



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

ADRIELE MÉRCIA ALVES SANTOS

**AVALIAÇÃO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DIRETA DE
MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL
COMPLETO.**

**ARAXÁ-MG
2021**

ADRIELE MÉRCIA ALVES SANTOS

**AVALIAÇÃO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DIRETA DE
MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL
COMPLETO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Me. Leandro Henrique Santos
Coorientadora: Dra. Michelly dos Santos Oliveira

**ARAXÁ-MG
2021**

ADRIELE MÉRCIA ALVES SANTOS

**AVALIAÇÃO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DIRETA DE
MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL
COMPLETO.**

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

Data de Defesa: Araxá, 10 de setembro de 2021.

Presidente e Orientador(a): Prof. Me. Leandro Henrique dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG - Unidade Araxá

Membro Titular e Coorientadora: Prof. Dr^a Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

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

Membro Titular: Esp. João Victor da Silva Alves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

FOLHA DE ASSINATURAS

SISTEMA INTEGRADO DE PATRIMÔNIO,
ADMINISTRAÇÃO E CONTRATOS

*Emitido em
17/09/2021*

CÓPIA DE FOLHA DE ASSINATURAS Nº 1/2021 - CEMIAx (11.51.17)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

*(Assinado digitalmente em 18/09/2021
15:14)*

JOAO VICTOR DA SILVA ALVES

COORDENADOR -

TITULAR CADAX

(11.57.02)

Matrícula: 2139243

*(Assinado digitalmente em 18/09/2021 13:32
)*

LEANDRO HENRIQUE SANTOS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO

DMCAX (11.57.04)

Matrícula: 1856063

*(Assinado digitalmente em 20/09/2021
09:59)*

MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA

PROFESSOR ENS BASICO TECN

TECNOLÓGICO DMCAX (11.57.04)

Matrícula: 2523382

*(Assinado digitalmente em 18/09/2021 19:01
)*

NATAL JUNIO PIRES

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO

DFGAX (11.57.03)

Matrícula: 1645579

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número:
1, ano: **2021**, tipo: **CÓPIA DE FOLHA DE ASSINATURAS**, data de emissão: **18/09/2021** e o código de
verificação: **2bd1ce4fe1**

A Edno dos Santos, a pessoa que mais sonhou e lutou por este momento, meu modelo de honestidade, caráter e trabalho duro. A esse Homem sertanejo que sonhou em ver a filha “doutora”. Ao meu Sertanejo e ao meu Sertão que me mostraram que o caminho é a Educação!

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é para Deus e a Nossa Senhora Aparecida que sempre estiveram no meu caminho, me dando força para lutar pelos meus sonhos.

Ao meu pai, Edno dos Santos, que lutou muito para isso ocorresse, pelos ensinamentos, pelo cuidado, por ser meu companheiro de caminhada, de vida, por ser meu primeiro professor, meu primeiro gestor, que me fez a guerreira que sou. E a Deus novamente por ter me feito filha dele. Ao meu eterno Edim do Trator, com eterno Amor!

A toda minha família que esteve ao meu lado e com certeza esperaram muito por esse momento. Em especial, aos meus sobrinhos Enzo e Antony, pelo tamanho amor que sinto por eles. Ao meu companheiro de estrada, José de Brito, pelo grande apoio, ajuda, paciência e amor.

Aos meus orientadores pelo grande apoio, acompanhamento, paciência, suporte e ensinamentos ao longo da realização da nossa pesquisa. Ao meu orientador Leandro Henrique pelo grande professor, orientador e amigo que se tornou! À minha coorientadora Michelly Oliveira, pela oportunidade e inserção neste mundo da pesquisa da tecnologia mineral, ao modelo de profissional e mulher que é!

Aos meus parceiros de laboratório Amanda Carneiro, Guilherme Otávio, Augusto Henrique, Joyce e Sofia Lelis.

Aos amigos, Amanda Carneiro, Natália Amorim, Tia Iris (Iris Avelar), Arthur Emílio e Marianna Fernandes, nos quais eu amo.

À equipe SPE do CEFET, Campus Araxá, pelo apoio, concessão da bolsa permanência que foi fundamental para minha permanência na instituição.

Aos meus gestores Daniel Melo e Filipe Neves.

A todos meus professores da UFVJM-Janaúba. Em especial a Patrícia Xavier, pelo voto de confiança, por ter me ajudado a mudar o rumo de todas as coisas que culminou na minha chegada ao CEFET/Araxá. A professora Vivian Benassi pelo carinho, amizade e por me mostrar esse mundo que é a pesquisa.

Ao CEFET e funcionários pela oportunidade de estudar nessa instituição de tamanha qualidade, pela formação técnica e pessoal.

As inúmeras pessoas que contribuíram neste caminho que estou trilhando, que apoiaram e ajudaram, desde a minha infância.

A todos, meu muito obrigada com um “cheiro” no coração”.

“As ‘dificuldades’ da vida”
In memoriam, Edno dos Santos

RESUMO

Para suprir a crescente demanda por fertilizantes, estratégicos na produção de alimentos, são fundamentais formas eficientes de concentração da sua principal fonte de matéria-prima que é a rocha fosfática. A flotação é a operação de concentração mais utilizada na indústria para beneficiamento do minério fosfático, principal fonte de fósforo, constituinte básico dos fertilizantes. Porém, quando o minério fosfático apresenta ganga carbonatada, como a jazida mineral de Araxá-MG, há uma dificuldade de seletividade na separação das espécies minerais, prejudicando o desempenho da flotação. A partir dessa problemática, vários estudos e pesquisas são realizados, visando maior seletividade através do emprego de diversos reagentes, atuantes como depressores e coletores. Dessa forma, este trabalho possui como objetivo avaliar a eficiência de reagentes depressor (resíduo de uma indústria alimentícia) e coletores (tradicional e alternativo) na flotação aniônica direta de apatita, constituinte do minério fosfático proveniente da jazida de Araxá-MG, utilizando a análise do planejamento fatorial completo. Para isso, o minério fosfático foi recebido preparado, sendo homogeneizado e quartado, direcionado para etapa de caracterização (análise química e granulométrica, além de picnometria) e ensaios de flotação em célula mecânica. Foram avaliados dois tipos de reagente coletor e um tipo de reagente depressor, com variação de suas dosagens. O planejamento dos testes foi realizado através da ferramenta estatística do planejamento fatorial completo, com três variáveis onde foram aplicados dois níveis para cada uma dessas, além do ponto central, como forma de avaliar a reprodutibilidade dos testes. Assim, a partir dos ensaios de flotação, o maior teor de P_2O_5 obtido foi 17,78% P_2O_5 , para Hidrocol, obtendo uma recuperação metalúrgica de 66,29%. O menor teor obtido foi 8,58% de P_2O_5 , utilizando o óleo A1. As relações CaO/P_2O_5 , Fe_2O_3/P_2O_5 e Al_2O_3/P_2O_5 apresentaram-se acima dos especificados pela indústria de fertilizantes. Em relação à análise estatística, o coletor e sua dosagem apresentaram, de forma geral, significância sobre o sistema, com efeito principal e interação sobre algumas variáveis. Sobre a otimização das respostas avaliadas, para o Hidrocol foi apontado como o coletor mais eficiente, sendo a melhor condição encontrada para menores concentrações de coletor e depressor (nível -1), apresentando teor de 17,13% P_2O_5 , com recuperação metalúrgica de 69,75%. Estabelecendo o óleo A1 como coletor, o cenário ótimo retornado pela análise estatística foi com a utilização de dosagens mais altas (nível 1) para os reagentes utilizados, apresentando teor de 17,58% P_2O_5 e recuperação metalúrgica 30,41%. Assim, conclui-se que o óleo A1 apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista que se trata de ensaios iniciais de flotação utilizando esse reagente como coletor de apatita, sendo um reagente promissor. Ainda, o óleo é obtido a partir de resíduo de processos industriais, oriundo de uma espécie vegetal endêmica da região da Amazônia, reforçando sua relevância.

PALAVRAS-CHAVE: Minério fosfático. Flotação. Coletor. Depressor. Planejamento Fatorial.

ABSTRACT

To supply the growing demand for fertilizers, which are strategic in food production, efficient ways of concentrating the main source of raw material, phosphate rock, are fundamental. Flotation is the most used concentration operation in the industry for processing phosphate ore, the main source of phosphorus, the basic constituent of fertilizers. However, when the phosphatic ore presents carbonated gangue, as in the Araxá-MG mineral deposit, there is a difficulty in selectivity in the separation of mineral species, impairing the flotation performance. From this problem, several studies and researches are carried out, aiming at greater selectivity through the use of different reagents, acting as depressants and collectors. Thus, this work aims to evaluate the efficiency of depressor reagents (waste from a food industry) and collectors (traditional and alternative) in the direct anionic flotation of apatite, a constituent of the phosphate ore from the Araxá-MG deposit, using the analysis of full factorial design. For this, the phosphatic ore was received prepared, being homogenized and quartered, directed to the characterization step (chemical and granulometric analysis, in addition to pycnometry) and flotation tests in mechanical cell. Two types of collecting reagent and one type of depressant reagent were evaluated, with variation in their dosages. Test planning was performed using the statistical tool of full factorial design, with three variables where two levels were applied to each of these, in addition to the central point, as a way to assess the reproducibility of the tests. Thus, from the flotation tests, the highest P_2O_5 content obtained was 17.78% P_2O_5 , for Hidrocol, obtaining a metallurgical recovery of 66.29%. The lowest content obtained was 8.58% of P_2O_5 , using the A1 oil. The CaO/P_2O_5 , Fe_2O_3/P_2O_5 and Al_2O_3/P_2O_5 ratios were above those specified by the fertilizer industry. Regarding the statistical analysis, the collector and its dosage showed, in general, significance on the system, with the main effect and interaction on some variables. Regarding the optimization of the evaluated responses, Hidrocol was appointed as the most efficient collector, being the best condition found for lower concentrations of collector and depressant (level -1), with a content of 17.13% P_2O_5 , with metallurgical recovery of 69.75%. Establishing the A1 oil as collector, the optimal scenario returned by the statistical analysis was the use of higher dosages (level 1) for the reagents used, with a content of 17.58% P_2O_5 and metallurgical recovery of 30.41%. Thus, it is concluded that the A1 oil presented satisfactory results, considering that it is about initial flotation tests using this reagent as apatite collector, being a promising reagent. Still, the oil is obtained from residue from industrial processes, coming from a plant species endemic to the Amazon region, reinforcing its relevance.

KEYWORDS: Phosphate ore. Flotation. Collector. Depressor. Factorial Design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de grãos e consumo de fertilizantes entre 1995 e 2018.	19
Figura 2 - Apresentação do agricultor na Conferência do Milênio mostrando a influência do uso de fertilizantes em sua cultura de milho.	20
Figura 3 - Linha de produção dos fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos.	21
Figura 4 - Localização dos depósitos fosfáticos economicamente e potencialmente viáveis. .	23
Figura 5 - Reservas mundiais de fosfato em 2020.	23
Figura 6 - Geometria e tamanho dos Complexos Alcalino Carbonatítico no mundo.	25
Figura 7 - Localização do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro.	26
Figura 8 - Mapa geológico do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro.	26
Figura 9 - Apatita.	29
Figura 10 - Representação do sistema com e sem coletor em contato bolha-partícula.	33
Figura 11 - Classificação dos coletores	33
Figura 12 - Estrutura da molécula de glicose	34
Figura 13 - Estrutura da molécula de CMC.	35
Figura 14 - Estrutura da molécula de amilose e amilopectina.	35
Figura 15 - Esquema da estrutura de uma célula de flotação de minério.	38
Figura 16 - Célula de flotação	39
Figura 17 - Máquina de flotação.	40
Figura 18 - Banco de células de flotação.	40
Figura 19 - Design da célula pneumática.	41
Figura 20 - Concentrado final utilizando as células pneumáticas em Los Penambres.	42
Figura 21 - Esquema da coluna de flotação.	43
Figura 22 - Esquema da coluna de flotação Microtel TM	44
Figura 23 - Esquema genérico de um processo.	44
Figura 24 - Etapas desenvolvidas no trabalho.	46
Figura 25 - Início de preparação da amostra.	47
Figura 26 - Fluxograma de preparação da amostra BEB 01: Etapa de britagem.	48
Figura 27 - Fluxograma de preparação da amostra BEB 01: Etapa de moagem, separação magnética e deslamagem.	49
Figura 28 - Amostra de minério fosfático cedida pela Mosaic Fertilizantes.	50
Figura 29 - Homogeneização e quarteamento da amostra mineral	50

Figura 30 - Picnometria. (A) Conjunto picnômetro + minério + água. (B) Conjunto picnômetro + minério. (C) Picnômetro + água.....	51
Figura 31 - Peneirador Suspenso.....	52
Figura 32 - Gelatinização do amido de batata.....	53
Figura 33 - Saponificação dos coletores utilizando Hidrocol (à esquerda) e óleo A1 (à direita).	54
Figura 34 - Resumo do experimento fatorial completo.....	55
Figura 35 - Célula mecânica Denver (à esquerda) e cuba utilizada (à direita).....	56
Figura 36 - Análise granulométrica da amostra de minério BEB 01.....	64
Figura 37 - Flotação utilizando o Hidrocol saponificado (à esquerda). Flotação utilizando o óleo A1 saponificado (à direita)	65
Figura 38 - Produtos gerados dos ensaios 1 e 2 de flotação. Produtos utilizando Hidrocol saponificado (acima). Produtos utilizando o óleo A1 saponificado (abaixo).....	66
Figura 39 - Verificação da significância das variáveis de entrada sobre o teor de P_2O_5	70
Figura 40 - Análise dos efeitos principais (acima) e efeitos de interação (abaixo) para o teor de P_2O_5	71
Figura 41 - Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação metalúrgica.	72
Figura 42 - Análise dos efeitos dos efeitos principais (acima) e de interação (abaixo) para a recuperação metalúrgica.	73
Figura 43 - Verificação da significância das variáveis para CaO/P_2O_5	78
Figura 44 - Verificação da significância das variáveis para Al_2O_3/P_2O_5	78
Figura 45 - Verificação da significância das variáveis para Fe_2O_3/P_2O_5	79
Figura 46 - Cenários obtidos para otimização das respostas.	80
Figura 47 - Cenário de otimização das respostas utilizando o óleo A1 como reagente coletor	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica da amostra de minério BEB 01.	60
Gráfico 2 -Teores de P_2O_5 do concentrado e rejeito da flotação, com suas respectivas razões de enriquecimento.....	68
Gráfico 3 - Recuperações mássicas e metalúrgicas dos concentrados dos ensaios realizados.	69
Gráfico 4 - Contorno de teor de P_2O_5 versus Dosagem de Coletor e Dosagem de Depressor	82
Gráfico 5 - Gráfico de Superfície de Teor de P_2O_5 versus dosagem de coletor e depressor ...	82

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Planejamento Fatorial Completo dos ensaios a serem realizados.	55
Tabela 2 - Conversão dos níveis utilizados nos ensaios.	56
Tabela 3- Variáveis operacionais utilizadas nos ensaios de flotação.	57
Quadro 1 - Variações mineralógica do mineral apatita.....	30
Quadro 2 - Análise química da amostra de minério BEB 01	62
Quadro 3 - Resultados de recuperação mássica, metalúrgica e razão de enriquecimento.	67
Quadro 4 - Análises químicas dos concentrados e dos rejeitos dos ensaios.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerias
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PF	Planejamento Fatorial

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	17
2.0 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Fertilizantes	19
2.2 Depósitos minerais fosfáticos	22
2.3 Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro	25
2.4 Mineral Apatita e Fósforo	28
2.5 Flotação	31
2.5.1 COLETORES	32
2.5.2 DEPRESSORES	34
2.5.3 ESPUMANTES	36
2.5.4 MODIFICADORES	36
2.6 Equipamentos de Flotação	37
2.6.1 CÉLULAS MECÂNICAS	39
2.6.2 CÉLULAS PNEUMÁTICAS	41
2.6.3 COLUNAS DE FLOTAÇÃO	42
2.7 Planejamento Fatorial	44
3.0 METODOLOGIA	46
3.1 Preparação das Amostras de Minério Fosfático Realizada no CDM-Vale	46
3.2 Caracterização da amostra de minério fosfático BEB 01	49
3.2.1 PICNOMETRIA	50
3.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	52
3.3 Ensaio de Flotação	52
3.3.1. PREPARAÇÃO DOS REAGENTES	53
3.3.2 PLANEJAMENTO FATORIAL DOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO	54
3.3.3 TESTES DE FLOTAÇÃO	56
3.3.6 ANÁLISE DOS DADOS	57
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Caracterização do minério fosfático BEB 01	59
4.1.1 PICNOMETRIA	59
4.1.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA BEB 01	59
4.1.3 ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOQUÍMICA DA AMOSTRA	61
4.2 Ensaio de Flotação	65
5. CONCLUSÕES	85
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87

1.0 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores e exportadores de fertilizantes do mundo, além de ser um grande consumidor deste recurso. Esse alto consumo se justifica pelo aumento da produção de alimentos, possibilitada pelo uso desse insumo. Essa relação se mostra histórica, no sentido de que ao longo dos anos é observado o aumento na produção de alimentos, através do aumento do uso de fertilizantes na produção agrícola que garantiu ao país um patamar mundial como potência na agricultura (REETZ, 2017; EPE, 2019).

Apesar do fertilizante ser um recurso estratégico e de suma importância na agricultura brasileira, 80% da sua demanda é atendida pela importação. Esse choque entre a demanda e oferta observada no país é ocasionado pela competitividade do setor agrícola, bem como restrições industriais na produção nacional. Essas restrições estão ligadas ao setor mineral, que é um dos principais fornecedores de matéria-prima para produção de fertilizantes. As reservas nacionais de rocha fosfática apresentam teores de fósforo cada vez menores, associados a contaminantes de complexidade superior, apesar da descoberta de novos depósitos e da instalação de novos empreendimentos ao longo dos anos. Com essa redução do teor, novas tecnologias e estudos são aplicadas visando a otimização das técnicas de concentração, e a obtenção de produtos dentro das especificações de mercado (EPE, 2019; BENITE, 2015).

A origem do minério fosfático influencia na etapa de concentração, bem como na sua complexidade, seletividade, recuperação e teores obtidos. Um dos principais métodos de concentração utilizados, dentre diversos outros, é a flotação. Como as reservas brasileiras são majoritariamente ígneas, apresentando baixo teor de fósforo associado a contaminantes complexos e em crescente participação na rocha fosfática, a flotação se torna complexa, exigindo reagentes capazes de tornar o processo seletivo eficiente (SOUZA *et al.*, 2014; GUIMARÃES, LIMA e OLIVEIRA, 2004).

O desempenho da flotação de minério fosfático é impactado pela semelhança das características de superfície da apatita (mineral-minério) e dos minerais calcita e dolomita, presente na rocha em questão. Assim, a seletividade da concentração passa pelo emprego de reagentes durante a operação, sendo objeto de vários estudos. Souza *et al.* (2014) avaliaram alguns tipos de reagentes depressores na flotação de minério fosfático sílico-carbonatado, como amido de milho, amido de mandioca e dextrina, discutindo a diferença de teor de P_2O_5

obtidos no concentrado, de acordo com o reagente utilizado. Carneiro (2018) investigou o mesmo minério, utilizando alguns reagentes depressores, dentre eles um resíduo amiláceo da indústria alimentícia que apresentou resultados de recuperação de P_2O_5 similares ao reagente utilizado industrialmente. A mesma metodologia utilizada por Carneiro (2018) foi aplicada para minério fosfático ultrafino em um estudo apresentado por CARNEIRO *et al.* (2021). Nesses estudos, pode ser observado que a recuperação e teor de P_2O_5 obtidos, variam de acordo com o reagente utilizado, mas a característica do minério também afeta o desempenho da operação.

Em estudos com reagentes coletores por exemplo, Guimarães, Lima e Oliveira (2004) analisaram a ação do óleo de soja hidrogenado saponificado como coletor para diferentes tipos de minério fosfático. Martins *et al.* (2019) procederam com análise exploratória acerca da preparação de reagentes coletores utilizando óleo de soja e óleo de patauá. O estudo se distingue pela busca de uma nova fonte vegetal (óleo de patauá) para possível aplicação como reagente coletor em processos de flotação mineral.

Todos esses estudos trazem a importância já ressaltada da busca de reagentes e métodos para o desempenho satisfatório da flotação, a fim de aumentar a eficiência da operação e a qualidade do concentrado fosfático obtido, matéria-prima para produção de fertilizantes.

Baseado nisso, este trabalho possui como objetivo avaliar o desempenho de reagentes depressor e coletores na flotação de uma amostra de minério fosfático proveniente do depósito alcalino carbonatítico do Barreiro (Araxá-MG). Como método estatístico de análise dos ensaios, foi utilizado o planejamento fatorial completo, bem como a análise de recuperação e teores de P_2O_5 obtidos, além de cenário ótimo para a operação.

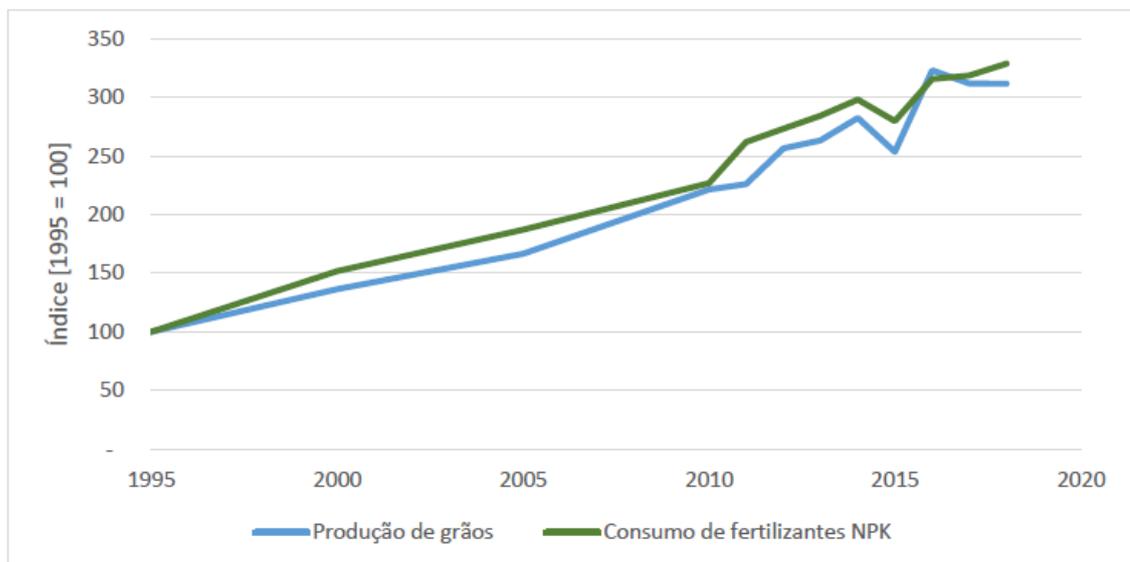
2.0 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão abordados temas de suma importância para o entendimento deste trabalho. Serão discutidos tópicos como o cenário dos fertilizantes no Brasil, a geologia do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, fundamentos da operação de flotação, reagentes envolvidos e o planejamento fatorial.

2.1 Fertilizantes

Como um dos maiores exportadores e importadores agrícolas, o Brasil possui uma posição de destaque no cenário mundial, a partir do expressivo consumo de fertilizantes. O aumento da produção de alimentos possibilita uma segurança alimentar global diante da crescente demanda que o aumento populacional vem ocasionando. Caso não fossem utilizados os fertilizantes, a produção de alimentos básicos cairia pela metade e, por consequência, mais áreas de florestas seriam necessárias para atender a demanda do setor. A relação entre produção de grãos e uso desses insumos ao longo dos anos no Brasil, apresentado na Figura 1, ilustra o impacto do emprego de fertilizantes sobre o setor agrícola (EPE, 2019; REETZ, 2017).

Figura 1 - Produção de grãos e consumo de fertilizantes entre 1995 e 2018.



Fonte: EPE (2019).

A relação entre produção de alimentos e áreas disponíveis para cultura agrícola foi tratada por Saath e Fachinello (2018), no período de 2012 a 2024, avaliando a demanda por alimentos frente às terras produtivas no Brasil. Destacam também que, em alguns locais do mundo, o aumento de novas terras para produção agrícolas não seria possível. Logo, o aumento de produtividade seria a melhor opção para o atendimento da necessidade de alimentos. Isso coloca o Brasil em papel de destaque, visto o alto potencial agrícola que possui. Diante disso, os autores ainda mencionam que, para que o país consiga atender a crescente demanda por alimentos dentro das projeções realizadas, o Brasil deve aumentar sua capacidade produtiva e área plantada. Essa produtividade pode ser atingida através do uso de fertilizantes e irrigação.

Os fertilizantes são umas das principais fontes de macronutrientes responsáveis pela nutrição das plantas, como fontes de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Esses elementos são nutrientes que, apesar de serem fornecidos pelo solo às plantas, demandam uma complementação, que é realizada através do uso de fertilizantes. Um exemplo da importância dos fertilizantes na nutrição das plantas é apresentado na Conferência do Milênio, no ano 2000, que ocorreu na sede das Nações Unidas, na cidade de Nova York. No evento, foi apresentado por um agricultor da Nigéria espigas de milho cultivadas sem a presença de fertilizantes, como apresentado na Figura 2. Quando começou a utilizar o insumo nas culturas, houve aumento em sua produtividade, de forma que conseguiu atender a demanda da sua família, que antes não era atendida, e pôde vender parte excedente da sua produção (EPE, 2019; IFA, 2000).

Figura 2 - Apresentação do agricultor na Conferência do Milênio mostrando a influência do uso de fertilizantes em sua cultura de milho.

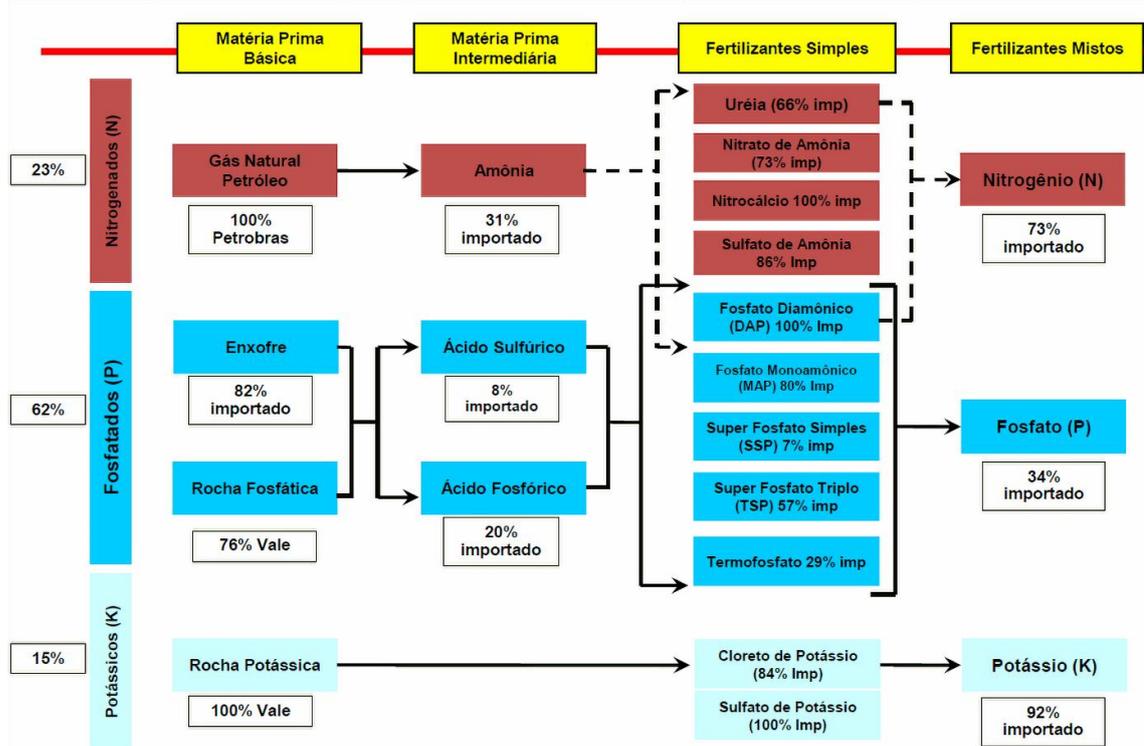


Fonte: REETZ (2017).

Isso mostra que se os fertilizantes não fossem utilizados, a produção de culturas ocorreria pelos nutrientes limitados presentes no solo. Conseqüentemente, a produtividade diminuiria de maneira progressiva, conforme o solo fosse utilizado, pois as plantas apresentariam a quantidade de nutrientes insuficientes para o seu desenvolvimento (IFA, 2000).

Os fertilizantes podem ser classificados, como nitrogenados, fosfatados e potássicos. As principais matérias-primas da produção desses insumos são o gás natural, rochas fosfáticas e rochas potássicas, respectivamente. Essa linha produtiva, juntamente com as taxas de importação de cada tipo, segue apresentada na Figura 3 (EPE, 2019; REETZ, 2017).

Figura 3 - Linha de produção dos fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos.



Fonte: EPE (2019)

O consumo destes fertilizantes do tipo NPK no Brasil, no ano de 2018, foi de 35 milhões de toneladas, sendo que 80% deste montante foi proveniente de importação. Isso mostra que, apesar do grande consumo do país, há uma alta dependência externa destes produtos (EPE, 2019).

Essa dependência do país é citada por Rodrigues *et al.* (2015), que relata uma produção insuficiente à demanda, necessitando assim, importar o insumo.

Como tentativa para diminuir essa dependência, o Ministério da Agricultura lançou em 2020 o Programa Nacional de Fertilizantes, visando o aumento da produção do país. Através de um decreto governamental, o programa foi criado para que ações públicas e privadas fossem organizadas para aumentar a produção e comércio de fertilizantes no país. Outra tentativa de aumentar a produção nacional de fertilizantes foi apresentada pelo Ministério de Minas e Energia, juntamente com Serviço Geológico do Brasil, através de um estudo sobre possíveis reservas de potássio. O estudo denominado “Informe Avaliação do Potencial de Potássio no Brasil – Área Bacia do Amazonas”, avalia reservas de potássio na Bacia do Amazonas. O estudo ainda informa que em Nova Olinda do Norte, Autazes e Itacoatira existe um depósito com cerca de 3,2 bilhões de toneladas de minério, além da ocorrência em outros locais. Esse tipo de iniciativa traz grande expectativa sobre o cenário brasileiro de produção de fertilizantes, através de descobertas de jazidas, pois possibilitam que as projeções no aumento da produção de grãos, para a próxima década, feita pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, sejam atingidas (GLOBALFERT, 2021; RODRIGUES, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2015).

Dessa forma, a abertura de empreendimentos na área de produção de fertilizantes pode auxiliar no aumento da produção interna, apesar de outros fatores influenciarem nessa iniciativa, como disponibilidade, preço e competição internacional (EPE, 2019).

2.2 Depósitos minerais fosfáticos

A principal fonte de fósforo para produção de fertilizantes fosfatados é a indústria mineral. Minério fosfático contempla rochas que podem se formar em ambientes geológicos distintos, contidas em depósitos sedimentares, ígneos e biogênicos (denominados também de insulares). O primeiro tipo apresenta maiores proporções em termos mundiais, com elevados teores de P_2O_5 , sendo ele, juntamente com os depósitos tipo ígneos mais importantes para economia (SOUZA e FONSECA, 2009; FIXEN, 2009; LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2005; ABRAM, 2016; ALBUQUERQUE, 1996).

Em termos mundiais, os depósitos sedimentares estão localizados nos Estados Unidos, sudeste do México, Marrocos e noroeste do Saara e Oriente Médio. Os depósitos ígneos estão localizados na África do Sul, Rússia, Finlândia e Brasil, como mostra a Figura 4.

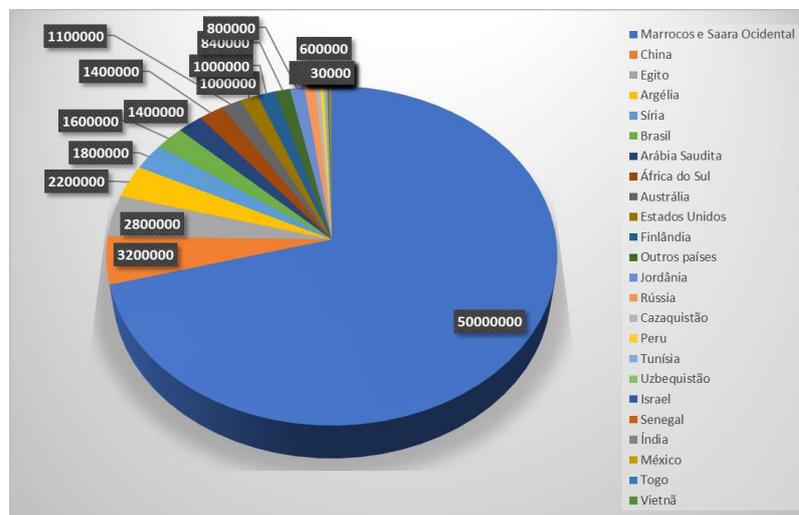
Figura 4 - Localização dos depósitos fosfáticos economicamente e potencialmente viáveis.



Fonte: McCLELLAN e VAN KAUWENBERGH (2004).

Segundo o relatório anual lançado pela USGS (2021), os países com as maiores reservas de depósitos fosfáticos são Marrocos e Saara Ocidental, seguido pela China e Egito, enquanto o Brasil ocupa o 6º lugar no ranking mundial. O panorama das maiores reservas mundiais de rocha fosfática segue apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Reservas mundiais de fosfato em 2020.



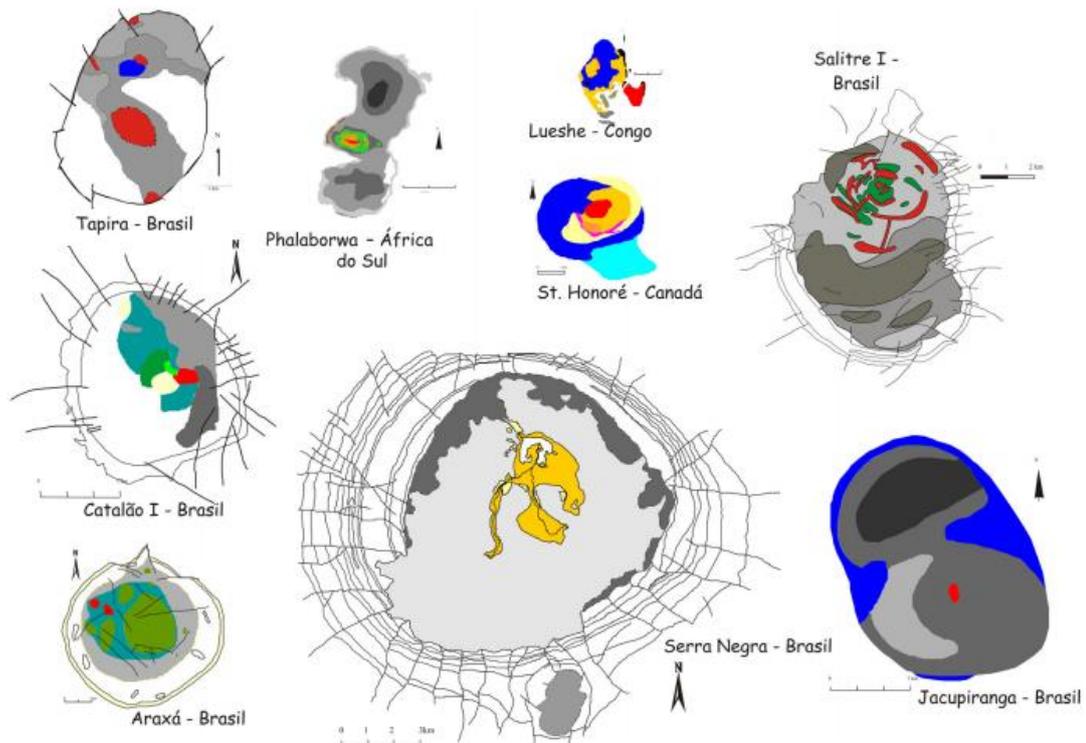
Fonte: USGS (2021).

Apesar dos depósitos sedimentares constituírem uma grande parte dos depósitos fosfatados, o Brasil possui 80% de jazidas fosfáticas de origem ígnea. Contudo, são 6 tipos distintos de ambientes geológicos que originaram os depósitos fosfáticos no país, sendo eles os magmáticos, ortomagmáticos, metassedimentares, sedimentogênicos, lateríticos e orgânicos. O ambiente magmático formou os complexos alcalino-carbonatítico mesozoico, com elevado teor de minério, como os depósitos de Catalão-GO, Tapira-MG, Araxá-MG e Patrocínio-MG. O ambiente ortomagmáticos formou o complexo alcalino-carbonatítico com depósitos em Angico dos Dias-BA e Maecuru-PA. O ambiente metassedimentar formou os depósitos de Patos de Minas-MG, Irecê-BA, Lagamar-MG e Itatiaia-CE. O ambiente sedimentogênico formou os depósitos Paulista/Igarassu-PE e Goiânia-PE. O ambiente laterítico gerou minerais de baixa solubilidade em relação ao fósforo e elevado teor, com fosfatos aluminosos, com depósitos em Taura e Pirocáua-MA. Por fim, o ambiente orgânico, além da localização possui depósitos com baixas reservas justificando a falta de interesse por esse tipo de depósito. Exemplo de depósito como este é o de Ilha Rasa-PE (LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2005).

Contudo, 95% da produção do país é advinda de depósitos alcalino-carbonatítico, característico por uma mineralogia variada, como apresentado na Figura 6. Os carbonatitos são rochas compostas por agregações mineralógicas, como a dolomita, calcita, calcita-dolomita, ankerita, siderita e outras espécies acessórias. Esse tipo de rocha comumente se associa a rochas silicáticas e alcalinas. Essa associação produz complexos em forma de *plugs*, *cone*, *sheets*, *diques*, *sills*, *tefra* e *derrames*. Esses complexos estão presentes em sistema de falhas e lineamentos, e assim formam estruturas de domos, circulares-ovaladas com formação de fenitos ao seu redor. A Figura 6 apresenta a ilustração da forma de alguns complexos carbonatíticos espalhados pelo mundo (LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2005; BARBOSA, 2009).

Além disso, os complexos carbonatíticos podem ser classificados em séries petrogenéticas, que são as séries silicatada, carbonatítica e a foscorítica. A série silicatada possui maior volume quando comparada às demais, onde está inserida a série de afiliação sódica e a série potássica, representada pela série bebedourítica, presente nos complexos carbonatíticos do Alto Paranaíba. A série carbonatítica está ligada a primeira série. Por sua vez, a série foscorítica possui menor ocorrência, com composição de três minerais principais, óxidos de Fe e Ti, apatita e silicatos (BARBOSA, 2009).

Figura 6 - Geometria e tamanho dos Complexos Alcalino Carbonatítico no mundo.



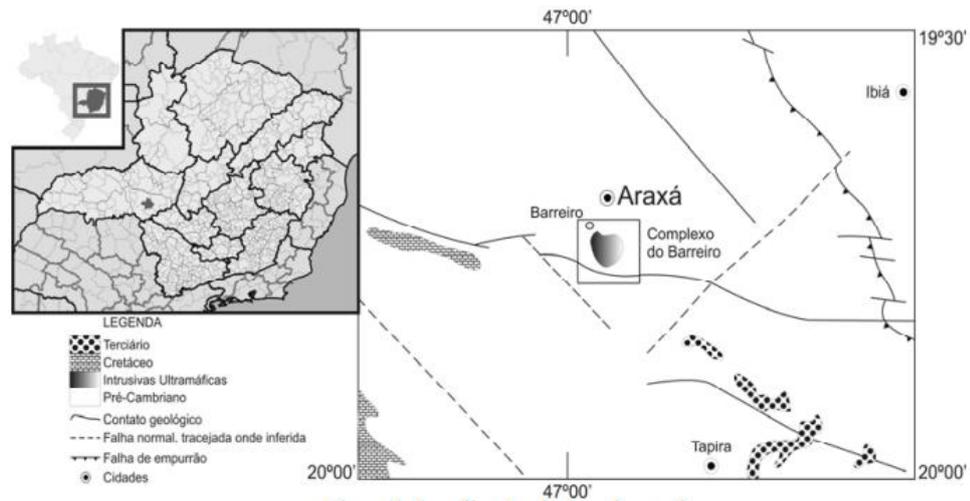
Fonte: BARBOSA (2009).

Para este trabalho, será explanado com maior ênfase o depósito fosfático do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, localizado na cidade de Araxá-MG.

2.3 Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro

O depósito de rocha fosfática de Araxá foi originado em um ambiente magmático, com complexo alcalino-carbonatítico. Localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Parnaíba, sudoeste de Minas Gerais, está localizado no Complexo Carbonatítico do Barreiro, apresentado na Figura 7. Nesse complexo está localizado uma grande mina de nióbio, uma importante mina de fosfato e um parque de águas termais (CRUZ *et al.*, 2011; RAPOSO e PEREIRA, 2013).

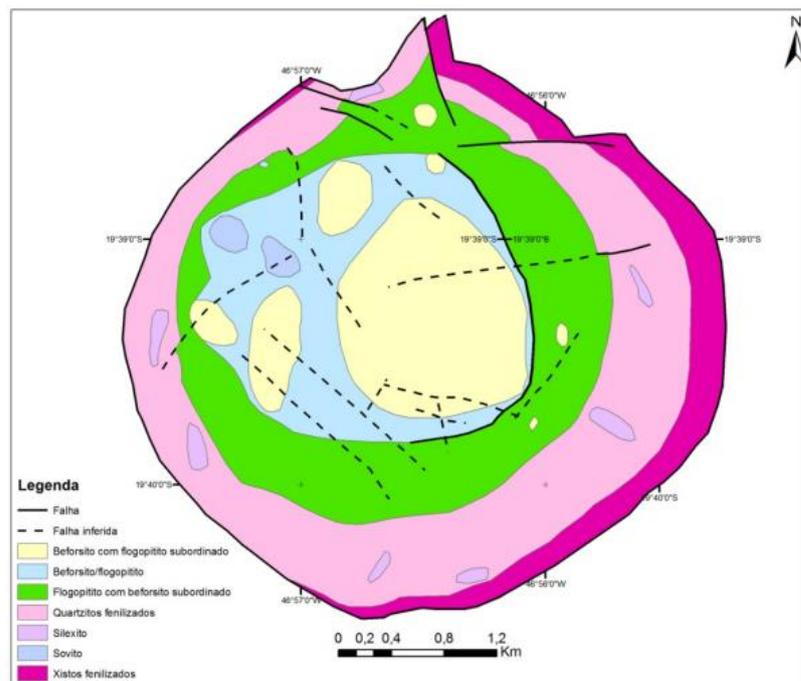
Figura 7 - Localização do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro.



Fonte: CRUZ *et al.* (2011).

O Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro está intrudido entre quartzitos e xistos, possuindo estrutura dômica, com formato semi-circular, apresentando um diâmetro com cerca de 4,5 km e uma área de 1,5 km². Sua representação é apresentada na Figura 8. (CRUZ *et al.*, 2011; RAPOSO e PEREIRA, 2013).

Figura 8 - Mapa geológico do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro.



Fonte: CRUZ *et al.* (2011).

O Complexo é composto por rochas ultramáficas metassomatizadas, com carbonatitos, fosfato residual e uma espessa camada intempérica. Além disso, possui flogopititos, veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito e magnetitito, e poucos veios de barita e silexito (CRUZ *et al.*, 2011; RAPOSO e PEREIRA, 2013).

Neste complexo, há mineralizações de nióbio em sua região central, fosfato na região nordeste, urânio e ETR na região norte. Isso permitiu o desenvolvimento mineral na região, com atividades de lavra desde 1970. Em suas unidades litológicas são encontrados (CRUZ *et al.*, 2011; ABRAM, 2016; RAPOSO e PEREIRA, 2013):

- Wherlitos – composto por olivina e piroxênio;
- Bebedouritos – composto por diopsídio, flogopita, magnetita, apatita e perovskita;
- Flogopitito – composto por flogopita, carbonato, olivina, magnetita e apatita;
- Carbonatito – localizado em instruções em unidades silicatada máficas e ultramáficas;
- Foscorito – composto por apatita, magnetita e silicato magnesiano, cortado por carbonatito e rochas ultramáficas.

Em relação a jazida de fosfato apatítico de Araxá, o minério é classificado de acordo com teor de P_2O_5 total e P_2O_5 apatítico, CaO, MgO e a relação CaO/ P_2O_5 . São identificadas fases como oxidado, cimentado/bitolado, silicatado e sílico-carbonatado (CRUZ *et al.*, 2011).

A exploração inicial ocorreu na parte inicial do manto intempérico, que é uma região oxidada e homogênea. À medida que se aprofunda a exploração, há aproximação da rocha fresca, que possui um menor teor de minério, mudanças nas características químicas e físicas, ocasionando baixos rendimentos mássicos, afetando a produção de concentrados fosfáticos. Uma das mudanças citadas anteriormente é a heterogeneidade do minério, apresentando uma maior taxa de contaminantes (GRASSO, 2015).

Essa heterogeneidade obtida ao se aproximar da rocha fresca gera uma dificuldade na produção do concentrado fosfático, exigindo maior conhecimento sobre o manto. Estas informações são importantes para a vida útil da mina, e também para a produção dos fertilizantes. Com essas mudanças, diferentes respostas em processos de beneficiamento e metalúrgico serão observadas. Assim é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, bem como otimização e utilização de novos métodos que vêm sendo estudados, visando

viabilizar o processamento deste recurso com vista a obter um concentrado de acordo com as especificações de mercado. (GRASSO, 2015; BENITE, 2015).

2.4 Mineral Apatita e Fósforo

O fósforo é um elemento químico, presente na Tabela Periódica, com número atômico 15, símbolo químico “P”. Como um dos principais macronutrientes primários existentes nos fertilizantes, o fósforo é um elemento que possui grande distribuição na crosta terrestre (SOUZA e FONSECA, 2009; UHLEIN, MARQUES e UHLEIN, 2018; LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2008).

A sua grande importância está no papel fundamental que desempenha na produção vegetal, como a fotossíntese e participação ativa durante o crescimento e sustentação corporal de vegetais e animais. Em relação à sua aplicação, o principal uso é na agricultura, presente nos fertilizantes. Assim, o fósforo está presente na composição dos seres vivos, sendo transferido ao solo por solubilização e entrando na cadeia novamente pela absorção das plantas, alimentação de herbívoros e onívoros. Quando ocorre a perda de fósforo no solo, sua reposição deve ser realizada a partir do emprego dos fertilizantes (SOUZA e FONSECA, 2009; LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2008).

Este elemento não se apresenta livre na natureza, sendo sua forma estável o íon ortofosfato (PO_4^{3-}), encontrado sob a forma de sais, os fosfatos. Assim, a principal fonte de fósforo é a rocha fosfática, presente em depósitos de origem sedimentar, ígneo e biogénico (SOUZA e FONSECA, 2009).

Há uma grande quantidade de minerais onde o fósforo está presente, com teor acima de 10%. Essa grande quantidade e complexidade dos minerais fosfatados é devido ao grande número de combinações que o íon ortofosfato possibilita, juntamente com as várias substituições possíveis, aliado aos diversos tipos de ambientes de formação (LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2005).

Dentre as formas mineralógicas existentes, a apatita é a mais comum, apresentada na Figura 9. Ela se apresenta como um mineral que possui brilho vítreo, cor azul, fratura conchoidal, dureza 5 pela escala de Mohs, aspecto translúcido, traço branco e densidade entre 3,1 a 3,2 g/cm³ (PEIXOTO, FERREIRA e MATTOS, 2016).

A apatita é semi-solúvel, muito presente na crosta terrestre, em distintos ambientes, proporcionando assim, uma ampla variedade composicional, influenciada pelo ambiente de formação, podendo ser sedimentar, ígneo, metamórfico e hidrotermal (SOUZA e FONSECA, 2009; UHLEIN, MARQUES e UHLEIN, 2018).

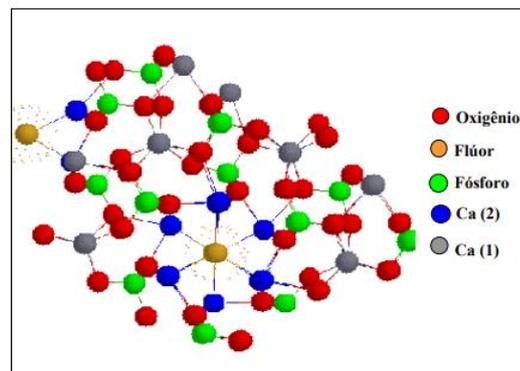
Figura 9 - Apatita



Fonte: PEIXOTO, FERREIRA e MATTOS (2016)

Em relação à sua estrutura, a apatita é um mineral hexagonal, sendo que a cada átomo de flúor (F) há três átomos de cálcio (Ca). Há a união também das colunas Ca-O unidas com tetraedros de PO_4 , formando assim uma malha hexagonal, conforme apresentada na Figura 10 (CHULA, 2004).

Figura 10 - Estrutura da fluorapatita



Fonte: RIBEIRO (2002) *apud* CHULA (2004).

A fórmula geral da apatita é $M_{10}(YO_4)_6(X_2)_5$. Dentro desse grupo, existem as variações fluorapatita, hidroxiapatita, cloroapatita, presentes em rochas ígneas, em especial

carbonatitos. Em rochas sedimentares, há ocorrência das variações da carbonatoapatita e carbonato-fluorapatita. As espécies mineralógicas da apatita são apresentadas no Quadro 1. (LOUREIRO, MONTE e NASCIMENTO, 2008).

Quadro 1 - Variações mineralógica do mineral apatita.

MINERAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA
Fluorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$
Cloroapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
Carbonatohidroxiapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH})$
Carbonatofluorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{F}$
Esvabita	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$
Turneaureita	$\text{Ca}_5[(\text{As}, \text{P})\text{O}_4]_3\text{Cl}$
Johnbaumita	$\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})$
Fermorita	$(\text{Ca}, \text{Sr})_5(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH})$
Fluorcafita	$\text{Ca}(\text{Sr}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ce})_3(\text{PO}_4)_3\text{F}$
Estrôncioapatita	$(\text{Sr}, \text{Ca})_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
Belovita – (Ce)	$\text{Sr}_3\text{Na}(\text{Ce}, \text{La})(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$
Belovita - (La)	$\text{Sr}_3\text{Na}(\text{La}, \text{Ce})(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$
Alforsita	$\text{Ba}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Morelandita	$(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Pb})_5(\text{AsO}_4, \text{PO}_4)\text{Cl}$
Hedifana	$\text{Pb}_3\text{Ca}_2(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Piromorfita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Mimetita	$\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Clinomimetita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Vanadinita	$\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$

Fonte: ATHENA MINERALOGY *apud* CHULA (2004).

Rochas carbonatíticas apresentam em sua composição apatitas com um teor de P_2O_5 entre 5 e 15%. O principal grupo de apatitas presente nesse tipo de rocha é fluorapatita, sendo um cristal de cálcio com flúor. Os depósitos de rochas carbonatíticas que possuem apatita apresentam contaminantes que influenciam em seu processo de concentração nas usinas de beneficiamento, aumentando os custos de produção, sendo considerados assim, depósitos complexos (SOUZA e FONSECA, 2009).

2.5 Flotação

Para ser encaminhado para a indústria de fertilizantes, o minério fosfático deve atender a alguns parâmetros industriais como teor de P_2O_5 maior que 30%, razão CaO/P_2O_5 menor que 1,6, e taxa MgO menor que 1%. Porém, quando a rocha fosfática não atende a esses critérios, é necessário submetê-la a rotas industriais envolvendo processos de beneficiamento. Dentre os métodos utilizados para essa concentração mineral, como lixiviação e calcinação, o principal método utilizado é a flotação (SIS e CHANDER, 2003; MASSI *et al.*, 2008).

A flotação se trata do método de concentração mineral mais utilizado pela indústria mineral. A operação se baseia na diferença das propriedades de superfície das partículas minerais para que ocorra a separação entre elas. A técnica envolve o emprego de uma suspensão aquosa denominada de polpa, onde são inseridas bolhas de ar. As partículas hidrofóbicas ou hidrofobizadas, presentes na polpa, percorrem um trajeto, até que dado momento elas se prendem a essas bolhas de gás, deslocando-a para a superfície. O conjunto bolha-partícula ao chegar na superfície é separado na espuma formando o produto flotado. As demais espécies minerais, hidrofílicas, permanecem na fase aquosa formando o produto afundado (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; MASSI *et al.*, 2008; OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

A capacidade das partículas de se aderirem às bolhas na fase aquosa dependerá da sua hidrofobicidade, ou seja, quanto mais a partícula for hidrofóbica, maior será a afinidade por substâncias apolares, promovendo melhor adesão nas bolhas de gás. Apesar da hidrofobicidade ser uma propriedade importante no processo de concentração, as partículas minerais são majoritariamente hidrofílicas, sendo poucos os minerais hidrofóbicos naturalmente. Para contornar essa situação e possibilitar que a flotação seja aplicada, são utilizados reagentes. Minerais hidrofílicos podem ter sua superfície modificada, tornando-a

hidrofóbica. Assim, a flotação é possibilitada pela indução da hidrofobicidade na superfície das partículas (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

No caso da flotação de minérios fosfatados, os minerais que o compõem são semi-solúveis. Minerais como a apatita, fluorita e magnesita são hidrofílicos. Assim, para flotá-los é necessário realizar sua hidrofobização para viabilizar a sua flotação. Isso é realizado através de reagentes (SIS e CHANDER, 2003).

Porém, neste caso ainda há um outro fator que prejudica a etapa. Alguns minerais possuem propriedades de superfície semelhantes, como a apatita e a calcita, dificultando a seletividade da operação. Essa semelhança, aliada à complexidade mineralógica, baixo grau de uniformidade, baixo teor de apatita e alto teor de carbonatos, características dos depósitos fosfáticos brasileiros, prejudica o aproveitamento econômico do recurso. Baseado nessa problemática, vários estudos são realizados através da pesquisa por novos reagentes que propiciem essa seletividade (SIS e CHANDER, 2003; GUIMARÃES, LIMA e OLIVEIRA, 2004).

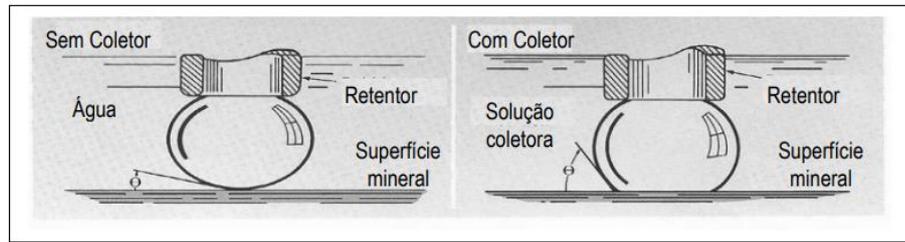
2.5.1 COLETORES

Coletores são reagentes utilizados na flotação que possuem a função de adsorver seletivamente na superfície de determinadas partículas, formando uma monocamada hidrofóbica sobre ela. São reagentes que atuam no aumento do ângulo de contato entre a fase sólida, líquida e gasosa, importante para que ocorra uma adsorção significativa, e assim, proporcionar boas condições para a flotação (GUEDES, 2012; DOWN, 1981 *apud* CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; LUZ e LINS, 2010; MONTE e PERES, 2010).

Esses reagentes se comportam como substâncias surfactantes que possuem em suas estruturas duas partes principais, uma parte apolar, de natureza molecular e uma outra polar, iônica. A porção molecular possui tamanho de cadeia variável, orgânica, linear ou ramificada (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; MONTE e PERES, 2010; LUZ e LINS, 2010).

Quando estão em solução, a porção polar do coletor fica ionizada, e a porção molecular preserva sua composição. No contato sólido-gás a molécula do surfactante tenderá a se posicionar com a parte apolar em contato com gás e a parte polar em contato com a partícula. Esse contato, em um sistema de flotação, com presença e ausência de coletor é representado na Figura 10 abaixo (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; LUZ e LINS, 2010).

Figura 10 - Representação do sistema com e sem coletor em contato bolha-partícula.

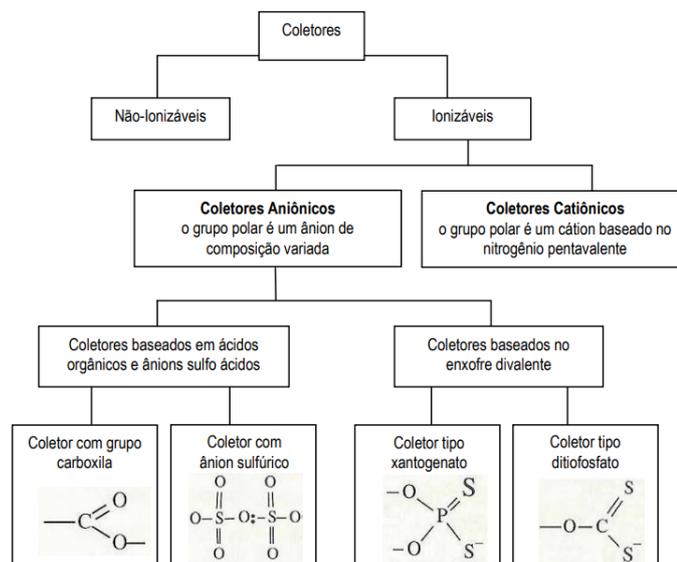


Fonte: CHAVES, FILHO e BRAGA (2010).

Os coletores podem ser classificados de acordo com sua carga iônica em catiônicos e aniônicos. Essa classificação leva em consideração a carga elétrica da porção polar, oriunda da ionização da estrutura. A classificação geral, em função da carga iônica é apresentada na Figura 11 (CHAVES, FILHO E BRAGA, 2010).

Os coletores não ionizáveis são hidrocarbonetos líquidos, como o diesel. Os coletores aniônicos se subdividem de acordo com sua função química, em oxidrídricos e sulfidrídricos. Os principais componentes desse grupo são ácidos graxos, bem como seus sabões, além de sulfatos e sulfonatos de alquila. Os coletores catiônicos são representados pelas aminas e seus acetatos, sendo menos seletivos, quando comparados aos coletores aniônicos, e mais afetados pelos modificadores de coleta. Em geral, são aplicados em flotação de não metálicos, como o quartzo, micas, talco, dentre outros (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

Figura 11 - Classificação dos coletores



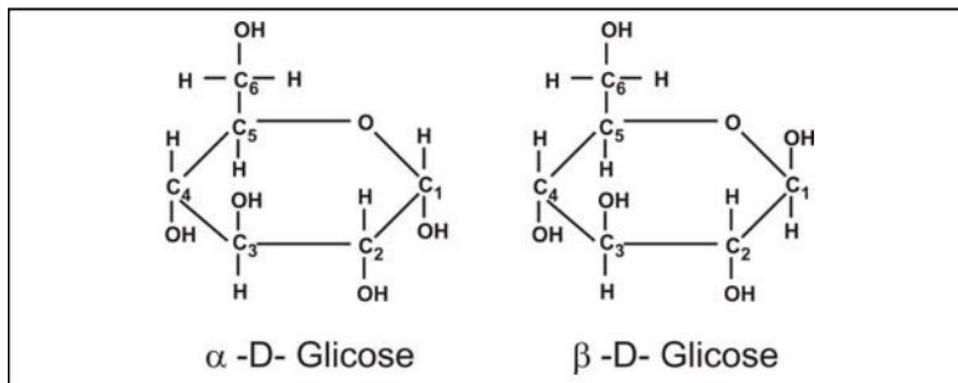
Fonte: CHAVES, FILHO e BRAGA (2010).

2.5.2 DEPRESSORES

Os depressores são reagentes utilizados na flotação com a função de deprimir determinadas partículas minerais. Assim, proporcionam um caráter hidrofílico e inibem a ação do coletor, tornando a etapa mais seletiva. Podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos, representados pelos amidos, taninos, dextrinas, celulose, dentre outros, apresentam em sua estrutura grupos polares hidrofílicos orientados para a fase aquosa. Os inorgânicos são comumente aplicados em carbonatos, em sistemas de flotação como silicatos, fosfatos, cromatos, dentre outros, apresentando vantagens em relação os orgânicos, por serem mais baratos, estáveis, não tóxicos e biodegradáveis (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; NUNES e PERES, 2011).

Alguns depressores orgânicos, merecem destaque neste trabalho, tendo em vista que são aplicados na flotação de minérios fosfáticos. Os polissacarídeos são depressores orgânicos, compostos por polímeros orgânicos de moléculas de glicose. O amido e a celulose são os principais representantes desse grupo. Ambos são constituídos de glicose, que por sua vez, é constituído de monômeros de α -D-glicose e β -D-glicose, diferindo apenas pela orientação do grupo hidroxila que estão ligados ao átomo de carbono C1, conforme apresentado na Figura 12 abaixo (NUNES e PERES, 2011; LUZ e LINS, 2010).

Figura 12 - Estrutura da molécula de glicose

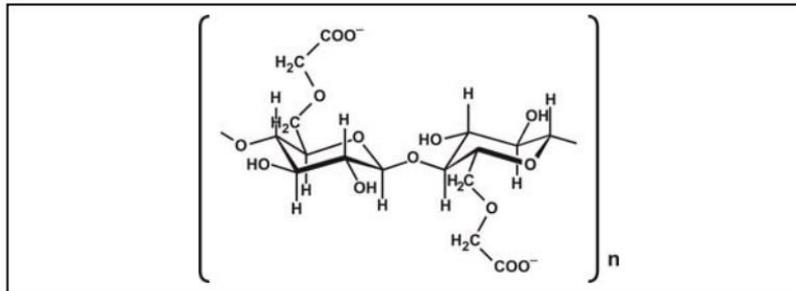


Fonte: NUNES e PERES (2011).

A carboximetil celulose (CMC) é um outro tipo de depressor orgânico, de estrutura linear, apresentando monômeros de β -D-glicose nos carbonos C1 e C4. Apresenta também

grupos carboxílicos, conferindo característica hidrofílica expressiva, conforme apresentada na Figura 13. O CMC é utilizado na flotação de minérios polimetálicos, como cobre-zinco, cobre-níquel, metais do grupo platina e cobre-chumbo-zinco (NUNES e PERES, 2011).

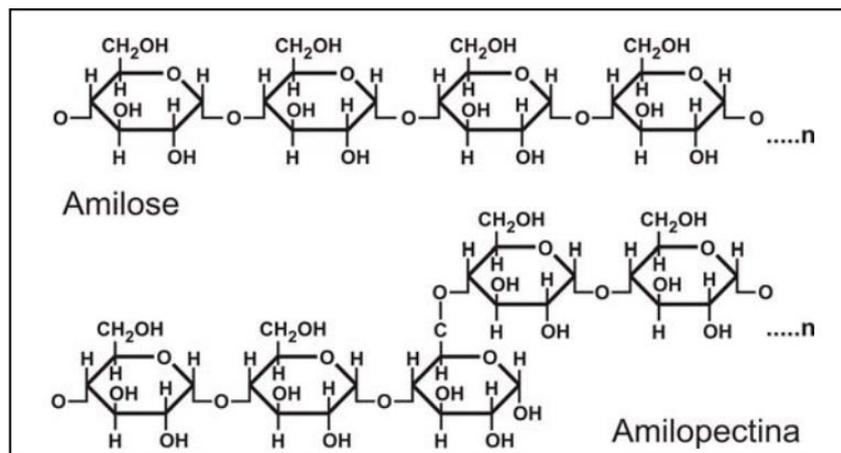
Figura 13 - Estrutura da molécula de CMC.



Fonte: NUNES e PERES (2011).

O amido é um polissacarídeo utilizado em sistema que possuem ganga carbonática, como os argilo-minerais e óxidos de ferro, por exemplo. O amido é composto principalmente por amilose e amilopectina, que são outros tipos de moléculas de glicose. A amido possui estrutura linear e insolúvel, enquanto a amilopectina possui estrutura ramificada e alta solubilidade. Suas estruturas são apresentadas na Figura 14 abaixo (NUNES e PERES, 2011).

Figura 14 - Estrutura da molécula de amilose e amilopectina.



Fonte: NUNES e PERES (2011).

Diante disso, são reagentes que atuam na seletividade do processo de flotação. Alguns exemplos deste tipo de reagentes são silicato de sódio, polímeros naturais (celulose, amido) e polímeros sintéticos (OLIVEIRA e SOUZA, 2012; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

2.5.3 ESPUMANTES

Os espumantes têm a função de reduzir a tensão interfacial líquido gás, favorecendo a estabilidade das bolhas geradas no sistema. São compostos tenso-ativos heteropolares, que possuem uma porção polar e uma porção hidrocarbônica. Estes reagentes são muito parecidos com os reagentes coletores, diferenciando-se pela característica do grupo polar. Os espumantes possuem radical liofílico com afinidade pela água, enquanto nos coletores, o radical são ativos quimicamente, com capacidade de interação com a superfície do mineral de interesse (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

Baltar (2008) cita que um bom espumante deve proporcionar a formação de bolhas estáveis durante a colisão, adesão e transporte da partícula até a superfície permitindo sua coleta, possuir baixa sensibilidade ao pH da polpa e presença de sais dissolvidos, não deve apresentar propriedades de coleta, além de possuir baixo custo com disponibilidade.

Um dos primeiros espumantes naturais utilizados foram o óleo de pinho e ácido cresílico. Porém, vêm sendo substituído por produtos sintetizados a base de polipropileno glicol e álcoois de cadeia cíclica ou ramificada. A Clariant[®], por exemplo, é uma empresa que fornece reagentes espumantes, como Flotanol e Montanol, à base de éter de propilenoglicol e mistura de álcoois alifáticos ramificados, respectivamente (CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

2.5.4 MODIFICADORES

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

Os reagentes modificadores podem ser classificados de acordo com a função que desempenham no sistema de flotação, como os depressores (tratados no item 2.5.2 DEPRESSORES), ativadores, reguladores de pH e dispersantes. Os ativadores são reagentes que favorecem a adsorção do coletor sobre a partícula de interesse. Os dispersantes impedem a agregação das partículas, podendo ser orgânicos e inorgânicos, como o metassilicato de sódio, carboximetilcelulose (CMC) e metafosfato de sódio. Os reguladores de pH também possuem um papel muito importante tendo em vista a importância de controle do pH na polpa. É um tipo de reagente que atua sobre o potencial zeta da partícula mineral, adsorção e dissociação dos coletores e adsorção de cátions e ânions (OLIVEIRA e SOUZA, 2012; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

2.6 Equipamentos de Flotação

Como citado anteriormente, a flotação é o método de concentração mais comumente utilizado para concentração do minério fosfático. Esse tipo de processo é realizado em máquinas, denominadas equipamentos de flotação, que devem possuir a capacidade de realizar distintas funções simultâneas para que a concentração ocorra de maneira mais eficiente possível. Essas funções são citadas por Oliveira e Souza (2012):

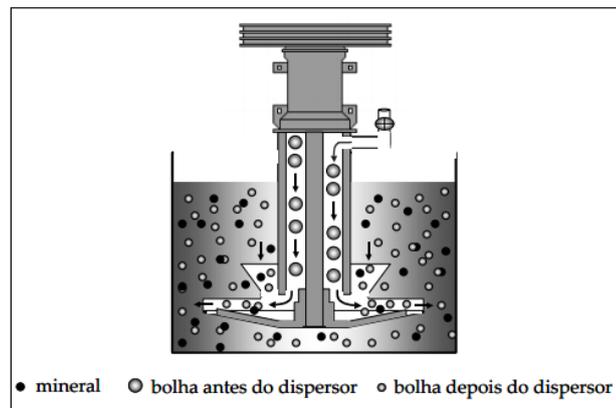
- Capacidade de que as partículas sejam mantidas em suspensão, sendo definido um grau de agitação sobre a polpa, de forma que a velocidade que as partículas ascendem seja maior que a velocidade de sedimentação na polpa.
- Capacidade de gerar bolhas proporcionando uma coleta de partículas de diferentes tamanhos, e com isso, proporcionando também dispersão dessas bolhas geradas para que haja o contato entre partícula bolha.
- Além do contato, deve proporcionar a colisão entre a partícula bolha, de forma a promover a sua adesão seletiva e assim, possibilitar o movimento ascendente desse agregado a camada de espuma.

Nesse sentido, existem vários tipos de máquinas de flotação que possuem diversas características. Para avaliar a eficiência e a performance destes equipamentos, são observados desempenho, capacidade, custos operacionais e facilidade de operação. Diante das possíveis características que esses equipamentos possuem e avaliando sua eficiência e performance, foram desenvolvidos ao longo do tempo alguns tipos de máquinas de flotação, sendo

divididos em três classes principais: células mecânicas, células pneumáticas e células de coluna (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Em escala de bancadas, podem ser utilizadas as células de flotação, que possuem um recipiente, ou cuba, que pode ser de vidro, alumínio ou acrílico com vários tipos de formato e volume, e sistema de agitação e aeração, conforme apresentado na Figura 15 abaixo (SAMPAIO e BALTAR, 2007).

Figura 15 - Esquema da estrutura de uma célula de flotação de minério.



Fonte: SAMPAIO e BALTAR (2007).

O sistema de agitação é composto por um motor, que ao ser ligado, aciona através de correias outro conjunto que consiste em um tubo oco dotado de uma hélice (impulsor) em sua extremidade oposta. Assim, esse sistema nas máquinas de flotação promove um regime de operação turbulento em sua porção inferior, favorecendo o choque da partícula-bolha. Na porção superior, a operação deve ocorrer em regime laminar, proporcionando um ambiente que preserve a integridade das bolhas (SAMPAIO e BALTAR, 2007; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

A função desse sistema consiste em manter as partículas em suspensão e assim, proporciona o contato da bolha com a partícula. Contudo, se a agitação for intensa, de forma excessiva, provocará a coalescência das bolhas antes que a mesma alcance a superfície da célula, prejudicando assim a eficiência da flotação. Porém, se a agitação for baixa, as partículas sedimentam. Dessa forma, a agitação deve ser controlada para que o processo não seja prejudicado (SAMPAIO e BALTAR, 2007).

Em relação ao sistema de aeração, o mesmo tem a função de introduzir bolhas na polpa. O fluxo de ar que é introduzido na polpa passa por um tubo oco e sua saída ocorre pelas aberturas próximas ao dispersor (SAMPAIO e BALTAR, 2007).

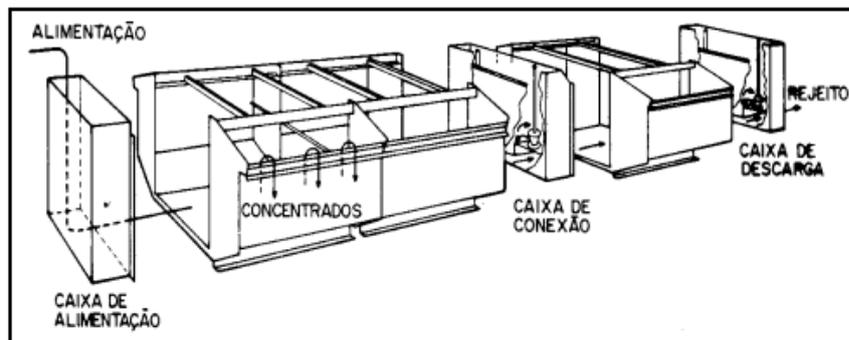
O fluxo de ar promovido pelo sistema de aeração pode ocorrer por ar comprimido ou pressão negativa. No caso do ar comprimido, há a possibilidade de controle da quantidade de ar que é injetado nas máquinas de flotação que utilizam esse tipo de sistema. No segundo tipo, a pressão negativa é gerada na extremidade inferior do sistema de agitação (impulsor) e assim promove a entrada de ar por uma válvula na porção superior (SAMPAIO e BALTAR, 2007; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

2.6.1 CÉLULAS MECÂNICAS

Segundo Chaves (2006), as células mecânicas são tanques que recebem a polpa pela sua região lateral. Na porção superior é retirada a espuma mineralizada e na porção inferior é obtido o produto afundado. Em escala industrial, são utilizados conjuntos de células mecânicas, sob a forma de bancos de flotação, a fim de garantir que as partículas hidrofobizadas apresentem maior probabilidade de serem flotadas. Assim, diminui-se a chance de que partículas que deveriam ser coletadas, sejam carregadas pelo fluxo deprimido, o que chamado pelo autor, “exaustão da espuma”.

Essas células podem ser fechadas, denominadas de “*cell-to-cell*”, ou abertas em sua lateral. No caso de células abertas, o fluxo deprimido passa de uma célula a outra. Isso ocorre devido o controle de nível entre a alimentação e a descarga, permitindo a passagem do fluxo deprimido entre as células. No caso das células fechadas, há um dispositivo próprio que faz esse controle de nível. Contudo, existe tendência de se utilizar modelos com abertura em sua lateral (CHAVES, 2006). A Figura 16 apresenta o esquema das células de flotação.

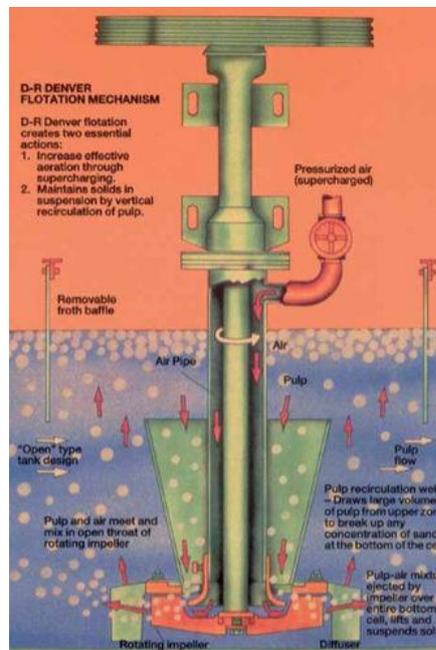
Figura 16 - Célula de flotação



Fonte: CHAVES, FILHO e BRAGA (2010).

A máquina de flotação é introduzida internamente na célula. Por sua vez é constituído de um rotor que está conectado por um eixo de acionamento, e assim tem a função de manter a polpa em suspensão. Com o seu movimento é gerada pressão negativa, que aspira o ar para o interior da polpa, realizando sua flotação. Há casos também em que há injeção de ar comprimido, adicionando um estator em torno rotor, para que uma grande quantidade de pequenas bolhas sejam criadas e capazes de carregarem as partículas coletadas (CHAVES, 2010; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010). As Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, máquina de flotação e conjunto de células de flotação.

Figura 17 - Máquina de flotação.



Fonte: DIRECT INDUSTRY.

Figura 18 - Banco de células de flotação.



Fonte: DIRECT INDUSTRY.

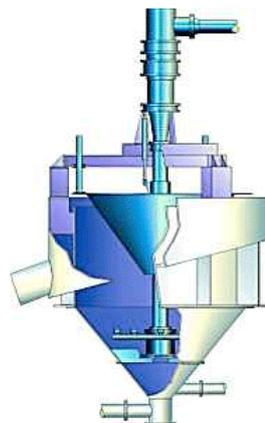
2.6.2 CÉLULAS PNEUMÁTICAS

As células pneumáticas são resultantes da tentativa de suprir algumas deficiências que as células mecânicas possuíam. O equipamento é composto por um tanque de seção cilíndrica ou quadrada, sem partes móveis e com o ar introduzido por um injetor, também chamado de aerador, no fundo da célula. Esse injetor possui canais para passagem de ar, produzindo bolhas com diâmetro de 0,1 a 0,5 mm (CHAVES, 2006; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Esse ar injetado é responsável pela agitação, e isso faz com que o consumo energético seja alto. Contudo, como não ocorre agitação mecânica, a turbulência na polpa é baixa e isso possibilita que partículas finas e grosseiras sejam flotadas. Devido a isso, esse tipo de célula é recomendado para materiais com ampla faixa granulométrica, materiais densos e frágeis (CHAVES, 2006; OLIVEIRA e SOUZA, 2012; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

Um exemplo de empresa que fornece células pneumáticas é a Maelgwyn Mineral Services, na área de implantação de tecnologia em processamento mineral, químico e residual. Na linha de seus produtos, a empresa oferece Imhoflot G-Cell, uma célula pneumática, com características como possibilidade de recuperação de partículas menores que 20 μm e maiores que 350 μm , e a geração de bolhas pequenas, que ajudam na seletividade do processo. O *design* esquemático desse tipo de célula é mostrado na Figura 19 (MAELGWYN, 2020).

Figura 19 - Design da célula pneumática.



Fonte: MAELGWYN (2020).

Como exemplo de aplicação das células pneumáticas, destaca-se o emprego destes equipamentos na empresa Minera Los Penambres, localizada no Chile, para flotação de molibdênio, apresentado na Figura 20. A sua capacidade por célula era de 200 m³/h, podendo utilizar entre 160 m³/h a 280 m³/h. A decisão de incorporá-las em seu beneficiamento surgiu de resultados de ensaios realizados em escala piloto, onde observaram aumento do teor e recuperação em seus concentrados. Assim, hoje conseguem produzir teores maiores que 50% de Mo, com recuperações melhores (MAELGWYN, 2008).

Figura 20 - Concentrado final utilizando as células pneumáticas em Los Penambres.



Fonte: MAELGWYN (2008).

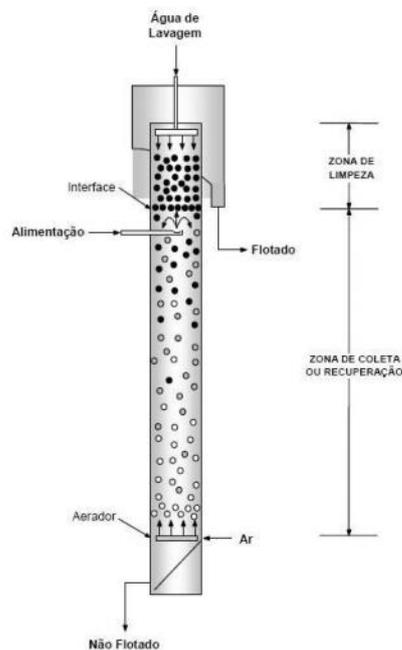
2.6.3 COLUNAS DE FLOTAÇÃO

O surgimento das colunas nas operações de flotação provocou grande desenvolvimento no setor. O início do seu desenvolvimento foi realizado por uma dupla de canadenses, Boutin e Tremblay, no início da década de 60. Sua patente foi registrada no início do século passado. A primeira coluna implantada ocorreu no Canadá, na Les Mines Gaspé, em 1981, substituindo um conjunto de células na etapa *cleaner*, em um circuito de produção. Posteriormente, foi implantada na mesma unidade uma segunda coluna, vindo a substituir todas as células mecânicas do circuito (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Esse equipamento se diferencia das células mecânicas, basicamente, pela sua geometria, com uma relação altura/diâmetro alta, existência da água de lavagem, sem

presença de agitação mecânica, possuindo sistema de geração de bolhas. Com essas características, a coluna permite a obtenção de melhores resultados, principalmente quando aplicado a materiais de granulometria fina. O esquema da coluna de flotação é apresentado na Figura 21 (OLIVEIRA e SOUZA, 2012; CHAVES, 2006; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010).

Figura 21 - Esquema da coluna de flotação.



Fonte: CHAVES *et al.* (2010).

A sua alimentação é feita a 2/3 da altura da coluna e a introdução do ar ocorre na porção inferior, em sua base. As partículas se deslocam em posição contracorrente se chocando com as bolhas de ar. Isso ocorre na zona de coleta ou recuperação, localizada entre ponto de geração das bolhas, e a interface polpa-espuma. Assim, nesse movimento, as partículas hidrofobizadas se deslocam para a espuma, presente na zona de limpeza (presente entre a interface polpa-espuma e transbordo da coluna). Neste ponto, ocorre a lavagem das bolhas mineralizadas, e assim as partículas que sofreram arraste mecânico, se desprendem das bolhas e afundam. As partículas hidrofílicas são retiradas na porção inferior da coluna (CHAVES, 2006; CHAVES, FILHO e BRAGA, 2010; OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Uma empresa que fornece esse tipo de máquina é a Metso, oferecendo, dentre sua linha de produtos, a coluna de flotação MicrotelTM, produzida em uma faixa de diâmetro de

0,3 a 6 metros, e uma altura de 7 a 15 metros. O esquema desse produto oferecido pela empresa é apresentado na Figura 22 (METSO, 2020).

Figura 22 - Esquema da coluna de flotação Microtel™

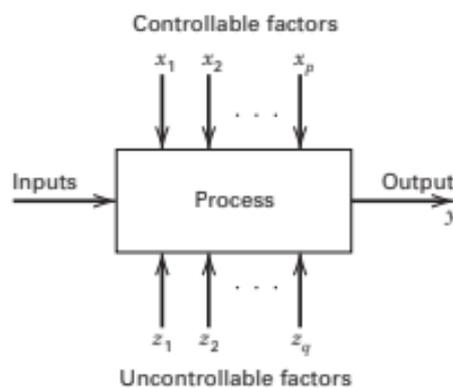


Fonte: METSO (2020).

2.7 Planejamento Fatorial

Para entender algum processo ou sistema em operação, é importante ir além da observação. Um processo está associado com fatores de entrada, que dependendo da forma que são modificados, produzem fatores de saída, numa relação de causa e efeito. À medida que as variáveis de entradas são modificadas, deve-se observar as modificações produzidas nas variáveis de saída. E para entender essa relação e como o processo funciona é necessário realizar experimentos. Essa relação é ilustrada na Figura 23 (MONTGOMERY, 2013).

Figura 23 - Esquema genérico de um processo.



Fonte: MONTGOMERY (2013).

Essa observação sobre o processo/sistema pode gerar teorias e a experimentação mostrará se elas estão corretas. Dessa forma, Montgomery (2013, p.13) traz a definição de experimento como “[...] teste ou série de execuções em que mudanças propositadas são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema para que possamos observar e identificar as razões para mudanças que podem ser observadas nas respostas de saída. [...]”.

Quando esses experimentos envolvem o estudo de mais de uma variável, é indicado utilizar o planejamento fatorial, pois o mesmo estuda o efeito de uma ou mais variáveis sobre uma ou mais resposta com mesmo nível de interesse sobre os fatores. Essas variáveis podem ser qualitativas e quantitativas (MONTGOMERY, 2013; PULIDO e SALAZAR, 2012).

Assim, em um planejamento fatorial são realizadas todas as combinações possíveis de acordo com os níveis das variáveis que estão sendo estudadas (MONTGOMERY, 2013; PULIDO e SALAZAR, 2012).

Quando estudados, esses fatores devem possuir pelo menos dois níveis de ensaios para cada um. Dessa forma, o planejamento fatorial completo é realizado com as combinações e seus devidos níveis possíveis. Quando a resposta possui uma mudança ocasionada por uma mudança no nível, é denominado de efeito do fator, que também é conhecido como efeito principal. Por outro lado, se as variáveis interagirem entre si, será um efeito de interação, ou seja, o efeito da variável depende do nível em que a(s) outra(s) variável(is) se encontra(m) (MONTGOMERY, 2013; PULIDO e SALAZAR, 2012).

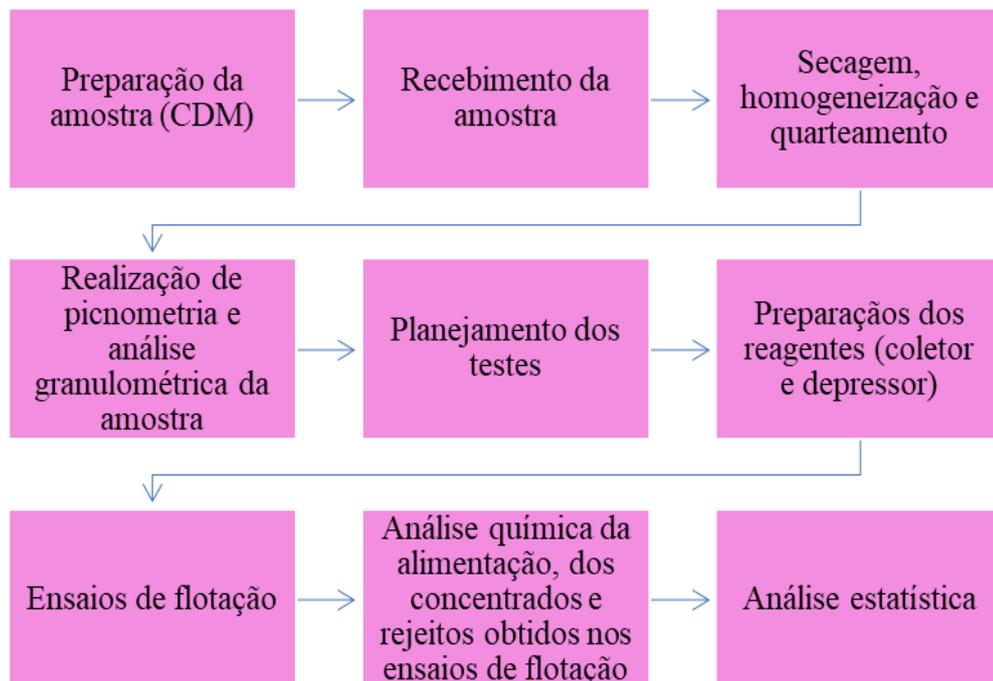
No caso dos experimentos fatoriais, estes podem ter 2^k , sendo k fatores e dois níveis de ensaio, ou 3^k , com k fatores e três níveis de ensaio, e assim por diante. Caso k fatores não possuir o mesmo número de níveis, o número de ensaios correspondentes serão o produto dos seus níveis (PULIDO e SALAZAR, 2012).

Os experimentos 2^k , em especial, são utilizados quando o número de fatores estão entre 2 e 5, com tamanho entre 4 e 32 tratamentos. Planejamentos fatoriais com 2 níveis, completos ou fracionários (2^{k-p} indicado quando o número de fatores é acima de 5), possui maior impacto, apresentando-se de forma versátil e eficiente em suas aplicações (PULIDO E SALAZAR, 2012).

3.0 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Campus Araxá. As análises químicas da alimentação e dos produtos gerados nos ensaios de flotação foram realizadas pela *Mosaic* Fertilizantes, no Complexo de Mineração de Tapira (CMT). A análise granulométrica inicial e preparação da amostra foram realizadas no Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) da Vale. O esquema de todas as etapas do trabalho é ilustrado na Figura 24 abaixo.

Figura 24 - Etapas desenvolvidas no trabalho.



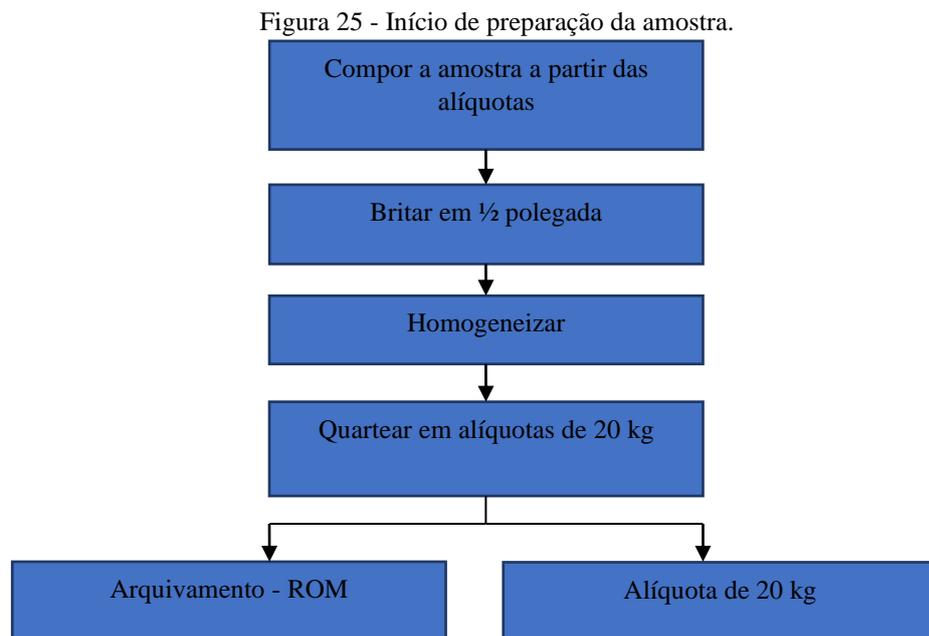
Dessa forma, neste tópico será tratado a adequação granulométrica, realizada pela empresa (CDM-Vale), além da caracterização física do minério (picnometria e análise granulométrica), ensaios de flotação, bem como a preparação dos reagentes envolvidos, que foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, Campus Araxá.

3.1 Preparação das Amostras de Minério Fosfático Realizada no CDM-Vale

Para este trabalho foi utilizada uma amostra de minério fosfático, cedida pela Vale Fertilizantes, atualmente *Mosaic* Fertilizantes, oriunda do depósito fosfático de Araxá-MG. O

minério fosfático foi retirado de um afloramento de bebedourito, constituindo-se de rocha fresca. A empresa realizou sua adequação granulométrica e análise granuloquímica, que será abordado abaixo.

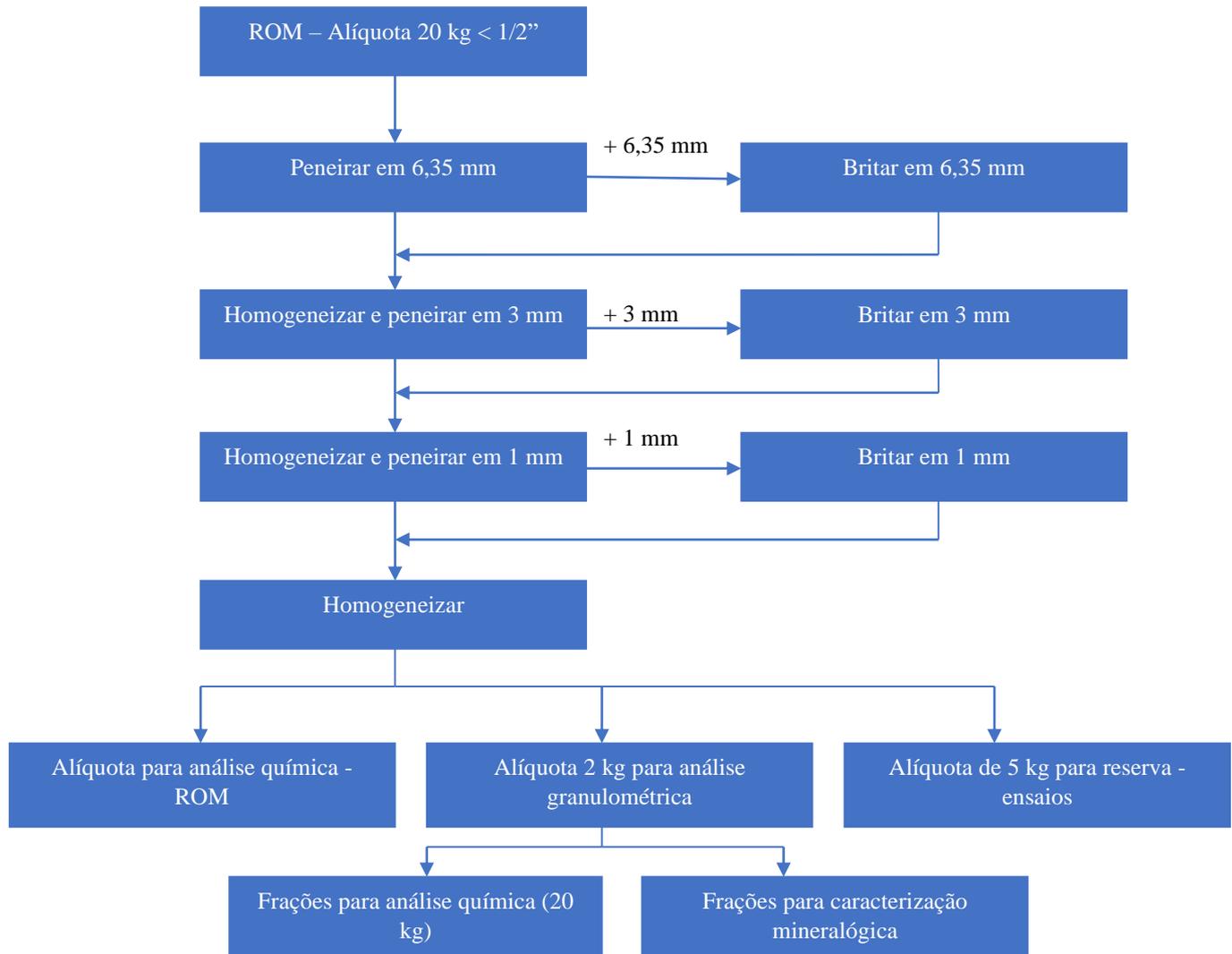
Dessa forma, após a amostra de minério bebedourítico ser recolhida, foi iniciada a sua preparação. Foi realizada a britagem em ½”, sendo seu produto homogeneizado e separado em alíquotas de 20 kg, conforme apresentado na Figura 25.



Fonte: FERREIRA (2015).

Com a alíquota de 20 kg foi realizada uma nova britagem em 6,35 mm, 3 mm e 1 mm, em circuito fechado com peneiramento, em peneiras com malhas de aberturas correspondentes. Após essa etapa, foi realizada a homogeneização, quartejamento e retiradas de alíquotas para análise química e análise granulométrica, como apresentado no esquema da Figura 26.

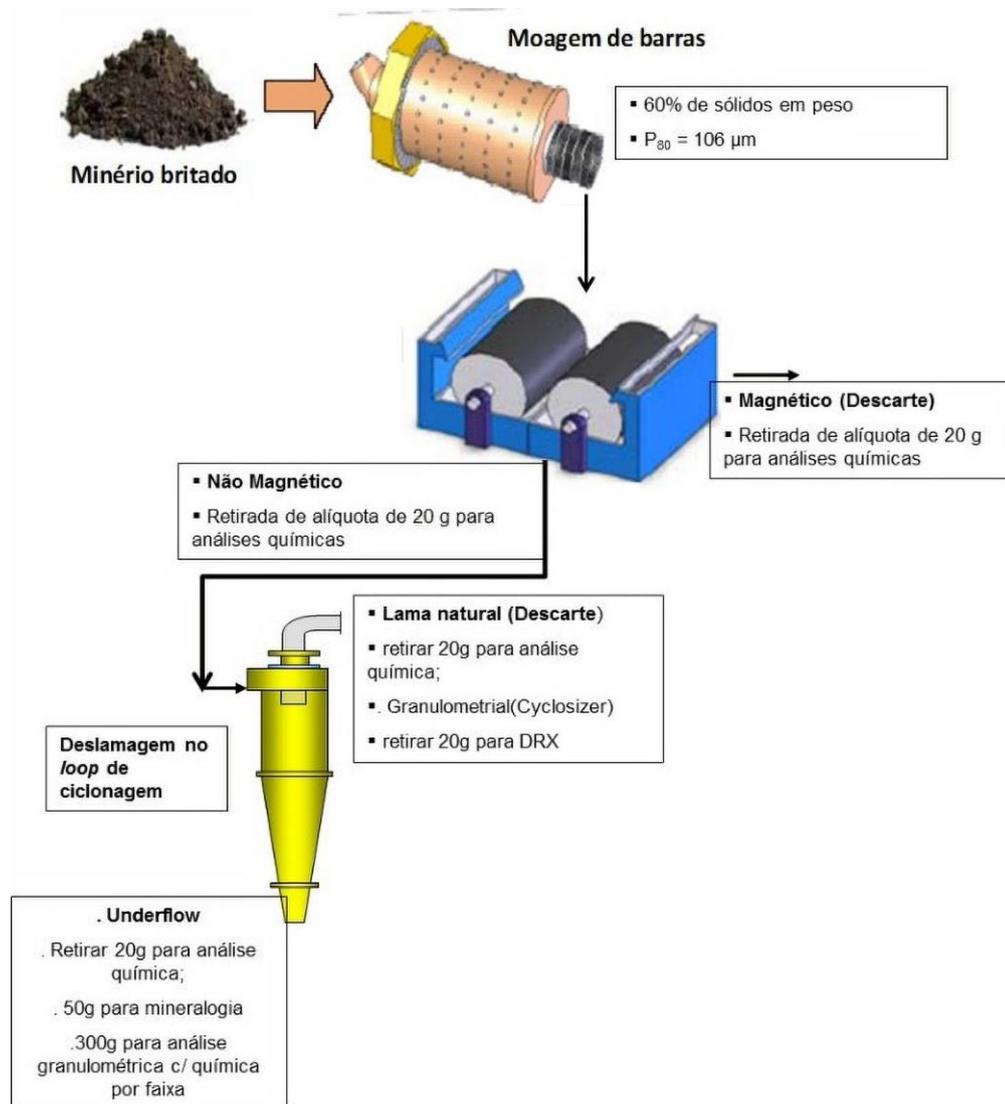
Figura 26 - Fluxograma de preparação da amostra BEB 01: Etapa de britagem.



Fonte: Adaptado de FERREIRA (2015).

Após essa etapa, foi realizada a moagem no moinho de barras de forma a obter um produto com p80 de 106 μm . Posteriormente, com o produto moído foi realizada separação magnética de baixo campo, com campo magnético de 1000 Gauss e alimentação de 25% de sólidos (em peso). A fração magnética foi recolhida e a fração não magnética continuou no circuito de preparação. Assim, foi realizada sua deslamagem em um ciclone, para obter um corte de *overflow* de 15 a 20 μm , como apresentado na Figura 27. Dessa forma, a amostra BEB 01 utilizada neste trabalho consistiu no *underflow* da deslamagem da etapa de preparação.

Figura 27 - Fluxograma de preparação da amostra BEB 01: Etapa de moagem, separação magnética e deslamagem.



Fonte: FERREIRA (2015).

3.2 Caracterização da amostra de minério fosfático BEB 01

Como abordado no tópico anterior, a amostra objeto desse estudo, passou por adequação granulométrica, consistindo no *underflow* da etapa de ciclonagem, realizada pela empresa que doou a amostra para este estudo. Assim, esse produto, consiste na amostra BEB 01.

Com o recebimento da amostra BEB 01, apresentada na Figura 28, foi realizada inicialmente a sua secagem, em estufa a 100 °C, por 24 horas. Posteriormente foi realizado teste de picnometria, análise granulométrica, ensaios de flotação utilizando o planejamento

fatorial completo e por fim, realização da análise química dos produtos obtidos. Todas estas etapas foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET, com exceção das análises químicas, que foram realizadas por fluorescência de raios-X, método de pastilha fundida, pela *Mosaic Fertilizantes*, no Complexo de Mineração de Tapira.

Figura 28 - Amostra de minério fosfático cedida pela *Mosaic Fertilizantes*.



3.2.1 PICNOMETRIA

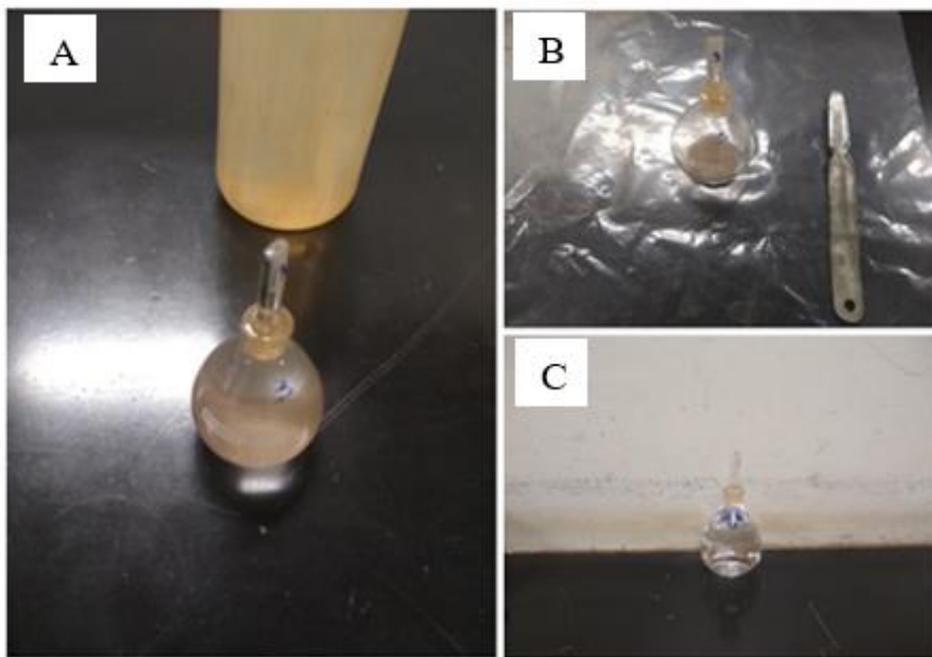
A densidade do minério fosfático (BEB 01) foi obtida a partir de ensaio de picnometria, conforme Sampaio e Silva (2007). Para isso, o minério foi homogeneizado e quarteado em pilha cônica, separando duas alíquotas, conforme apresentado na Figura 29 para a picnometria e análise granulométrica.

Figura 29 - Homogeneização e quarteamento da amostra mineral



Assim, na realização da picnometria, foi feita a pesagem de um picnômetro de 50 mL, limpo e seco. Após isso, foi colocado em seu interior amostra de minério, de modo que recobrisse o fundo da vidraria, e com esse conjunto, foi feita uma nova pesagem. Após essa pesagem, foi adicionada água, tomando o cuidado para que não houvesse a formação de bolhas. Com a adição de água, o picnômetro foi fechado de modo que o capilar da tampa se enchesse de líquido. O excesso de água foi retirado, e o conjunto foi pesado novamente. Por último, todo o conteúdo foi retirado do picnômetro, realizada a sua lavagem e secagem, e posteriormente inserido água em seu interior, sendo o conjunto pesado, como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Picnometria. (A) Conjunto picnômetro + minério + água. (B) Conjunto picnômetro + minério. (C) Picnômetro + água.



As pesagens foram realizadas em balança analítica. Quanto a reprodutibilidade dos testes, a procedimento foi realizada em quintuplicada.

Para a determinação da densidade dos sólidos, foi utilizada a equação 1 abaixo.

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

Sendo:

- d_s densidade dos sólidos (g/cm^3)
- A1 massa do picnômetro (g)
- A2 massa do picnômetro + amostra (g)
- A3 massa do picnômetro + amostra + água (g)
- A4 massa do picnômetro + água (g).

3.2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica da amostra BEB 01 foi realizada via peneiramento a úmido em peneirador suspenso, conforme apresentado na Figura 31. Foram utilizadas as peneiras de 48#, 70#, 100#, 150#, 200#, 270#, 325# e 400#. Com uma alimentação de 121,44 g de minério, foi realizado o peneiramento a úmido, onde a lavagem foi realizada até que a água saísse clarificada. Logo após, as massas retidas em cada peneira foram transferidas para pratos que foram secados em estufa e posteriormente, foram pesadas, e construída a curva granulométrica da análise realizada.

Figura 31 - Peneirador Suspenso.



3.3 Ensaio de Flotação

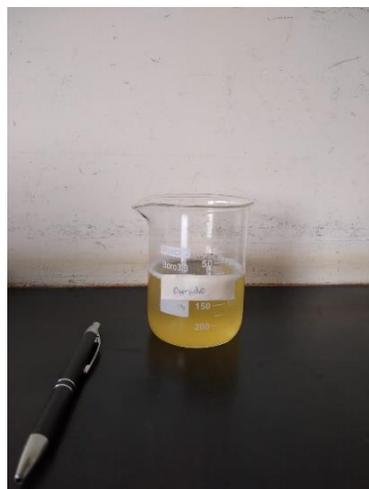
Neste tópico será abordado a preparação de reagentes, ensaios de flotação e o planejamento fatorial completo realizado

3.3.1. PREPARAÇÃO DOS REAGENTES

Todas as etapas realizadas neste tópico utilizaram metodologias oriundas de trabalhos anteriores, de forma que a preparação dos reagentes depressor e coletor e ensaios de flotação seguiram metodologias dos trabalhos realizados por Santos (2017) e Carneiro (2018) desenvolvidos no CEFET/MG, Campus Araxá. A escolha do depressor empregado (amido de batata residual) foi baseada no trabalho de Carneiro (2018), onde a mesma desenvolveu um estudo com avaliação de diversos amidos de distintas origens botânicas na flotação de minério fosfático, obtendo resultados similares entre amido de batata residual e amido industrial. A escolha do coletor foi baseada no trabalho de Paiva (2019), onde o autor desenvolveu estudo fundamental, a partir de microflotação em tubo de Hallimond, para os minerais apatita, calcita e dolomita, utilizando óleos amazônicos como coletores. Dentre esses óleos, baseado em seus resultados, foi escolhido para este trabalho, que será denominado de óleo amazônico A1, que apresentou resultado mais satisfatório no estudo citado. Além dele, foi empregado como coletor o óleo de soja parcialmente hidrogenado, comercialmente conhecido como Hidrocol, previamente saponificado. O reagente empregado como regulador de pH foi o hidróxido de sódio (NaOH) sob a forma de solução aquosa a 10% m/m.

A preparação da solução de amido de batata para os ensaios de flotação, conforme apresentado na Figura 32, envolveu a sua gelatinização. Para isso, foram pesados 5g de amostra de amido, 45 g de água, 12,5 g de NaOH e 104,16 g de água para a diluição.

Figura 32 - Gelatinização do amido de batata.



Após a pesagem dos reagentes, misturou-se amido, água e NaOH. A mistura foi agitada em agitador mecânico da marca IKA modelo RW20DS32 com rotação de 500 rpm, por 10 minutos. Após esse período, adicionou-se a água de diluição, e foi agitado por mais 10 minutos. Todo o procedimento foi acompanhado com cuidado para que não houvesse a formação de espuma. As soluções foram preparadas a 3% m/m e relação amido:soda 4:1.

A preparação da solução de óleo A1 e Hidrocol envolveu sua saponificação, para a obtenção do coletor, conforme apresentado na Figura 33. Para isso foram pesados 5 g de óleo, 7,85 g de água, 7,15 g de NaOH e 180 g de água para a diluição.

Figura 33 - Saponificação dos coletores utilizando Hidrocol (à esquerda) e óleo A1 (à direita).



Após a pesagem dos reagentes, misturou-se o óleo, água e o NaOH. A mistura foi agitada em agitador magnético, da marca Hanna *Instruments* por 10 minutos. Após esse período, foi adicionado água de diluição e foi agitado por mais 10 minutos. Todo o procedimento foi acompanhado com cuidado para que não houvesse formação de espuma. As soluções foram preparadas com concentração à 2,5% m/m de óleo e relação óleo:soda 7:1.

3.3.2 PLANEJAMENTO FATORIAL DOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO

Para os testes de flotação foi utilizado o planejamento fatorial completo. As variáveis de estudos foram o tipo de coletor, dosagem de coletor e dosagem de depressor. Cada variável utilizou dois níveis de variação. Para a reprodutibilidade dos testes foi utilizada o ponto

central. Desta forma, foi executado um teste 2^3 com 8 pontos centrais totais, totalizando 16 testes de flotação. As variáveis resposta estudadas foram o teor de P_2O_5 e a recuperação metalúrgica, analisando as variáveis significativas e a otimização das variáveis respostas, através da análise estatística do PF no *software* Minitab. O planejamento dos testes é apresentado na Figura 34 (*layout* de resumo dos experimentos) e Tabela 1 abaixo. A Tabela 2 apresenta a conversão das variáveis utilizadas.

Figura 34 - Resumo do experimento fatorial completo.

Experimento Fatorial Completo

* NOTA * O número de pontos centrais especificado está dobrado para cada fator categórico. Para fatores categóricos de Q, o resultado é 2^Q para cada ponto central.

Resumo do experimento

Fatores: 3 Experimento Base: 3; 8
 Ensaios: 16 Réplicas: 1
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 8

Todos os termos estão livres de alias.

Tabela 1 - Planejamento Fatorial Completo dos ensaios a serem realizados.

Planejamento Fatorial Completo			
Ensaio	Tipo de Coletor	Dosagem de Coletor	Dosagem de Depressor
Ensaio 1	1	1	1
Ensaio 2	-1	0	0
Ensaio 3	1	-1	1
Ensaio 4	1	-1	-1
Ensaio 5	1	0	0
Ensaio 6	-1	0	0
Ensaio 7	1	1	-1
Ensaio 8	-1	1	1
Ensaio 9	1	0	0
Ensaio 10	1	0	0
Ensaio 11	1	0	0
Ensaio 12	-1	-1	-1
Ensaio 13	-1	0	0
Ensaio 14	-1	1	-1
Ensaio 15	-1	-1	1
Ensaio 16	-1	0	0

Tabela 2 - Conversão dos níveis utilizados nos ensaios.

Níveis utilizados	Tipo de Coletor	Dosagem de Coletor	Dosagem de Depressor
1	Hidrocol	500	350
0	Hidrocol/óleo A1	350	225
-1	Óleo A1	200	100

3.3.3 TESTES DE FLOTAÇÃO

Os testes de flotação foram realizados em uma célula mecânica Denver, com cuba de 1,5 L (volume útil de 1,25 L), apresentada na Figura 35, de acordo com planejamento fatorial realizado, conforme discutido anteriormente.

Figura 35 - Célula mecânica Denver (à esquerda) e cuba utilizada (à direita).



Dessa forma, foi promovido o contato dos reagentes com a superfícies das partículas, realizando o condicionamento da polpa, a 50% de sólidos. Para isso, a cuba foi alimentada com minério e água e, logo após, o rotor foi ligado. Adicionou-se o depressor e o condicionou por 5 minutos. Após esse tempo, adicionou-se o coletor, e o condicionou novamente por mais

5 minutos. Terminado o condicionamento do coletor, foi adicionada a água de diluição, ajustando a polpa com 25% de sólidos. Nesse momento, o gás foi ligado, e a espuma gerada foi raspada e separada em uma bandeja a parte.

No condicionamento, utilizou-se uma polpa preparada com 50% de sólidos, e na flotação, 25% de sólidos. A espuma era raspada por cerca de 2 minutos. As variáveis utilizadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3- Variáveis operacionais utilizadas nos ensaios de flotação.

Variáveis dos ensaios de flotação executados.	
% de sólidos no condicionamento	50
% de sólidos na flotação	25
Massa de sólidos (g)	376,83
Volume de água no condicionamento (mL)	376,83
Volume de água para flotação (mL)	753,66
Tempo de condicionamento do depressor (min)	5
Tempo de condicionamento do coletor (min)	5
Volume de polpa (mL)	1507,33

Os concentrados e rejeitos obtidos foram levados para a estufa de secagem à 100°C. Após a secagem desses produtos, eles foram pesados, e uma pequena alíquota de cada produto foi retirada para ser encaminhada para a análise química. Durante todo o processo foi controlado o pH da polpa, utilizando o pHmetro da marca Hanna modelo Edge, mantendo-o em 9,5.

3.3.6 ANÁLISE DOS DADOS

Objetivando analisar os dados obtidos com os testes de flotação, foram calculadas a recuperação mássica, recuperação metalúrgica e razão de enriquecimento, utilizando as equações 2, 3 e, respectivamente.

Dessa forma, a recuperação mássica foi calculada utilizando as massas da alimentação e do concentrado de cada teste, através da equação abaixo.

$$R_{mássica} = \frac{C}{A} * 100 \quad (2)$$

Sendo:

- $R_{mássica}$ Recuperação mássica (%)
- C massa do concentrado (g)
- A massa de alimentação recalculada (g)

A recuperação metalúrgica foi calculada utilizando as massas da alimentação, do concentrado e dos teores de cada ensaio.

$$R_{metalúrgica} = \frac{C \cdot c}{A \cdot a} * 100 \quad (3)$$

Sendo:

- $R_{metalúrgica}$ Recuperação metalúrgica (%)
- c teor de P_2O_5 no concentrado (%)
- a teor de P_2O_5 na alimentação (%).

Por fim, foi determinada a razão de enriquecimento dos ensaios de flotação, utilizando a equação 4, abaixo:

$$Re = \frac{c}{a} \quad (4)$$

Sendo:

Re Razão de enriquecimento.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão tratados os resultados obtidos neste trabalho: caracterização química e física (análise granuloquímica, picnometria, análise granulométrica), testes de flotação e análise estatística.

4.1 Caracterização do minério fosfático BEB 01

Nesse tópico serão apresentados os resultados da caracterização física (picnometria e análise granulométrica), química e granuloquímica do minério empregado neste estudo.

4.1.1 PICNOMETRIA

Conforme apresentado em 3.2 *Caracterização da amostra de minério fosfático BEB 01*, foi realizado a picnometria a fim de determinar a densidade do minério estudado. Dessa forma, os dados obtidos de acordo com cada ensaio são apresentados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Ensaio de picnometria realizados.

Teste	A1(pic. Vazio) (g)	A2 (pic. + min.) (g)	A3 (pic + min + água) (g)	A4 (pic + água) (g)	Densidade (g/cm ³)
1	31,8	32,86	82,87	82,14	3,21
2	30,8	31,8	82,14	81,46	3,13
3	29,6	30,52	80,1	79,47	3,17
4	29,64	30,88	80,05	79,21	3,10
5	29,44	30,82	81,12	80,19	3,07
média					3,14

Assim, a densidade do minério encontrada foi de 3,14 g/cm³ com desvio padrão de 0,06 g/cm³, indicando uma boa reprodutibilidade dos ensaios. Utilizando a equação 1, foi obtida a densidade de polpa de 1,21 g/cm³.

4.1.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA BEB 01

Conforme apresentado em 3.2 *Caracterização da amostra de minério fosfático BEB 01*, foi realizada a homogeneização e o quarteramento, obtendo-se 121,44 g de amostra para a

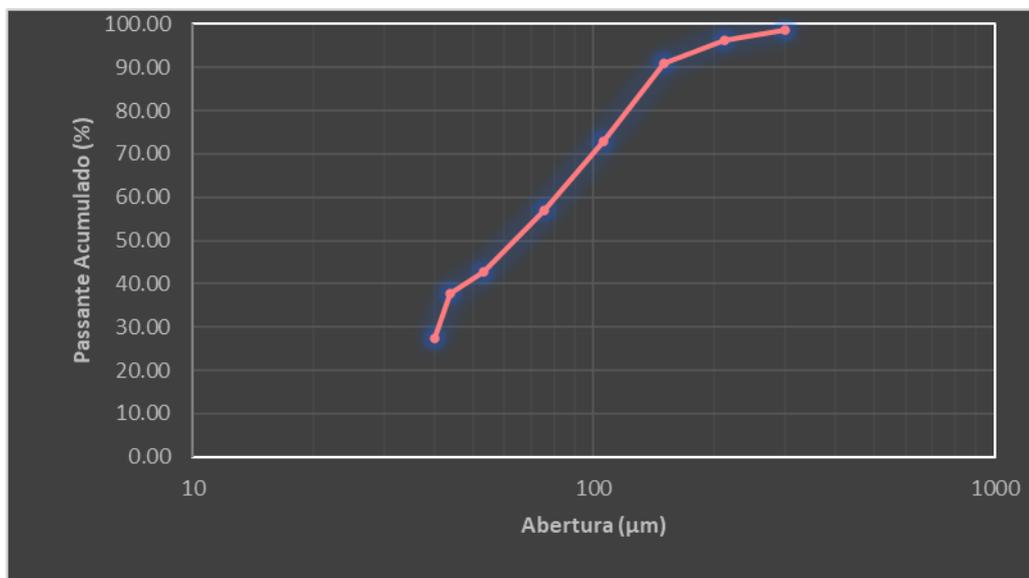
realização do peneiramento a seco da amostra BEB 01, a fim de obter a sua análise granulométrica. Com as massas retidas em cada peneira, foi construída a Tabela 5, com a análise granulométrica.

Tabela 5. Análise granulométrica da amostra BEB 01

Abertura (#)	Abertura (μm)	Massa retida (g)	Massa retida simples (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Passante Acumulado (%)
48	300	1,48	1,22	1,22	98,78
70	212	3,07	2,53	3,75	96,25
100	150	6,24	5,14	8,89	91,11
150	106	22,14	18,23	27,12	72,88
200	75	19,36	15,94	43,06	56,94
270	53	17,27	14,22	57,28	42,72
325	44	5,86	4,83	62,10	37,90
400	37	12,68	10,44	72,55	27,45
-400	37	33,34	27,45	100,00	0,00
Total	-	121,44	100,00	-	-

A partir da análise granulométrica, pode-se perceber que a aberturas que apresentaram maiores taxas de massas retidas foram em 106, 75, 53 e 37 μm . Vale observar que 27,45% das partículas ficaram abaixo de 37 μm , pois a deslamagem realizada ocorreu com corte entre 20 μm . A partir dessa análise, foi construída a curva granulométrica, mostrada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da amostra de minério BEB 01.



Analisando o Gráfico 1, pode-se observar que 80% das partículas (d_{80}) são menores que cerca de 120 μm , ou seja, a amostra se apresentava adequada para os testes de flotação, considerando que a apatita está liberada abaixo de 212 μm , em geral. Em relação ao d_{50} da amostra, 50% das partículas estão abaixo de 62 μm .

Também pode ser obtido o diâmetro médio de Sauter, que se refere ao diâmetro médio das partículas, que foi 0,04 mm.

Pode ser observado também que com a utilização da peneira de 300 μm , pode-se realizar a verificação do *gap* superior da amostra, e de fato constatado isso, pois a massa retida na peneira foi pequena. Assim a amostra estava abaixo de 212, com uma quantidade de material considerável (cerca de 30%) passante em 37 μm . Assim percebe-se que há uma quantidade de finos consideráveis na amostra. Contudo não foi realizada uma nova deslamagem para a eliminação das partículas menores que 53 μm , tendo em vista que a realização dos testes de flotação deveria ser feita com as condições industriais, que ocorrem com um corte de 20 μm . E esse corte foi realizado no momento da sua preparação através da ciclonagem com abordado em *3.1 Preparação das Amostra de Minério Fosfático Realizadas na CDM-Vale*.

Além disso, essa taxa de 27,45% de partículas abaixo de 0,037 mm corrobora com trabalho de Carneiro (2018). A autora obteve na preparação da sua amostra, que era minério fosfático sílico-carbonatado, após a deslamagem, 29,72% das partículas menores que 0,037 mm.

4.1.3 ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOQUÍMICA DA AMOSTRA

De acordo com a análise química, apresentada no Quadro 2, a amostra BEB 01 possui um teor de 6,55% de P_2O_5 . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, foram 3,24; 1,44 e 0,27. Com exceção da relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, as outras apresentaram valores acima do estipulado por Oliveira (2007) como ideal, que no caso é 1,6 para $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e para a razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, valor abaixo de 0,095. Em relação ao teor de MgO , também apresentou valor maior que 1%.

Comparado a outros minérios fosfáticos complexos, como o estudado Carneiro (2018), que trabalhou com minério fosfático sílico-carbonatado, do Complexo Carbonatítico do Barreiro, em Araxá-MG, a amostra possuía teor menor de P_2O_5 , 6,08%.

Quadro 2 - Análise química da amostra de minério BEB 01

	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	TiO_2	SiO_2	BaO	SrO	Nb_2O_5
Teor	6,55	9,45	13,51	21,21	1,76	3,33	26,86	0,24	0,67	0,10

A análise granuloquímica realizada revelou a composição da amostra por faixa granulométrica, conforme é apresentada na Figura 36.

Em relação ao teor de P_2O_5 , os valores variaram entre as faixas analisadas, aumentando entre 212 a 74 μm , que possivelmente ocorre devido a liberação crescente da apatita, entretanto volta diminuir em faixas mais finas (26 a 10 μm). Na peneira com abertura de 26 μm , é atingido o maior valor para o teor, 7,26% de P_2O_5 . Também é possível avaliar a moabilidade da apatita. No caso, ela moeu mais, permanecendo em faixas mais finas. Isso leva inclusive, a confirmar a deslamagem da empresa, já que entre 37 μm e 20 μm tem-se muito P_2O_5 , que seria perdido em 37 μm .

Em relação ao teor de CaO , de forma geral, este aumentou com a diminuição da granulometria, atingindo o maior valor na peneira com abertura de 26 μm . Esse valor volta a diminuir entre 26 a 10 μm .

Para o teor de Al_2O_3 , o seu valor diminui à medida que a granulometria diminui, alcançando o menor valor em 26 μm . No restante da série de peneiras, esse valor volta a aumentar. O maior teor está na abertura de 212 μm , com valor de 7,89%. Assim, é perceptível que o Al_2O_3 moeu menos, se concentrando nessa faixa mais grosseira.

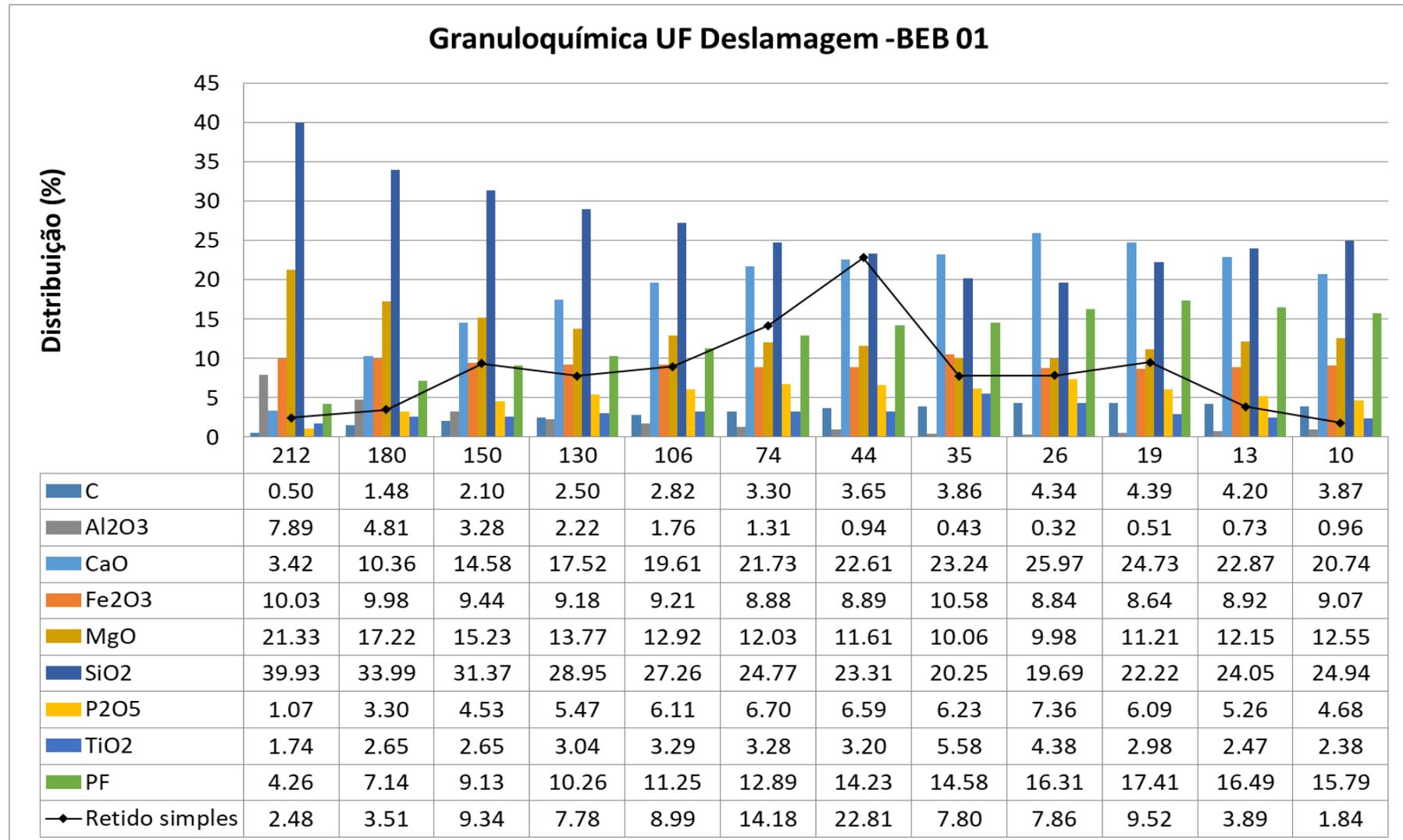
Para o teor de Fe_2O_3 , observa-se que há a mesma tendência que ocorreu na análise anterior. O seu teor diminui à medida que a granulometria diminui, alcançando um dos menores valores em 26 μm . E no restante da série de peneiras, esse valor volta a aumentar. O maior valor do teor de Fe_2O_3 está na abertura de 212 μm , com valor de 10,03%. Em relação a sua moabilidade, também é realizada a mesma observação feita anteriormente, o Fe_2O_3 moeu menos, se concentrando nessa faixa granulométrica.

O teor de MgO também diminui com a diminuição da granulometria da amostra, de forma a atingir o menor valor em 26 μm . No restante da série, esse valor volta a aumentar, atingindo o maior valor. Essa mesma tendência é observada para o teor de SiO_2 .

Assim, é observado, que essas substâncias (CaO , Al_2O_3 , MgO e SiO_2) atingem o menor valor de seus teores em 26 μm . E é nessa granulometria que se encontra o maior teor de P_2O_5 . Isso mostra que em relação a moabilidade diferencial das partículas, P_2O_5 possui maior facilidade de moer, frente as partículas de CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO e SiO_2 .

Comparando a análise química da amostra com a análise granulométrica, anteriormente apresentadas, observa-se que seus resultados corroboram com a análise granuloquímica apresentada. A análise granulométrica revelou que a amostra estava concentrada principalmente entre 106 e 53 μm , e análise química apresentou um teor de P_2O_5 de 6,55%. Nessas mesmas faixas, a análise granuloquímica apresenta uma média de teores muito próxima a obtida pela análise química, que é 6,53% de P_2O_5 , valor médio entre os teores presentes em 106, 75 e 44 μm . Essa mesma análise pode ser feita para CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO e SiO_2 , onde mostra a proximidade desses teores médios nesta faixa granulométrica, comparada aos teores obtidos na análise química.

Figura 36 - Análise granulométrica da amostra de minério BEB 01.



Fonte: VALE (2015).

4.2 Ensaio de Flotação

Ao longo dos ensaios de flotação realizados, foi observado que o pH durante o condicionamento dos reagentes e durante a própria flotação, permaneceu em torno de 9,4 a 9,6. Com isso, dispensou-se o uso do regulador de pH, evitando a introdução de íons adicionais à polpa de minério.

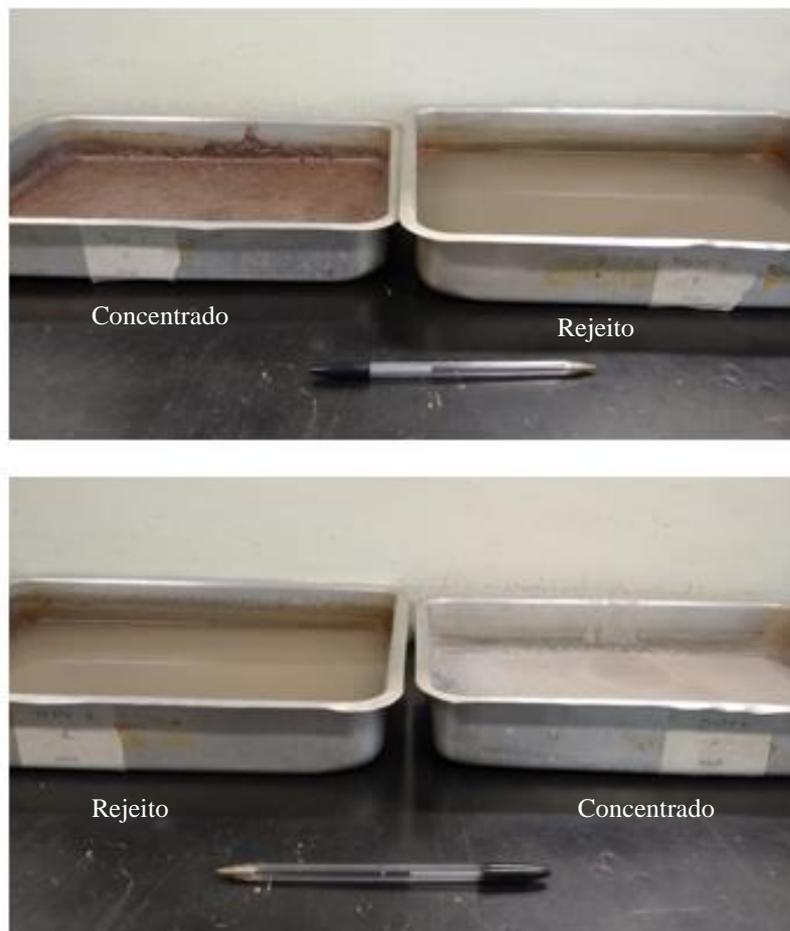
Nos testes em que se utilizou o Hidrocol como coletor, de forma geral, as bolhas eram pequenas, bem formadas e muito bem mineralizadas. Por sua vez, quando se utilizava o óleo A1 saponificado, o contrário era observado, poucas bolhas, grandes e pouco mineralizadas. Essa questão pode estar ligada a forma de saponificação do coletor de óleo A1 e também pH da flotação. Isso porque, o pH utilizado, pode ter afetado sua especificação, prejudicando a ação espumante do reagente e provocando maior coalescência das bolhas. Essas características são apresentadas na Figura 37.

Figura 37 - Flotação utilizando o Hidrocol saponificado (à esquerda). Flotação utilizando o óleo A1 saponificado (à direita)



Com as massas obtidas de concentrados e rejeitos dos ensaios de flotação, conforme apresentado na Figura 38, e da análise química realizada por Fluorescência de Raios-X, pelo método de pastilha fundida, foi possível calcular a recuperação mássica, recuperação metalúrgica e razões de enriquecimento, utilizando as equações 2, 3 e 4, respectivamente. Tais valores são apresentados no Quadro 3.

Figura 38 - Produtos gerados dos ensaios 1 e 2 de flotação. Produtos utilizando Hidrocol saponificado (acima).
Produtos utilizando o óleo A1 saponificado (abaixo).

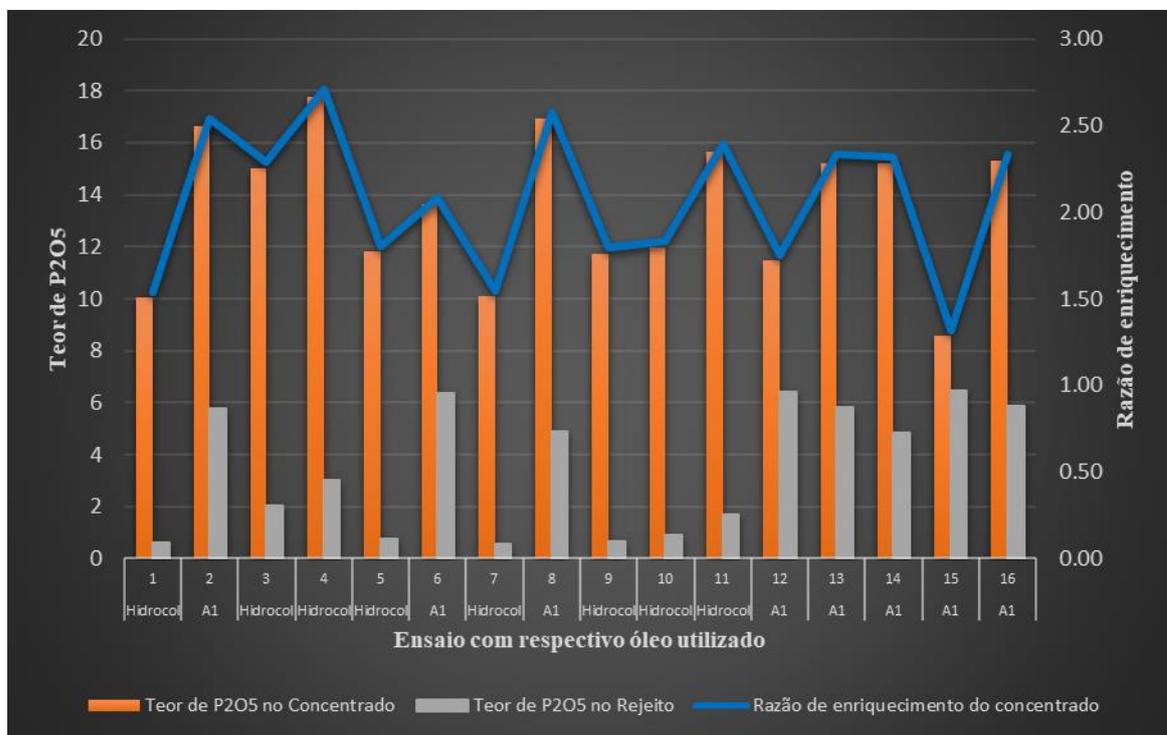


Quadro 3 - Resultados de recuperação mássica, metalúrgica e razão de enriquecimento.

Teste	Óleo	Dosagem de Coletor (g/t)	Dosagem de Depressor (g/t)	P₂O₅ (%) no concentrado	Rec. Mássica (%)	Rec. Met. (%)	Razão de enriquecimento
1	Hidrocol	500	350	10,04	63,88	97,92	1,53
2	A1	350	225	16,63	5,46	13,86	2,54
3	Hidrocol	200	350	15,02	34,69	79,54	2,29
4	Hidrocol	200	100	17,78	24,36	66,13	2,71
5	Hidrocol	350	225	11,81	52,20	94,12	1,80
6	A1	350	225	13,65	1,50	3,12	2,08
7	Hidrocol	500	100	10,09	61,85	95,27	1,54
8	A1	500	350	16,93	13,17	34,03	2,58
9	Hidrocol	350	225	11,71	55,38	99,01	1,79
10	Hidrocol	350	225	11,97	52,25	95,49	1,83
11	Hidrocol	350	225	15,66	34,81	83,23	2,39
12	A1	200	100	11,48	0,81	1,42	1,75
13	A1	350	225	15,23	7,62	17,72	2,33
14	A1	500	100	15,21	16,36	37,99	2,32
15	A1	200	350	8,58	0,97	1,27	1,31
16	A1	350	225	15,29	6,45	15,06	2,33

Analisando os teores obtidos nos ensaios, apresentado no Quadro 3, observa-se que o concentrado do teste 4, utilizando o Hidrocol como coletor, apresentou maior teor de P_2O_5 , (17,78%), seguido pelos testes 8 (16,93%) e 2 (16,63%), sendo que nesses dois últimos casos, foi utilizado A1. A razão de enriquecimento seguiu essa mesma tendência, apresentando, para os testes citados, 2,71; 2,58 e 2,54, respectivamente. Em contrapartida, o teste 15 apresentou menor teor de P_2O_5 no concentrado (8,58%), empregando A1. Os teores obtidos pelo concentrado e rejeito dos ensaios, bem como suas razões de enriquecimento são apresentados também no Gráfico 2.

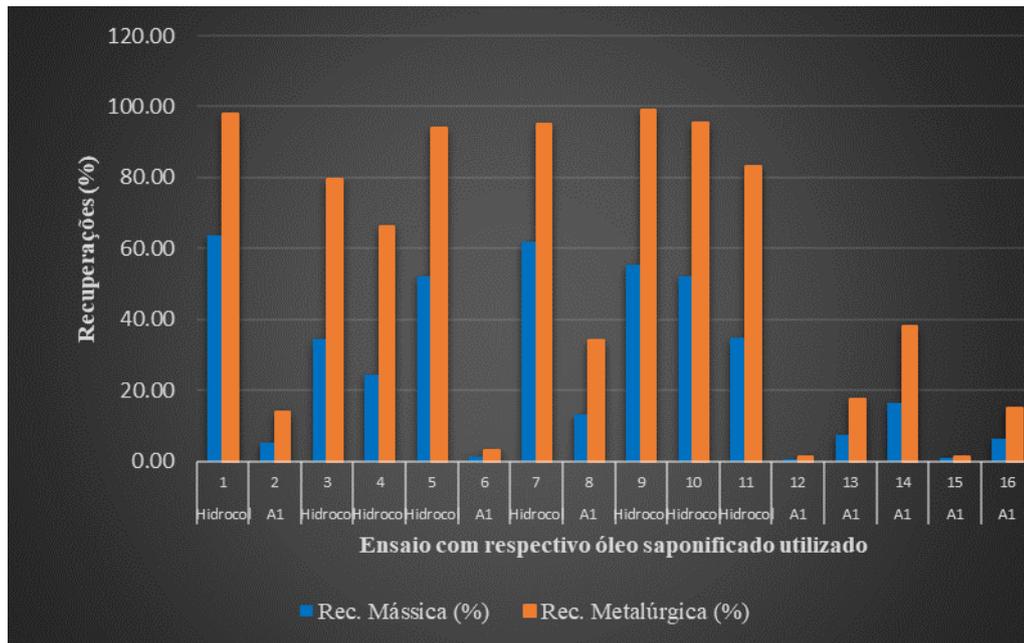
Gráfico 2 -Teores de P_2O_5 do concentrado e rejeito da flotação, com suas respectivas razões de enriquecimento.



Em relação à recuperação mássica, os testes 1, 7 e 9 se destacaram, com 63,88%, 61,85% e 55,38%, respectivamente, enquanto o teste 12 apresentou menor resultado (0,81%).

Em relação à recuperação metalúrgica, os testes 9, 1, 10 apresentaram maiores resultados, com 99,01%, 97,92% e 95,49%, respectivamente, enquanto o teste 15 apresentou menor valor (1,27%). Os valores de recuperação também são apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Recuperações mássicas e metalúrgicas dos concentrados dos ensaios realizados.



A partir desses resultados, é possível observar que, no caso do teste 4, que apresentou maior teor de P_2O_5 , o ensaio ocorreu com o Hidrocol, nas menores dosagens utilizadas, que foi 200 g/t para coletor, e 100 g/t para depressor. No teste 8, por sua vez, foi utilizado o óleo A1, com maiores dosagens de reagentes. E no caso do teste 2, foi utilizado o óleo A1, como dosagem intermediária de coletor e alta dosagem de depressor.

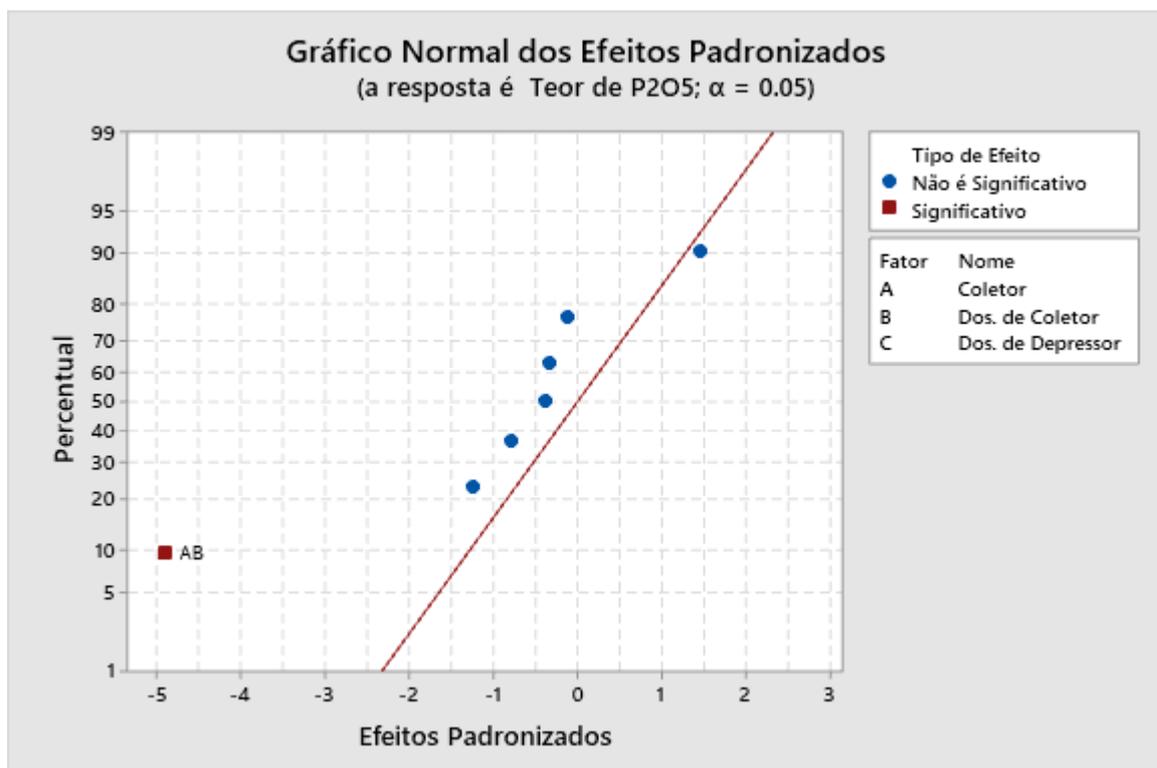
Diante disso, pode ser observado que utilizando o Hidrocol, em sua quantidade mínima testada, se mostrou eficiente para promover a hidrofobização das partículas de interesse (apatita) e a menor dosagem de depressor, também foi suficiente para deprimir as demais partículas de ganga. Assim, há uma seletividade da operação, como foi refletido no valor de teor de P_2O_5 obtido.

Para os testes 1 e 7, empregando maior dosagem de coletor Hidrocol pra ambos, mas distintas dosagens de depressor entre eles, os resultados similares sugerem um efeito pouco pronunciado da dosagem de depressor sobre os parâmetros avaliados. Esse fenômeno pode ser observado inclusive para o coletor A1, quando comparados os resultados dos testes 8 e 14, muito próximos, mesmo sendo realizados empregando a mesma dosagem de coletor e dosagens distintas de depressor. Para os testes 1 e 3, empregando maior dosagem de depressor pra ambos, mas distintas dosagens de coletor entre eles, os resultados demonstram relação inversa entre a dosagem de coletor e o teor do concentrado. Já para as recuperações mássica e

metalúrgica, essa relação se mostra direta. Para o coletor A1, quando comparados os resultados dos testes 8 e 15, realizados empregando a mesma dosagem de depressor e dosagens distintas de coletor, a relação entre dosagem de coletor e os parâmetros avaliados se apresenta de forma direta. Tal constatação sugere que, tanto o tipo quanto a dosagem de coletor, afetam significativamente o teor do concentrado.

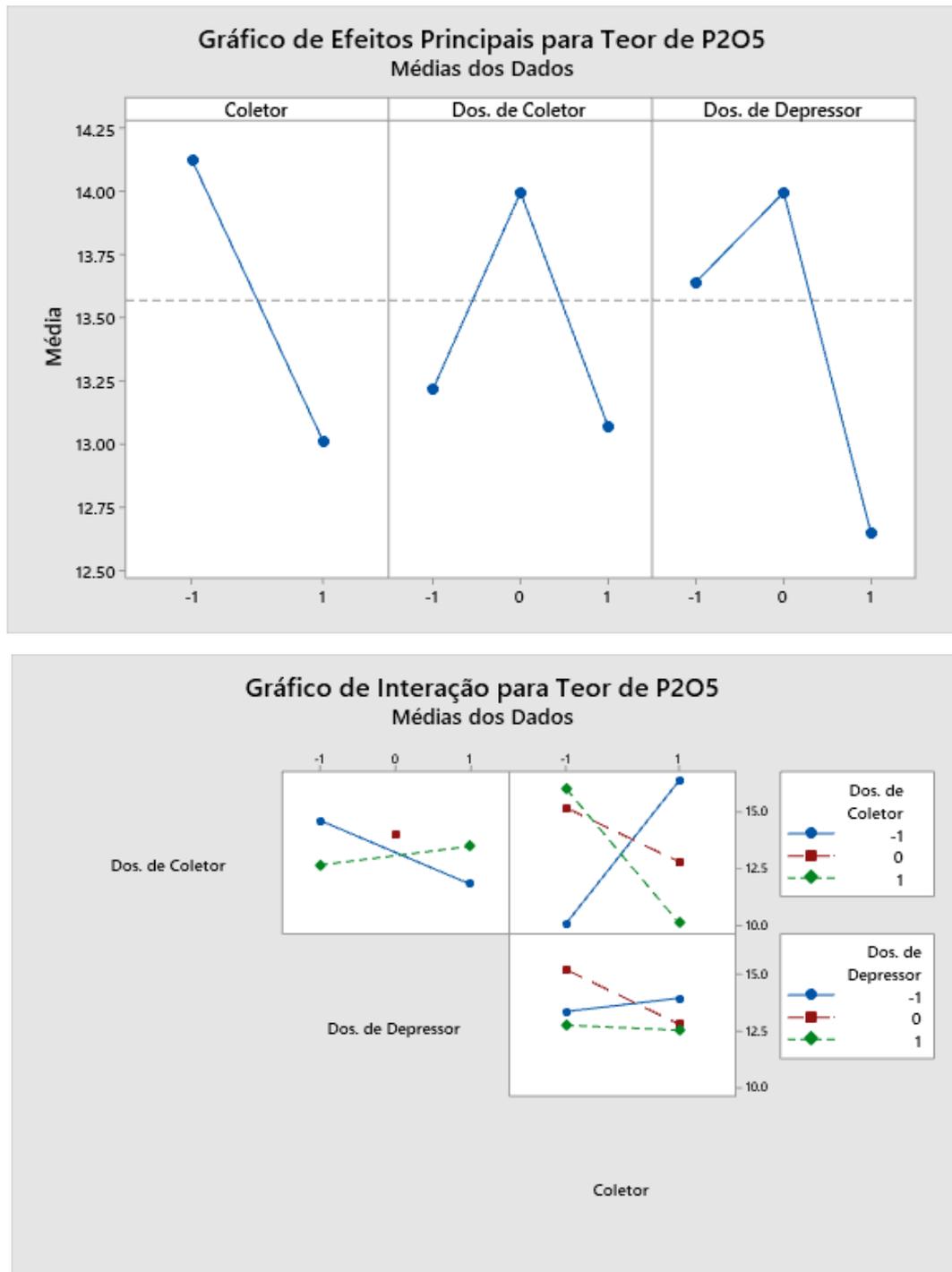
As discussões realizadas podem ser confirmadas pela análise estatística do planejamento fatorial, verificando assim a significância das variáveis de entrada para teor de P_2O_5 , apresentado na Figura 39 abaixo. De fato, a interação entre o tipo de coletor com a sua dosagem é significativa, porém com efeito negativo sobre sistema, quando considerado o efeito sinérgico dessas variáveis. Já a variável dosagem de depressor não foi significativa, como discutido anteriormente.

Figura 39 - Verificação da significância das variáveis de entrada sobre o teor de P_2O_5 .



Assim, o efeito da variação do tipo e da dosagem dos reagentes sobre a resposta analisada pode ser observada nos efeitos principais e de interação, apresentada pela análise estatística do planejamento fatorial na Figura 40.

Figura 40 - Análise dos efeitos principais (acima) e efeitos de interação (abaixo) para o teor de P_2O_5 .



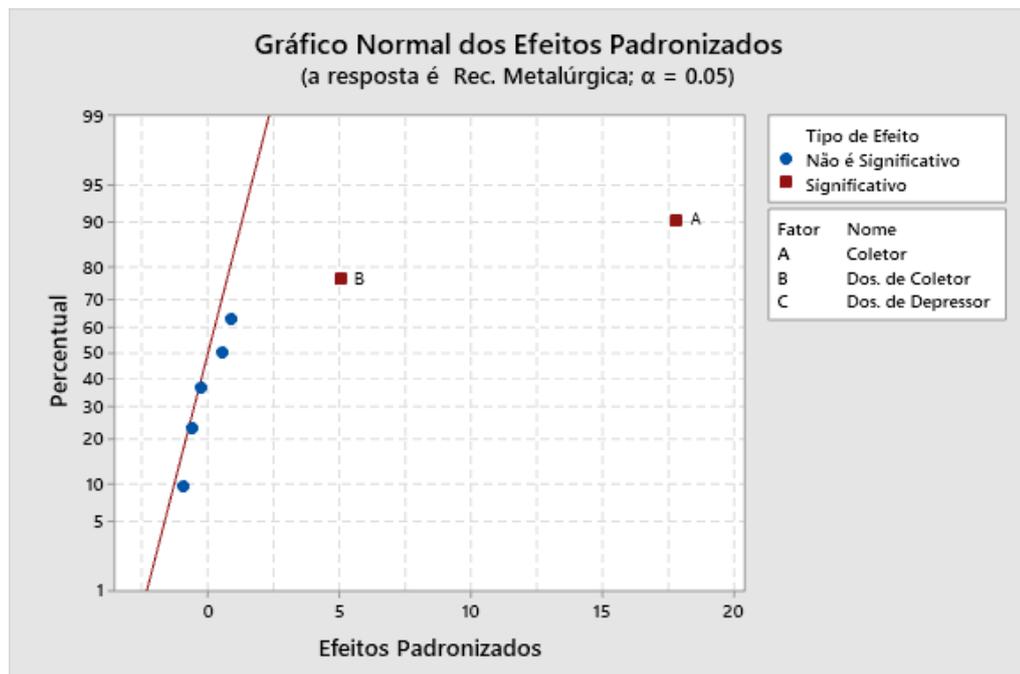
Analisando os efeitos principais para o teor de P_2O_5 , observa-se que para o coletor, ao passar do nível -1 para +1, ou seja, com a troca do óleo A1 para o Hidrocol, houve um aumento em seu valor. Para as dosagens dos reagentes envolvidos, ao passa do nível -1 para 0 (ponto central), houve um aumento da variável resposta, contudo ao aumentar ainda mais essa dosagem, passando do nível 0 para +1, houve uma diminuição da resposta, mostrando que o

aumento nas dosagens dos reagentes não é um cenário ideal, isso porque o excesso de reagentes pode provocar a formação de micelas ou hidrofobização dos minerais de ganga. Com esse tipo de análise consegue-se iniciar um olhar para o que deverá ser cenário ótimo para os testes.

Em relação aos efeitos de interação, para o teor de P_2O_5 consegue observar que houve interação de segunda ordem entre as variáveis. Das interações apresentadas, observa-se a maior variação para a interação entre o coletor e dosagem do coletor, mostrando mais uma vez a sua significância frente as outras interações.

A Figura 41 apresenta a análise da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação metalúrgica através do gráfico normal, com nível de 95% de confiança. A análise mostra um efeito de primeira ordem do tipo de coletor e sua concentração sobre o sistema, de forma positiva, refletida sobre o aumento dessa recuperação, como tratado anteriormente.

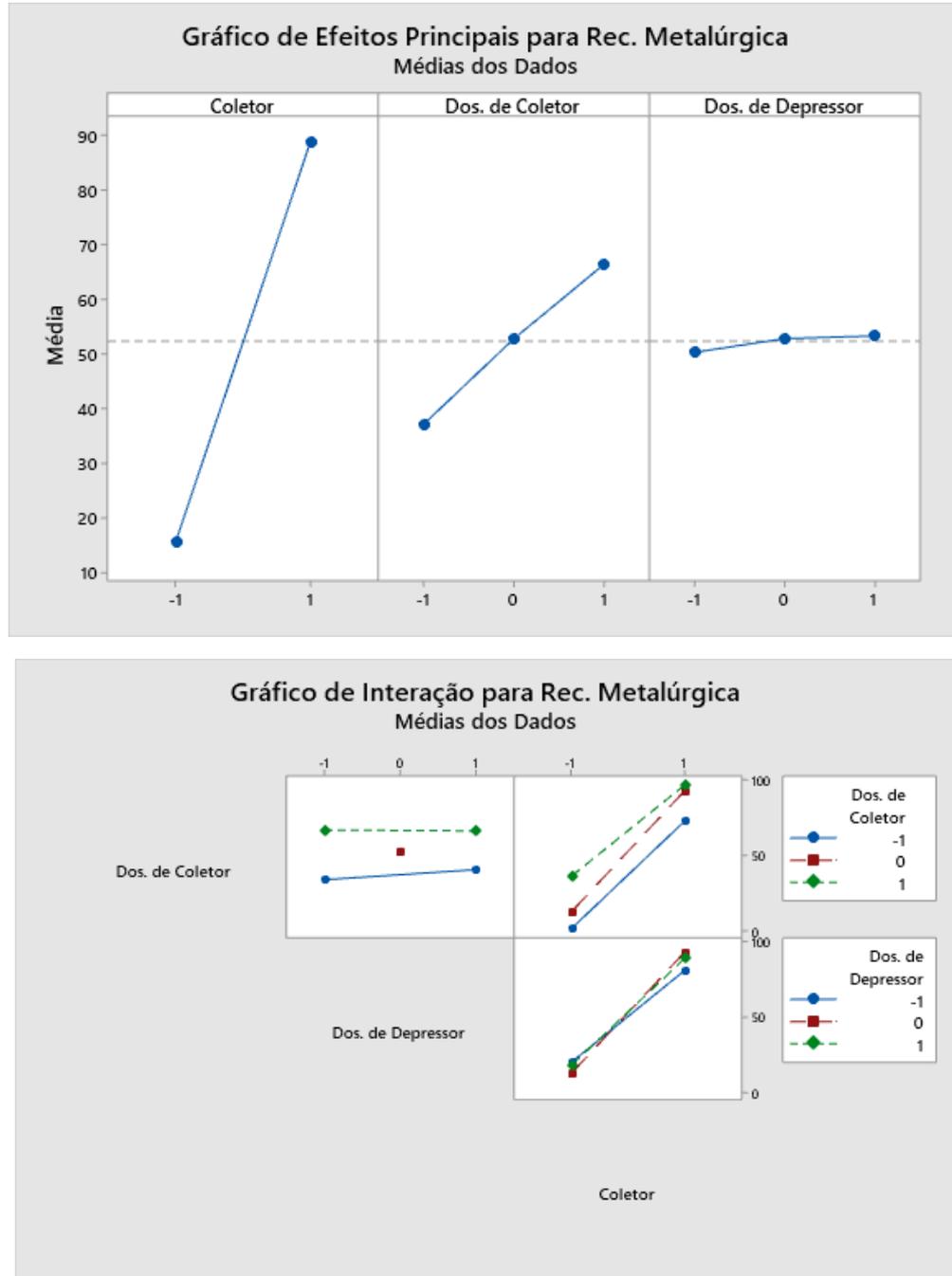
Figura 41 - Verificação da significância das variáveis de entrada sobre a recuperação metalúrgica.



O fato da dosagem de depressor não se apresentar como uma variável significativa pode estar ligado a menor faixa de variação dessas dosagens, podendo em um trabalho futuro, ser avaliado uma faixa maior de concentração desse reagente.

A análise dos efeitos das variáveis de entrada para a recuperação metalúrgica é apresentada através do gráfico de efeitos principais e de interação na Figura 42.

Figura 42 - Análise dos efeitos dos efeitos principais (acima) e de interação (abaixo) para a recuperação metalúrgica.



Analisando os efeitos principais para a recuperação metalúrgica, observa-se que para o coletor, ao passar do nível -1 para +1, ou seja, com a troca do óleo A1 para o Hidrocol, houve um aumento em seu valor. Para as dosagens dos reagentes envolvidos, ao passar do nível -1

para 0 (ponto central), houve um aumento da variável resposta. Aumentando ainda mais essa dosagem, passando do nível 0 para +1, houve um aumento da resposta, apesar de ser uma taxa pequena. Essa análise confirma que o aumento da dosagem de coletor é prejudicial ao processo, não pela formação de micelas, mas sim, pela hidrofobização dos minerais de ganga. Pois se fosse pela formação de micelas, a recuperação metalúrgica não continuaria aumentando de 0 para o nível +1. Esse aumento é devido a coleta contínua de minerais de apatita e de ganga, aumentando assim a sua recuperação, contudo, diminuindo o seu teor de P_2O_5 .

Em relação aos efeitos de interação para a recuperação metalúrgica consegue observar que houve interação de segunda ordem entre as variáveis. Das interações apresentadas, observa-se a maior variação para a interação entre o coletor e sua dosagem e entre coletor e dosagem de depressor. A análise química dos produtos obtidos em cada teste segue apresentada no Quadro 4, assim como as relações CaO/P_2O_5 , Al_2O_3/P_2O_5 e Fe_2O_3/P_2O_5 .

Quadro 4 - Análises químicas dos concentrados e dos rejeitos dos ensaios.

Teste	Amostra	Massa (g)	P ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	SiO ₂ (%)	BaO (%)	SrO (%)	Nb ₂ O ₅ (%)	CaO/P ₂ O ₅ (%)	Al ₂ O ₃ /P ₂ O ₅ (%)	Fe ₂ O ₃ /P ₂ O ₅ (%)
1	C1	239,7	10,04	7,51	10,62	29,75	1,07	2,83	17,14	0,33	0,97	<0,10	2,96	0,11	0,75
	R1	135,53	0,59	12,24	18,48	7,12	2,52	4,46	42,02	-	0,12	0,13	12,07	4,27	20,75
2	C2	20,49	16,63	3,53	4,5	42,66	0,42	1,04	7,66	0,68	1,72	<0,10	2,57	0,03	0,21
	R2	354,9	5,77	9,7	13,73	19,89	1,83	3,39	28,02	0,22	0,6	0,11	3,45	0,32	1,68
3	C3	130	15,02	4,69	6,44	39,68	0,59	1,87	9,77	0,45	1,3	<0,10	2,64	0,04	0,31
	R3	244,77	2,05	12,05	17,67	11,84	2,34	4,3	35,62	0,1	0,32	0,13	5,78	1,14	5,88
4	C4	92	17,78	3,16	4,53	44,47	0,43	1,19	6,34	0,51	1,45	<0,10	2,50	0,02	0,18
	R4	285,64	3,01	11,56	16,32	14,39	2,25	4	34,37	0,16	0,4	0,13	4,78	0,75	3,84
5	C5	196	11,81	6,17	8,55	34,37	0,66	2,57	12,75	0,4	1,13	<0,10	2,91	0,06	0,52
	R5	179,47	0,74	12,51	18,38	7,54	2,8	4,5	40,33	-	0,14	0,14	10,19	3,78	16,91
6	C6	5,6	13,65	6,07	8,38	33,84	0,96	1,65	15,73	0,65	1,57	<0,10	2,48	0,07	0,44
	R6	368,86	6,35	9,71	13,11	21,63	1,81	3,42	27,14	0,26	0,68	0,11	3,41	0,29	1,53
7	C7	231,92	10,09	7,28	9,75	31,03	0,92	3,1	16,16	0,33	1,02	<0,10	3,08	0,09	0,72
	R7	143,07	0,58	13,03	18,79	6,27	3,22	3,58	44,5	0,1	0,1	0,13	10,81	5,55	22,47
8	C8	49,47	16,93	3,49	4,49	43,36	0,34	1,17	7,39	0,59	1,59	<0,10	2,56	0,02	0,21
	R8	326,26	4,88	10,24	14,14	18,17	2,13	3,6	29,46	0,18	0,53	0,11	3,72	0,44	2,10
9	C9	208,31	11,71	6,46	8,92	33,71	0,74	2,69	13,63	0,38	1,1	<0,10	2,88	0,06	0,55
	R9	167,82	0,67	12,85	18,72	7,18	3,29	4,14	41,44	-	0,14	0,13	10,72	4,91	19,18
10	C10	196,05	11,97	6,17	8,55	34,59	1,08	2,57	12,88	0,4	1,14	<0,10	2,89	0,09	0,52
	R10	179,13	0,91	12,85	18,66	7,54	2,89	4,31	40,53	-	0,14	0,14	8,29	3,18	14,12
11	C11	130,47	15,66	4,11	5,82	40,63	0,37	1,59	8,14	0,43	1,31	<0,10	2,59	0,02	0,26
	R11	244,33	1,68	12,51	17,49	11,41	2,47	4,69	35,97	0,12	0,3	0,14	6,79	1,47	7,45
12	C12	3,05	11,48	6,32	9,33	31,19	1,04	1,96	16,74	0,84	1,49	<0,10	2,72	0,16	0,21
	R12	373,16	6,39	9,52	12,94	21,67	1,72	3,38	26,44	0,25	0,68	0,10	3,39	0,27	1,49
13	C13	28,65	15,23	3,52	4,76	40,63	0,43	0,95	8,07	0,6	1,65	<0,10	2,67	0,03	0,23
	R13	347,29	5,84	10,08	13,61	20,36	2,03	3,56	28,48	0,22	0,6	0,11	3,49	0,35	1,73

14	C14	61,47	15,21	3,42	4,53	42,91	0,3	1,2	7,31	0,63	1,59	<0,10	2,82	0,02	0,22
	R14	314,28	4,84	10,76	14,58	17,68	2,27	3,77	30,46	0,17	0,5	0,12	3,65	0,47	2,22
15	C15	3,66	8,58	8,05	11,54	26,03	1,47	1,88	21,75	0,52	1,41	<0,10	3,03	0,17	0,94
	R15	372,77	6,44	9,58	13,14	21,75	1,89	3,46	27,03	0,28	0,67	0,11	3,38	0,29	1,49
16	C16	24,31	15,29	3,94	5,29	40,54	0,48	1,14	9,31	0,68	1,71	<0,10	2,65	0,03	0,26
	R16	352,58	5,88	10,03	13,62	20,58	1,96	3,52	28,05	0,23	0,61	0,11	3,50	0,33	1,71

A relação de $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ foi maior que 1,6, ou seja, fora da especificação, segundo Oliveira (2007). O mesmo ocorre para a relação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, que não permaneceu abaixo de 0,095, e para o teor de MgO , que apresentou teores maiores que 1%. Para a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, as relações permaneceram abaixo de 0,095, com exceção dos concentrados dos testes 1, 12 e 15.

Comparando os valores entre a relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e os teores de P_2O_5 , observa-se que os produtos com os menores teores, testes 15, 1 e 7, com 8,58%, 10,04% e 10,09%, respectivamente, apresentaram, os maiores valores para essa relação, 3,03, 2,96 e 3,08, respectivamente. Essa relação inversa ocorreu provavelmente devido a maior coleta de partículas de CaO ao invés de P_2O_5 , elevando assim sua massa no concentrado e consequentemente, aumentando a relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$. Nesses casos a adsorção do coletor sobre as partículas ocorreu de forma não seletiva.

Para a relação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, essa mesma tendência é observada. As maiores relações foram obtidas para os ensaios 15, 1 e 7, de 0,94, 0,75 e 0,72, respectivamente, que também foram os produtos concentrados que apresentaram menores teores de P_2O_5 . A análise dessas duas relações, mostram que os concentrados com menores teores de P_2O_5 apresentaram os maiores valores para as razões $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, evidenciando que nesses casos, não houve seletividade para os carbonatos e minério de ferro.

Além disso, nesses mesmos ensaios, houve menores relações de $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$. No caso do ensaio 1 e 7, foi utilizado maior dosagem de Hidrocol, e o ensaio 15 foi utilizado alta dosagem de depressor. Isso mostra que a máxima concentração de reagentes não proporcionou uma coleta seletiva de P_2O_5 . Em relação à verificação da significância dessas variáveis, é apresentado o gráfico normal de efeitos, nas Figuras 43, 44 e 45.

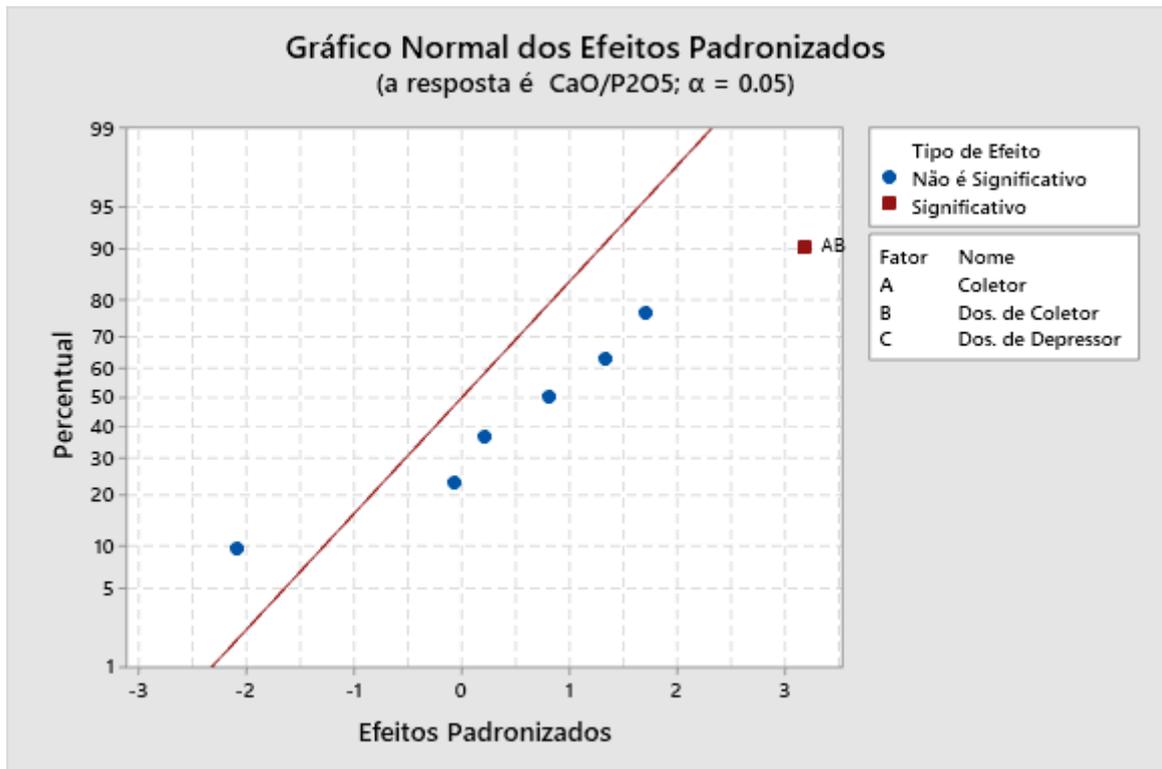
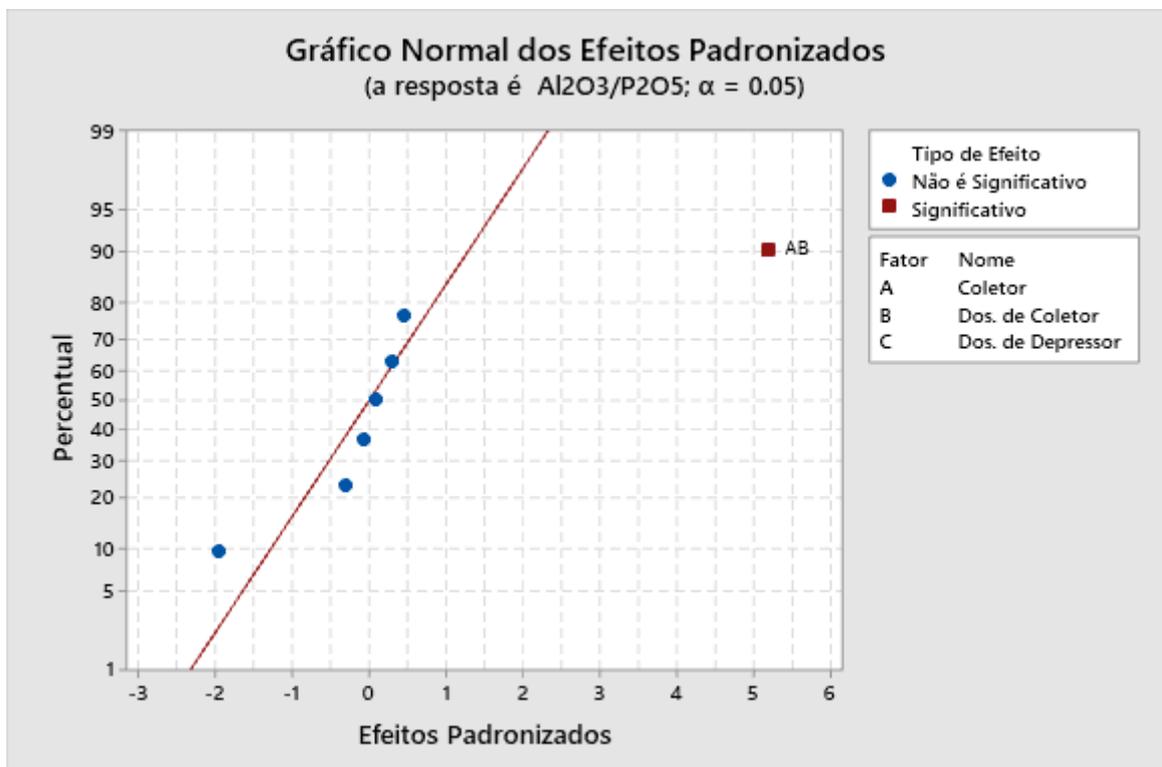
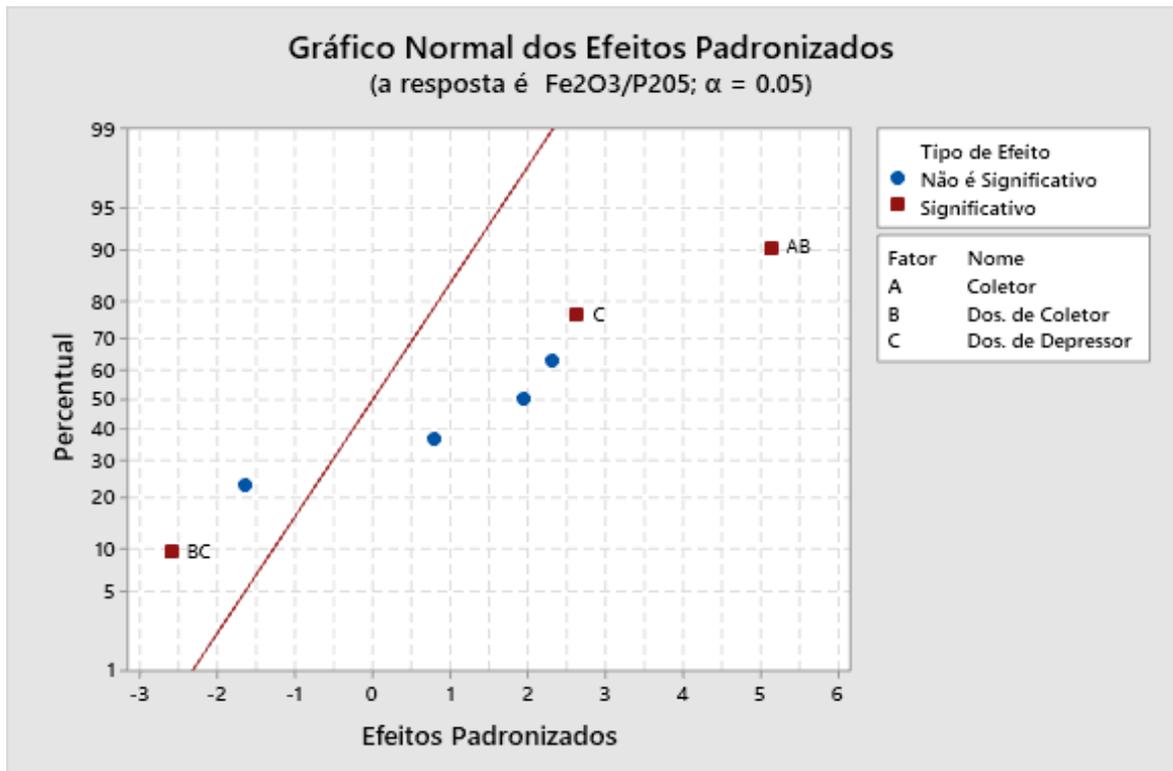
Figura 43 - Verificação da significância das variáveis para CaO/P₂O₅.Figura 44 - Verificação da significância das variáveis para Al₂O₃/P₂O₅.

Figura 45 - Verificação da significância das variáveis para $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$.

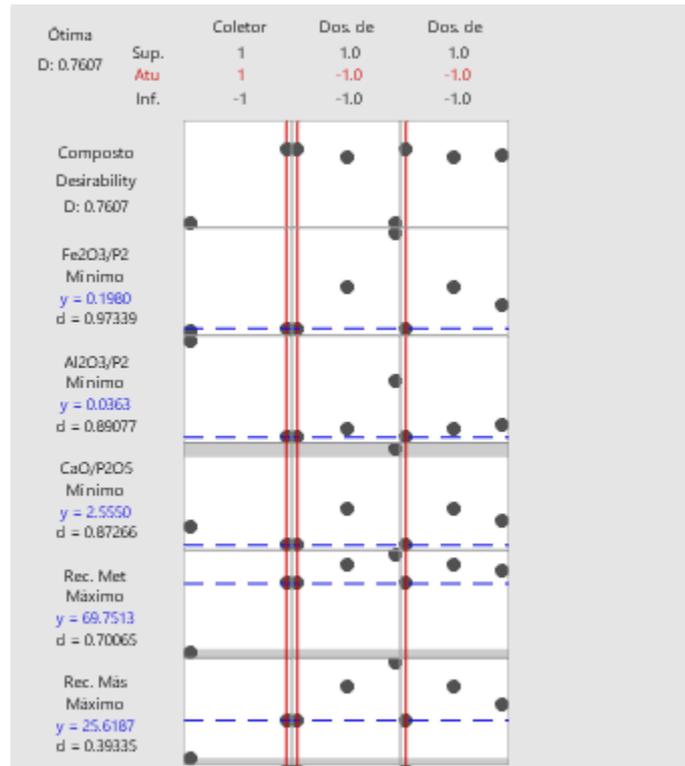
Analisando as Figuras 44, 45 e 46, observa-se que foi significativo para a relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ a interação entre o coletor e a sua dosagem (efeito de segunda ordem), de forma positiva, e para a relação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ essa mesma interação teve significância, como também a dosagem do depressor. Para essa última relação, também houve significância de forma negativa sobre o sistema a interação entre as dosagens dos reagentes.

Por fim, foi obtido os cenários ótimos, otimizando as respostas, de forma que o teor de P_2O_5 , recuperação mássica e recuperação metalúrgica fossem maximizados, e as relações $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, fossem minimizadas, utilizando um nível de confiança de 95%.

O cenário ótimo para que as respostas sejam otimizadas, foi utilizando o nível máximo para o coletor e mínimo para as dosagens de coletor e depressor. Ou seja, utilizar o Hidrocol como coletor, com dosagem 200 g/t e para o depressor, 100 g/t. Essa condição corrobora com os resultados obtidos, como abordado na discussão. Com esse cenário, a análise estatística apresenta como respostas ótimas teor de 17,13% P_2O_5 no concentrado, além de recuperações mássica e metalúrgica de 25,62% e 69,75%, respectivamente.

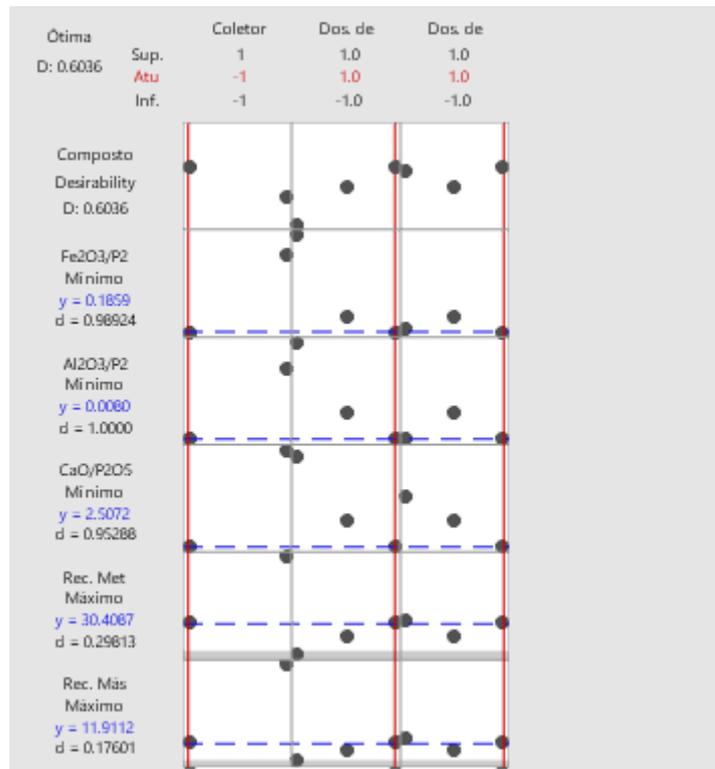
As relações $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ (2,555) e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ (0,198) permaneceram acima da especificação, enquanto $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, (0,036) se mostrou abaixo de 0,095, conforme apresentada na Figura 46. Comparada as relações da alimentação houve uma diminuição em seus valores de 21,42%; 86,25% e 86,67%, respectivamente.

Figura 46 - Cenários obtidos para otimização das respostas.



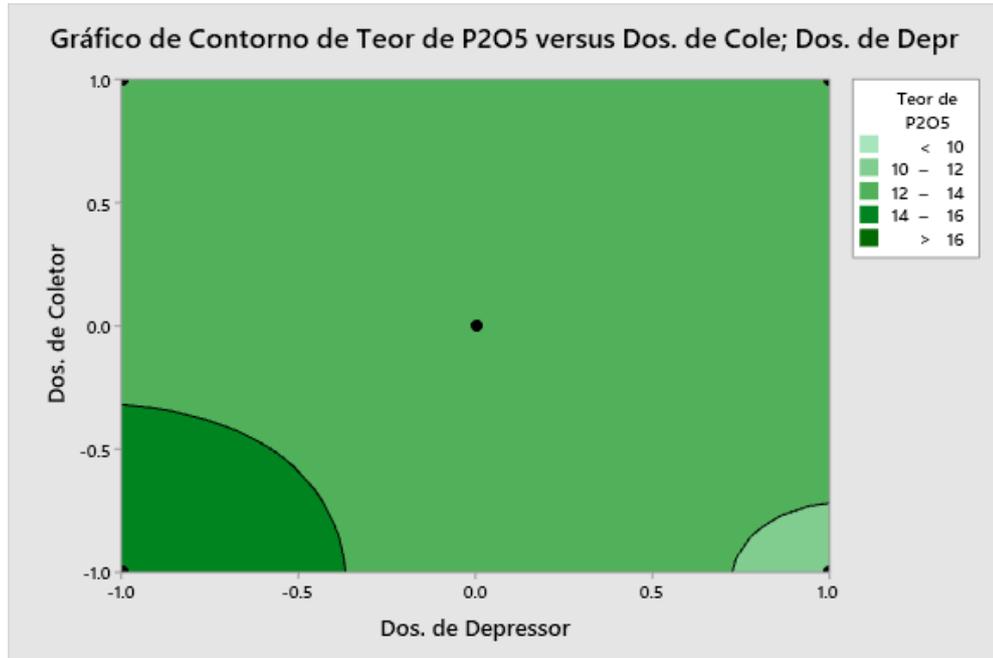
A fim de obter o cenário ótimo considerando a utilização do coletor A1, o mesmo processo anterior foi realizado, porém, estabelecendo como coletor o nível -1. Esse cenário é apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Cenário de otimização das respostas utilizando o óleo A1 como reagente coletor

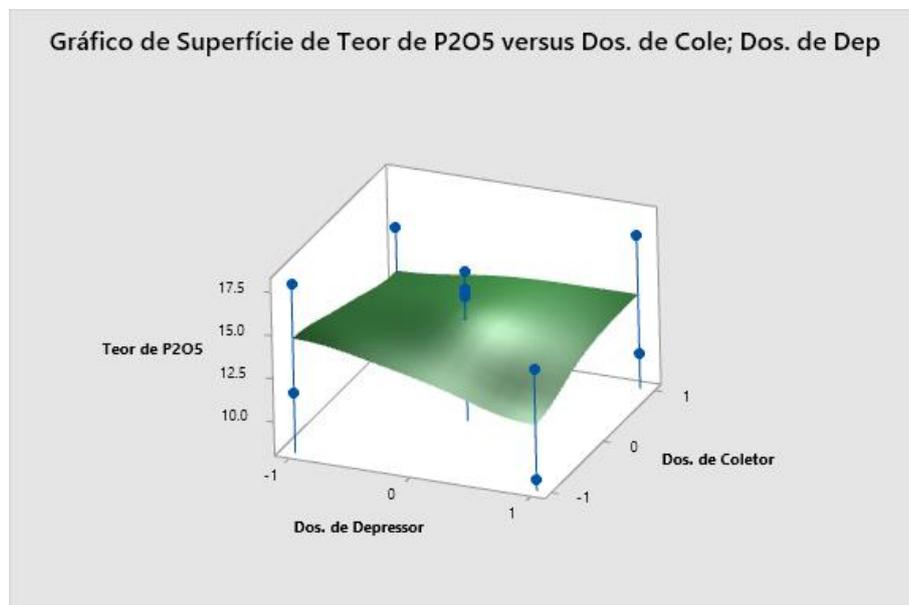


Nesse segundo cenário, utilizando o coletor A1, a dosagem do coletor e do depressor se mostram no nível 1, ou seja, 500 g/t e 350 g/t, respectivamente. Nesse cenário, o teor de P₂O₅ previsto corresponde a 17,58% P₂O₅, recuperação mássica e metalúrgica de 11,91% e 30,41%, respectivamente. Para as relações CaO/P₂O₅, Fe₂O₃/P₂O₅ e Al₂O₃/P₂O₅ foram previstos, 2,507; 0,186 e 0,008, respectivamente, valores que representam uma diminuição de 22,62%; 87,08% e 97,04%, respectivamente.

Buscando avaliar a variação da principal resposta analisada (teor de P₂O₅), de acordo com a variação da dosagem do coletor e do depressor, foi obtido o seu gráfico de contorno, apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Contorno de teor de P_2O_5 versus Dosagem de Coletor e Dosagem de Depressor

Assim, é possível observar que os maiores teores (maior que 16%), estão concentrados em regiões com utilização de menores dosagens de reagentes, caso que o cenário de otimização, apresentado na Figura 46, retorna com uso de Hidrocol. Ainda, os menores teores (menor que 10%) estão concentrados nas regiões de maiores dosagens. Isso também pode ser visto na superfície de resposta apresentada pelo Gráfico 5.

Gráfico 5 - Gráfico de Superfície de Teor de P_2O_5 versus dosagem de coletor e depressor

Por fim, como esse trabalho se trata dos ensaios iniciais, para a tentativa de transferência das condições dos ensaios de microflotação, realizados no trabalho de Paiva (2019) para ensaios de flotação em bancada, e sendo uma das primeiras iniciativas para utilização do coletor A1 na flotação de um minério complexo, os resultados obtidos se mostraram significativos. Nesse sentido, mostra a possível viabilidade do uso do reagente A1 na flotação de minério fosfático, tendo em vista que se trata de um recurso de origem residual de espécies vegetais endêmicas da Amazônia. Tal fato é muito importante na busca por reagentes alternativos, seletivos, de baixo custo, e com disponibilidade que possam ser aplicados na indústria mineral.

Iniciativas desse sentido, foram desenvolvidas no CEFET/MG, Campus Araxá. Coutinho (2018) traz um estudo de otimização avaliando duas rotas para a concentração de minério fosfático sílico carbonatado. Uma rota convencional, utilizada pela indústria e uma optativa que propunha a realização de uma separação magnética de alto campo, que ocorreria anteriormente aos testes de flotação.

Carneiro (2018) realizou um estudo utilizando 6 tipos de reagentes depressores de origens botânicas diferentes, dentre eles, o amido utilizado na indústria e outro se tratava de um resíduo da indústria alimentícia. A autora avaliou as condições ótimas de pH e dosagem do reagente. Em relação aos seus resultados, os mesmos apresentaram-se similares para os 6 tipos de amido utilizados, não apresentando seletividade frente ao minério investigado, que foi o minério fosfático sílico carbonatado.

Carneiro *et al.* (2021) também avaliou esses mesmos 6 amidos na flotação do minério fosfático ultrafino. Obteve um teor médio, utilizando o amido residual, de 27,88% de P_2O_5 , com uma recuperação metalúrgica de 66,61%. Em sua análise estatística, observou que o amido residual e industrial produziu concentrados com teores estatisticamente iguais.

Santos (2017) realizou ensaios de flotação em coluna, com etapa *rougher* e *cleaner*, avaliando as condições ótimas de pH, temperatura e dosagem. Em seu cenário ótimo, era possível obter um teor de 13,56% de P_2O_5 , utilizando pH 9,5, dosagem de 150 g/t e temperatura de 25 °C.

Comparando esses trabalhos, com os resultados obtidos neste trabalho, é possível observar a obtenção de teores próximos ou similares utilizando o Hidrocol. Em contrapartida, ao utilizar o óleo A1, os seus resultados mostram que há a possibilidade do seu uso como

reagente, mas para que isso ocorra, outras variáveis devem ser exploradas, como o pH e granulometria.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios e análises químicas, juntamente com a análise estatística realizada, o objetivo de avaliar os reagentes coletor e depressor no processo de flotação foi alcançado. Foi possível observar que apesar da complexidade apresentada pelo minério, os reagentes apresentaram seletividade para os carbonatos e minério de ferro.

Para os testes iniciais de caracterização do minério, foi obtido uma densidade de sólidos $3,14 \text{ g/cm}^3$, através dos ensaios de picnometria realizados. Para a análise granulométrica, 96,25% da amostra apresentava-se passante em $212 \mu\text{m}$.

Em relação aos testes de flotação, foram observadas características distintas para os reagentes coletores utilizados. Para o Hidrocol, foram observadas grande números de bolhas, pequenas, bem formadas e bem mineralizadas. O contrário foi observado para o óleo A1. Bolhas grandes, mal formadas e muito pouco mineralizadas. Além disso, em todos os ensaios de flotação, não foi utilizado regulador de pH, permanecendo entre 9,4 a 9,6 no condicionamento e durante a flotação.

Em relação aos teores de P_2O_5 , permaneceram de forma geral, acima de 10% (com exceção do concentrado do teste 15), as recuperações mássicas entre 0,81 e 63,88% e as recuperações metalúrgicas entre 1,27% e 97,92%. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ permaneceu acima 2,50, sendo que o valor ideal, citado por Oliveira (2007), seria igual ou abaixo de 1,6. As relações $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ e $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$, permaneceram acima 0,18% e 0,02%, respectivamente, razões essas que devem permanecer abaixo de 0,095. Os teores de MgO permaneceram acima de 1%. Vale citar que houve uma diminuição de 21,14%; 86,25% e 86,67%, respectivamente, desses valores comparados aos valores obtidos das relações da alimentação.

Na análise estatística foi observado que de forma geral, o tipo de coletor e sua dosagem, bem como a interação dessas variáveis eram significativos no processo, e possuindo efeito de primeira ordem ou de segunda ordem. Foi observado que para a otimização das respostas, era necessário utilizar o Hidrocol saponificado como reagente coletor, com dosagens menores de reagentes. Se fosse estabelecido o emprego do coletor A1, era necessário utilizar dosagens maiores dos reagentes (nível 1).

Contudo, baseados nos estudos fundamentais realizados por Paiva (2019) utilizando o óleo A1, esses ensaios representam a primeira iniciativa de transferência das condições

realizadas de microflotação para a flotação em bancada. Além disso, através desses ensaios foi possível observar a viabilidade deste reagente residual, como coletor na flotação de minério fosfático, o qual apresentou resultados satisfatórios frente a um minério tão complexo como o utilizado.

Com esses resultados, baseados na análise química e estatística executada, pode-se observar que o óleo A1 saponificado apresentou seletividade frente aos carbonatos. É um reagente, que, apesar de necessitar de mais estudos e análises, se apresenta promissor na utilização como coletor em flotação de minério fosfático complexo. Se torna ainda mais atrativo devido ao fato de ser uma substância residual de processos industriais, originária de uma espécie vegetal endêmica da região do Amazonas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise exploratória sobre a saponificação do óleo A1.
- Realizar uma análise exploratória sobre os efeitos do pH e granulometria utilizando o óleo A1 na flotação de minério fosfático.
- Realizar a análise fatorial utilizando mais um tipo de reagente depressor, assim como uma maior faixa de dosagem.
- Realizar os testes de flotação em coluna e avaliar seus resultados frente aos obtidos em célula.
- Avaliar a utilização do óleo A1 em etapa *cleaner*, visto a seletividade apresentada nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ABRAM., M. B. Fosfato no Brasil. **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Org.: MELFI, A. J.; MISI, A.; CAMPOS, D. de A.; CORDANI, U. G Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016.
- ALBURQUEQUE, G. de A. Sá C. de. **A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas**. Rio de Janeiro: CETEM, 1996. 130 p.
- ATHENA MINERALOGY: **Systematic list of minerals – Phosphates**. Disponível na Internet <http://un2sg4.unige.ch/athena/mineral/minppcl7.html> *apud* CHULA, A.M.D. **Caracterização Mineralógica do Minério Fosfático da Mina de Tapira - MG**. 2004. 378 f. Tese de (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- BALTAR, C.A.M. **Flotação no Tratamento de Minérios**. Recife: Departamento de Engenharia de Minas/UFPE, 2008.
- BARBOSA, E. S. R. **Mineralogia e Petrologia do Complexo Carbonatítico-Foscorítico de Salitre, MG**. Universidade de Brasília. Tese (Doutorado). Brasília. 2009.
- BENITE, V. de Melo. A importância da pesquisa na avaliação da eficiência das tecnologias em fertilizantes fosfatados no Brasil. **Boletim Informativo da SBCS**. Rio Verde- GO, 2015.
- BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.
- CARNEIRO, A. A. **Avaliação de diferentes tipos de amido na flotação aniônica direta de minério fosfático sílico-carbonatado**. 2018. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Araxá, 2018.
- CARNEIRO, A. A. *et al.* Avaliação de Diferentes Polissacarídeos Como Depressores na Flotação Anônica Direta de Minério Fosfático Ultrafino. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, 2021.
- CHAVES, A. P.; FILHO, L. de S. L.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.
- CHAVES, A. P. Máquinas de flotação. In: CHAVES, A. P. (Org.). **A flotação no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Signus, 2006. p. 31-44.
- CHULA, A.M.D. **Caracterização Mineralógica do Minério Fosfático da Mina de Tapira - MG**. 2004. 378 f. Tese de (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- CRUZ, J. R. da, *et al.* Caracterização Espectral do Depósito de Fosfato de Araxá (MG). **Anais...Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba, 2011. P 3530.
- COUTINHO, N. A. F. S. **Otimização de Processo de Flotação de Minério Fosfático Sílico-carbonatado de Araxá-MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.
- DIRECT INDUSTRY. **Máquinas de Flotação**. 2021. Disponível em <<https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/maquina-flotacao-96278.html>>. Acessado em 18/08/2021.

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

EPE: Empresa de Pesquisa Energética. **Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Fertilizantes Nitrogenados**. 2019. Disponível em < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-01-19%20%20GN_Fertilizantes.pdf. Acessado em 12/10/2020.

FERREIRA, E. **Caracterização mineralógica das amostras de rocha fresca do CMA**. Relatórios Internos. Vale. 2015.

FIXEN, P. E. **Reservas Mundiais de Nutrientes dos Fertilizantes**. Informações Agronômicas. N 26, 2009.

GLOBALFERT. Projeto Visa a Redução da Dependência Externa de Fertilizantes no Brasil. **Jornal Cana**, 2021. Disponível em < <https://www.globalfert.com.br/noticias/negocios/projeto-visa-a-reducao-da-dependencia-externa-de-fertilizantes-no-brasil/> > Acessado em 11/08/2021.

GRASSO, C. B. **Geologia e Geometalurgia dos Minérios dos Minérios de Fosfato na Base do Manto de Intemperismo da Mina do Barreiro**. Universidade de Brasília. Tese (Doutorado). Brasília, 2015.

GUEDES, T. S. **Estudo Sobre Coletores na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro Itabiríticos**. Universidade Federal de Minas Gerais. Monografia (Especialista em Engenharia de Recursos Mineraias). Belo Horizonte, 2012.

GUIMARÃES, G. C.; LIMA, R. M. F.; OLIVEIRA, M. L. M. Flotação de Diferentes Tipologias de Minério Fosfático de Tapira/MG, Usando o Coletor Óleo de Soja Hidrogenado. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, 57(3), 203-207, 2004.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION – IFA. **Mineral Fertilizer Use and the Environment**. Revised Edition. Paris, 2000.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais/Fosfato. In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed(s)). **Rochas e minerais Industriais**. 1ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO, M. Fosfato. In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed(s)). **Rochas e minerais Industriais: Usos e Especificações**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 141-171.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

MAELGWYN. **Contrato para flotação de Mobilidénio em Los Penambres**. 2008. Disponível em <<https://www.maelgwyn.com/2008-archive/?lang=pt-br>> Acessado em 18/08/2021.

MAELGWYN. **Plantas de Flotação Pneumática Imhoflot™**. 2020. Disponível em <http://www.maelgwyn.com/technology/pneumatic-flotation-imhoflot/> Acessado em 18/08/2021.

MARTINS, R. L. *et al.* Estudo de coletores para apatita obtidos via saponificação/neutralização alcoólica. **Anais...** XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2019.

MASSI, L *et al.* Fundamentos e Aplicações da Flotação como Técnica de Separação de Misturas. **Química Nova na Escola**, n 28, 2008.

McCLELLAN, G. H.; VAN KAUWENBERGH, S. J. Depósitos Mundiais de Fosfato. In: **Uso de Rochas Fosfáticas para Agricultura Sustentável**. FAO. 2004. Disponível em <<http://www.fao.org/3/y5053e/y5053e07.htm>>. Acessado em 20 de novembro de 2020.

METSO MINERAÇÃO. **Colunas de Flotação Alta Recuperação Microtel™**. 2020. Disponível em <<https://www.metso.com/br/produtos/colunas-de-flotacao-de-alta-recuperacao-microcel/>> Acessado em 18/08/2021.

MONTE, M. B. de M., PERES, A. E. C. Química de Superfície na Flotação. In: LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

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

NUNES, A. P. L.; PERES, A. E. C. Reagentes Depressores de Carbonato. **Série Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM, 2011.

OLIVEIRA, M. S. **Minério Fosfático Sílico-Carbonatado: Estudo Fundamental**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, M. D. **Tratamento de Minérios**. CEFET/MG. Araxá, 2012.

PAIVA, A. H. L. **Estudo de Óleos Amazônicos na Flotação da Apatita**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2019.

PEIXOTO, A.; FERREIRA, D.; MATTOS, I. **Catálogo de Minerais do Laboratório de Mineralogia**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

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

RAPOSO, D. B.; PEREIRA, S. Y. Caracterização litológica e hidrodinâmica do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Oeste de Minas Gerais. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 32, n.1, p. 33-50, 2013.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e Seu Uso Eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. – São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

RIBEIRO, C. C. **Apatita**. Relatório Interno Ultrafértil. Maio, 2002, 28 p. *apud* CHULA, A.M.D. **Caracterização Mineralógica do Minério Fosfático da Mina de Tapira - MG**. 2004. 378 f. Tese de (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

RODRIGUES, R. Um plano para os fertilizantes. **Forbes**, 2021. Disponível em <<https://forbes.com.br/colunas/2021/07/roberto-rodrigues-um-plano-para-os-fertilizantes/>>. Acessado em 25/08/2021.

- RODRIGUES, R. B. *et al.* Opção de Troca de Produto na Indústria de Fertilizantes. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 50, n. 2, p. 129-140, 2015.
- SAATH, K. C. de O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n 2, p 195-212, 2018.
- SAMPAIO, J. A.; BALTAR, C. A. M. Ensaio de Flotação. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A (Edi). **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.
- SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. da. Determinação das Densidades de Sólidos e de Polpa. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios Práticas Laboratoriais**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2007.
- SANTOS, K. F. **Flotação de minério fosfático sílico-carbonatado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá.
- SIS, H.; CHANDER, S. Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review. **Minerals Engineering**, 16, 577-585, 2003.
- SOUZA, A. L. de S *et al.* Use of depressants in the direct flotation of a silicate-carbonate phosphate ore. **Revista Escola de Minas**, v. 67, n 2, Ouro Preto, 2014.
- SOUZA, A. E. de; FONSECA, D. S. **Fosfato**. DNPM. 2009
- UHLEIN, A.; MARQUES, C. S. de S.; UHLEIN, G. J. Fertilizantes Provenientes de Depósitos Sedimentares de Fosfato e Potássio Pré-Cambrianos. In: PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. (Coord.). **Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais – CODEMGE, 2018.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Phosphate Rock**. Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia, US:USGS, 2021. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/. Acessado em 11/08/2021.
- VALE. **Amostras de Rocha Fresca**. Relatórios Internos. 2015.