



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
ENGENHARIA DE MINAS

Caio Yasuhiro Kikuchi

ESTUDO FUNDAMENTAL DA FLOTABILIDADE DE APATITA E DOLOMITA
EMPREGANDO ÓLEO DE PATAUÁ

ARAXÁ-MG

2024

CAIO YASUHIRO KIKUCHI

**ESTUDO FUNDAMENTAL DA FLOTABILIDADE DE APATITA E DOLOMITA
EMPREGANDO ÓLEO DE PATAUÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Leandro Henrique Santos

ARAXÁ-MG

2024

CAIO YASUHIRO KIKUCHI

**ESTUDO FUNDAMENTAL DA FLOTABILIDADE DE APATITA E
DOLOMITA EMPREGANDO ÓLEO DE PATAUÁ**

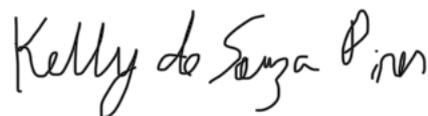
Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Minas do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 13 de setembro de 2024.



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

Membro Titular: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Ma. Kelly de Souza Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

RESUMO

A população mundial ultrapassou 8 bilhões em 2022, com projeções indicando que o crescimento populacional global excederá 10 bilhões de indivíduos até o ano de 2100. Esse aumento pressiona a demanda por alimentos, o que, por consequência, intensifica a necessidade de fertilizantes, especialmente de P_2O_5 . Para atender a essa demanda crescente, torna-se fundamental aprimorar a seletividade no beneficiamento de minérios fosfáticos por meio do uso de coletores seletivos no sistema apatita-carbonatos. Os principais coletores empregados na concentração de fosfatos incluem ácidos graxos, sarcosinatos e óleo de soja hidrogenado. Em busca de soluções mais sustentáveis, estudos vêm investigando o potencial do óleo de patauá, proveniente de resíduos da indústria cosmética, para a flotação de minerais levemente solúveis, promovendo o desenvolvimento sustentável e a economia circular na região amazônica. Neste contexto, o presente estudo avaliou o desempenho do óleo de patauá saponificado como coletor na microflotação de apatita e dolomita, utilizando um tubo de Hallimond modificado. Foram investigadas a flotabilidade dos minerais em diferentes condições de pH e concentração de coletor, com o objetivo de buscar seletividade na separação, empregando o planejamento fatorial em estrela e análise estatística via Minitab® 18. O planejamento considerou dois fatores, a concentração de coletor, nos níveis de 10mg/L (baixo) e 25mg/L (alto), e o pH, nos níveis de 7 (baixo) e 10 (alto). Também foram investigados pontos estrela para analisar efeitos não lineares e interações das variáveis em níveis intermediários. O ponto central, realizado em quadruplicata, foi definido em 17,5mg/L de coletor e pH 8,5. A flotabilidade da apatita variou de 6,39% a 43,78%, com o maior valor obtido a 25mg/L de coletor e pH 10,0, e o menor a pH 7,0 na mesma concentração. A dolomita apresentou flotabilidade elevada em quase todas as condições, variando de 33,25% a 72,81%, com o máximo a 17,5mg/L de coletor e pH 8,5, e o mínimo a pH 6,4 na mesma concentração. A interação entre os fatores foi significativa para a apatita, enquanto o pH influenciou fortemente a flotabilidade da dolomita. A otimização revelou dois cenários: para a apatita, a flotabilidade máxima foi de 44,78% (28,106mg/L e pH 10,62), com mínima da dolomita de 53,66%; para a dolomita, a flotabilidade máxima foi de 65,39% (9,928mg/L e pH 9,897), com mínima da apatita de 6,39%. O segundo cenário é promissor para o processo de flotação reversa da apatita, oferecendo vantagens industriais, como a economia de reagente coletor e no ajuste do pH.

Palavras-chave: Apatita; Dolomita; Microflotação; Flotabilidade.

ABSTRACT

The global population surpassed 8 billion in 2022, with projections indicating it will exceed 10 billion by 2100. This growth places increasing pressure on food demand, which in turn intensifies the need for fertilizers, particularly P_2O_5 . To meet this rising demand, improving selectivity in the beneficiation of phosphate ores is crucial, particularly through the use of selective collectors in the apatite-carbonate flotation system. Commonly used collectors in phosphate concentration include fatty acids, sarcosinates, and hydrogenated soybean oil. In pursuit of more sustainable solutions, recent studies have explored the potential of patauá oil, a byproduct of the cosmetic industry, for the flotation of slightly soluble minerals, promoting sustainable development and circular economy practices in the Amazon region. In this context, the present study evaluated the performance of saponified patauá oil as a collector in the microflotation of apatite and dolomite, using a modified Hallimond tube. Flotation of the minerals was investigated under varying pH conditions and collector concentrations, with the goal of enhancing separation selectivity. A star-point factorial design was employed, with statistical analysis performed using Minitab® 18. The design considered two factors: collector concentration, at levels of 10mg/L (low) and 25mg/L (high), and pH, at levels of 7 (low) and 10 (high). Star points were included to examine nonlinear effects and variable interactions at intermediate levels. The central point, tested in quadruplicate, was set at 17.5mg/L of collector and pH 8.5. Apatite flotation ranged from 6.39% to 43.78%, with the highest value observed at 25mg/L of collector and pH 10, and the lowest at pH 7 at the same concentration. Dolomite showed high flotation across nearly all conditions, ranging from 33.25% to 72.81%, with the maximum at 17.5mg/L of collector and pH 8.5, and the minimum at pH 6.4 at the same concentration. Significant factor interactions were observed for apatite, while pH had a strong influence on dolomite flotation. Optimization revealed two key scenarios: for apatite, maximum flotation was 44.78% (28.106mg/L and pH 10.62), with minimum dolomite flotation at 53.66%; for dolomite, maximum flotation was 65.39% (9.928mg/L and pH 9.897), with minimum apatite flotation at 6.39%. The latter scenario shows promise for the reverse flotation of apatite, offering industrial benefits such as reduced collector reagent consumption and easier pH adjustment.

Keywords: Apatite; Dolomite; Microflotation; Floatability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de produção do superfosfato simples (SSP).....	14
Figura 2 - Esquema de produção do superfosfato triplo (TSP).....	14
Figura 3 - Esquema de produção de fosfatos de amônio (MAP/DAP)	15
Figura 4 - Representação esquemática do ângulo de contato entre as fases líquida, sólida e gasosa em equilíbrio	17
Figura 5 - Tubo de Hallimond original.....	20
Figura 6 - Tubo de Hallimond modificado (A) e Inserção de placa porosa no tubo modificado (B).....	20
Figura 7 - Solubilidade da apatita em função do pH	22
Figura 8 - Representação gráfica do planejamento fatorial em estrela.....	25
Figura 9 - Partículas de apatita livres, mistas e magnetita.....	27
Figura 10 – Fragmentação das amostras de apatita e dolomita	28
Figura 11 - Saponificação alcoólica do óleo de patauá	30
Figura 12 - Difratoograma de raios X da amostra de apatita.....	33
Figura 13 - Difratoograma de Raios X da amostra de dolomita.....	34
Figura 14 - FTIR do óleo de patauá e coletor de óleo de patauá.....	35
Figura 15 - Gráfico normal dos efeitos padronizados para flotabilidade de apatita.....	39
Figura 16 - Potencial zeta em função do pH da apatita pura e condicionada com coletor de óleo de patauá	40
Figura 17 - Gráfico normal dos efeitos padronizados para flotabilidade de dolomita	41
Figura 18 - Potencial zeta em função do pH da dolomita pura e condicionada com coletor de óleo de patauá	42
Figura 19 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a apatita.....	43
Figura 20 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a dolomita	43
Figura 21 - Regiões de flotabilidade de apatita	44
Figura 22 - Regiões de flotabilidade de dolomita.....	44
Figura 23 - Maximização da flotabilidade da apatita e minimização da flotabilidade da dolomita.....	45
Figura 24 - Maximização da flotabilidade da dolomita e minimização da flotabilidade da apatita	46
Figura 25 - Flotabilidade em função do pH para apatita, calcita e dolomita usando 10 e 20mg/L de Hidrocol	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Minerais do grupo da apatita.	11
Tabela 2 - Produção mundial de fosfato e reservas.	12
Tabela 3 - Perfil de ácidos graxos do óleo de Patauí 24	24
Tabela 4 - Tabela de planejamento fatorial em estrela.....	26
Tabela 5 - Planejamento fatorial dos ensaios de microflotação	31
Tabela 6 - Parâmetros constantes dos testes de microflotação.....	31
Tabela 7 - Análise química da apatita	33
Tabela 8 - Composição química da amostra de dolomita.....	34
Tabela 9 - Caracterização do óleo de patauí (% de massa).....	35
Tabela 10 - Flotabilidade da apatita e dolomita nos ensaios de microflotação	36
Tabela 11 - Análise da variância de apatita.....	37
Tabela 12 - Análise de variância de dolomita	38
Tabela 13 - Ensaios de arraste da amostra de apatita	55
Tabela 14 - Ensaios de arraste da amostra de dolomita.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Minério fosfático	10
2.1.1	Apatita	10
2.1.2	Depósitos e reservas.....	11
2.1.3	Fertilizantes fosfatados	13
2.1.4	Mercado de Fertilizantes.....	15
2.2	Flotação	16
2.2.1	Fundamentos.....	17
2.2.2	Microflotação	19
2.2.3	Flotação de minério fosfático.....	21
2.2.4	Sistema apatita-carbonatos.....	21
2.3	Óleos amazônicos.....	23
2.4	Planejamento experimental	24
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Preparação das amostras	27
3.2	Caracterização da apatita, dolomita e óleo de patauá	28
3.3	Ensaio de saponificação do óleo de Patauá.....	29
3.4	Planejamento experimental dos ensaios de microflotação em tubo de Hallimond	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Caracterização das amostras minerais	33
4.2	Caracterização do óleo de patauá e coletor.....	34
4.3	Resultados dos ensaios de microflotação	36
5	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – Ensaio de arraste	55

1 INTRODUÇÃO

Conforme os dados da Organização das Nações Unidas (ONU), em novembro de 2022 a população mundial ultrapassou os 8 bilhões de habitantes. Mesmo com a sutil redução na taxa de crescimento populacional, que atualmente se situa em 0,9% ao ano, as projeções apontam para a possibilidade de a população global exceder 10 bilhões de indivíduos até o ano de 2100. Simultaneamente, em 2021, o consumo global de P_2O_5 , sob a forma de fertilizantes aumentou 7% em comparação ao ano anterior. Tal crescimento foi impulsionado por preços agrícolas elevados, uma maior área de cultivo e o aumento das exportações, com a América do Sul e a Ásia liderando esse crescimento (JASINSKI, 2023). Nesse contexto, o processamento de minérios fosfáticos, essenciais para a produção de fertilizantes químicos, requer melhorias contínuas para atender à crescente demanda por alimentos.

Os depósitos ígneos de fosfato estão geralmente associados a carbonatitos do período Fanerozoico e a intrusões alcalinas com baixo teor de sílica. Estes, em geral, apresentam teores de P_2O_5 variando entre 5 a 15%. Os minérios de fosfato ígneos podem ser processados para produzir concentrados de alta qualidade, com teores acima de 30% de P_2O_5 , mesmo partindo de valores inferiores a 5% de P_2O_5 (PUFAHL; GROAT, 2017). No entanto, a etapa crítica no processamento de minério fosfático é a separação seletiva entre apatita e ganga carbonática (calcita e dolomita) por meio da flotação. A falta de seletividade nessa separação ocorre devido à adsorção dos coletores nas superfícies tanto da apatita quanto dos carbonatos, levando à flotação simultânea de ambos (PAIVA, 2011).

Com o intuito de aprimorar a seletividade na etapa de concentração do minério fosfático, estudos fundamentais podem ser realizados, como a microflotação, buscando entender a dinâmica e características da operação. Essa técnica possibilita o estudo do comportamento de espécies minerais de maneira isolada, em ambiente químico controlado. Tal cenário pode considerar a utilização de reagentes menos prejudiciais ao meio ambiente e economicamente viáveis, que interagem de forma eficaz com a superfície mineral (SANTOS, 2019).

No início das operações no Brasil, o *tall oil* saponificado, importado, era amplamente utilizado como reagente coletor. Entretanto, com as variações cambiais e a baixa qualidade do *tall oil* nacional, que apresentava um alto teor de ácidos rosínicos (ácidos graxos com mais de 18 carbonos), comprometendo a eficiência espumante, houve a necessidade de buscar alternativas. Como resposta, diferentes fontes vegetais, como óleos de arroz, soja, soja hidrogenada e uva, passaram a ser exploradas, além de reagentes sintéticos (GUIMARÃES; ARAUJO; PERES, 2005). Atualmente, os principais reagentes coletores utilizados nas

unidades de concentração de fosfatos incluem ácidos graxos, sarcosinatos e óleo de soja hidrogenado. Lisboa (2014) conduziu um estudo sobre o uso de óleo residual de fritura como reagente coletor de minerais, mostrando seu potencial na flotação. que, por já conter ácidos graxos livres devido ao processo de cocção, facilita o processo de saponificação.

Uma outra alternativa são óleos amazônicos provenientes de resíduos da indústria de cosméticos. Conforme Santos (2022), a região amazônica abriga uma rica diversidade de óleos vegetais com propriedades que os tornam candidatos promissores para a aplicação em processos de flotação de minerais levemente solúveis. Essas oleaginosas amazônicas se destacam por sua alta concentração de ácidos graxos, com ênfase nos ácidos oleico e linoleico. Um exemplo notável é o patauá, oriundo de uma palmeira nativa da região amazônica, cujo óleo é amplamente empregado em aplicações medicinais, cosméticas, culinárias e na preparação de uma bebida semelhante ao leite. A utilização do óleo de patauá promove o aproveitamento de um recurso local, fortalecendo o desenvolvimento sustentável na Amazônia e contribuindo para a economia circular ao reutilizar subprodutos industriais.

Dessa forma, este estudo visou avaliar o desempenho do óleo de patauá saponificado como coletor de apatita e dolomita, a partir da técnica de microflotação, empregando amostras minerais provenientes de depósitos de origem ígnea, utilizando tubo de Hallimond modificado. O objetivo foi avaliar a flotabilidade dos minerais citados considerando diferentes condições de pH e concentração de coletor, buscando identificar condições de seletividade na separação do sistema apatita/dolomita. Para isso, caracterizou-se as amostras minerais de apatita e dolomita, bem como o óleo de patauá e o coletor obtido a partir da saponificação deste. Além disso, foram realizados ensaios de microflotação empregando o planejamento fatorial de experimentos e o tratamento estatístico dos resultados obtidos com o auxílio do software estatístico Minitab® 18.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o embasamento teórico, primeiramente, explorou-se o minério fosfático, as características mineralógicas da apatita, depósitos e reservas, o mercado e a interação com a indústria de fertilizantes. Em seguida, analisou-se os fundamentos da flotação e a microflotação, e posteriormente o sistema apatita/carbonatos na flotação de minério fosfático. Por fim, foram explorados os efeitos potenciais dos óleos amazônicos no tratamento de minérios fosfáticos e o planejamento experimental, especificamente o planejamento fatorial estrela.

2.1 Minério fosfático

A rocha fosfática, composta por minerais ricos em fosfato, como o grupo da apatita, destaca-se como uma fonte de fósforo, elemento essencial para o desenvolvimento das plantas. Seu papel é fundamental na produção de fertilizantes, os quais fornecem nutrientes para o solo, contribuindo assim para o aumento da produtividade e qualidade dos cultivos na agricultura. Além disso, a rocha fosfática contribui em diversos setores industriais, incluindo a produção de ácido fosfórico e outros compostos químicos. Sua relevância abrange tanto o desenvolvimento agrícola quanto a segurança alimentar, enfatizando sua importância nos aspectos econômicos e ambientais (SANTOS, 2019).

2.1.1 Apatita

O elemento químico fósforo (P) está amplamente disseminado na crosta terrestre, principalmente na forma de compostos conhecidos como fosfatos. Um mineral de destaque nesse contexto é a apatita que não corresponde a um mineral único, mas engloba diversos membros de um grupo de minerais isomórficos (NUNES, 2022).

O supergrupo recebeu seu nome do nome genérico "apatita", inicialmente introduzido pelo mineralogista alemão Werner, em 1786. A origem do termo deriva do grego ἀπατάω (apatao), que significa "enganar", fazendo alusão ao fato de a apatita ser frequentemente confundida com outros minerais, como, por exemplo, o berilo e a milarita. (PASERO *et al.*, 2010).

Os principais grupos incluem a fluorapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})$), que é o mineral de minério primordial nas rochas fosfáticas, juntamente com hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) e cloroapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl})$). Além disso, o cálcio (Ca) presente na apatita pode ser parcialmente substituído

por outros elementos, como magnésio (Mg), sódio (Na), manganês (Mn) e outros (NUNES, 2022). Na Tabela 1 estão descritos alguns minerais do supergrupo da apatita.

Tabela 1 - Minerais do grupo da apatita.

Mineral	Composição Química
Alforsita	$Ba_5(PO_4)_3Cl$
Belovita-(Ce)	$Sr_3Na(Ce,La)(PO_4)_3(F,OH)$
Belovita-(La)	$Sr_3Na(La,Ce)(PO_4)_3(F,OH)$
Carbonatofluorapatita	$((Ca,Na,Mg)_{10}(PO_4,CO_3)_6(F,OH)_2)$
Carbonatohidroxiapatita	$Ca_5(PO_4,CO_3)_3(OH)$
Clinonilmetita	$Pb_5(PO_4)_3Cl$
Cloroapatita	$Ca_{10}(PO_4)_6Cl_{12}$
Estrôncioapatita	$(Sr,Ca)_5(PO_4)_3(OH,F)$
Esvabita	$Ca_5(AsO_4)_3F$
Fermorita	$(Ca,Sr)_5(AsO_4,PO_4)_3(OH)$
Fluorapatita	$Ca_{10}(PO_4)_6F_2$
Fuorcafita	$(Ca(Sr,Na,Ca)(Ca,Sr,Ce)_3(PO_4)_3F)$
Hidroxiapatita	$Ca_{10}(PO_4)_6OH_2$
Johnbaumita	$Ca_5(AsO_4)_3(OH)$
Mimetita	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$
Piromorfita	$Pb_5(PO_4)_3Cl$
Turneureita	$Ca_5[(As,P)O_4]_3Cl$
Vanadinita	$Pb_5(VO_4)_3Cl$

Fonte: Adaptado de Pasero *et al.* (2010).

A apatita é frequentemente encontrada na forma de cristais hexagonais de hábito prismático alongado, embora, ocasionalmente, possa assumir uma forma prismática mais curta ou tabular. Esses cristais geralmente apresentam faces de bipirâmides proeminentes e um plano basal. A clivagem da apatita é caracteristicamente fraca, possuindo uma dureza de 5 na escala de Mohs, com uma densidade relativa variando de 3,15 a 3,20. Seu brilho é descrito como vítreo a sobresinoso, e sua coloração predominante tende a ser uma variedade de tons de verde ou marrom, embora também possa ocorrer em azul, violeta e até mesmo incolor (KLEIN; DUTROW, 2012).

2.1.2 Depósitos e reservas

Os depósitos de rocha fosfática ultrapassam os 300 bilhões de toneladas e ocorrem principalmente em ambientes marinhos como fosforitos sedimentares. Os maiores depósitos sedimentares são encontrados no norte da África, no Oriente Médio, na China e nos Estados Unidos. As ocorrências de origem ígnea são encontradas no Brasil, Canadá, Finlândia, Rússia

e África do Sul (JASINSKI, 2023). A produção mundial dos anos 2021 e 2022 e as reservas de rocha fosfática podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Produção mundial de fosfato e reservas.

País	Produção 2021 (10³)	Produção 2022 (10³)	Reservas 2022 (10³)
Estados Unidos	21.600	21.000	1.000.000
Argélia	1.400	1.800	2.200.000
Austrália	2.500	2.500	51.100.000
Brasil	6.000	5.500	1.600.000
China	90.000	85.000	1.900.000
Egito	5.000	5.000	2.800.000
Finlândia	990	1.000	1.000.000
Índia	1.400	1.400	46.000
Israel	2.430	3.000	60.000
Jordânia	10.000	10.000	1.000.000
Cazaquistão	1.500	1.500	260.000
México	488	450	30.000
Marrocos	38.100	40.000	50.000.000
Peru	4.200	4.200	210.000
Rússia	14.000	13.000	600.000
Arábia Saudita	9.200	9.000	1.400.000
Senegal	2.100	2.600	50.000
África do Sul	2.130	1.600	1.600.000
Togo	1.000	1.500	30.000
Tunísia	3.730	4.000	2.500.000
Turquia	600	800	50.000
Uzbequistão	900	900	100.000
Vietnã	4.500	4.500	30.000
Outros países	1.950	1.600	2.600.000
Total Mundial	226.000	220.000	72.000.000

Fonte: Adaptado de Jasinski (2023).

Nos minérios ígneos, comumente carbonatitos, são encontradas rochas ígneas contendo mais de 50% de minerais de carbonato (WOOLLEY; KEMPE, 1989). Já os depósitos sedimentares de fosfato são caracterizados como sedimentos bioelementares, uma classe de rochas sedimentares químicas formadas por precipitações dos elementos P, Fe ou Si (PUFAHL, 2010).

A formação predominante dos minérios fosfáticos sedimentares ocorre em ambientes marinho-rasos plataformais. Nessas áreas, o fitoplâncton extrai o fósforo da superfície oceânica, convertendo-o em apatita (GLENN *et al.*, 1994; JARVIS *et al.*, 1994). Essa fonte de fósforo

dissolvido, em última instância, provém da intemperização química de rochas continentais (COMPTON *et al.*, 2000; FILIPPELLI, 2008), estabelecendo uma conexão entre depósitos de fosfato ígneos e sedimentares por meio do ciclo do fósforo. Rochas sedimentares bioquímicas com mais de 18% de P_2O_5 são denominadas fosforitos (GLENN *et al.*, 1994; PUFAHL, 2010).

As maiores reservas de rochas fosfáticas no Brasil são formadas a partir de rochas ígneas, caracterizadas por teores médios de P_2O_5 variando de 4% a 15%. Estas exibem uma mineralogia complexa, abrangendo minério magmático primário e manto secundário enriquecido, resultando em baixa uniformidade e, conseqüentemente, em maior complexidade e custo no aproveitamento industrial.

Representando cerca de 80% da produção nacional de fosfato, os depósitos ígneos brasileiros exercem influência direta no preço médio do fosfato no país, superando as práticas globais. Em contrapartida, apenas 20% dos depósitos brasileiros têm origem sedimentar. Os depósitos magmáticos, considerados de importância global, incluem locais como Tapira, Araxá, Catalão/Ouvidor I e II, Salitre I e II, Serra Negra, Cajati (Jacupiranga), Anitápolis e Ipanema. Em 2015, a produção nacional atingiu 6,1 milhões de toneladas de concentrado de rocha fosfática, com 35% de P_2O_5 . A maior concentração ocorre nos municípios de Tapira e Araxá (MG), e Catalão e Ouvidor (GO), que respondem por aproximadamente 80%, enquanto contribuições adicionais vêm de Cajati (SP), Patos de Minas (MG), Lagamar (MG) e Angico dos Dias (BA) (SCHUELER; DOURADO; RIZZO, 2019).

2.1.3 Fertilizantes fosfatados

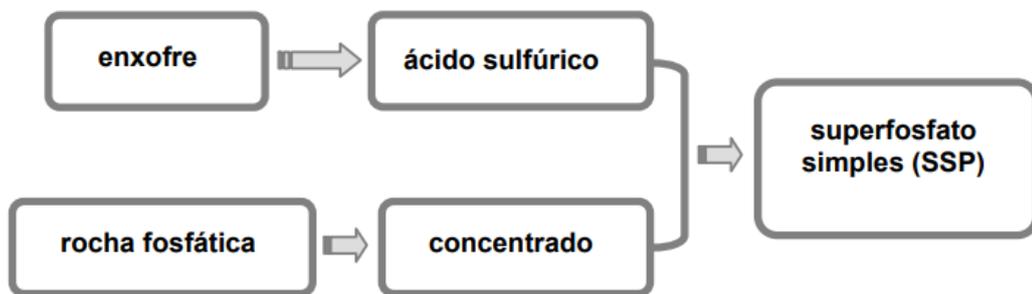
A maioria dos solos no Brasil apresenta baixa fertilidade natural, destacando-se pela deficiência de fósforo. Essa condição demanda a aplicação de quantidades substanciais de fertilizantes fosfatados para obter rendimentos elevados nas colheitas. O fósforo emerge como um dos nutrientes mais limitantes para o crescimento das plantas em solos tropicais e subtropicais, principalmente devido à alta adsorção de íons fosfato por óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, abundantemente presentes em solos altamente intemperizados (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O consumo global, para a utilização de fertilizantes, representa cerca de 90%, enquanto os restantes 10% apresentam outra aplicação (AWADALLAH *et al.*, 1998). No contexto brasileiro, a extração de fosfato tem como foco principal a indústria de fertilizantes. As empresas que realizam a extração seguem uma abordagem altamente verticalizada, controlando unidades industriais responsáveis pela produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico,

superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato de monoamônio (MAP) e fosfato bicálcico (FONSECA, 2018).

A produção de fertilizantes fosfatados inicia-se com a extração do minério de depósitos de rochas fosfáticas. Para aprimorar a solubilidade do fósforo no concentrado, são empregados processos de ataque por ácido sulfúrico e/ou fosfórico, dando origem aos superfosfatos. O superfosfato simples (SSP) é obtido através do ataque por ácido sulfúrico, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de produção do superfosfato simples (SSP)



Fonte: Dias e Lajolo (2010).

A mistura de proporções variadas do concentrado fosfático e ácido sulfúrico resulta na formação de ácido fosfórico, e a subsequente reação entre o concentrado e o ácido fosfórico conduz à produção de superfosfato triplo (TSP), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de produção do superfosfato triplo (TSP)



Fonte: Dias e Lajolo (2010).

Adicionalmente, a interação da amônia com o ácido fosfórico gera fosfato de monoamônio (MAP) e fosfato de diamônio (DAP), conforme demonstrado na Figura 3 (DIAS; LAJOLO, 2010).

Figura 3 - Esquema de produção de fosfatos de amônio (MAP/DAP)



Fonte: Dias e Lajolo (2010).

No cenário brasileiro, os minérios portadores de fósforo são escassos, apresentando uma disponibilidade primária de recursos minerais que atende a um horizonte inferior a 25 anos. Além disso, o consumo interno é fortemente dependente das importações, o que torna o país particularmente vulnerável e sublinhando sua fragilidade no cenário internacional, especialmente para a manutenção de sua posição de destaque no setor de agronegócio mundial (SANTOS, 2022).

2.1.4 Mercado de Fertilizantes

O setor de fertilizantes é fundamental no aumento da produtividade agrícola no Brasil. No entanto, a produção interna não consegue suprir completamente a demanda do mercado, resultando em uma alta dependência de importações desses insumos, que representam mais de 81% do consumo interno. Em 2020, foram importadas aproximadamente 32,8 milhões de toneladas de fertilizantes, evidenciando um crescimento de 11,2% em comparação com o ano anterior. Em contrapartida, a produção brasileira atingiu apenas 6,3 milhões de toneladas neste mesmo ano, refletindo uma redução de 11% em relação a 2019, quando foram produzidas 7,1 milhões de toneladas (SGM, 2021).

Em 2022, a produção mundial de rocha fosfática registrou uma leve queda devido ao conflito entre Rússia e Ucrânia, resultando em uma redução nas exportações desses materiais, assim como de fertilizantes russos. Apesar de os materiais de fertilizantes estarem isentos de sanções, restrições em alguns países impediram a entrada de navios russos em seus portos. O mercado global de fertilizantes fosfatados enfrentou desafios significativos, incluindo interrupções no fornecimento, preços elevados na primeira metade do ano e um consumo reduzido em algumas regiões. A China impôs restrições às exportações de DAP e MAP, resultando em uma diminuição de cerca de 5 milhões de toneladas nas exportações chinesas.

Apesar dos esforços de outros países em aumentar as exportações, não foi possível compensar totalmente a perda no mercado global. Como resultado desses fatores, o consumo global de P_2O_5 contido em fertilizantes foi estimado como ligeiramente menor, atingindo cerca de 48 milhões de toneladas em 2022 (JASINSKI, 2023).

Em 2023, quatro grandes empresas dominaram a distribuição de fertilizantes no Brasil. A Mosaic se destacou com 21% de participação de mercado, seguida pela Fertipar com 17%, Eurochem com 14%, e Yara com 12%. O Brasil é atualmente o maior importador mundial de fertilizantes, com mais de 70% dos insumos agrícolas provenientes do exterior, conforme dados da Associação Nacional para a Difusão de Adubos (Anda). Em janeiro de 2024, o país importou 2,77 milhões de toneladas, o maior volume em cinco anos, segundo o Boletim Logístico da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), um número que poderia ser reduzido com o fortalecimento da produção nacional. (GLOBALFERT, 2024).

Frente a esses desafios, o Ministério da Agricultura implementou em 2020 o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), aprovado em março de 2022 pelo decreto N°10.991. O PNF 2022-2050 busca reduzir a dependência externa por meio de ações como incentivos à produção de fertilizantes, investimentos em pesquisa, desenvolvimento, inovação e aprimoramento da cadeia de produção e distribuição desses insumos no Brasil, conforme delineado pelo decreto.

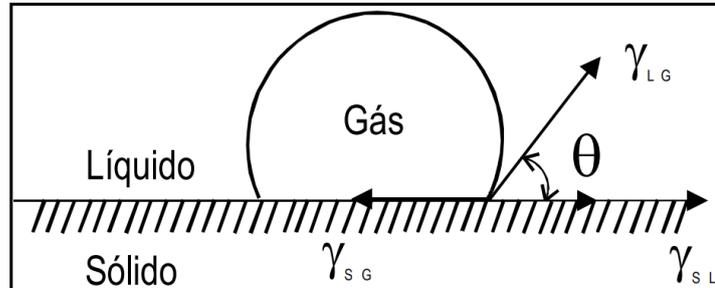
2.2 Flotação

Como citado, a principal técnica de concentração empregada no processamento de minério fosfático corresponde à flotação. Assim como outras técnicas empregadas em processamento de minérios, durante a etapa de concentração mineral, é realizada a separação entre o mineral-minério de seus minerais de ganga, empregando uma propriedade específica para diferenciá-los. Assim, o processo de flotação opera com a premissa de que as partículas hidrofóbicas, ou seja, aquelas que são flotáveis, são capturadas pelas bolhas na fase líquida e transportadas em direção à interface polpa-espuma. Enquanto isso, as partículas hidrofílicas permanecem em suspensão no sistema (ATA; AHMED; JAMESON, 2004).

A avaliação da hidrofobicidade de um sólido pode ser feita por meio do ângulo de contato (θ) entre as fases sólida, líquida e gasosa, conforme ilustrado na Figura 4. Esse ângulo, que é convencionalmente medido na fase líquida e indica que as interfaces sólido-líquido, sólido-gás e gás-líquido alcançaram o equilíbrio e estão em saturação mútua. Quando o valor de θ é elevado, as gotas tendem a se espalhar sobre a superfície, sugerindo que o sólido não foi

molhado pelo líquido (meio aquoso) e, por isso, é classificado como hidrofóbico (MONTE; PERES, 2010).

Figura 4 - Representação esquemática do ângulo de contato entre as fases líquida, sólida e gasosa em equilíbrio



Fonte: Monte e Peres (2010).

Minerais hidrofóbicos repelem a água e preferem substâncias apolares, enquanto a maioria dos minerais tende a interagir com a água. No entanto, a hidrofobicidade não é comum entre os minerais, sendo mais a exceção que a regra. Por outro lado, a hidrofiliicidade expressa a afinidade de uma espécie mineral pela fase líquida (água) no sistema de flotação. A adição de reagentes (coletores) pode modificar o comportamento hidrofílico dos minerais, tornando possível a indução de hidrofobicidade seletiva em uma espécie mineral, permitindo, assim, a separação seletiva (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

2.2.1 Fundamentos

A flotação é regida por três mecanismos essenciais que definem a probabilidade de flotação. Esses mecanismos podem ser expressos em termos de um produto de três probabilidades (HORNSBY; LEJA, 1983), conforme apresentado na Equação 1.

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_t \quad (1)$$

Em que:

P_f : Probabilidade de flotação;

P_c : Probabilidade de colisão;

P_a : Probabilidade de adesão;

P_t : Probabilidade de transporte.

Primeiramente, a colisão da partícula mineral com a bolha é desencadeada quando a partícula se aproxima o suficiente de uma bolha, iniciando interações físico-químicas. Esse fenômeno é viável a partir de uma quantidade específica de movimento (Q), que inclui fatores como velocidade de agitação, tamanho e densidade das partículas. Em condições em que as partículas são finas e pouco densas, associadas a um Q pequeno, elas tendem a desviar a trajetória de colisão, seguindo as linhas de fluxo do fluido ao redor das bolhas. Essa tendência pode ser mitigada com a redução do diâmetro das bolhas e o aumento da agitação. A probabilidade de colisão aumenta com o aumento da turbulência, o aumento do tamanho das partículas e pela diminuição do tamanho das bolhas (BALTAR, 2021; LUZ *et al.*, 2018).

O segundo mecanismo é a adesão, onde partículas hidrofobizadas se ligam às bolhas de ar. Para que a adesão ocorra de maneira eficiente é necessário que o sistema atenda a requisitos termodinâmicos e cinéticos (BALTAR, 2021; LUZ *et al.*, 2018).

Os requisitos termodinâmicos envolvem a criação de condições favoráveis ao surgimento da interface gás-sólido, substituindo as interfaces sólido-líquido e líquido-gás. Esse processo é espontâneo, levando à diminuição da variação da energia livre (ΔG) de adesão entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar, obtida pela equação de Dupré, conforme a Equação 2 (FUERSTENAU; CHANDER, 1986).

$$\Delta G = \gamma_{GS} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (2)$$

Em que:

γ_{GS} : tensão superficial na interface gás-sólido;

γ_{SL} : tensão superficial na interface sólido-líquido;

γ_{LG} : tensão superficial na interface líquido-gás.

Ao unir a equação de Young com a forma adequada da equação de Dupré, surge a equação de Young-Dupré (Equação 3). Essa expressão oferece o critério termodinâmico para o processo de flotação:

$$\Delta G = \gamma_{LG}(\cos \theta - 1) \quad (3)$$

Além disso, os requisitos cinéticos demandam que a adesão ocorra durante o tempo de contato entre a bolha e a partícula. O tempo de contato é o intervalo entre a colisão e o

movimento da partícula sobre a superfície da bolha. Durante esse processo, ocorre o tempo de indução, caracterizado pelo afinamento e ruptura espontânea da película. A probabilidade de adesão aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, o aumento da velocidade de agitação, a diminuição do tamanho das bolhas, até certo diâmetro e a hidrofobicidade da superfície mineral (BALTAR, 2021; REIS, 2019; TESTA, 2008).

O terceiro mecanismo é o transporte, durante o qual não pode haver a destruição do agregado bolha-partícula. Esse transporte ocorre em duas zonas distintas, a zona de polpa e a zona de espuma. A primeira se manifesta quando o empuxo do agregado é maior que o peso da partícula, favorecido por bolhas grandes e partículas pequenas. Por outro lado, na zona de espuma, a coalescência das bolhas resulta na ruptura do agregado no ponto de contato entre elas. Nesse cenário, as partículas têm três destinos possíveis, sendo eles retornar à polpa, permanecer retidas na espuma e flutuar por arraste, ou participar de um segundo processo de adesão. A probabilidade de transporte aumenta com a diminuição da turbulência, aumento da hidrofobicidade da superfície mineral, aumento do tamanho da bolha e diminuição do tamanho da partícula (BALTAR, 2021; LUZ *et al.*, 2018).

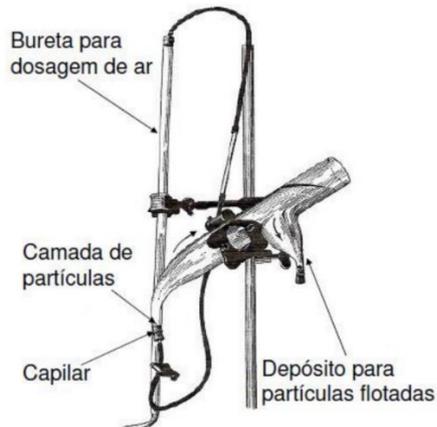
2.2.2 Microflotação

No início da implementação industrial do processo de flotação, a abordagem inicial envolvia o uso de óleo como fase apolar. Posteriormente, à medida que se percebia a possibilidade de ajustar a hidrofobicidade das superfícies minerais com reagentes apropriados, houve uma transição para o uso de ar, resultando na técnica de flotação em espuma. Essa evolução técnica enfatizou a importância de analisar o comportamento das espécies minerais de forma isolada, aplicando diversos reagentes. Devido à extensa variedade de reagentes a serem considerados, a condução de testes em escala industrial ou de bancada tornou-se impraticável. Como solução, foram desenvolvidas técnicas dinâmicas em escala laboratorial, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das interações que ocorrem no processo, especialmente no que diz respeito aos fenômenos interfaciais das partículas minerais (ARAÚJO *et al.*, 2005).

O Tubo de Hallimond, desenvolvido por A. F. Hallimond em 1944, consiste na introdução de bolhas individuais de ar no fundo do tubo através de um capilar. Essas bolhas percorrem uma camada de partículas, coletando-as enquanto sobem pelo tubo. Quando atingem a superfície da solução, as bolhas se quebram, liberando as partículas para um depósito específico. Modificações posteriores incluíram a divisão do tubo por Metzger e a adição de um

capilar por Fuerstenau e colaboradores em 1957, que também estabeleceram parâmetros geométricos ainda em uso (ARAUJO *et al.*, 2005). Sua configuração original pode ser visualizada na Figura 5.

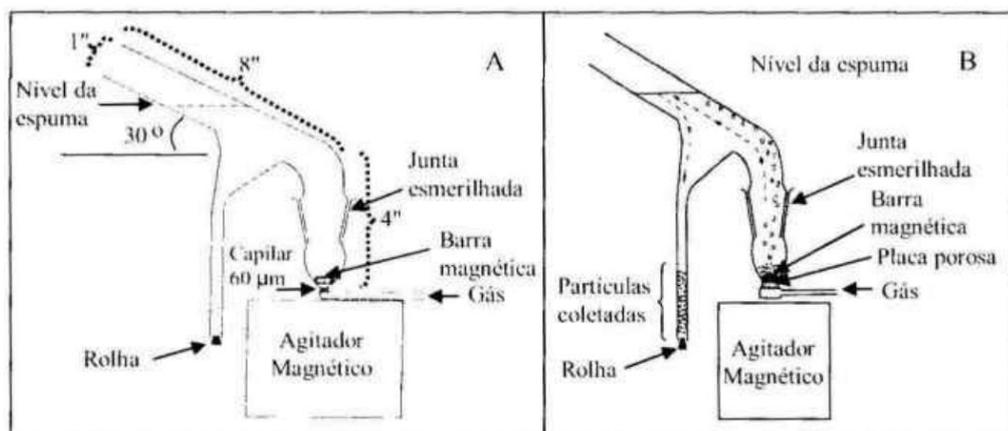
Figura 5 - Tubo de Hallimond original



Fonte: Araujo *et al.* (2005).

Diversas modificações foram implementadas, como a introdução de uma placa porosa de vidro sinterizado, visando melhorar a distribuição das bolhas de ar, o uso de tubos de vidro extensores para faixas granulométricas mais finas e a incorporação de medidas contínuas de pH e atmosfera controlada na flotação de minerais carbonatados fracamente solúveis. Essas modificações aprimoraram a eficácia do Tubo de Hallimond em experimentos específicos, oferecendo maior controle e precisão nos resultados obtidos (ARAUJO *et al.*, 2005). Algumas modificações podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 - Tubo de Hallimond modificado (A) e Inserção de placa porosa no tubo modificado (B)



Fonte: Araujo *et al.* (2005).

2.2.3 Flotação de minério fosfático

Para separar apatitas dos minerais de ganga em minérios fosfáticos de origem ígnea, é necessário alterar as características de suas superfícies. Essa modificação é comumente realizada no processo de concentração através da flotação aniônica direta por espuma. Para isso, são empregados ácidos carboxílicos que variam em tamanho de cadeia carbônica e grau de saturação. Esses ácidos são adsorvidos na superfície da apatita por meio do processo de quimissorção, onde ocorre a precipitação de um sal do ácido carboxílico na superfície do mineral (CHAVES, 2013).

Estudos utilizando o tubo de Hallimond revelaram que o desempenho na flotabilidade das apatitas é uma característica intrínseca, dependente de fatores como a origem, o tipo, substituições químicas e associações minerais de cada apatita e depósito mineral. Foi observado que apatitas primárias apresentam melhor desempenho em relação às secundárias, devido às interações com óxido-hidróxido de ferro nas superfícies destas últimas, concluindo que a flotabilidade geral está intrinsecamente relacionada às variações composicionais, morfológicas e ao grau de impregnação e intercrescimento com óxidos-hidróxidos de ferro (LENHARO, 1994). Em amostras de um minério alterado, a presença de contaminantes (Fe, Si e Ti) reduziu a flotabilidade para uma mesma concentração de coletor (SALUM *et al.*, 1990). A cristalinidade também influenciou, com amostras de maior cristalinidade mostrando melhor desempenho na flotação, enquanto amostras de menor cristalinidade exigiram doses mais elevadas de coletor para resultados comparáveis (RODRIGUES; BRANDÃO, 1993).

2.2.4 Sistema apatita-carbonatos

O minério fosfático apresenta silicatos e carbonatos como minerais de ganga. A flotação, embora eficiente na separação dos silicatos, tem sua eficácia reduzida pela presença de carbonatos, como calcita e dolomita. A similaridade entre as características físico-químicas superficiais dos carbonatos e da apatita compromete a seletividade do processo, uma vez que os sais de ácidos graxos, como o oleato, adsorvem-se através dos sítios desse cátion metálico na superfície dos minerais (RAO; FORSSBERG, 1990; HASSANZADEH *et al.*, 2020; ABOUZEID *et al.*, 2009).

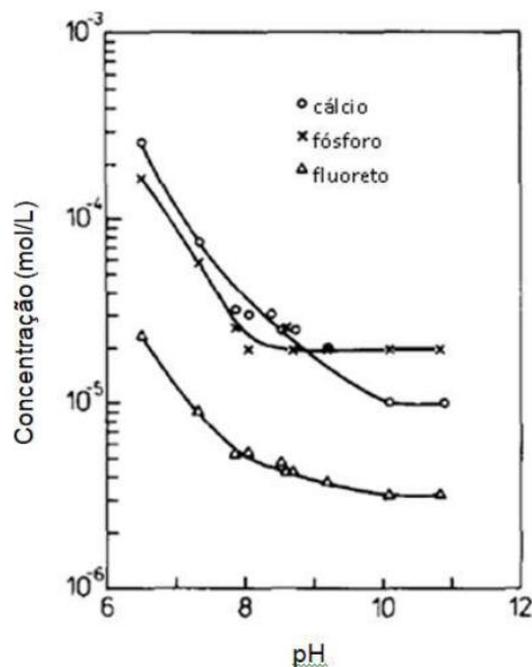
A justificativa para a semelhança no comportamento entre minerais fosfáticos e minerais de ganga durante a flotação aniônica está na afinidade de suas composições químicas de superfície, associada à alta atividade de superfície dos coletores utilizados. No entanto, a

interação entre ânions e cátions dissolvidos compromete a seletividade do processo, permitindo a adsorção global tanto para apatitas quanto para ganga carbonática. A flotação das apatitas com ácidos graxos ocorre em pH alcalino, resultando em recuperações expressivas de fósforo. Contudo, a obtenção de seletividade entre apatita e ganga dolomítica se torna crítica quando esta última compõe mais de 25% da rocha fosfática (MONTE; PIMENTEL, 2021).

As apatitas ígneas, que possuem baixa área superficial, mostram-se mais solúveis em pH baixos, o que resulta em uma maior flotabilidade. Esse comportamento apoia a teoria de que ocorre precipitação superficial durante a adsorção do oleato, uma vez que condições que aumentam a solubilidade do mineral também promovem uma maior liberação de íons Ca^{2+} próximos à partícula (HORTA; MONTE; LEAL FILHO, 2016; ZHONG; VASUDEVAN; SOMASUNDARAN, 1993).

Conforme Santos (2022), os carbonatos, assim como os fosfatos, são classificados como minerais semi-solúveis, caracterizados por uma solubilidade significativa, maior do que a de muitos minerais compostos por óxidos e silicatos, mas menor do que a de minerais altamente solúveis, como halita e silvita. Em contato com água, minerais semi-solúveis passam por um processo de dissolução que é afetado por várias condições do sistema, como força iônica, temperatura, pH, e a presença de outras espécies químicas na solução. O comportamento da fluorapatita em solução aquosa varia com o pH, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Solubilidade da apatita em função do pH



Fonte: adaptado de Rao *et al.*, (1990).

Sua solubilidade diminui em pH ácidos, mantém-se constante entre pH 7 e 11, e aumenta novamente em ambientes altamente alcalinos. A dissolução parcial dos minerais e as propriedades químicas do sistema mineral-solução influenciam a composição química da fase aquosa e a carga das superfícies das partículas minerais na polpa. Para a apatita, a forma solúvel de cálcio ou a espécie predominante de fósforo são determinadas pelas condições da solução e pelo seu domínio de estabilidade (SANTOS, 2022).

Johnston e Leja (1978) *apud* Abouzeid *et al.* (2009) avançaram na compreensão do sistema fosfato-carbonato ao estudar a flotação de apatita e dolomita em meio ácido, na presença de ácido oleico e soluções de fosfato solúvel. Eles observaram que os íons fosfato solúveis suprimem a flotação da apatita, permitindo que a dolomita flutue com facilidade, e que a presença de gesso requer grandes quantidades de fosfato, um efeito que pode ser contrabalançado pela adição de íons sulfato. Além disso, conforme apontado por Bertolucci (1968) *apud* Abouzeid *et al.* (2009) e confirmado por Anazia *et al.* (1991) *apud* Abouzeid *et al.* (2009), a depressão da apatita é explicada pela formação de ligações de hidrogênio mais fortes ao seu redor, enquanto a liberação de CO₂ dos carbonatos em meio ácido perturba essas ligações, facilitando a adsorção do coletor e, conseqüentemente, a flotação dos carbonatos.

Nesse contexto, torna-se necessário conduzir estudos para desenvolver reagentes alternativos, eficientes, ambientalmente seguros e disponíveis na separação entre apatita e carbonatos e selecionar um coletor que responda adequadamente à presença de íons cálcio e magnésio dissolvidos na polpa de minério.

2.3 Óleos amazônicos

O Brasil se destaca como um dos países com uma biodiversidade vegetal excepcional, contendo uma riqueza de mais de 45.000 espécies de plantas, representando aproximadamente 10% do total mundial (MÜGGE *et al.*, 2016). A região amazônica destaca-se pela abundância de frutas e plantas oleaginosas, cuja exploração comercial é de grande importância local. Além disso, as plantas oleaginosas na Amazônia, especialmente as palmeiras, apresentam ácidos graxos insaturados, destacando-se pela presença de altos níveis de ácido oleico (C18:1) e linoleico (C18:2), superando assim outros óleos vegetais, como o de oliva (SERRA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2022).

Os dados mais detalhados disponíveis sobre a composição de ácidos graxos no óleo de Patauá indicam que o ácido oleico e o ácido palmítico, em torno de 75% e 15% respectivamente,

são os principais componentes, representando cerca de 90% do total de ácidos graxos, como pode ser observado na Tabela 3 (SANTOS *et al.*, 2020).

Tabela 3 - Perfil de ácidos graxos do óleo de Patauá

Cadeia Carbonica	Ácidos Graxos	Óleo de Patauá (%)
(C12:0)	Laurico	2.23 ± 0.03
(C16:0)	Palmítico	13.63 ± 0.01
(C16:1)	Palmitoleico	0.86 ± 0.02
(C18:0)	Esteárico	2.95 ± 0.12
(C18:1, ω-9)	Oleico	71.79 ± 0.02
(C18:2, ω-6)	Linoleico	4.72 ± 0.03
(C18:3, ω-3)	Linolênico	0.51 ± 0.00
(C20:1)	Erúcido	0.46 ± 0.00
Ácidos graxos insaturados totais		78.34
Ácidos graxos saturados totais		19.27
Total		97.61

Fonte: Santos *et al.* (2020).

O Patauá (*Oenocarpus bataua*), também conhecido como ungurahui, seje, patawa ou coroba, é uma palmeira com copa ou subcopa, atingindo até 35 metros de altura, distribuída na metade norte da América do Sul, incluindo Panamá e Trinidad. Amplamente encontrado nas florestas amazônicas, essa espécie monoica é essencial para comunidades indígenas, sendo seus frutos utilizados como fonte de óleo para fins medicinais, cosméticos, culinários e na preparação de uma bebida semelhante ao leite (MONTÚFAR, 2010).

2.4 Planejamento experimental

O planejamento experimental é uma metodologia utilizada para investigar como variáveis (fatores) influenciam uma ou mais respostas de interesse. O objetivo é determinar a relação entre os fatores e as respostas de forma sistemática e controlada.

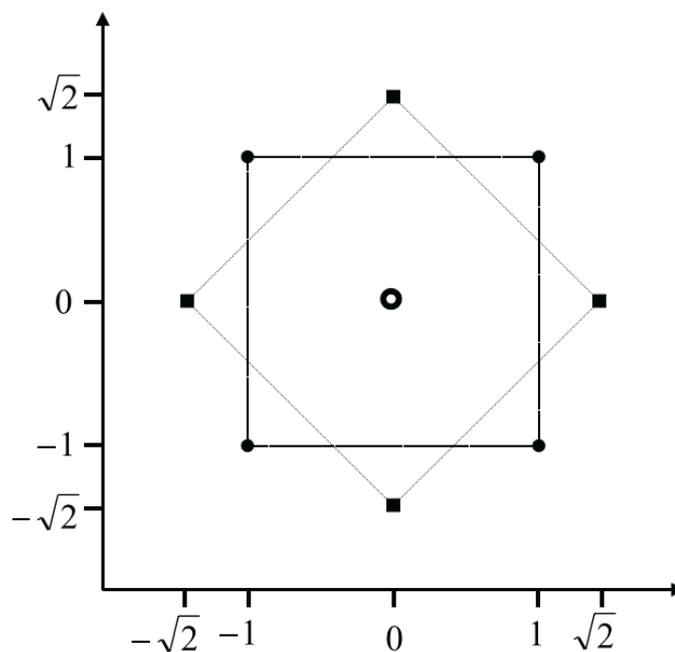
O planejamento fatorial é um método de planejamento experimental, onde se testam todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Para um planejamento fatorial completo com k fatores, onde o fator i possui n_i níveis, o número total de experimentos necessários é dado pela Equação 4:

$$N = n_1 \times n_2 \times \cdots n_k \quad (4)$$

Para um planejamento fatorial de dois níveis, o número de experimentos é dado por 2^k , onde k é o número de fatores. Por exemplo, para $k = 2$, o planejamento fatorial será $2^2 = 4$ experimentos.

O planejamento fatorial 2^2 ampliado em estrela, ou planejamento composto central rotacional, é uma metodologia que adiciona uma configuração rotacionada dos pontos do planejamento fatorial inicial, girando-os 45° . Este planejamento inclui quatro pontos experimentais iniciais, quatro pontos axiais referentes à expansão em estrela com níveis adicionais e três pontos (ou mais) centrais para verificação de erros, resultando em um total de 11 experimentos. A rotação gera uma distribuição octogonal dos pontos, que estão situados a uma distância de $\sqrt{2}$ unidades codificadas do ponto central, conforme demonstrado na Figura 8. Os níveis codificados utilizados são os valores mínimos (-1), máximos ($+1$), os pontos axiais ($-\sqrt{2}$ e $+\sqrt{2}$) e o ponto central (0). Com esses pontos definidos, é gerada a tabela de experimentos, que pode ser aleatorizada para minimizar o efeito de possíveis variabilidades não controladas durante a execução dos experimentos, conforme demonstrado na Tabela 4.

Figura 8 - Representação gráfica do planejamento fatorial em estrela



Fonte: Pereira-Filho *et al.* (2002).

Tabela 4 - Tabela de planejamento fatorial em estrela

Ensaio	Fator A	Fator B
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	$-\sqrt{2}$	0
6	$+\sqrt{2}$	0
7	0	$-\sqrt{2}$
8	0	$+\sqrt{2}$
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os pontos ótimos de operação podem ser estimados a partir de um modelo estatístico polinomial quadrático, conforme a Equação 5, o qual é construído utilizando os dados do planejamento experimental em estrela.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (5)$$

Nesse modelo, y representa a variável de resposta e β_0 é a constante. Os termos X_1 e X_2 correspondem aos valores das variáveis independentes, enquanto β_1 e β_2 são os coeficientes associados aos termos lineares de X_1 e X_2 , respectivamente. Os coeficientes β_{11} e β_{22} representam os termos quadráticos para X_1 e X_2 . Além disso, o coeficiente β_{12} refere-se ao termo de interação entre X_1 e X_2 .

3 METODOLOGIA

Os ensaios foram conduzidos em diferentes laboratórios, incluindo o Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) e o Laboratório de Química (LQ) do CEFET-MG, Campus Araxá, além do Laboratório de Análises Químicas (LAQ) e do Laboratório de Minérios e Materiais (LMM) dos Departamentos de Engenharia de Minas e de Metalurgia e Materiais da UFMG. Os experimentos realizados abrangeram a preparação das amostras, a caracterização da apatita, dolomita e óleo de patauá, os ensaios de saponificação do óleo de patauá, e o planejamento experimental dos ensaios de microflotação utilizando o tubo de Hallimond modificado.

3.1 Preparação das amostras

Neste estudo, foram utilizadas amostras dos minerais apatita e dolomita. A apatita foi extraída da mina "Bigorna", pertencente ao Complexo de Mineração de Tapira (CMT), situado em Tapira, Minas Gerais. A dolomita foi obtida de um depósito da Nexa Resources, localizado entre Vazante e Paracatu, também em Minas Gerais.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) para adequação. Inicialmente, as amostras minerais de apatita e dolomita passaram por processos de fragmentação, utilizando rolo e martelo. Após a redução granulométrica, foi realizada uma catação manual para separar as partículas de apatita livres e mistas do mineral de ganga (magnetita), conforme ilustrado na Figura 9.

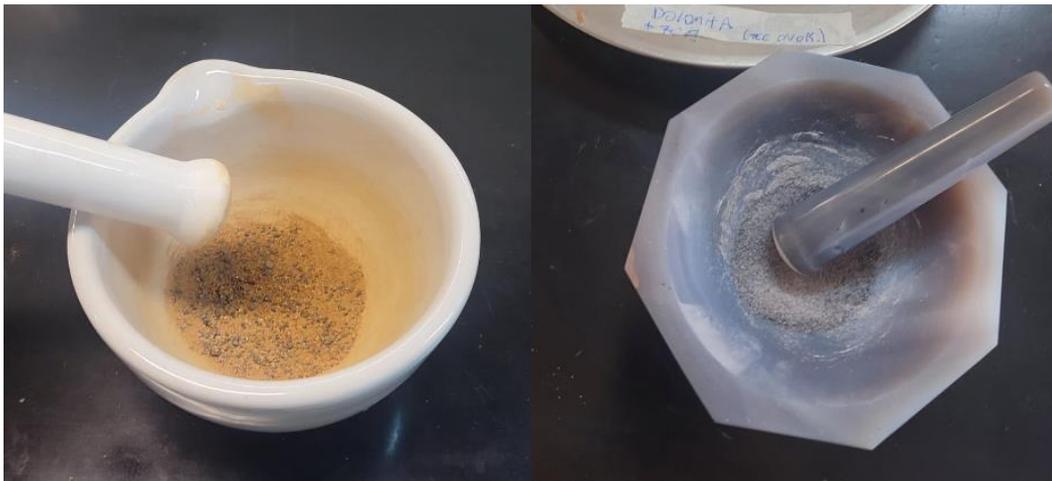
Figura 9 - Partículas de apatita livres, mistas e magnetita



Fonte: Autoria própria (2024).

Em seguida, as amostras de apatita livre e mistas foram fragmentadas em gral e pistilo de porcelana, enquanto as amostras de dolomita foram fragmentadas em gral e pistilo de ágata, devido à dureza do mineral, ilustrado na Figura 10. Após a fragmentação, realizou-se a separação magnética da magnetita residual da apatita, utilizando um bastão magnético de 1500 Gauss.

Figura 10 – Fragmentação das amostras de apatita e dolomita



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a última etapa de fragmentação, as amostras de apatita e dolomita foram peneiradas a úmido, e a faixa granulométrica de $-0,212\text{mm} +0,075\text{mm}$ de cada mineral foi separada. Segundo Lima e Valadão (2008), a flotação é eficaz dentro da faixa de partículas que varia de 10 a $300\mu\text{m}$. Fora desse intervalo, a seletividade do processo diminui significativamente, pois as condições hidrodinâmicas do sistema não conseguem garantir a flotabilidade adequada das partículas. A presença de partículas com tamanhos distintos nos sistemas de flotação pode comprometer a seletividade, uma vez que essas partículas apresentam comportamentos distintos.

Cada amostra de apatita e dolomita foi pesada em $(0,5000 \pm 0,0005)\text{g}$ utilizando uma balança analítica Shimadzu, modelo AUY220, e armazenada em tubos do tipo Eppendorf. No total, foram preparados 80 tubos, com 40 tubos para cada mineral, contendo $0,5000\text{g}$ de apatita ou dolomita em cada um.

3.2 Caracterização das amostras de apatita, dolomita e óleo de patauá

A caracterização da amostra de apatita, realizada previamente por Santos (2019), incluiu técnicas de difratometria de raios X (DRX). A amostra foi fixada em um suporte com

granulometria inferior a 0,038mm por prensagem manual. O difratograma obtido foi então comparado com fichas padrões de minerais disponíveis no banco de dados do *International Centre of Diffraction Data* (ICDD). Para a análise semiquantitativa das fases presentes, foi empregado o método de Rietveld, enquanto para a análise química quantitativa, utilizou-se a espectrometria de emissão óptica com plasma de argônio (ICP-OES).

No estudo conduzido por Souza (2018), a amostra de dolomita foi caracterizada por meio de difração de raios X, utilizando o método do pó total. As análises foram realizadas com o difratômetro de raios X modelo X'Pert³ Powder da PANalytical, equipado com um tubo de cobre que emite radiação Cu-K α com comprimento de onda de 1,5406 Å. As condições de varredura incluíram um arranjo de 2 θ no intervalo de 5 a 90°, tensão de 45 kV, corrente de 40 mA e tempo de coleta de 15 minutos. Essas análises foram efetuadas no Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X do DEMIN/UFOP, utilizando o *software Data Collector* para obter os difratogramas. A interpretação dos difratogramas foi realizada com o *software HighScorePlus*, utilizando a base de dados PDF-4 da ASTM para a análise qualitativa e a quantificação mineralógica através do método de refinamento de Rietveld. A análise química da dolomita foi conduzida no Laboratório Químico da Votorantim Metais, unidade Vazante, empregando um espectrofotômetro de absorção atômica (AAS) modelo 725 da Agilent, determinando os teores de Zn, Mg, Ca, Pb, Fe, Ag, Cu, SiO₂ e outros elementos.

Na caracterização da amostra de óleo de patauá, conduzida previamente por Santos (2019), foram empregadas técnicas de cromatografia gasosa (CG). Após a saponificação do óleo de patauá, os produtos sólidos resultantes foram submetidos à análise por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

3.3 Ensaio de saponificação do óleo de Patauá

O método de saponificação alcoólica, realizado previamente por Santos (2019), foi aplicado ao óleo de patauá, sendo conduzido a uma temperatura de 75°C com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em etanol anidro, seguido de refluxo. A saponificação do coletor foi realizada reagindo 4g de óleo de patauá com 100mL de uma solução alcoólica de NaOH a 2% (m/v) em um balão volumétrico, conforme ilustrado na Figura 11. Este sistema foi submetido a aquecimento em chapa aquecedora e refluxo, com um condensador, ao longo de um período de 60 minutos.

Figura 11 - Saponificação alcoólica do óleo de patauá



Fonte: Santos (2019).

O produto resultante da saponificação foi filtrado por meio de filtros de papel e, posteriormente, conduzido à estufa, onde foi mantido a uma temperatura de 80°C por 24 horas. A eficiência da saponificação foi avaliada por meio da análise FTIR dos produtos sólidos.

3.4 Planejamento experimental dos ensaios de microflotação em tubo de Hallimond

No planejamento fatorial em estrela desenvolvido para os ensaios com apatita e dolomita, foram definidos dois fatores principais: a concentração de coletor derivado do óleo de patauá e o pH. A concentração de coletor foi variada entre dois níveis extremos, com 10mg/L representando o nível baixo (-1) e 25mg/L o nível alto (+1). Da mesma forma, o pH foi ajustado para dois níveis extremos, sendo 7 o nível baixo e 10 o nível alto.

Esses níveis permitiram a criação de combinações experimentais que abrangeram tanto os pontos fatoriais, que são as combinações extremas das variáveis, quanto os pontos estrela, que investigam efeitos não lineares e interações das variáveis em níveis intermediários. O ponto central foi estabelecido com a concentração de coletor e o pH ajustados para 17,5mg/L e 8,5, respectivamente, representando a média entre os níveis extremos.

Foram realizados quatro experimentos no ponto central para aferir a precisão na estimativa da variabilidade experimental. Além disso, a realização dos ensaios foi aleatorizada

para minimizar o impacto de variações não controladas durante a execução dos experimentos, conforme demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Planejamento fatorial dos ensaios de microflotação

Ordem de ensaio	Apatita				Ordem de ensaio	Dolomita			
	Concentração coletor (mg/L)	Nível	pH	Nível		Concentração coletor (mg/L)	Nível	Ph	Nível
1	10,00	-1	7,0	-1	13	17,50	0	10,6	+√2
2	25,00	+1	10,0	+1	14	17,50	0	8,5	0
3	10,00	-1	10,0	+1	15	6,89	-√2	8,5	0
4	17,50	0	8,5	0	16	17,50	0	6,4	-√2
5	17,50	0	8,5	0	17	10,00	-1	10,0	+1
6	17,50	0	6,4	-√2	18	17,50	0	8,5	0
7	25,00	+1	7,0	-1	19	17,50	0	8,5	0
8	17,50	0	8,5	0	20	25,00	+1	10,0	+1
9	17,50	0	8,5	0	21	28,11	+√2	8,5	0
10	17,50	0	10,6	+√2	22	25,00	+1	7,0	-1
11	28,11	+√2	8,5	0	23	17,50	0	8,5	0
12	6,89	-√2	8,5	0	24	10,00	-1	7,0	-1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Cada ensaio foi realizado com 0,5000g de apatita ou 0,5000g de dolomita como alimentação, conforme especificado na Tabela 6 e utilizando os parâmetros contínuos da Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros constantes dos testes de microflotação.

Parâmetros	Valor
Tempo de condicionamento (min)	3,0
Tempo de flotação (min)	1,0
Granulometria da amostra (mm)	-0,212 +0,075
Massa de alimentação (g)	0,5000
Volume no tubo de Hallimond (mL)	245,0
Vazão de N ₂	40mL.min ⁻¹
Agitação	Suspensão das partículas com mínimo arraste

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Inicialmente, os ensaios de microflotação com apatita e dolomita foram realizados posicionando a parte inferior do tubo sobre o agitador. Em seguida, uma barra magnética foi colocada no fundo do tubo de Hallimond, junto com aproximadamente 25mL da solução de

coletor, ajustada com a concentração e pH especificados para o ensaio. O agitador foi acionado na velocidade desejada, e a amostra mineral, previamente pesada, foi adicionada ao tubo, marcando o início do cronômetro e completando a montagem do tubo. Pouco antes de finalizar o tempo de condicionamento, o tubo foi preenchido com o restante da solução utilizada anteriormente. Após o término do condicionamento, o gás foi liberado e a flotação foi realizada por 1 minuto. Em seguida, o material flotado e o material afundado foram separados e filtrados em filtros de papel. Por fim, as frações coletadas foram secas e pesadas após 24 horas em estufa a 100°C, garantindo a completa remoção da água.

A partir dos pesos do material flotado e afundado, obtiveram-se os valores de flotabilidade e perda de massa em cada ensaio por meio das Equações 6 e 7. Os ensaios de arraste foram realizados em quintuplicata para as duas amostras minerais em água destilada e podem ser observados no Apêndice A. Prosseguiu-se com a análise dos resultados utilizando o programa estatístico Minitab® 18, onde a variável de resposta foi a flotabilidade, analisada quanto às influências isoladas ou interações com outras variáveis do sistema. Os resultados dos 24 experimentos foram analisados estatisticamente com um intervalo de confiança de 95%.

$$\textit{Flotabilidade} (\%) = \left(\frac{(\textit{Massa flotado})}{(\textit{Massa flotado} + \textit{Massa afundado})} \times 100 \right) - \textit{arraste} \quad (6)$$

$$\textit{Perda de massa} (\%) = \left(1 - \frac{(\textit{Massa flotado} + \textit{Massa afundado})}{(0,5)} \right) \times 100 \quad (7)$$

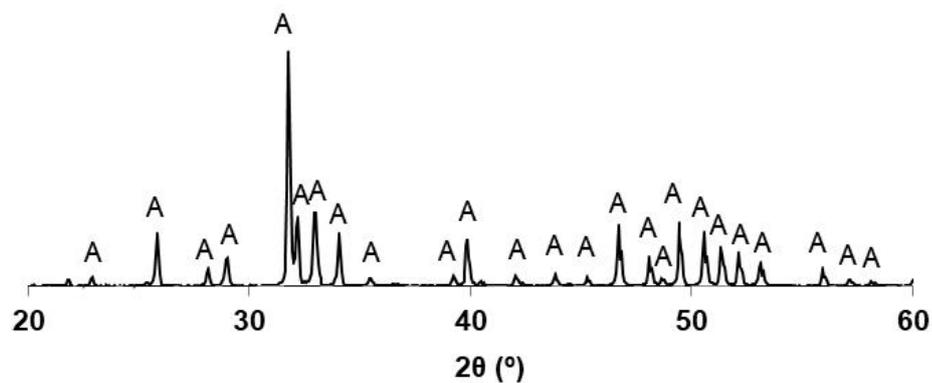
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, seguem apresentados os resultados relacionados à caracterização das amostras de apatita e dolomita, do óleo de patauá, e dos produtos sólidos resultantes do processo de saponificação. Além disso, foram discutidos os resultados dos ensaios de microflotação, juntamente com o tratamento estatístico dos dados coletados. Também foi incluída uma discussão sobre os resultados, visando proporcionar uma compreensão abrangente dos resultados obtidos e das implicações de cada um deles.

4.1 Caracterização das amostras minerais

A Figura 12 exibe o difratograma da apatita, destacando picos (A) que são típicos deste mineral. A pureza do mineral foi determinada superior a 90% mediante refinamento pelo método de Rietveld.

Figura 12 - Difratograma de raios X da amostra de apatita



Fonte: Santos (2019).

Legenda: ICDD – A: apatita

A análise química realizada com a técnica ICP-OES revelou que a amostra contém 90,58% de apatita. Os níveis dos elementos presentes na amostra estão listados na Tabela 7.

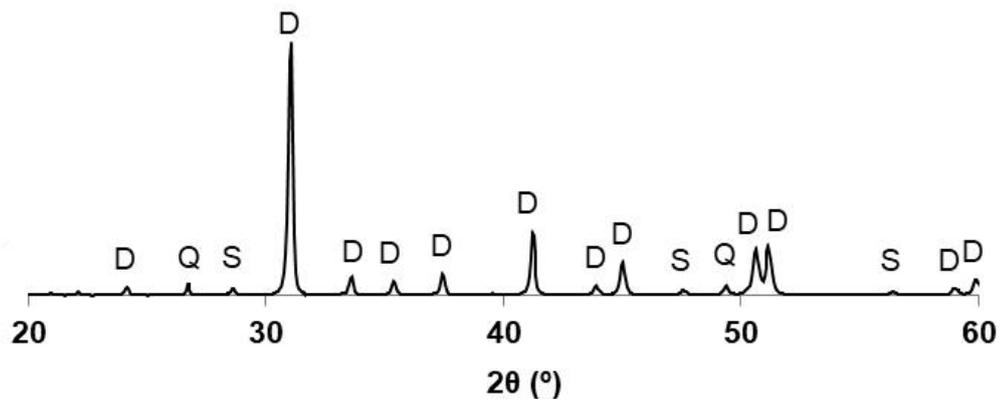
Tabela 7 - Análise química da apatita

	Ca	Fe	Na	P	Si	Sr	Ti
Teor (%)	34,67	0,78	0,06	16,32	0,31	0,16	0,05

Fonte: Santos (2022).

A Figura 13 apresenta a composição mineralógica da amostra de dolomita no difratograma de raio X.

Figura 13 - Difratograma de Raios X da amostra de dolomita.



Fonte: Santos (2022).

Legenda: ICDD - D: dolomita (84-2065), Q: quartzo (88-2302), S: esfalerita (05-0566)

A Tabela 8 apresenta a análise química da dolomita previamente caracterizada por Souza (2018). A dolomita pura ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) contém 21,7% de Ca e 13,2% de Mg. Assumindo que o cálcio presente na amostra (17,84%) provém exclusivamente da dolomita, a pureza calculada é de 82,21%. Usando o mesmo método para o teor de magnésio (11,88%), a amostra tem uma pureza de 90,10%, valores consistentes com os obtidos pela difração de raios X.

Tabela 8 - Composição química da amostra de dolomita

	Zn	Pb	Fe	Ca	Mg	Outros
Teor (%)	0,18	0,01	0,78	17,84	11,88	69,31

Fonte: Souza (2018)

4.2 Caracterização do óleo de patauá e coletor

Santos (2019) conduziu uma análise por cromatografia em fase gasosa (CG) do óleo de patauá, utilizando um procedimento analítico padrão amplamente empregado em laboratórios de controle e qualidade. Esse método permitiu a determinação do perfil graxo do óleo, cujos resultados estão detalhados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização do óleo de patauá (% de massa)

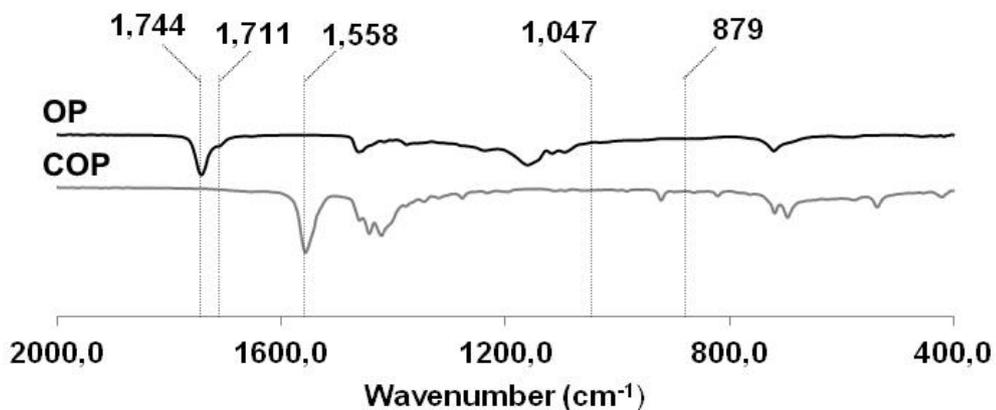
Ácido Graxo	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	Outros	Total
Patauá	0,7	0,5	11,5	0,7	4,4	75,0	5,9	0,5	0,3	0,5	100,0

Fonte: Adaptado de Santos (2019).

Observou-se que o ácido oleico (C18:1) representa 75,0% da composição do óleo de patauá, além de 11,5% de ácido palmítico (C16:0) e 5,9% de ácido linoleico (C18:2). Essa análise revelou a participação majoritária do ácido oleico na composição da amostra graxa avaliada, sendo este um dos principais ácidos graxos utilizados na flotação de minerais levemente solúveis, conforme apontado por Costa (2012).

Após a saponificação do óleo de patauá, os produtos sólidos obtidos foram analisados por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A análise dos resultados revelou padrões específicos nas bandas geradas, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - FTIR do óleo de patauá e coletor de óleo de patauá



Fonte: Santos (2022).

A maior banda foi observada em $1558,00\text{cm}^{-1}$, característica de sais sódicos. A região entre 1600cm^{-1} e 2000cm^{-1} , que é típica de ácidos graxos livres, não apresentou bandas, indicando que a saponificação do óleo vegetal foi eficaz.

4.3 Resultados dos ensaios de microflotação

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de microflotação realizados para determinar a flotabilidade dos minerais apatita e dolomita em diferentes condições de concentração do coletor e pH.

Tabela 10 - Flotabilidade da apatita e dolomita nos ensaios de microflotação

Ensaio	Apatita				Ensaio	Dolomita			
	Concentração coletor (mg/L)	pH	Flotabilidade (%)	Perda (%)		Concentração coletor (mg/L)	pH	Flotabilidade (%)	Perda (%)
1	10,00	7,0	14,73	4,45	13	17,50	10,6	62,62	9,06
2	25,00	10,0	43,78	8,68	14	17,50	8,5	70,78	1,82
3	10,00	10,0	7,20	9,70	15	6,89	8,5	51,98	1,06
4	17,50	8,5	25,22	2,82	16	17,50	6,4	33,25	3,68
5	17,50	8,5	22,13	3,66	17	10,00	10,0	67,10	0,40
6	17,50	6,4	7,01	3,34	18	17,50	8,5	72,46	2,02
7	25,00	7,0	6,39	3,82	19	17,50	8,5	70,21	3,28
8	17,50	8,5	20,36	2,82	20	25,00	10,0	66,82	3,76
9	17,50	8,5	18,83	2,70	21	28,11	8,5	71,56	3,60
10	17,50	10,6	16,84	2,28	22	25,00	7,0	56,85	2,64
11	28,11	8,5	14,47	3,02	23	17,50	8,5	72,81	3,66
12	6,89	8,5	12,47	3,60	24	10,00	7,0	38,82	3,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a apatita, observou-se que a flotabilidade variou significativamente, com valores que foram de 6,39% a 43,78%. O maior índice de flotabilidade foi obtido no ensaio número 2, com uma concentração de coletor de 25mg/L e pH 10,0. Já o menor índice ocorreu no ensaio número 7, com 6,39% de flotabilidade, sob concentração de 25mg/L e pH 7,0.

No caso da dolomita, a flotabilidade apresentou valores mais elevados em comparação à apatita, variando de 33,25% a 72,81%. O maior valor de flotabilidade foi registrado no ensaio número 23, com concentração de coletor de 17,50mg/L e pH 8,5. Contrariamente, o menor valor foi observado no ensaio número 16, com 33,25%, em que a concentração do coletor foi 17,5mg/L e pH 6,4.

Utilizando os valores de flotabilidade obtidos, realizou-se um tratamento estatístico por meio do software Minitab®, com nível de confiança de 95%. Primeiramente foi realizado a análise de variância que mostram quais efeitos principais e interações são significativas para a apatita e para a dolomita.

Na Tabela 11, referente à apatita, observou-se que o modelo geral explicou 83,50% da variação nos dados, com um valor-P de 0,024, indicando que o modelo foi significativo. A maior contribuição foi observada na interação entre a concentração do coletor e o pH, que representou 43,34% da variação total, com um valor-P de 0,007, demonstrando uma interação significativa entre esses fatores.

Tabela 11 - Análise da variância de apatita

Fonte	GL	Contribuição (%)	Valor-P
Modelo	5	83,50	0,024
Linear	2	30,94	0,042
Concentração coletor	1	10,37	0,1
pH	1	20,57	0,34
Quadrado	2	9,22	0,264
Concentração coletor*Concentração coletor	1	2,40	0,265
pH*pH	1	6,83	0,166
Interação com 2 Fatores	1	43,34	0,007
Concentração coletor*pH	1	43,34	0,007
Erro	6	16,50	
Total	11	100	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os efeitos lineares, compostos pela concentração do coletor e pH, contribuíram com 30,94% da variação, sendo o valor-P significativo em 0,042. No entanto, individualmente, a concentração do coletor (10,37%) e o pH (20,57%) não foram estatisticamente significativos, com valores-P de 0,1 e 0,34, respectivamente. Os termos quadráticos, que consideraram a concentração do coletor ao quadrado e o pH ao quadrado, explicaram 9,22% da variação, mas não foram significativos.

A não significância dos efeitos principais pode indicar que a resposta da apatita aos fatores estudados é complexa e pode depender mais das interações entre os fatores do que de seus efeitos diretos. Isso significa que, para otimizar a separação da apatita, pode ser necessário ajustar ambos os fatores simultaneamente, em vez de focar em um único fator.

Na Tabela 12, que analisou a dolomita, o modelo geral foi altamente significativo, explicando 98,42% da variação nos dados, com um valor-P de 0,000. A análise dos efeitos lineares mostrou que a concentração do coletor e o pH foram altamente significativos, com contribuições de 12,92% e 39,89%, respectivamente, ambos com valor-P de 0,000.

Tabela 12 - Análise de variância de dolomita

Fonte	GL	Contribuição (%)	Valor-P
Modelo	5	98,42	0,000
Linear	2	52,79	0,000
Concentração coletor	1	12,92	0,000
pH	1	39,89	0,000
Quadrado	2	41,43	0,000
Concentração coletor*Concentração coletor	1	1,37	0,003
pH*pH	1	40,06	0,000
Interação com 2 Fatores	1	4,20	0,007
Concentração coletor*pH	1	4,20	0,007
Erro	6	1,58	
Total	11	100	

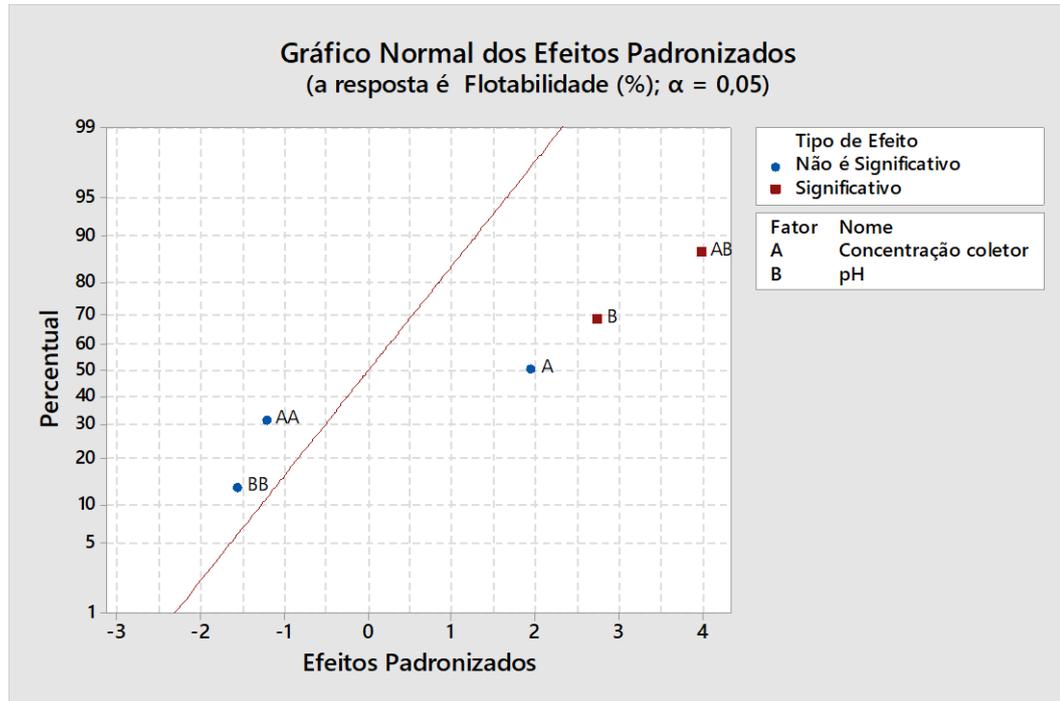
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os termos quadráticos também foram significativos, contribuindo com 41,43% da variação, com destaque para o pH ao quadrado, que explicou 40,06% da variação e teve um valor-P de 0,000. A interação entre a concentração do coletor e o pH, embora menor em contribuição (4,20%), também foi significativa, com um valor-P de 0,007.

O efeito principal do pH foi especialmente notável, contribuindo com quase 40% da variação nos resultados. Isso sugere que o pH desempenhou um papel crucial na modificação das condições de superfície da dolomita, influenciando diretamente sua interação com o coletor. O efeito significativo da concentração do coletor também indica que a quantidade de reagente presente no sistema teve um impacto direto na eficiência do processo de separação da dolomita.

As Figuras 15 e 17 ilustram os efeitos padronizados da concentração do coletor e do pH na flotabilidade da apatita e da dolomita.

Figura 15 - Gráfico normal dos efeitos padronizados para flotabilidade de apatita



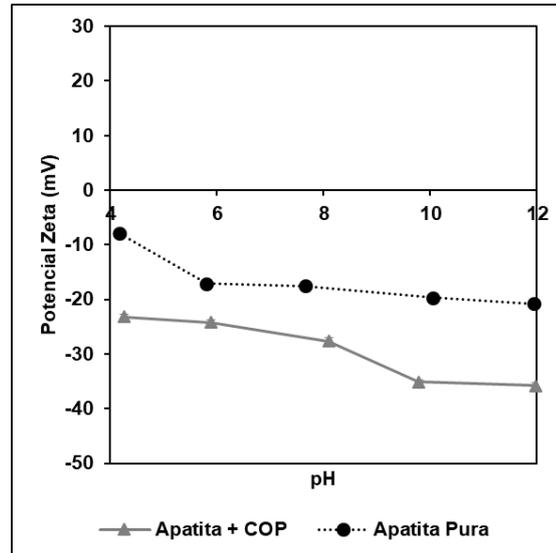
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise do efeito da interação entre a concentração do coletor e o pH (AB) mostrou que essa interação foi a mais significativa para a flotabilidade da apatita, destacando-se por estar acima e distante da linha de significância. Isso indicou uma interação positiva entre os fatores, sugerindo que a combinação desses parâmetros tem um impacto relevante na flotabilidade. De forma semelhante, o efeito individual do pH (B) também se mostrou significativo, evidenciando que o pH, por si só, exerceu um efeito positivo na flotabilidade da apatita. Dessa forma, ficou clara a relação direta entre o pH e a flotabilidade da apatita, onde, dentro da faixa avaliada, quanto maior o pH do sistema, maior a flotabilidade. Em contraste, a concentração do coletor, assim como as interações quadráticas da concentração do coletor (AA) e do pH (BB), não apresentaram significância.

Santos (2022) discute o potencial zeta da superfície da apatita, tanto na sua forma pura quanto após o condicionamento com o coletor obtido a partir da saponificação do óleo de patauá. De acordo com os resultados de ensaios de eletroforese (Figura 16), foi constatado que o potencial de superfície da apatita apresenta ponto isoelétrico (PIE) inferior a 4, tanto na forma pura quanto após o condicionamento. Ou seja, em toda a faixa de pH avaliada, a superfície das partículas minerais de apatita permaneceu negativa, reduzindo ainda mais esse valor progressivamente com o aumento do pH. Tal comportamento indica uma maior adsorção do coletor na superfície mineral com o aumento do pH, reforçando a hidrofobicidade da mesma, o

que favorece sua adesão às bolhas e, conseqüentemente, sua coleta. Esse fenômeno explica a relação direta entre o pH e a flotabilidade da apatita.

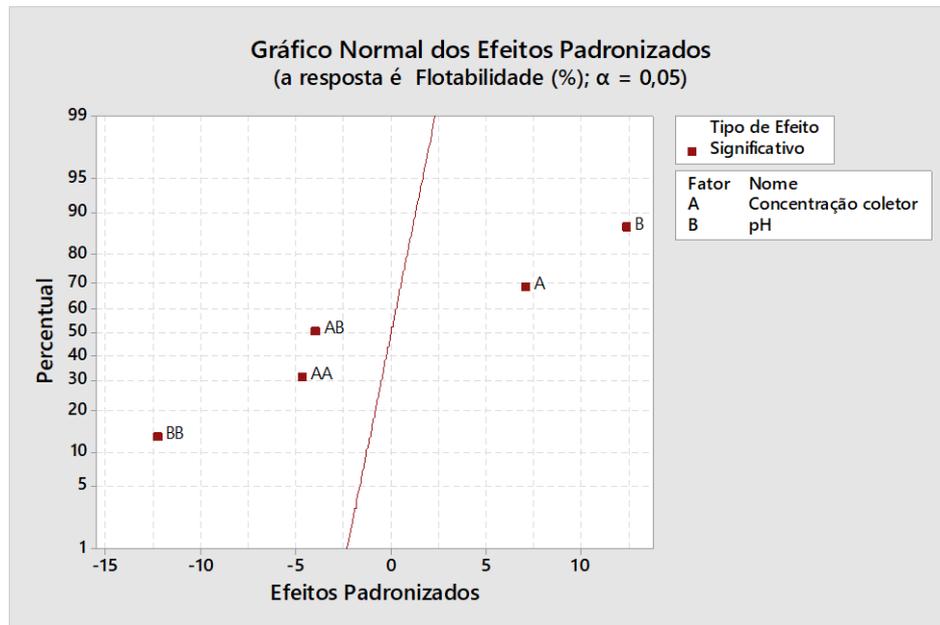
Figura 16 - Potencial zeta em função do pH da apatita pura e condicionada com coletor de óleo de patauá



Fonte: Santos (2022).

O efeito não significativo da concentração isoladamente pode ser atribuído à elevada influência do pH sobre a carga de superfície das partículas, evidenciada pelos resultados dos ensaios de eletroforese. Assim, essa característica pode sobrepor e mascarar a influência da concentração, que é menos expressiva em relação ao pH. Ou seja, uma hipótese seria que já em baixas concentrações de coletor, observa-se a formação do filme hidrofóbico em condições similares às de concentrações maiores, limitadas pelas características estruturais do coletor. Mesmo assim, quando avaliada em conjunto com o pH (interação), a concentração apresenta relação direta com a flotabilidade da apatita, potencializando o efeito do pH no sistema.

Figura 17 - Gráfico normal dos efeitos padronizados para flotabilidade de dolomita

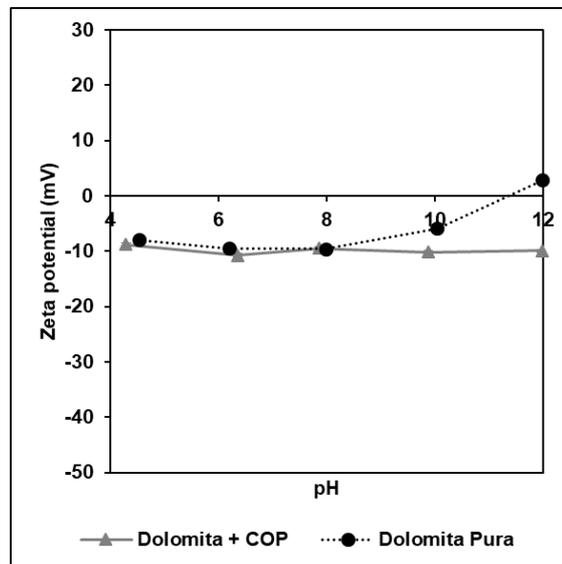


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Já para a dolomita, tanto a concentração do coletor (A) quanto o pH (B) mostraram efeitos positivos na flotabilidade, como evidenciado pelos pontos A e B posicionados acima da linha de significância, sendo o pH o fator mais expressivo. As interações entre os fatores (AB) e as interações quadráticas (AA e BB) foram significativas, porém com efeito negativo, destacando-se a interação quadrática do pH (BB) como a mais expressiva.

Tal comportamento pode ser discutido à luz do potencial de superfície das partículas, puras e após condicionamento, conforme realizado para a apatita, conforme a Figura 18. Santos (2022) discute que, acima do PIE, após o condicionamento, observa-se uma relação inversa entre o pH e o potencial de superfície das partículas, similar à apatita, mas com valores absolutos inferiores. Portanto, a influência do pH se apresenta de forma similar ao discutido para a apatita, mas com um efeito positivo também da concentração, que favorece a hidrofobização da partícula com o seu aumento, embora de forma menos expressiva que o pH.

Figura 18 - Potencial zeta em função do pH da dolomita pura e condicionada com coletor de óleo de patauá

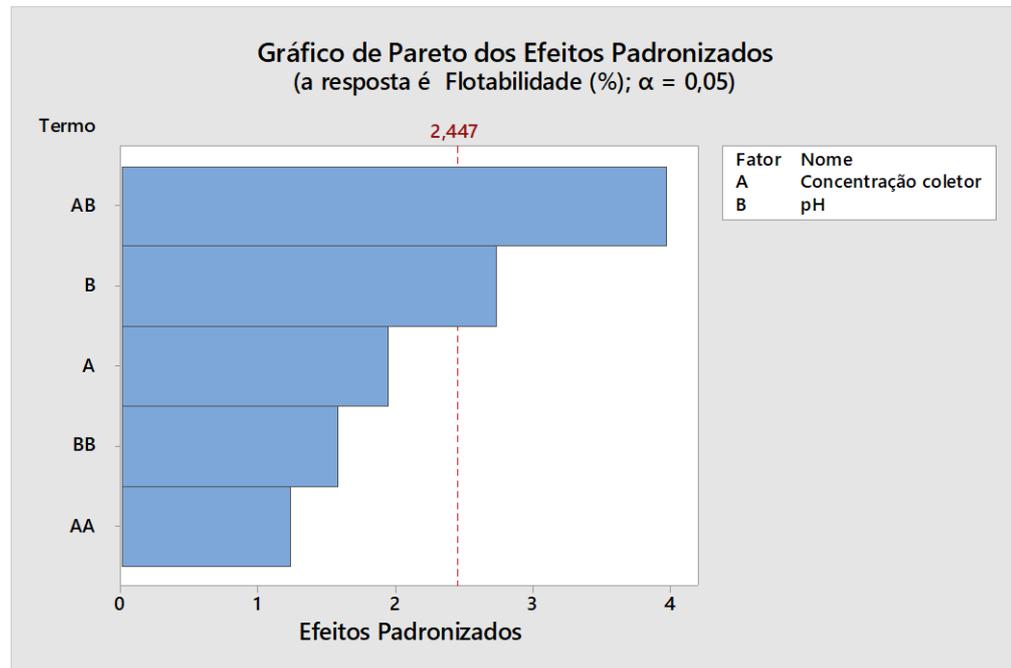


Fonte: Santos (2022).

Ao avaliar a interação das variáveis (pH e concentração de coletor), observa-se um efeito negativo sobre a flotabilidade da dolomita, mesmo que com menor significância. Esse fenômeno pode ser discutido à luz da reação de especiação do coletor empregado, uma vez que ela é dependente do pH do meio. Além disso, a concentração do coletor, isoladamente, é significativa para o sistema. Ou seja, quanto maior o pH do sistema, maior a formação de compostos sem a função de hidrofobização, devido à protonação do carboxilato formado. Assim, com o aumento do pH, a fase ativa do coletor tende a diminuir no sistema, prejudicando a hidrofobização das partículas de dolomita, sua adesão às bolhas e sua efetiva coleta no flotado.

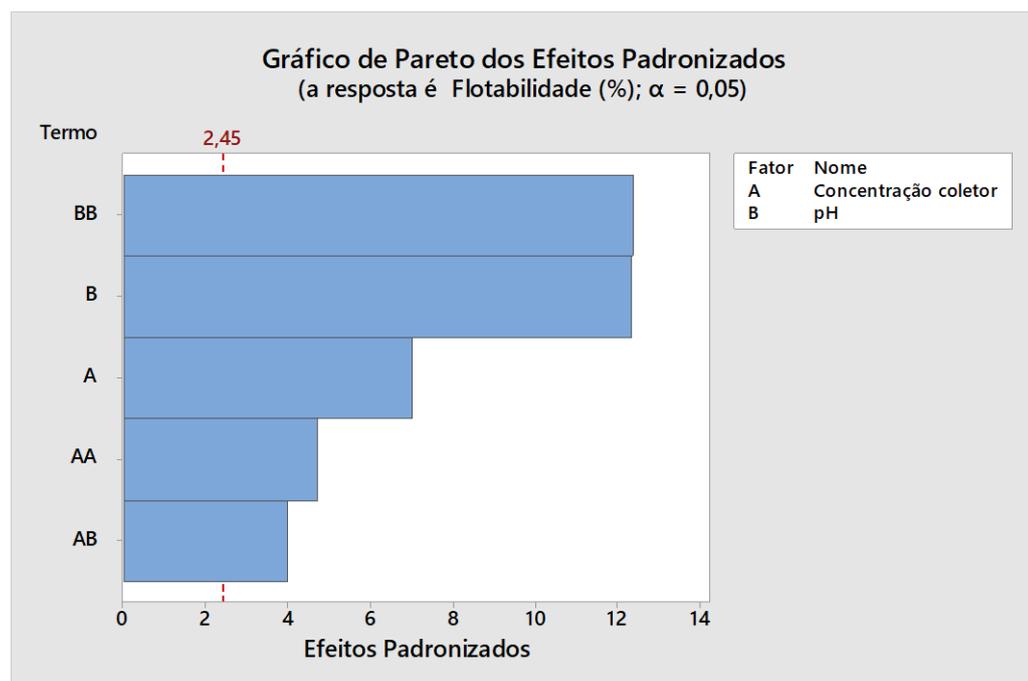
As Figuras 19 e 20 ilustraram a magnitude da contribuição de cada fator para a flotabilidade dos minerais apatita e dolomita. Quanto mais afastada do limite de significância, maior foi a influência da variável sobre a flotabilidade.

Figura 19 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a apatita



No caso da apatita, a interação entre a concentração do coletor e o pH (AB) revelou-se significativa, assim como o efeito individual do pH (B), corroborando com a análise dos efeitos padronizados.

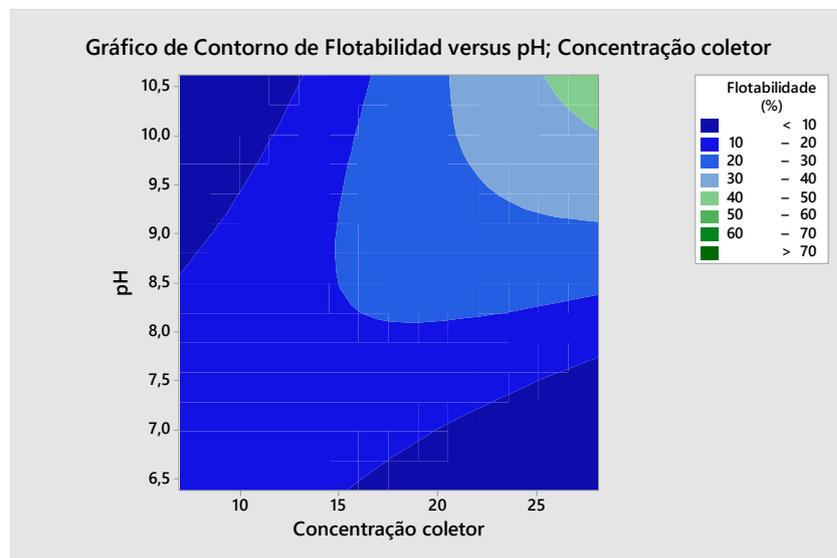
Figura 20 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a dolomita



Para a dolomita, todos os fatores mostraram-se significativos, com a interação quadrática do pH (BB) e o pH (B) apresentando as maiores expressividades, seguidos pela concentração do coletor (A), como constatado pela análise dos efeitos padronizados.

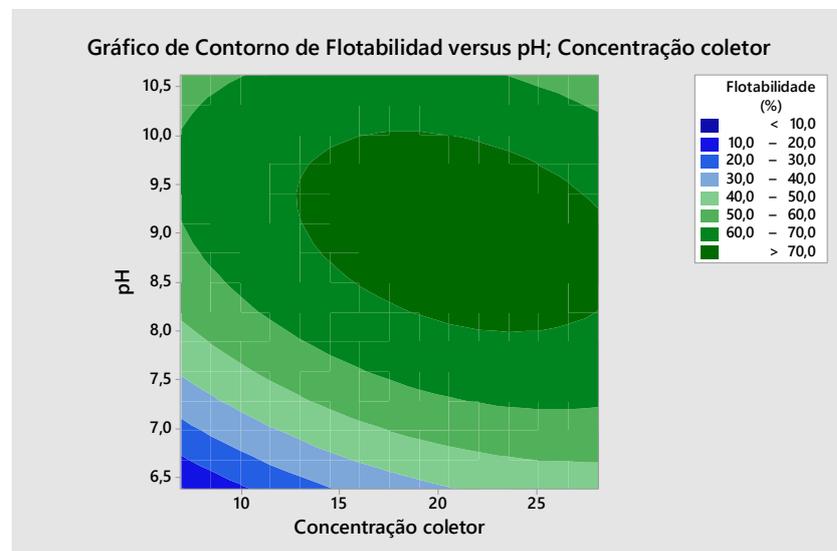
Os gráficos apresentados nas Figuras 21 e 22 mostram o contorno da flotabilidade em função do pH e da concentração do coletor. Observou-se que a maior região de flotabilidade da apatita ocorreu em pHs alcalinos e em altas concentrações de coletor. Em contraste, para a dolomita, a maior região de flotabilidade foi identificada em concentrações de coletor variando entre 15 a 25mg/L e em pHs entre 8 a 10.

Figura 21 - Regiões de flotabilidade de apatita



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 22 - Regiões de flotabilidade de dolomita

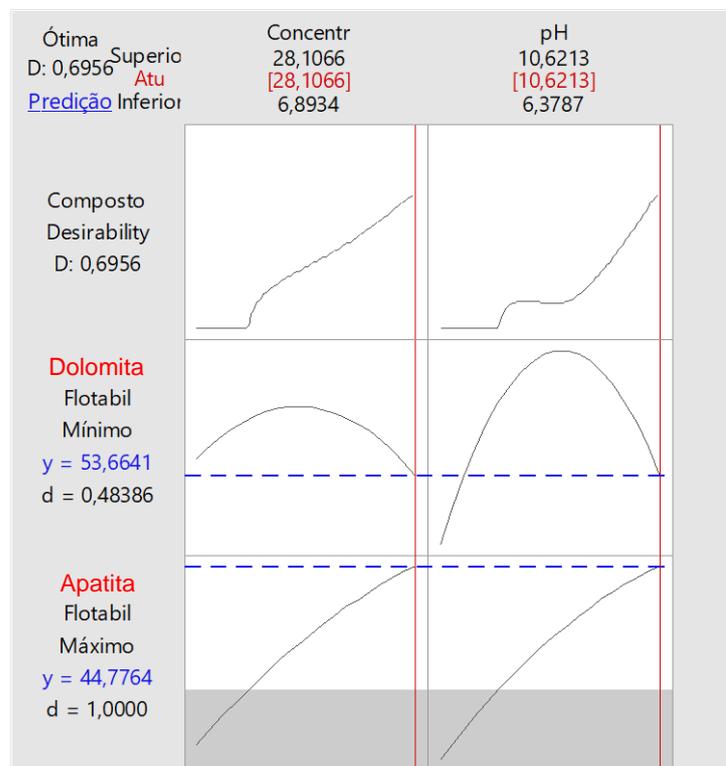


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A otimização dos resultados de flotabilidade para os minerais apatita e dolomita foi conduzida com o objetivo de maximizar a seletividade do processo de separação. Dois cenários distintos foram analisados. O primeiro visando maximizar a flotabilidade da apatita enquanto minimizava a flotabilidade da dolomita, e o segundo com o objetivo oposto, maximizando a flotabilidade da dolomita e minimizando a flotabilidade da apatita.

No primeiro cenário, ilustrado na Figura 23, o resultado da otimização proporcionou uma flotabilidade máxima de 44,7764% para a apatita, com 28,106mg/L de concentração de coletor e em pH 10,6213. Entretanto, a flotabilidade mínima alcançada para a dolomita foi de 53,6641%. A análise desses resultados revelou que, apesar dos esforços para aumentar a seletividade, a flotabilidade da dolomita permaneceu relativamente alta. Isso sugere que, sob as condições ótimas estabelecidas, a diferença entre a capacidade de flotação da apatita e da dolomita não foi suficiente para garantir uma separação eficaz dos minerais.

Figura 23 - Maximização da flotabilidade da apatita e minimização da flotabilidade da dolomita

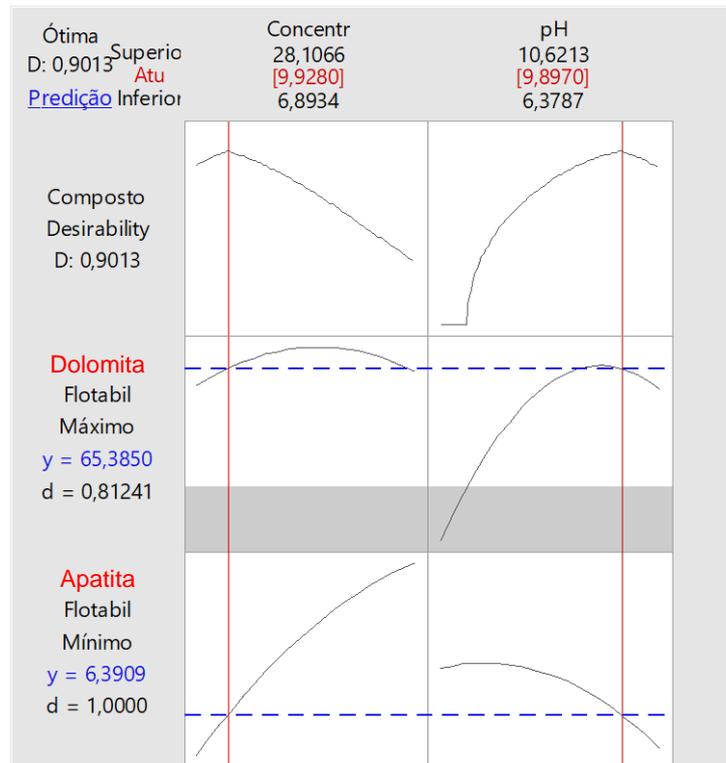


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

No segundo cenário, ilustrado na Figura 24, a otimização foi direcionada para maximizar a flotabilidade da dolomita, ao mesmo tempo em que se buscava minimizar a

flotabilidade da apatita. Nesse contexto, a flotabilidade máxima da dolomita atingiu 65,3850%, enquanto a flotabilidade mínima da apatita foi reduzida para 6,3909%, quando em 9,928mg/L de concentração de coletor e em pH 9,897.

Figura 24 - Maximização da flotabilidade da dolomita e minimização da flotabilidade da apatita



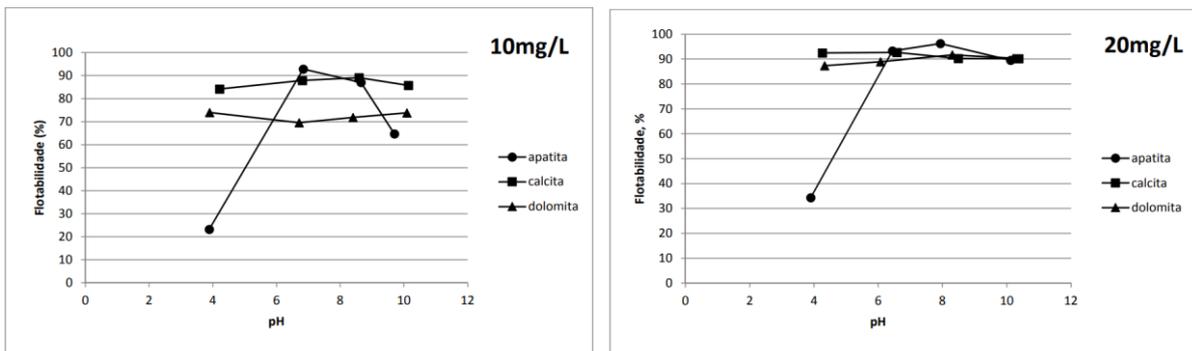
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Esses resultados indicaram uma separação mais eficiente entre os dois minerais em comparação ao primeiro cenário. A apatita apresentou uma flotabilidade substancialmente mais baixa, enquanto a dolomita atingiu uma flotabilidade elevada, favorecendo a separação seletiva dos minerais. Esse cenário sugere, juntamente com a avaliação dos valores de flotabilidade alcançados, que as condições estabelecidas têm potencial para a separação seletiva dos minerais no processo de flotação reversa de apatita.

Como vantagens deste cenário de seletividade, podem ser destacadas a baixa concentração empregada e o pH identificado, que se mostra próximo ao pH das polpas condicionadas industrialmente. Isso representa uma economia significativa, já que demanda menor quantidade de reagentes para o ajuste de pH do sistema, um fator crucial no ambiente industrial.

No estudo realizado por Lopes (2013), o reagente coletor Hidrocol, derivado de óleo de soja parcialmente hidrogenado e amplamente utilizado na indústria, foi testado na flotação dos minerais apatita, dolomita e calcita em concentrações de 10 e 20mg/L e pH variando de 4 a 10. Todos os minerais apresentaram alta flotabilidade, conforme ilustrado na Figura 25. Apenas a apatita demonstrou sensibilidade ao pH da solução, exibindo baixa flotabilidade em pH 4.

Figura 25 - Flotabilidade em função do pH para apatita, calcita e dolomita usando 10 e 20mg/L de Hidrocol



Fonte: Lopes (2013).

Apesar de a flotabilidade da apatita obtida na presente pesquisa com o coletor de óleo de pataúá não ter sido tão expressiva quanto a do Hidrocol, a flotabilidade da dolomita foi significativa. Além disso, observou-se uma considerável janela de seletividade ao utilizar o óleo de pataúá, o que representa uma vantagem em relação ao Hidrocol, cuja seletividade foi observada de forma expressiva apenas em pH 4.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de microflotação demonstraram a complexidade envolvida na separação seletiva dos minerais apatita e dolomita. A análise dos dados indicou que a flotabilidade da apatita foi fortemente influenciada pela interação entre a concentração do coletor e o pH, embora os efeitos principais individuais de ambos os fatores não tenham sido significativos. No caso da apatita, a maior flotabilidade obtida foi de 43,78%, com uma concentração de coletor de 25mg/L e pH 10,0. O menor valor apresentou 6,39% de flotabilidade, sob as mesmas condições de concentração de coletor, mas com pH 7,0. O que está de acordo com a literatura, sugerindo que a hidrofobização da apatita é favorecida em pH alcalino devido à maior adsorção do coletor na superfície do mineral.

Em contrapartida, a dolomita mostrou-se mais responsiva às variáveis estudadas, com flotabilidade elevada em quase todas as condições testadas, especialmente em pHs intermediários e com concentrações moderadas de coletor. O maior índice de 72,81% foi observado com uma concentração de coletor de 17,5mg/L e pH 8,5, enquanto o menor índice, de 33,25%, ocorreu com a mesma concentração de coletor, mas pH 6,4. A análise estatística revelou que o pH teve maior influência na hidrofobização das partículas, mas a concentração do coletor também teve um efeito positivo, embora menos expressivo. No entanto, a interação entre pH e concentração do coletor resultou em uma redução na flotabilidade da dolomita, devido à especiação do coletor e à diminuição da fase ativa do mesmo em pH elevado, prejudicando a hidrofobização, sua adesão às bolhas e sua efetiva coleta no flotado.

A otimização dos resultados de flotabilidade indicou dois cenários principais. No primeiro, visando maximizar a flotabilidade da apatita e minimizar a da dolomita, obteve-se uma flotabilidade máxima de 44,7764% para a apatita com 28,106mg/L de concentração de coletor e pH 10,6213, enquanto a flotabilidade mínima da dolomita foi de 53,6641%. No segundo cenário, focado na maximização da flotabilidade da dolomita e minimização da apatita, alcançou-se uma flotabilidade máxima de 65,3850% para a dolomita, com 9,928mg/L de concentração de coletor e pH 9,897, enquanto a apatita apresentou uma flotabilidade mínima de 6,3909%. Este cenário sugere que as condições identificadas são promissoras para processos de flotação reversa de apatita, destacando-se as vantagens industriais relacionadas à economia de reagentes, como a baixa concentração de coletor e no ajuste do pH do sistema.

REFERÊNCIAS

ABOUZEID, A. -Z. M.; NEGM, A. T.; ELGILLANI, D. A. Upgrading of calcareous phosphate ores by flotation: Effect of ore characteristics. **International Journal of Mineral Processing**, v. 90 (1-4), p. 81 – 89, fevereiro 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.005>. Acesso em: 27 ago 2024.

ARAUJO, A. C. de *et al.* Revisitando as técnicas de avaliação de flotabilidade: uma visão crítica. In: **XXI ENTMME**. Natal: [s.n.], 2005. p. 325 – 332. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320297405_REVISITANDO_AS_TECNICAS_DE_AVALIACAO_DE_FLOTABILIDADE_UMA_VISAO_CRITICA. Acesso em: 15 nov 2023.

ATA, S.; AHMED, N.; JAMESON, G. J. The effect of hydrophobicity on the drainage of gangue minerals in flotation froths. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 7, p. 897 – 901, Julho 2004.

AWADALLAH, R. *et al.* Beneficiation of west sibaiya phosphate ores by flotation in alkaline media. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 29, n. 6, p. 1149 – 1156, Dezembro 1998. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/bc7723dd2470b346913ae78b6abf9099/1?pq-origsite=gscholar&cbl=49318>. Acesso em: 14 nov 2023.

BALTAR, C. A. M. (ed.). **Flotação: em nova abordagem**. Recife: Ed. UFPE, p. 512, 2021.

CHAVES, A. P. (org.). **Teoria e Prática do Tratamento de Minerios: A flotação no brasil**. 3. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2013. v. 4. 512 p.

COMPTON, J. S. *et al.* Variations in the global phosphorus cycle. In: GLENN, C. R.; PREVOT-LUCAS, L.; LUCAS, J. (ed.). **Marine Authigenesis: From global to microbial**. Society for Sedimentary Geology, 2000. p. 21 – 33. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259221979_Variations_in_the_global_phosphorus_cycle. Acesso em: 13 nov 2023.

COSTA, L. M. da; SILVA, M. F. de Oliveira e. A indústria química e o setor de fertilizantes. In: **BNDDES 60 anos: perspectivas setoriais**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 12 – 30. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2025?&locale=pt_BR. Acesso em: 29 out 2023.

DIAS, E. G.; LAJOLO, R. D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no brasil. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (ed.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 6, p. 105 – 124. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/917/1/cap6.pdf>. Acesso em: 15 nov 2023.

FILIPPELLI, G. M. The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future. **Elements**, v. 4, n. 2, p. 89 – 95, Abril 2008. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/4/2/89/137768/The-Global-Phosphorus-Cycle-Past-Present-and?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 13 nov 2023.

FONSECA, D. S. Fosfato. In: **Sumário Mineral Brasileiro 2018**. ANM, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/fosfato_sm_2018. Acesso em: 14 nov 2023.

FUERSTENAU, D.; CHANDER, S. Thermodynamics of Flotation. In: SOMASUNDARAN, P. (ed.). **Advances in Mineral Processing**. Colorado: Society for Mining Metallurgy, 1986. cap. 7.

GLENN, C. R. *et al.* Phosphorus and Phosphorites: Sedimentology and Environments of Formation. **Eclogae Geologicae Helvetiae**, v. 87, n. 3, p. 747 – 788, Janeiro 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259590468_Phosphorus_and_Phosphorites_Sedimentology_and_Environments_of_Formation. Acesso em: 13 nov 2023.

GLOBALFERT. **Outlook GlobalFert 2024**. 2024. Disponível em: <https://globalfert.com.br/outlook-globalfert/>. Acesso em: 3 set 2024.

GUIMARÃES, R. C.; ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C. Reagents in igneous phosphate ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, n. 2, p. 199 – 204, Fevereiro 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.022>. Acesso em: 17 set 2024.

HASSANZADEH, A.; HOANG, D. H.; BROCKMANN, M. Assessment of flotation kinetics modeling using information criteria; case studies of elevated-pyritic copper sulfide and highgrade carbonaceous sedimentary apatite ores. **Journal of Dispersion Science and echnology**, v. 41 (7), p. 1083 – 1094, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1656640>. Acesso em: 27 ago 2024.

HORNSBY, D.; LEJA, J. Critical surface tension of floatability. **Colloids and Surfaces**, v. 7, n. 4, p. 339 – 349, Outubro 1983. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0166662283800602>. Acesso em: 16 nov 2023.

HORTA, D.; MONTE, M. B. de M.; LEAL FILHO, L. de S. The effect of dissolution kinetics on flotation response of apatite with sodium oleate. **International Journal of Mineral Processing**, v. 146, p. 91 – 104, Janeiro 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.12.003>. Acesso em: 27 ago 2024.

JARVIS, I. *et al.* Phosphorite geochemistry: State-of-the-art and environmental concerns. **Eclogae Geologicae Helvetiae**, v. 87, n. 3, p. 643 – 700, Janeiro 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279905385_Phosphorite_geochemistry_state-of-the-art_and_environmental_concerns. Acesso em: 13 nov 2023.

JASINSKI, S. M. Phosphate rock. In: **Mineral Commodity Summaries 2023**. U.S. Geological Survey, 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. Acesso em: 13 nov 2023.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. ISBN 987-85-7780-963-9. Disponível em:

<https://dageoufba.files.wordpress.com/2013/08/manual-de-cic3aancia-dos-minerais-klein-e-dutrow.pdf>. Acesso em: 19 out 2023.

LENHARO, S. L. R. **Caracterizacao mineralogica/tecnologica das apatitas de alguns depositos brasileiros de fosfato**. 1994. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Acesso em: 16 nov 2023.

LIMA, N. P.; VALADÃO, G. E. Avaliação do efeito da granulometria no processo de flotação. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 4, p. 473 – 477, Outubro 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000400011>. Acesso em: 17 set 2024.

LISBOA, M. D. C. **Uso de óleo residual de fritura como reagente coletor de minerais**. 2014. 49 p. Monografia (Engenharia de Minas e Meio Ambiente) — Universidade Federal Do Sul E Sudeste Do Pará. Disponível em: <https://repositorio.unifesspa.edu.br/bitstream/123456789/1795/1/Uso%20de%20%20leo%20residual%20de%20fritura%20como%20reagente%20coletor%20de%20minerais.pdf>. Acesso em: 17 set 2024.

LOPES, G. M. **Coletores potencialmente seletivos na separação de apatita, calcita e dolomita**. 2013. 165 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9DKEZW/1/tese_de_doutorado_gilmara_m_lopes_coletores_potencialmente_seletivos_na_separa_o_de_apatita_calcita_e_dolomita.pdf. Acesso em: 18 set 2024.

LUZ, A. B. da; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. 984 p.

MONTE, M. B. de M.; PERES, A. E. C. Química de Superfície na Flotação. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. cap. 10, p. 399 – 461. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/743/1/CCL00320010.pdf>. Acesso em: 16 nov 2023.

MONTE, M. B. de M.; PIMENTEL, D. A. Influência dos Finos de Dolomita e da Dissolução de Minerais de Cálcio no Desempenho da Flotação de Apatita. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 38090 – 38105, Abril 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/28130>. Acesso em: 16 nov 2023.

MONTÚFAR, R. *et al.* *Oenocarpus bataua* Mart. (Arecaceae): Rediscovering a Source of High Oleic Vegetable Oil from Amazonia. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 87, n. 2, p. 167 – 172, Fevereiro 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225175556_Oenocarpus_bataua_Mart_Arecaceae_Rediscovering_a_Source_of_High_Oleic_Vegetable_Oil_from_Amazonia. Acesso em: 10 nov 2023.

MÜGGE, F. L. *et al.* Native plant species with economic value from Minas Gerais and Goiás: a discussion on the currentness of the data recovered by the French naturalist Auguste de Saint-Hilaire. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 455 – 462, Dezembro 2016. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/hb/a/9RFwnvFVCwLzFK4ZwffSjJy/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 10 nov 2023.

NUNES, K. L. **Beneficiamento de minério fosfático: estudo de caso do complexo mineroquímico de cajati**. 2022. 50 p. Monografia (Engenharia de Minas) — UFMG. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiw3Kasu-eCAxWymGoFHdKsCgwQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fdemin.ufmg.br%2Fdownloadtcc.php%3Ff%3D147&usg=AOvVaw3V8Nci0_rO8M37CKhUZtwa&opi=89978449. Acesso em: 19 out 2023.

OLIVEIRA, L. C. A. de *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1 – 15, Dezembro 2021. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/b75a15113267007f38261faf5c9a6532/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032621>. Acesso em: 14 nov 2023.

PAIVA, P. R. P. D. **Propriedades de superfície de apatita proveniente de rochas de filiação carbonatítica e sua concentração por flotação**. 2011. 180 p. Tese (Instituto de Geociências) — Universidade de Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8725>. Acesso em: 29 out 2023.

PASERO, M. *et al.* Nomenclature of the apatite supergroup minerals. **European Journal of Mineralogy**, v. 22, n. 2, p. 163 – 179, Março 2010. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/eurjmin/article/22/2/163/69447/Nomenclature-of-the-apatite-supergroup-minerals>. Acesso em: 19 out 2023.

PEREIRA-FILHO, E. R.; POPPI, R. J.; ARRUDA, M. A. Z. Emprego de planejamento fatorial para a otimização das temperaturas de pirólise e atomização de Al, Cd, Mo e Pb por ETAAS. **Química Nova**, Sociedade Brasileira de Química, v. 25, n. 2, p. 246 – 253, Março/Abril 2002. ISSN 1678-7064. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/BsNtkPsC6XmJTTQkHZp43xF/>. Acesso em: 13 ago 2024.

PUFAHL, P. K. Bioelemental Sediments. In: JAMES, N. P.; DALRYMPLE, R. W. (ed.). **Facies Models**. 4. ed. Geological Association of Canada, 2010. p. 477 – 503. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258994093_Bioelemental_Sediments. Acesso em: 13 nov 2023.

PUFAHL, P. K.; GROAT, L. A. Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An Invited Paper. **Economic Geology**, v. 112, n. 3, p. 483 – 516, maio 2017. ISSN 1554-0774. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article/112/3/483/172162/Sedimentary-and-Igneous-Phosphate-Deposits>. Acesso em: 29 out 2023.

RAO, K. H.; ANTTI, B.; FORSSBERG, E. Mechanism of Oleate Interaction on Salt-Type Minerals, Part II. Adsorption and Electrokinetic Studies of Apatite in the Presence of Sodium Oleate and Sodium Metasilicate. **International Journal of Mineral Processing**, v. 28 (1-2), p. 9– 79, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(90\)90027-V](https://doi.org/10.1016/0301-7516(90)90027-V). Acesso em: 27 ago 2024.

SERRA, J. L. *et al.* Alternative sources of oils and fats from Amazonian plants: Fatty acids, methyl tocopherols, total carotenoids and chemical composition. **Food Research International**, v. 116, p. 12 – 19, Fevereiro 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996918309724>. Acesso em: 10 nov 2023.

SGM. **Anuário Estatístico 2021**: Setor de transformação de não metálicos. MME, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 15 nov 2023.

SOUZA, T. F. D. **Flotação da smithsonita e da dolomita utilizando amina: estudos fundamentais**. 2018. 106 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral) — Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/2f43396f-7dd2-44a2-8a8b-e703d11618eb>. Acesso em: 16 ago 2024.

TESTA, F. G. **Avanços na flotação de finos de minério com condicionamento em alta intensidade**. 2008. 98 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/16482>. Acesso em: 16 nov 2023.

UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION. **World Population Prospects 2022: Summary of Results**, Nova Iorque, n. 3, p. 13 – 52, 2022. Disponível em: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf. Acesso em: 29 out 2023.

WOOLLEY, A. R.; KEMPE, D. R. C. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. **Carbonatites Genesis and Evolution**, p. 1 – 14, 1989. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/018/515/018515047.php>. Acesso em: 13 nov 2023.

ZHONG, K.; VASUDEVAN, T.; SOMASUNDARAN, P. Floatability of apatites of diferente type and origin: role of surface area and porosity. **International Journal of Mineral Processing**, v. 38, p. 177 – 188, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0301-516\(93\)90074-K](https://doi.org/10.1016/0301-516(93)90074-K). Acesso em: 27 ago 2024.

APÊNDICE A – Ensaios de arraste

Tabela 13 - Ensaios de arraste da amostra de apatita

Teste	Flotabilidade (%)	ALM (g)	Massa Flotado (g)	Flotado (%)	Massa Afundado (g)	Massa Flotado + Afundado (g)	Perda de Massa (%)	Média (%)	Desvio Padrão	CV
Arraste_A_01	2,0570	0,5000	0,0101	2,0570	0,4809	0,4910	1,8000	1,9894	0,071785	4%
Arraste_A_02	1,8940	0,5000	0,0094	1,8940	0,4869	0,4963	0,7400			
Arraste_A_03	1,9894	0,5000	0,0098	1,9894	0,4828	0,4926	1,4800			
Arraste_A_04	1,9768	0,5000	0,0097	1,9768	0,481	0,4907	1,8600			
Arraste_A_05	2,0741	0,5000	0,0103	2,0741	0,4863	0,4966	0,6800			

Tabela 14 - Ensaios de arraste da amostra de dolomita

Teste	Flotabilidade (%)	ALM (g)	Massa Flotado (g)	% Flotado	Massa Afundado (g)	Massa Flotado + Afundado (g)	Perda de Massa (ensaio) (%)	Média	Desvio Padrão	CV
Arraste_D_01	2,7897	0,5000	0,0137	2,7897	0,4774	0,4911	1,7800	2,7597	0,079785	3%
Arraste_D_02	2,7597	0,5000	0,0136	2,7597	0,4792	0,4928	1,4400			
Arraste_D_03	2,7722	0,5000	0,0137	2,7722	0,4805	0,4942	1,1600			
Arraste_D_04	2,5921	0,5000	0,0128	2,5921	0,481	0,4938	1,2400			
Arraste_D_05	2,7108	0,5000	0,0135	2,7108	0,4845	0,4980	0,4000			