”. Esta relação é mostrada na Figura 11.

Figura 11: Modelo genérico de um processo.



Fonte: MONTGOMERY (adaptado, 2013).

Quando esses experimentos envolvem o estudo de mais de uma variável, é indicado utilizar o planejamento fatorial (MONTGOMERY, 2013; PULIDO e SALAZAR, 2012). Dos métodos disponíveis de planejamento experimental, o mais indicado é o planejamento fatorial para duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada repetição, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (BARROS NETO *et al.*, 1996).

Para aplicar essa metodologia, é importante antes fazer uma triagem de quais serão as variáveis mais importantes do sistema para em seguida executar os experimentos e avaliar a influência delas nos resultados obtidos (MONTGOMERY, 1991; VICENTINI *et al.*, 2011).

Os experimentos fatoriais, podem ter  $2^k$ , sendo  $k$  fatores e dois níveis de ensaio, ou  $3^k$ , com  $k$  fatores e três níveis de ensaio, e assim por diante. Caso  $k$  fatores não possuam o mesmo número de níveis, o número de ensaios correspondentes serão o produto dos seus níveis (PULIDO e SALAZAR, 2012).

O método mais usado do planejamento fatorial é em dois níveis ( $2^k$ ) uma vez que é simples e eficiente. O planejamento em dois níveis será expresso pela realização de  $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$  ensaios diferentes e serão denominadas de matriz de planejamento (BARROS NETO *et al.*, 2007; COSTA, 2012).

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada na realização dos ensaios de flotação para execução da parte experimental do presente trabalho. Os testes foram desenvolvidos no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Campus Araxá, e as análises químicas da alimentação e dos produtos gerados nos ensaios de flotação foram realizadas na Universidade Federal de Minas Gerais, em Belo Horizonte.

#### **3.1. Obtenção das amostras**

Para a realização dos ensaios de flotação do presente trabalho, foi utilizado um material cedido por uma mineradora localizada em Tapira-MG. Foram recebidos o total de 50kg de minério fosfático, proveniente da alimentação da moagem da mineradora, os quais foram submetidos às etapas de preparação de amostras que serão discutidas nos tópicos seguintes.

#### **3.2. Preparação da amostra**

Devido à grande quantidade de fragmentos grosseiros presentes na amostra, optou-se por realizar primeiramente um corte granulométrico através de um peneiramento referente à malha 20# (0,837 mm). O produto passante foi submetido a um peneirador mecânico de marca PRODUTEST com voltagem 110/220V, em uma peneira de malha 65# (0,209 mm) por cerca de 5 minutos (Figura 12). Este procedimento foi executado a fim de separar as partículas da amostra que já estavam em granulometria adequada para a alimentação da flotação, uma vez que, segundo Coutinho (2016), a granulometria das partículas de apatita contidas no minério fosfático, quando liberadas, está abaixo da malha de 65# (0,209 mm).

O produto retido final foi reservado e o produto passante final seguiu para as etapas seguintes de preparação/adequação da amostra.

Figura 12: Peneira com abertura de 65# no agitador de peneiras.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Em seguida, o minério foi submetido ao processo de deslamagem para que fossem removidas as partículas finas presentes. Esta etapa foi executada pois a presença de finos é prejudicial nos testes de flotação por recobrirem a superfície dos minerais, causando *slime coating*. Devido às interações com as lamas que possuem áreas superficiais específicas maiores em comparação com as partículas de maior tamanho, resulta na redução da rigidez da espuma, na interferência na adesão entre bolhas e minerais, e na diminuição da efetividade dos reagentes utilizados (YANG, 1979).

Na Figura 13a é possível ver o processo de deslamagem do minério feito a cada 1kg de material por três minutos em triplicata. Já na Figura 13b, o material decantado após utilizar o método de sinfonação, que foi levado à estufa a 100°C por cerca de 24 horas.

Figura 13: (a) Deslamagem do passante em 65#. (b) Material após ser deslamado.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Posteriormente, para a separação das alíquotas, foram realizadas as etapas de homogeneização e quarteamento da amostra através de uma pilha alongada. Com o uso de uma trena, foi delimitado o espaço de um metro para o comprimento da pilha e demarcado com fita crepe. Para a formação da pilha, o material foi distribuído da direita para a esquerda e vice-versa, até a distribuição total do material. As duas extremidades da pilha representadas por 10% do comprimento total, foram retomadas da mesma forma ao longo dela. Assim, foi construída a pilha alongada representada na Figura 14.

Figura 14: Quarteamento por pilha alongada para a retirada das alíquotas para caracterização.



Fonte: Próprio autor, 2023.

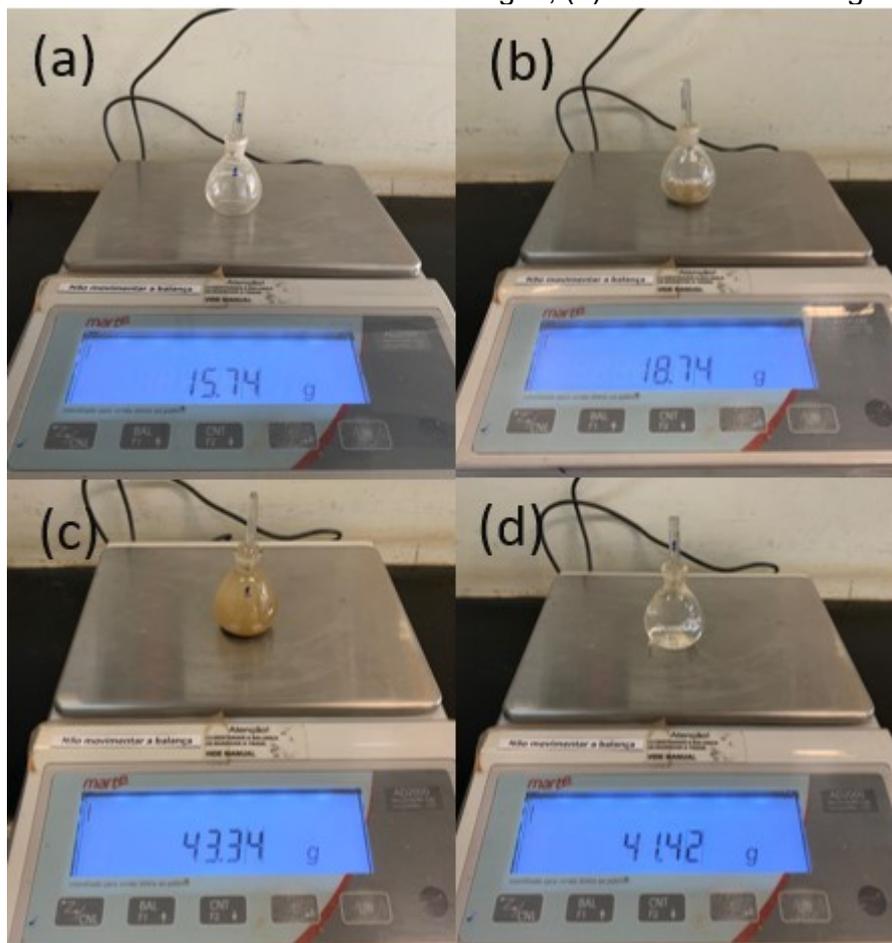
Foram coletadas desta pilha, 100g de amostra para ser analisada quimicamente, 200g para os ensaios de picnometria e 200g para a realização da análise granulométrica a úmido. O restante da amostra passou pelo mesmo procedimento do quarteamento por pilha alongada de forma a obter as alíquotas para os testes de flotação.

### 3.3. Picnometria

De forma a obter a densidade do minério, foi realizado o método da picnometria, conforme Oliveira (2017). Inicialmente, foi pesado um picnômetro de 50mL limpo e seco (Figura 15a), em seguida foi adicionada a amostra em seu interior até que cobrisse todo seu fundo, e o conjunto foi pesado (Figura 15b). Uma certa quantidade de água foi adicionada ao conjunto com bastante cuidado para se evitar a formação

de bolhas. O recipiente foi fechado de modo que o capilar da tampa se enchesse de água e o excesso de água fosse eliminado, e então o conjunto foi novamente pesado (Figura 15c). Todo o conteúdo foi eliminado do interior do picnômetro e após sua correta higienização, o mesmo foi totalmente preenchido com água e pesado novamente (Figura 15d).

Figura 15: Picnometria. (a) Picnômetro vazio, (b) Picnômetro com minério fosfático, (c) Picnômetro com minério fosfático e água, (d) Picnômetro com água.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Todas as pesagens foram realizadas em uma balança analítica da marca MARTE, modelo AD2000 e o procedimento foi realizado em quintuplicata. Para a determinação da densidade foi utilizada a equação 1.

$$ds = \frac{(A2)-(A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad (1)$$

Em que:

- ds densidade dos sólidos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
- A1 massa do picnômetro (g);
- A2 massa do picnômetro + amostra (g);
- A3 massa do picnômetro + amostra + água (g);
- A4 massa do picnômetro + água (g).

### 3.4. Análise granulométrica a úmido

A análise granulométrica da amostra foi realizada via peneiramento a úmido em um peneirador suspenso de marca CDC, como pode ser observado na Figura 16. Foi utilizada a seguinte sequência de peneiras: 48#, 65#, 100#, 150#, 200#, 270#, e 400#. Após o peneirador ser alimentado com 200g de minério, foi realizado o peneiramento a úmido, onde a lavagem foi realizada até que a água estivesse clarificada após atravessar o conjunto de peneiras.

Figura 16: Análise granulométrica a úmido no peneirador suspenso.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Posteriormente, as massas retidas em cada peneira, foram transferidas para pratos e secadas em estufa. Após a secagem, as mesmas foram pesadas, para a construção da curva granulométrica da análise realizada.

### 3.5. Preparação dos reagentes

Todas as etapas envolvidas neste tópico utilizaram metodologias de trabalhos anteriores, realizados por Santos (2017) e Carneiro (2018) desenvolvidos no CEFET/MG, Campus Araxá.

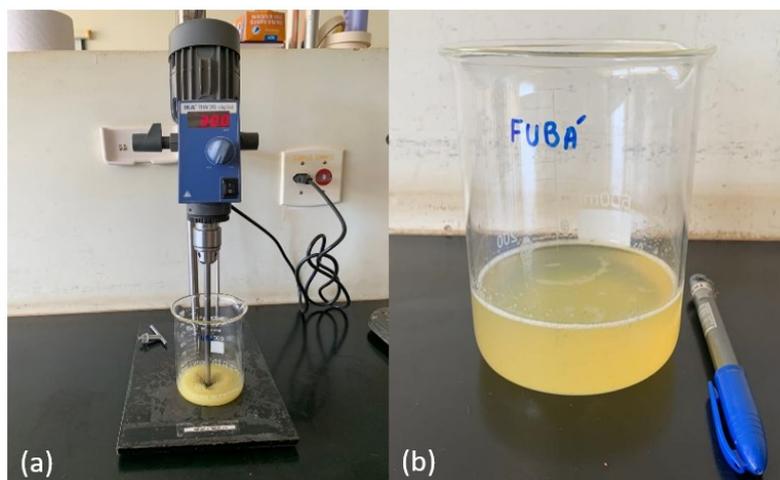
#### 3.5.1 Depressor

Para a preparação do depressor, foi feita sua gelatinização a partir do seguinte método:

- I. Pesou-se 5 g de amostra de fubá; 45 g de água; 12,5 g de NaOH e 104,16 g de água (para diluição);
- II. Misturou-se o fubá, a água e o NaOH durante 10 minutos. As amostras foram agitadas em um agitador mecânico da marca IKA, modelo RW20DS32 com rotação de 300 rpm (Figura 17a);
- III. Logo após os 10 minutos, adicionou-se a água de diluição e voltou-se a agitar por mais 10 minutos.

A Figura 17b mostra o aspecto do fubá após gelatinizado.

Figura 17: (a) Preparação do depressor no agitador mecânico, (b) Fubá gelatinizado.



Fonte: Próprio autor, 2023.

#### 3.5.2 Coletor

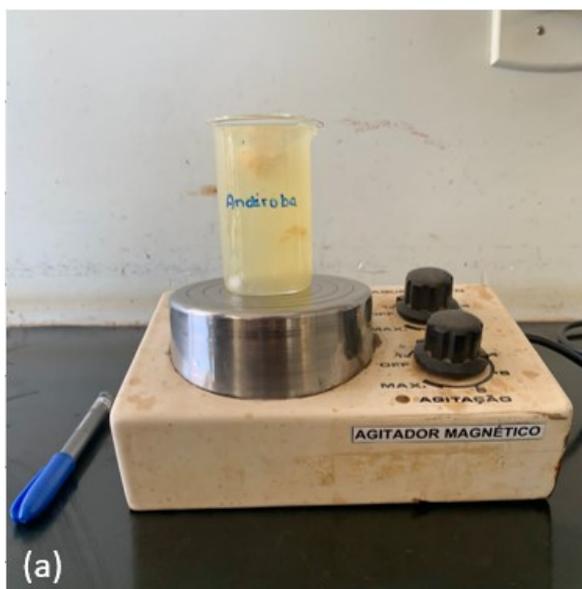
O trabalho de Santos (2021) titulado como “*Synergetic effects of fatty acids in amazon oil-based collectors for phosphate flotation*”, e o de Paiva (2019), foram utilizados para determinar a escolha do coletor, no qual o autor desenvolveu um

estudo fundamental a partir da microflotação em tubo de Hallimond. Foram utilizados os minerais apatita, calcita e dolomita, aplicando óleos amazônicos como coletores. Baseando nos resultados, foi escolhido para o presente trabalho, o coletor obtido a partir de óleo de andiroba, o qual apresentou um resultado mais satisfatório em relação aos outros.

A obtenção do coletor foi feita através da tese “Minérios Fosfáticos Ígneos com Ganga Carbonática: Estudos Fundamentais”, Santos (2022). O coletor foi sintetizado via saponificação da amostra de óleo a 75°C, usando uma reação com solução de hidróxido de sódio a 2% (p/v) em etanol anidro com refluxo por 60 minutos. O produto foi submetido a filtração, obtendo-se um sal de ácido graxo, o qual foi seco em estufa a 70°C por 24 horas, sendo armazenado para uso posterior como coletor.

A partir do coletor sólido seco obtido, foi preparada uma solução aquosa deste a 1% m/m (Figura 18).

Figura 18: Preparação do coletor no agitador magnético.



Fonte: Próprio autor, 2023.

### 3.5.3 Reguladores

De forma a regular o pH, foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH) sob a forma de solução aquosa a 10% m/m, HCl a 0,4 mol/l e o espumante flotanol a 1% m/m.

### 3.6. Planejamento fatorial

Para os testes de flotação foi utilizado o planejamento fatorial completo, onde as variáveis de estudos foram: a dosagem de coletor, dosagem de depressor e pH. Para a reprodutibilidade dos testes foi utilizada o ponto central, desta forma, foi executado um teste  $2^3$  com 4 pontos centrais totais, totalizando 12 testes de flotação. Na Tabela 2 está representado o planejamento dos testes que foram executados na ordem descrita e foram gerados.

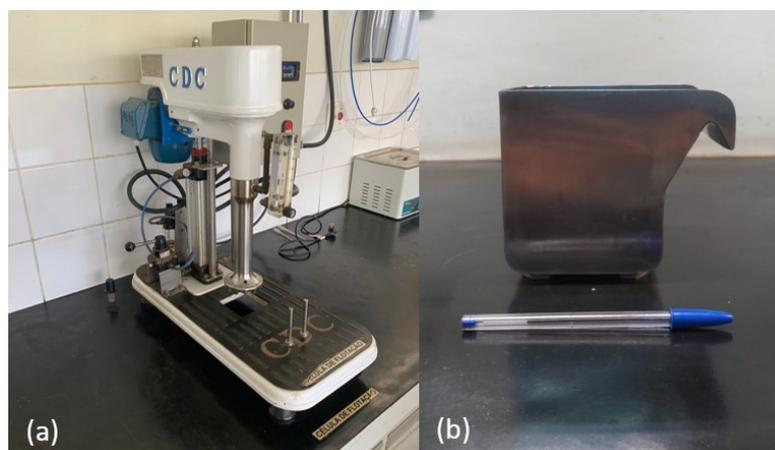
Tabela 2: Planejamento dos testes de flotação.

ORDEM DOS ENSAIOS	PONTO CENTRAL	BLOCOS	DOSAGEM COLETOR	DOSAGEM DEPRESSOR	pH
1	0	1	350	225	7,5
2	0	1	350	225	7,5
3	1	1	500	100	6,0
4	1	1	500	100	9,0
5	0	1	350	225	7,5
6	1	1	200	100	6,0
7	1	1	500	350	9,0
8	1	1	200	100	9,0
9	1	1	500	350	6,0
10	1	1	200	350	6,0
11	1	1	200	350	9,0
12	0	1	350	225	7,5

### 3.7. Ensaios de flotação

Os ensaios de flotação em escala de bancada foram realizados em uma célula de flotação de bancada C.D.C. (Figura 19a), utilizando uma cuba de 1200mL e 850 de volume útil (Figura 19b). Os ensaios foram executados na ordem do planejamento fatorial discutido anteriormente, gerada aleatoriamente.

Figura 19: (a) Célula de flotação de bancada C.D.C., (b) Cuba de 1200mL usada nos testes.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Para a execução dos testes foram utilizadas as variáveis conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis utilizadas nos ensaios de flotação.

VARIÁVEIS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO	
% de sólidos no condicionamento	50
% de sólidos na flotação	25
Massa de sólidos (g)	250
Volume de água no condicionamento (mL)	250
Volume de água de diluição (mL)	500
Tempo de condicionamento do depressor (min)	5
Tempo de condicionamento do coletor (min)	5
Volume de polpa (mL)	850

Diante das variáveis apresentadas, a cuba foi alimentada com 250g de minério e 250g de água de condicionamento a 50% de sólidos e em sequência o rotor foi ligado. Foi adicionado o depressor e o condicionou por 5 minutos. Durante este tempo o pH era constantemente monitorado através de um pHmetro e ajustado com as soluções citadas de NaOH ou HCl.

Após este tempo, adicionou-se o coletor, e o condicionou novamente por mais 5 minutos. Terminado este condicionamento, foi adicionado 500mL de água de diluição, ajustando a polpa com 25% de sólidos. Nesse momento, o ar foi ligado, o

espumante foi adicionado e a espuma gerada foi raspada por cerca de 3 minutos ou até sua exaustão, o que ocorria primeiro.

Os afundados e os flotados de cada ensaios foram separados em bandejas conforme a Figura 20 e levados para a estufa a 100°C por 24 horas.

Figura 20: (a) Amostra flotada, (b) Amostra afundada.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Após a secagem desses produtos, eles foram pesados, e retiradas amostras de concentrados para serem pulverizados no moinho de panela de marca AMEF, modelo AMP1-A (Figura 21). Em seguida as amostras pulverizadas e uma amostra da alimentação foram encaminhadas para a análise química via fluorescência de raios-X.

Figura 21: Moinho pulverizador de panela utilizado.



Fonte: Próprio autor, 2023.

As amostras analisadas em um espectrômetro de fluorescência de raios-X com dispersão por energia (EDFRX) ARL™ QUANT'X - Thermo Scientific™, tubo de ródio (50 W). A análise das amostras foi realizada em vácuo. A aquisição dos dados foi realizada pelo do software WINTRACE e os dados foram tratados no software Uniquant, baseado em parâmetros fundamentais.

Figura 22: ARL™ QUANT'X - Thermo Scientific™.



Fonte: Próprio autor, 2023.

### 3.8. Análise dos resultados

Para que fosse possível analisar os resultados obtidos através dos testes de flotação, foram utilizadas as fórmulas de recuperação mássica, metalúrgica, balanço metalúrgico e razão de enriquecimento.

Utilizando-se as massas de concentrado e alimentação de cada teste, a recuperação mássica foi calculada através da equação 2:

$$R_{m\acute{a}s} = \frac{C}{A} * 100 \quad (2)$$

Onde:

R<sub>más</sub> recuperação mássica (%);

C massa do concentrado (g);

A massa da alimentação (g).

A partir dos dados de massa do concentrado e da alimentação e os seus respectivos teores, foi possível calcular a recuperação metalúrgica de cada teste com a equação 3.

$$R_{met} = \frac{Cc}{Aa} * 100 \quad (3)$$

Onde:

- R<sub>met</sub> recuperação metalúrgica (%);
- c teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no concentrado (%);
- a teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na alimentação (%).

A fim de estimar os teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dos rejeitos obtidos em cada teste, usou-se a equação 4 de balanço metalúrgico.

$$Aa = Cc + Rr \quad (4)$$

Onde:

- A massa da alimentação (g);
- a teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da alimentação (%);
- C massa do concentrado (g);
- c teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do concentrado (%);
- R massa do rejeito (g);
- r teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do rejeito (%).

Para se determinar a razão de enriquecimento dos testes de flotação realizados, foi usada a equação 5.

$$Re = \frac{c}{a} \quad (5)$$

Onde:

- Re razão de enriquecimento;
- a teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da alimentação (%);
- c teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do concentrado (%).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão abordados neste tópico, os resultados alcançados no presente estudo, que engloba a picnometria, caracterização granulométrica e análise química, bem como os testes de flotação e a análise estatística realizada.

### 4.1. Picnometria

Assim como apresentado no tópico 3.3 *Picnometria*, a densidade do minério estudado foi determinada por meio da técnica de picnometria. Os ensaios foram realizados em quintuplicata e as massas obtidas em cada parâmetro, assim como as densidades de cada alíquota, a densidade média e o desvio padrão das mesmas, estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de picnometria.

TESTE	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )
1	15,74	18,74	43,34	41,42	2,78
2	15,7	18,88	43,08	41,03	2,81
3	15,92	18,3	42,14	40,62	2,77
4	15,49	17,29	42,28	41,06	3,10
5	15,73	18,64	43,00	41,07	2,97
Densidade Média					2,89
Desvio Padrão					0,13

A média de densidade obtida nos testes foi de 2,89 g/cm<sup>3</sup>, com um desvio padrão de 0,13 g/cm<sup>3</sup>, o que sugere uma alta consistência e reprodutibilidade nos resultados dos testes.

### 4.2. Análise granulométrica a úmido

Por meio do processo de homogeneização e quarteamento, descrito na seção 3.4 *Análise granulométrica a úmido*, obteve-se aproximadamente 200 g de amostra para realizar o peneiramento a úmido. Com as massas retidas em cada peneira, foi possível construir a Tabela 5, que apresenta os resultados da análise granulométrica.

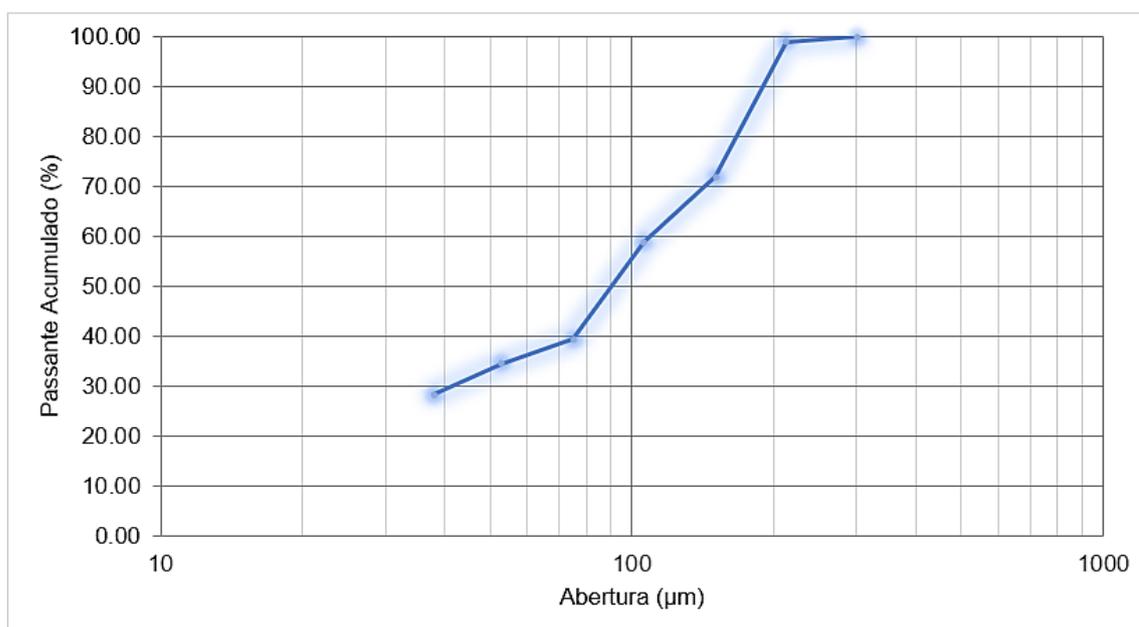
Tabela 5: Resultados da análise granulométrica a úmido.

ABERTURA (#)	ABERTURA ( $\mu\text{m}$ )	MASSA RETIDA (g)	MASSA RETIDA SIMPLES (%)	MASSA RETIDA ACUMULADA (%)	PASSANTE ACUMULADO (%)
48		0,00	0,00	0,00	100,00
65	212	2,07	1,04	1,04	98,97
100	150	54,11	27,06	28,09	71,91
150	106	25,82	12,91	41,00	59,00
200	75	39,11	19,56	60,56	39,45
270	53	9,70	4,85	65,41	34,60
400	38	12,70	6,35	71,76	28,25
-400	-38	56,49	28,25	100,00	0,00
Total		200	71,76	-	-

De acordo com a tabela, nota-se que 28,25% da amostra ainda permanece abaixo de 400#, o que indica que, mesmo realizando a etapa de deslamagem, ainda permanecia uma parcela significativa de finos na amostra. Vale ressaltar que as peneiras de 100# (0,15mm) e a de 200# (0,075mm) foram as que apresentaram os maiores valores de massa retida.

A partir dos dados obtidos na Tabela 5, construiu-se a curva granulométrica, apresentada na Figura 23.

Figura 23: Curva granulométrica da amostra.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Analisando a curva apresentada no gráfico, pode-se deduzir que 80% das partículas (d80) são menores que cerca de 170  $\mu\text{m}$ , assim, pode-se concluir que a amostra estava apropriada para a realização dos testes de flotação, uma vez que a apatita normalmente se encontra liberada com tamanho inferior a 212  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Caracterização química da alimentação

A análise química da amostra foi feita para a determinação do teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  presente, sendo realizada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), localizada em Belo Horizonte (MG). Através dela, como pode ser observada na Tabela 6, encontrou-se 9,4% de teor de apatita ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) na amostra da alimentação. Quando comparada a outros minérios fosfáticos, a amostra fornecida pela empresa de Tapira é sutilmente mais rica que as utilizadas nos estudos de Carneiro (2018) e Santos (2022), cujos teores eram de 6,08% e 6,55% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , respectivamente.

Tabela 6: Análise química da amostra de minério fosfático.

	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Cl}$	$\text{ZrO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{SrO}$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{BaO}$
<b>Teor (%)</b>	25,63	20,56	18,20	16,40	9,40	4,80	2,15	0,84	0,49	0,41	0,38	0,37	0,17	0,13

### 4.4 Ensaios de flotação

Os testes de flotação foram realizados com alimentação de 250 g de minério de acordo com o planejamento apresentado na metodologia, tópico 3.7 *Ensaios de flotação*. A Tabela 7 apresenta as massas de sólidos da alimentação, do rejeito e do concentrado e as perdas de massa ocorridas em cada teste.

Tabela 7: Massa dos produtos e perdas de massa por ensaio.

Teste	Alimentação (g)	Concentrado (g)	Rejeito (g)	Perda (g)	Perda (%)
1	250,02	9,41	232,02	8,59	3,44
2	250,09	12,35	227,90	9,84	3,93
3	250,06	13,18	230,11	6,77	2,71
4	250,13	13,90	228,60	7,63	3,05
5	250,04	6,44	236,22	7,38	2,95
6	250,13	7,41	235,20	7,52	3,01
7	250,10	16,20	224,50	9,40	3,76
8	250,00	14,31	228,42	7,27	2,91
9	250,04	23,24	221,40	5,40	2,16
10	250,07	16,34	227,55	6,18	2,47
11	250,04	10,85	231,18	8,01	3,20
12	250,08	12,84	228,79	8,45	3,38

Com base nas massas obtidas e nos resultados das análises químicas dos produtos da flotação, foi possível determinar as recuperações mássicas, as recuperações metalúrgicas e as razões de enriquecimento. Esses cálculos foram realizados utilizando as equações 2, 3 e 5, conforme apresentado na Tabela 8.

Devido às recuperações mássicas baixas obtidas em cada teste, foi decidido enviar apenas as amostras de concentrado para análise química. Portanto, para estimar os teores de  $P_2O_5$  nas amostras de concentrado, utilizou-se a equação 4.

Tabela 8: Resultados de recuperação mássica, metalúrgica e razão de enriquecimento.

Teste	Dosagem de Coletor (g/t)	Dosagem de Depressor (g/t)	pH	Amostra	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Rec. Mássica (%)	Rec. Metalurg. (%)	Razão de Enriquecimento
1	350	225	7,5	C1	8,37	3,76	2,96	0,89
				R1	9,79			
2	350	225	7,5	C2	6,78	4,94	3,15	0,72
				R2	9,95			
3	500	100	6,0	C3	6,11	5,27	3,03	0,65
				R3	9,86			
4	500	100	9,0	C4	6,54	5,56	3,42	0,70
				R4	9,89			
5	350	225	7,5	C5	8,18	2,58	1,98	0,87
				R5	9,73			
6	200	100	6,0	C6	5,55	2,96	1,55	0,59
				R6	9,82			
7	500	350	9,0	C7	6,94	6,48	4,23	0,74
				R7	9,97			
8	200	100	9,0	C8	6,49	5,72	3,49	0,69
				R8	9,88			
9	500	350	6,0	C9	7,77	9,29	6,79	0,83
				R9	9,80			
10	200	350	6,0	C10	6,15	6,53	3,78	0,65
				R10	9,89			
11	200	350	9,0	C11	6,08	4,34	2,48	0,65
				R11	9,88			
12	350	225	7,5	C12	6,82	5,13	3,29	0,73
				R12	9,89			

De forma geral, mesmo com o uso do espumante, foi observado que foram geradas bolhas pequenas e pouco mineralizadas. Essa questão pode estar ligada a forma de saponificação do coletor (óleo andiroba) e também pH da flotação, uma vez que ele pode ter afetado a ação espumante do reagente e provocando maior coalescência das bolhas. Essas características podem ser observadas na Figura 24.

Figura 24: Formação de bolhas em um dos ensaios de flotação realizado.



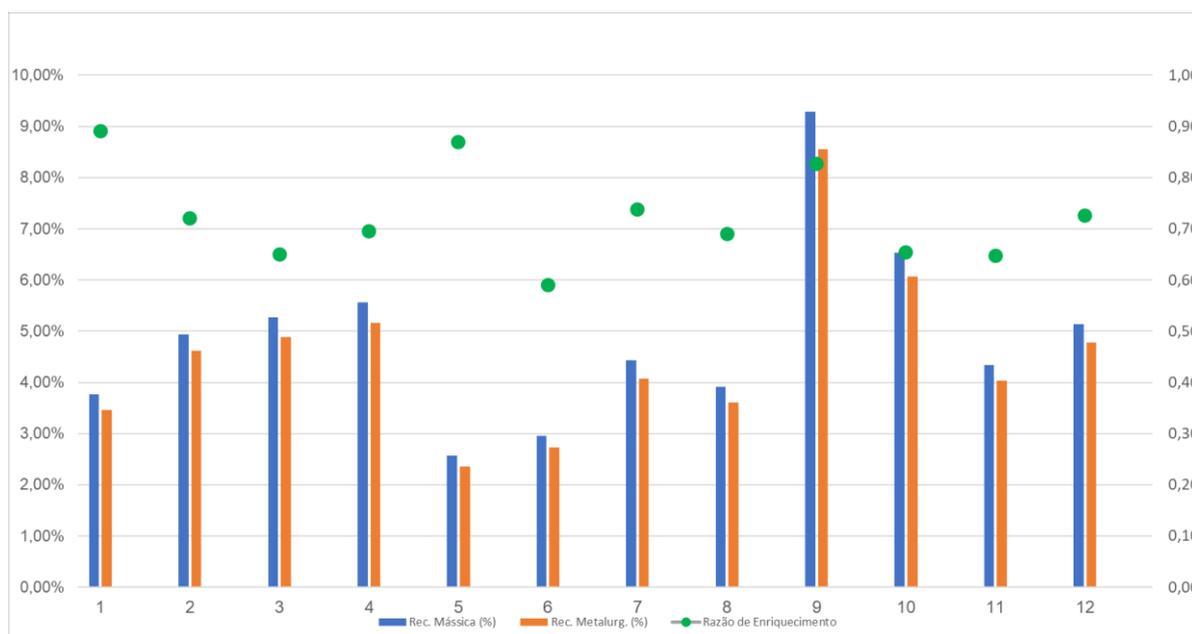
Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao examinar a Tabela 8, é possível observar e analisar os dados apresentados. Nota-se que o Teste 1 foi o que produziu um concentrado com maior teor de  $P_2O_5$ , igual a 8,37%, seguido pelo Teste 5 com 8,18% de  $P_2O_5$ . Como consequência, a razão de enriquecimento seguiu a mesma ordem, os Teste 1, 5 geraram, 0,89 e 0,87, respectivamente. Nestes dois testes foram utilizados os mesmos parâmetros, para dosagem de coletor e depressor e pH.

Quanto à recuperação mássica, os Testes 9 e 10 ficaram em primeiro e segundo lugar, respectivamente, com 9,29% e 6,53%, no qual foi utilizado a mesma dosagem de depressor e pH. Em relação à recuperação metalúrgica, o Teste 9 teve uma recuperação metalúrgica de 6,79%, enquanto o Teste 10, apresentou 3,78%. No que se refere ao pior resultado, o teste 6 se encaixou nesta categoria, gerando apenas 1,55%, no qual foi o teste executado com as menores dosagens de coletor e depressor.

Em resumo, estas informações discutidas podem ser melhor visualizadas na Figura 25.

Figura 25: Comparação dos dados obtidos após os ensaios de flotação.



Na Tabela 9 estão organizados os resultados das análises químicas de cada concentrado para os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaO}$ .

Tabela 9: Resultados das análises químicas dos concentrados.

Amostra	P2O5	Fe2O3	CaO	MgO	SiO2	TiO2	Al2O3	K2O	Cl	MnO	SrO	ZrO2	BaO	Nb2O5
C1	8,370	20,710	20,430	16,490	25,190	3,300	2,230	0,920	0,650	0,481	0,384	0,363	0,235	0,155
C2	6,780	20,920	17,270	17,970	27,550	3,460	2,760	0,994	0,649	0,481	0,350	0,356	0,213	0,153
C3	6,110	20,740	19,160	17,650	26,730	3,110	2,650	0,972	1,130	0,484	0,335	0,000	0,216	0,154
C4	6,540	20,820	16,810	18,350	28,120	3,520	2,600	1,000	0,493	0,473	0,337	0,367	0,209	0,156
C5	8,180	21,200	20,810	16,200	24,860	3,110	2,350	0,925	0,600	0,511	0,409	0,336	0,253	0,150
C6	5,550	23,170	18,390	16,700	25,580	3,120	2,490	0,980	1,540	0,560	0,000	0,355	0,247	0,166
C7	6,940	21,440	17,110	17,460	27,530	3,550	2,670	0,993	0,580	0,525	0,314	0,403	0,208	0,168
C8	6,490	21,180	15,160	19,080	29,000	3,440	2,670	0,981	0,465	0,495	0,264	0,356	0,160	0,152
C9	7,770	17,460	28,180	15,340	22,620	0,000	2,000	0,811	1,010	0,426	0,526	0,313	0,210	0,137
C10	6,150	0,000	23,140	16,180	24,390	2,760	2,360	0,933	1,440	0,505	0,416	0,323	0,239	0,146
C11	6,080	22,070	16,160	18,260	27,970	3,220	2,790	0,999	0,661	0,523	0,324	0,000	0,196	0,158
C12	6,820	20,470	20,790	17,000	25,810	3,240	2,510	0,942	0,720	0,493	0,393	0,345	0,216	0,000

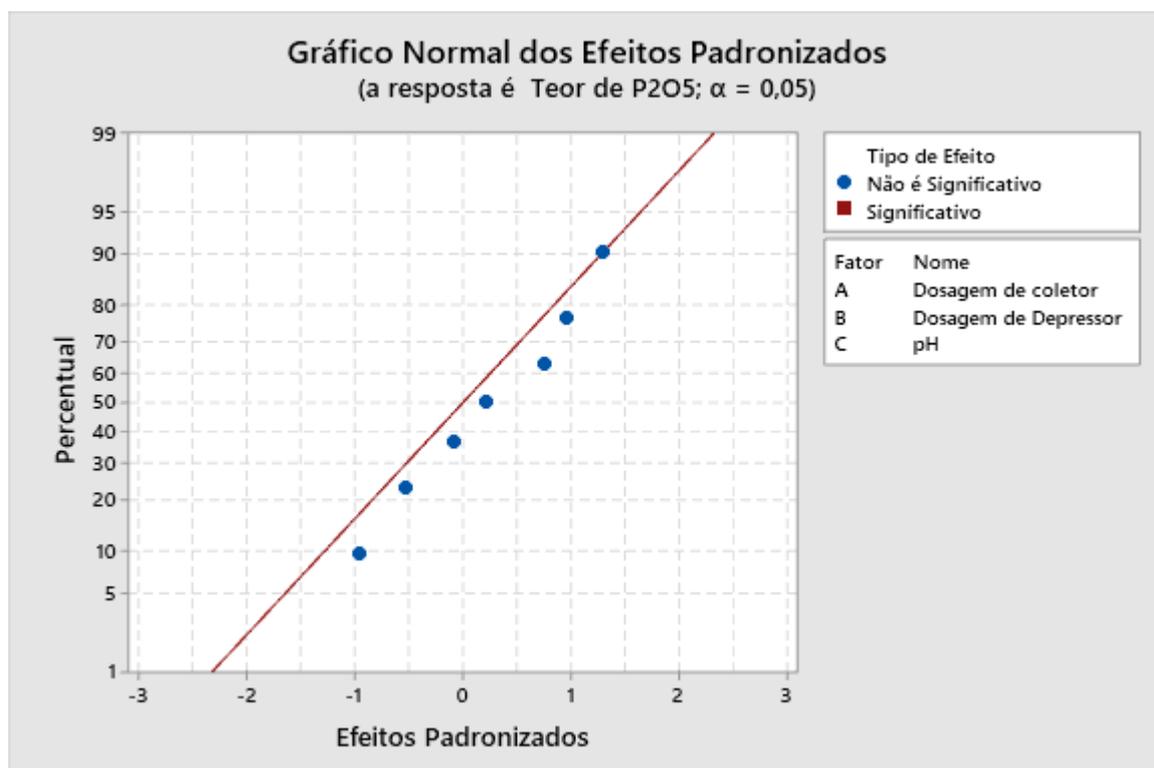
  

Amostra	Fe2O3/P2O5	CaO/P2O5	MgO/P2O5	SiO2/P2O5	TiO2/P2O5	Al2O3/P2O5	K2O/P2O5	Cl/P2O5	MnO/P2O5	SrO/P2O5	ZrO2/P2O5	BaO/P2O5	Nb2O5/P2O5
C1	2,474	2,441	1,970	3,010	0,394	0,266	0,110	0,078	0,057	0,046	0,043	0,028	0,019
C2	3,086	2,547	2,650	4,063	0,510	0,407	0,147	0,096	0,071	0,052	0,053	0,031	0,023
C3	3,394	3,136	2,889	4,375	0,509	0,434	0,159	0,185	0,079	0,055	0,000	0,035	0,025
C4	3,183	2,570	2,806	4,300	0,538	0,398	0,153	0,075	0,072	0,052	0,056	0,032	0,024
C5	2,592	2,544	1,980	3,039	0,380	0,287	0,113	0,073	0,062	0,050	0,041	0,031	0,018
C6	4,175	3,314	3,009	4,609	0,562	0,449	0,177	0,277	0,101	0,000	0,064	0,045	0,030
C7	3,089	2,465	2,516	3,967	0,512	0,385	0,143	0,084	0,076	0,045	0,058	0,030	0,024
C8	3,263	2,336	2,940	4,468	0,530	0,411	0,151	0,072	0,076	0,041	0,055	0,025	0,023
C9	2,247	3,627	1,974	2,911	0,000	0,257	0,104	0,130	0,055	0,068	0,040	0,027	0,018
C10	0,000	3,763	2,631	3,966	0,449	0,384	0,152	0,234	0,082	0,068	0,053	0,039	0,024
C11	3,630	2,658	3,003	4,600	0,530	0,459	0,164	0,109	0,086	0,053	0,000	0,032	0,026
C12	3,001	3,048	2,493	3,784	0,475	0,368	0,138	0,106	0,072	0,058	0,051	0,032	0,000

A partir dos dados da Tabela 9, é possível observar que  $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$  em todos os testes ficou bastante acima do valor estipulado por Oliveira (2007) como ideal (menor ou igual a 1,6). Assim como a relação  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$  que deveria ser abaixo de 0,095. Com relação aos carbonatos, foi obtido maior seletividade no Teste 1.

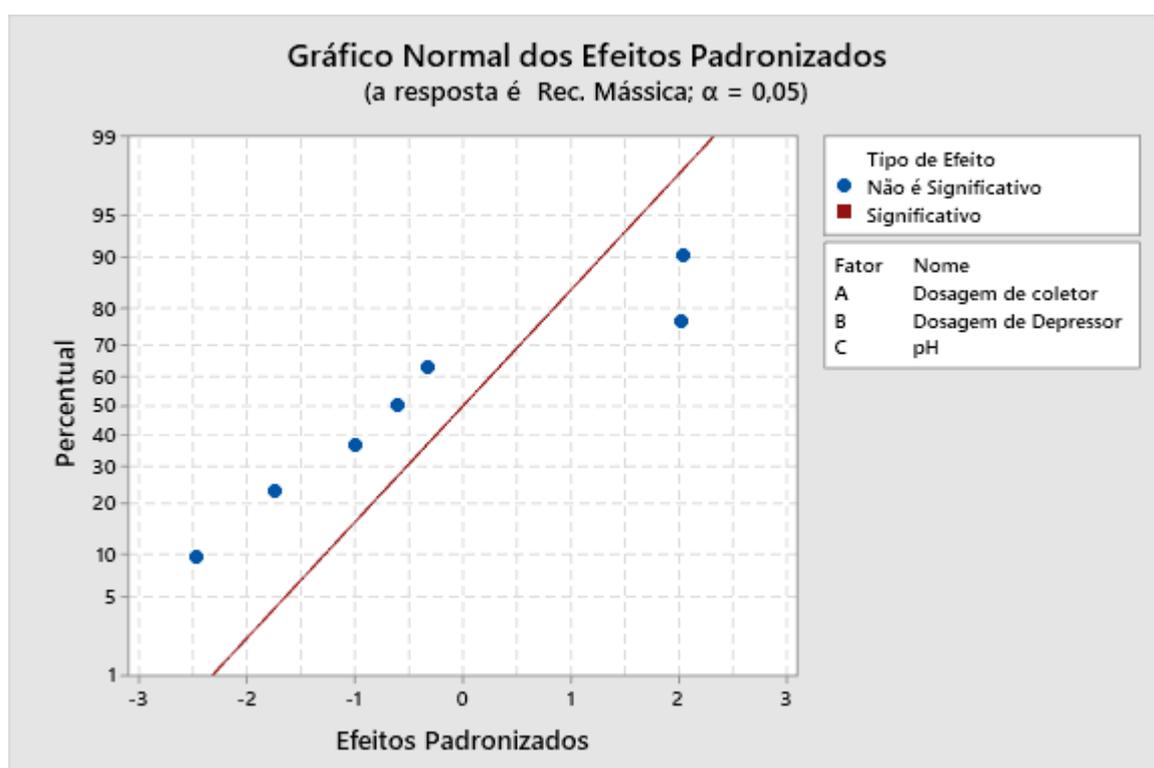
As análises realizadas podem ser validadas através da análise estatística do planejamento fatorial, que permite verificar a significância das variáveis de entrada em relação ao teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  sobre as variáveis de saída que foram analisadas, conforme são apresentados nas Figuras 26 e 27.

Figura 26: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre o teor de  $P_2O_5$ .



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 27: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação mássica.

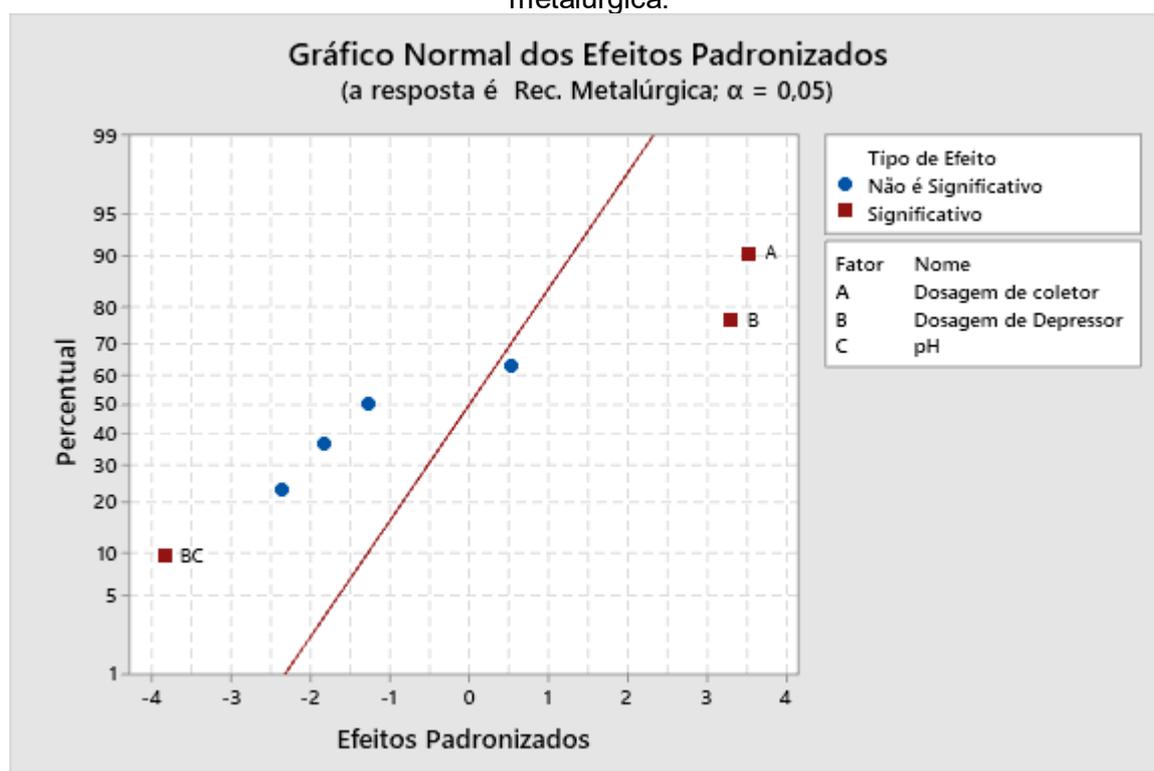


Fonte: Próprio autor, 2023.

De acordo com a Figura 26 e 27, mostra que nenhuma das variáveis de entrada apresentaram significância sobre o teor de  $P_2O_5$  e recuperação mássica. Isso pode ser constatado pelos menores valores em massa obtidos dos concentrados das operações de flotação realizadas, apresentadas na Tabela 7 e 8, onde são apresentadas as recuperações mássicas obtidas. No caso do teor de  $P_2O_5$  o mesmo pode ser constatado pelos valores próximos obtidos entre os ensaios ou pela possibilidade de ter ocorrido flotação reversa, pois os teores de rejeito são um pouco maiores em relação aos teores no concentrado. Ou uma outra possibilidade a ser investigada é que a seletividade do coletor utilizado tenha sido sobre os minerais de ganga, ao invés do mineral-minério em estudo, apatita.

A mesma análise pode ser realizada para a recuperação metalúrgica, apresentada na Figura 28.

Figura 28: Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação metalúrgica.

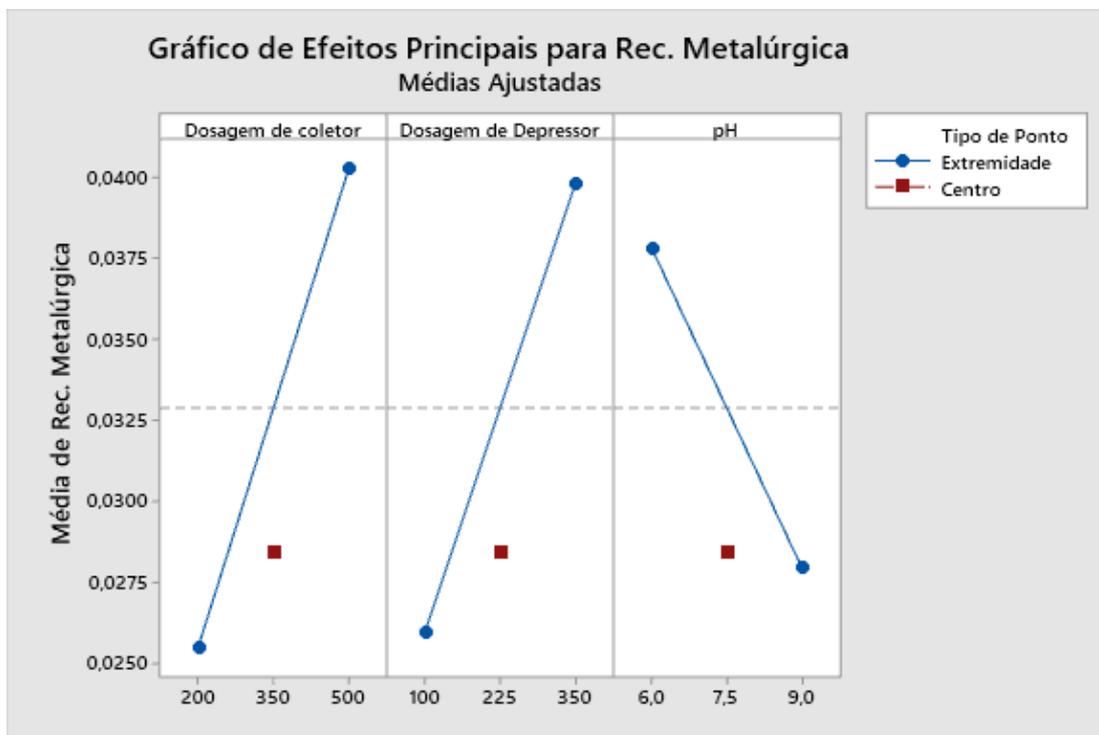


Fonte: Próprio autor, 2023.

Para a recuperação metalúrgica a dosagem de coletor e depressor apresentaram significância, com efeitos positivos, enquanto a interação entre a dosagem de depressor e pH também apresentaram significância sobre a recuperação metalúrgica, de forma antagônica. Sobre esse comportamento das variáveis de

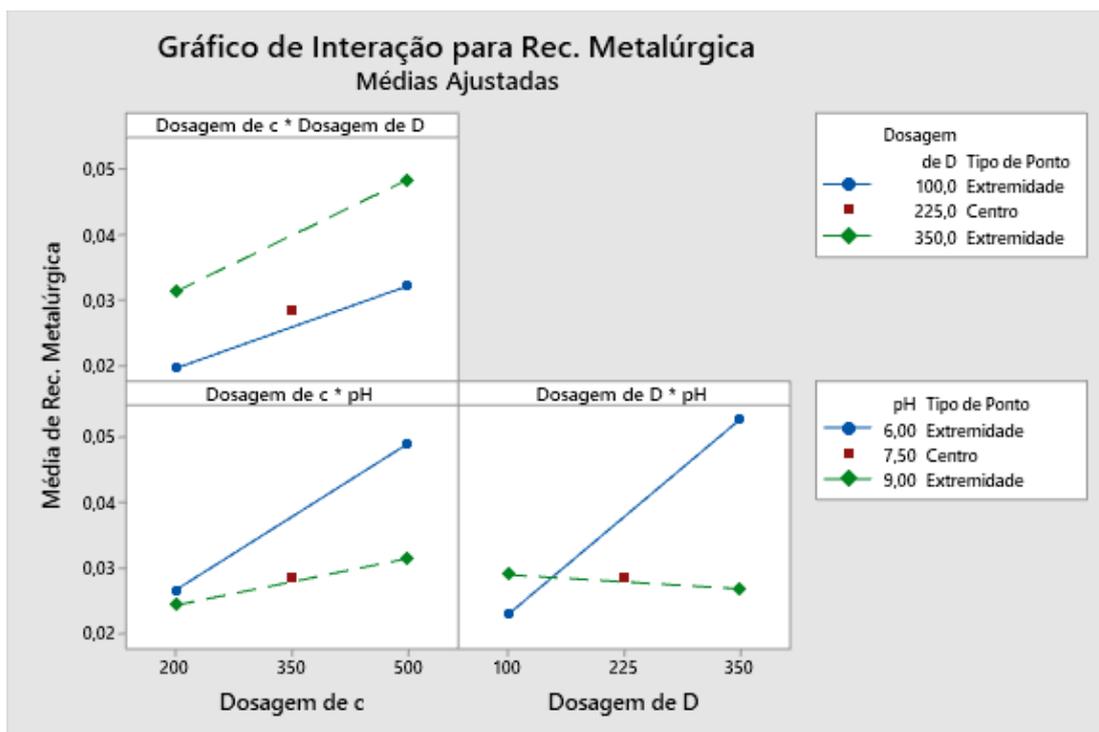
entrada, as Figuras 29 e 30 apresentam os efeitos principais e de interação das mesmas.

Figura 29: Efeitos principais para Recuperação Metalúrgica.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 30: Efeitos de interação para Recuperação Metalúrgica.



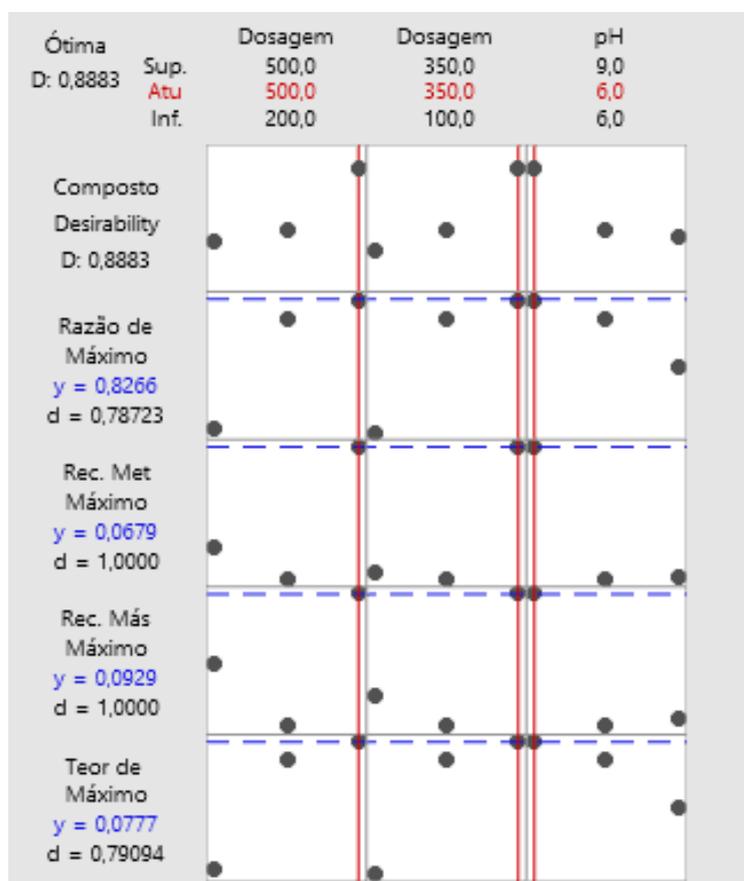
Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 29, observa-se ao aumentar a dosagem de coletor do nível -1 para +1, ocorre um aumento na recuperação metalúrgica. O mesmo pode ser observado para a dosagem de depressor. Porém ao aumentar o pH o nível -1 para +1, há uma diminuição na recuperação metalúrgica.

Na Figura 30, dentre as interações, a que apresenta mais efeito sobre a recuperação metalúrgica (podendo ser observado até mesmo pela inclinação entre as retas e a falta de paralelismo entre as mesmas) é a dosagem de depressor e o pH, mostrando que ao aumentar ambos os valores, a recuperação diminui seu valor.

O gráfico seguinte presente na Figura 31, tem a maximização de todas as respostas, de todas as variáveis analisadas para obtenção das melhores condições dentre as estudadas. Assim, a condição ótima de acordo com a análise estatística realizada foi para a dosagem de coletor igual a 500 (g/t) e a dosagem de depressor igual a 350 (g/t) com pH 6, corroborando com os resultados dos ensaios realizados e com as análises estatísticas anteriormente mencionadas.

Figura 31: Cenários obtidos para otimização das respostas.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Com todos os resultados apresentados, este trabalho com as tentativas de transferência de um estudo fundamental, realizado por Santos (2022), onde o autor começou a introduzir a utilização do óleo de andiroba, além de outras espécies amazônicas em estudo de microflotação com minerais puros de apatita, calcita e dolomita. Posteriormente esse trabalho foi continuado por Paiva (2019) e Santos (2021) na tentativa de realizar flotações de bancada com minério fosfático de ganga carbonatada. Todas essas iniciativas são importantes na busca de reagentes alternativos e de baixo custo que possam ser aplicados no beneficiamento de minérios complexo, como é o caso presente neste trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, dos ensaios, análises químicas e estatísticas, conclui-se que o objetivo do trabalho de testar diferentes dosagens dos reagentes foi atingida. Entretanto, como já era esperado, os resultados obtidos no estudo não foram altamente significativos devido à complexidade do minério utilizado. Foi possível observar e confirmar a complexidade apresentada pelo minério, na busca da seletividade entre dos reagentes analisados.

Com os ensaios de caracterização inicial, obteve-se uma densidade do minério de 2,89 g/cm<sup>3</sup>. Enquanto isso a análise granulométrica mostrou que cerca de 90% da amostra apresentava-se abaixo de 212 µm.

Em relação aos ensaios de flotação, de forma geral, a ação espumante do coletor foi baixa, onde as bolhas foram pequenas e pouco mineralizadas.

A análise estatística mostrou que a dosagem de depressor e coletor em efeitos principais apresentaram significância, com um efeito positivo sobre a recuperação metalúrgica. Contudo a interação entre a dosagem de depressor com pH apresentou um efeito antagônico sobre a mesma resposta. Para o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e a recuperação mássica, nenhuma das variáveis foram significativas, corroborando com as menores massas de concentrado obtidas em relação ao concentrado. Nas melhores condições estudadas, foi observado que a maior dosagem de coletor e depressor e pH 6, eram as condições que apresentaram maiores valores nas três variáveis de saída analisados.

Este trabalho, com suas análises químicas e estatísticas executadas, mostrou que o óleo de andiroba pode ser um possível reagente na flotação reversa de minério fosfático ou com a possibilidade de atuar na coleta de minerais de ganga carbonatados, devendo cada uma das possibilidades ser mais investigadas em estudos posteriores. De qualquer forma, o reagente se mostra promissor, e ainda mais atrativo por ser um resíduo industrial e de baixo custo corroborando com iniciativas científicas na substituição de reagentes em processos por reagentes mais sustentáveis.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. **Brasil tem apenas 22 plantas industriais de fertilizantes**. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/brasil-possui-apenas-22-plantas-industriaisde-fertilizantes-aponta-sinprifert/>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- ANDRADE, J. E. P.; KOO PAN, S. S.; DANTAS, C. A. D.; MELO, K. C. A. **Fertilizantes**. 1.ed. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 1995. 94-109 p.
- BARROS, L. A. F. **Flotação de Minérios Fosfáticos**. In: CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: A Flotação no Brasil. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. v.4, Cap. 5, p. 116-157.
- BEZERRA, M. et al. **Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira**. Disponível em: [http://www.sbpnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pibicbalcao/trabalhos/MATEUS\\_ARAUJO\\_BEZERRA.pdf](http://www.sbpnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pibicbalcao/trabalhos/MATEUS_ARAUJO_BEZERRA.pdf). Acesso em: 22 abr. 2022.
- BRANDÃO, P. R. G., CAIRES, L. G., QUEIROZ, D. S. B. **Vegetable lipid oil-based collectors in the flotation of apatite ores**. *Minerals Eng.*, v. 7, n. 7. 1994. 917-925 p.
- BROD J. A.; RIBEIRO C. C.; GASPAR J. C.; JUNQUEIRA-BROD T. C.; RIFFEL B.F.; SILVA J. F.; CHABAN N.; A. J. D. FERRARI. Excursão 1: **Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalino - Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba**. In: Congresso brasileiro de geologia, Araxá, 2004. 42 p.
- CARNEIRO, A. A. **Avaliação de diferentes tipos de amido na flotação aniônica direta de minério fosfático sílico-carbonatado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Araxá, 2018. 63 p.
- COUTINHO, N. A. F. S. **Otimização do Processo de Flotação do Minério Fosfático Sílicocarbonatado de Araxá-MG**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Ed(s)). **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 465-513 p.
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2006, n. 24. 97-138 p.
- DIAS, V.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. [s.l: s.n.]. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2657/1/BS%2024%20Fertilizantes\\_Uma%20Vis%c3%a3o%20Global%20Sint%c3%a9tica\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2657/1/BS%2024%20Fertilizantes_Uma%20Vis%c3%a3o%20Global%20Sint%c3%a9tica_P.pdf). Acesso em: 10 abr. 2022.

DOW. Flotation Fundamentals: Key to Effective, Economical Modern Mining Practice. The Dow Chemical Company, Michigan, 1981 apud CHAVES, A. P.; FILHO, L. de S. L.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

FUERSTENAU, D. W. “Where are we in flotation chemistry after 70 years of research”. v.3: **Flotation Operating Practices and Fundamentals**. XIX International Minerals Processing Congress. Littleton, Colorado, Estados Unidos, 1995. 3-18 p.

GUIMARÃES, R. C.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. (2005). **Reagents in igneous phosphate ores flotation. Minerals Engineering 18:199-204. Minerals of an igneous phosphate ore. Minerals Engineering**. v. 21. 2008. 994-999 p.

LIU, Q.; ZHANG, Y.; LASKOWSKI, J. S. **The Adsorption of Polysaccharides onto Mineral Surfaces: an Acid/Base Interaction**. Aline P. L. Nunes e Antônio E. C. Peres International Journal of Mineral Processing, vol. 60, p. 229-245, 2000.

MONTGOMERY, D. C. **Design And Analysis Of Experiments**. 8a edition. Arizona: Wiley, 2013.

MORAES, L. C.; SEER, H. J. **Terras raras – Recursos Minerais de Minas Gerais**. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substanciasminerais/terras-raras/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 471-550 p.

Oliveira, M. S. 2007. **Minério Fosfático Sílico-Carbonatado: Estudo Fundamental**. Tese de Doutorado. PPGEM/UFMG. Belo Horizonte, MG.

OLIVEIRA, M. S.; PERES, A. E. C. **Flotabilidade da apatita e minerais de ganga provenientes de minério sílico-carbonatado com oleato de sódio**. Ouro Preto: Revista Escola de Minas, 2010. v. 63, n. 3.I. 551-557 p.

PAIVA, P. R. P. de. **Propriedades de superfície de apatita proveniente de rochas de filiação carbonatítica e sua concentração por flotação**. Tese (Doutorado em Geologia). Brasília: Universidade de Brasília, 2011. 160 p.

PULIDO, H. G.; SALAZAR, R. de La V. **Análisis y Diseño de Experimentos**. 3º ed. México: McGraw Hill, 2012.

RIGGS SR & BURNETT WC. 1990. Continental margin environments and mineral resources (COMEMIR). **Plain of action. A research project of the Intergovernmental Oceanographic Commission - United Nations Ocean Affairs and Law of the Sea Branch. Ocean Science in Relation to Non-Living Resources (OSNLR)**. 8 p.

SANTANA, R. C. **Análise da Influência do Tamanho da Partícula na Flotação da Apatita em Coluna**. Dissertação (Mestrado) - Área de Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química da UFU, 2007. 166 p.

SANTOS, A. M. A. **Avaliação de reagentes na flotação direta de minério fosfático, utilizando planejamento fatorial completo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Araxá, 2021. 53 p.

SANTOS, K. F. **Flotação de minério fosfático sílico-carbonatado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017.

SANTOS, L. H. **Minérios fosfáticos ígneos com ganga carbonática: estudos fundamentais**. UFMG. 2022.

SANTOS, M. A. **Estudo da Influência de Íons Contaminantes na Flotação de Apatita em Coluna**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química da UFU, 2010. 149p. (Dissertação, Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SANTOS, R. L. C, SOBRAL, L.G. S, ARAÚJO, R. V. V. Equipe Técnica Fosfertil/CMT. **Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfertil**. ENTMME, CETEM, 2002. Disponível em: [www.cetem.gov](http://www.cetem.gov). Acesso: 26 de jun. 2022.

SÉRGIO, PAULO. **“O Brasil tem condições de ser autossuficiente na produção de fertilizantes?”**. OCPNEWS. Disponível em: <https://ocp.news/economia/o-brasil-temcondicoes-de-ser-autossuficiente-na-producaodefertilizantes#:~:text=Com%20investimentos%20pesados%20dentro%20de,Fonte%3A%20USP>. Acesso em: 23 maio, 2022.

SERRANO, LUIZ ROBERTO. **O Brasil tem capacidade de ser autossuficiente na produção de fertilizantes?** Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/o-brasil-tem-capacidade-de-ser-autossuficiente-na-producao-de-fertilizantes/>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SOMASUNDARAN, P. Unpublished Data apud HANNA, H. S.; SOMASUNDARAN, P. **Flotation of Salt-Type Minerals**. Flotation, A. M. Gaudin Memorial volume, AIME, New York, p.197-272, 1976.

SIS, H.; CHANDER, S. **Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review**. Minerals Engineering, 2003. 577-585 p.

STIFTUNG, H. B. **Atlas do Agronegócio**. Rio de Janeiro: Office. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/atlas-do-agronegocio>. Acesso em: 20 jun. 2022.

UFRGS, 2021. **APATITA  $-(Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl))$** . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/minmicro/Apatita.pdf>>.

UHLEIN, A. MARQUES, C. S. de S.; UHLEIN, G. J. Fertilizantes Provenientes de Depósitos Sedimentares de Fosfato e Potássio **Pré-Cambrianos**. In: **PEDROSASOARES, A.C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. (Coord.). Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais – CODEMGE, 2018.