



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

GUILHERME HENRIQUE DE OLIVEIRA

**REPROCESSAMENTO DO REJEITO DA ETAPA DE FLOTAÇÃO
SCAVENGER DE MINÉRIO DE FOSFATO POR MEIO DE SEPARAÇÃO
MAGNÉTICA**

ARAXÁ

2024

GUILHERME HENRIQUE DE OLIVEIRA

**REPROCESSAMENTO DO REJEITO DA ETAPA DE FLOTAÇÃO
SCAVENGER DE MINÉRIO DE FOSFATO POR MEIO DE SEPARAÇÃO
MAGNÉTICA**

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.

Orientador(a): Profa. Dr.(a) Michelly dos
Santos Oliveira.

Coorientador(a): Me. Santiago Henrique
Cruz.

ARAXÁ

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional em todos os momentos. Vocês sempre acreditaram em mim, me incentivaram e me ofereceram o suporte necessário para que eu pudesse alcançar este objetivo. Sou imensamente grato por tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante essa jornada, compartilhando momentos de alegria, desafios e superação. Vocês tornaram esse percurso mais leve e agradável, e cada palavra de incentivo foi essencial para que eu continuasse firme em busca desse sonho.

À minha companheira, por sua paciência, compreensão e amor. Sua presença foi uma fonte constante de força e motivação, e sem você ao meu lado, esse caminho teria sido muito mais difícil. Obrigado por acreditar em mim e por estar sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais desafiadores.

À faculdade, por proporcionar um ambiente de aprendizado e crescimento, onde pude desenvolver minhas habilidades e conhecimentos. Sou grato pela estrutura e pelas oportunidades que me foram oferecidas ao longo desses anos.

Aos professores, que com dedicação e sabedoria compartilharam seu conhecimento, guiando-me no processo de aprendizado e formação. Cada aula, cada orientação foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Por fim, aos meus orientadores, pela paciência, compreensão e por acreditarem no meu potencial. Suas orientações foram cruciais para a construção deste trabalho, e sem elas, este projeto não seria o que é hoje. Sou profundamente grato por todo o apoio e ensinamentos que recebi.

RESUMO

O reaproveitamento dos rejeitos gerados nas etapas de beneficiamento de minérios é amplamente discutido como uma estratégia para reduzir os custos das empresas e mitigar os impactos ambientais, promovendo uma mineração mais sustentável. Contudo, para cada tipo de minério existem diferentes etapas que visam o maior aproveitamento dos teores. O presente trabalho tem o propósito de avaliar o uso da separação magnética de baixo e alto campo para reaproveitamento do rejeito da etapa de flotação *scavenger* de minério fosfático do Complexo Minerioindustrial de Serra do Salitre. As separações magnéticas de bancada foram realizadas com as amostras de rejeitos moídas e não moídas. Os testes demonstraram que a moagem não foi diferencial para a concentração das amostras. Além disso, a separação magnética resultou no aumento dos teores de titânio e ferro, nos produtos magnéticos, e no aumento do teor de apatita, no produto não magnético. Foi possível sugerir uma rota de circuito fechado para a apatita a partir do produto não magnético da separação magnética de baixo campo. Além disso foi sugerido um estudo para recuperar, via flotação, a titanita presente na porção magnética da separação magnética de alto campo. Além disso, uma recuperação, via concentração gravítica, da magnetita, produzida na separação magnética de baixo campo, também foi proposta.

Palavras-chave: separação magnética, alto campo, baixo campo, fosfato, rejeito.

ABSTRACT

The reuse of waste generated in the ore beneficiation stages is widely discussed as a strategy to reduce company costs and mitigate environmental impacts, promoting more sustainable mining. However, for each type of ore, there are different stages aimed at maximizing its reuse. The present work aims to evaluate the use of low and high-field magnetic separation for the reuse of tailings from the scavenger flotation stage of phosphate ore from the Serra do Salitre Mining Complex. Bench magnetic separations were carried out with both ground and unground tailings samples. The tests demonstrated that grinding was not a differential factor for the concentration of the samples. Additionally, magnetic separation resulted in increased titanium and iron contents in the magnetic products and an increase in apatite content in the non-magnetic product. It was possible to suggest a closed-circuit route for apatite recovery from the non-magnetic product of low-field magnetic separation. Moreover, a study was suggested to recover, via flotation, the titanite present in the magnetic portion of the high-field magnetic separation. In addition, a recover, via gravity concentration, the magnetite produced in the low-field magnetic separation, was also proposed.

Keywords: magnetic separation, high-field, low-field, phosphate, tailings.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma típico de beneficiamento minério fosfático ígneo brasileiro.....	13
Figura 2: Mecanismo de flotação.....	15
Figura 3: Circuito de Flotação	16
Figura 4: Relação dos principais minerais com propriedades magnéticas. 19	
Figura 5: Diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.	20
Figura 6: Esboço do separador magnético de carrossel usado em escala laboratorial.....	21
Figura 7 - Fluxograma das etapas do estudo.	23
Figura 8: Moinho usado na cominuição do rejeito fosfático	24
Figura 9: Vista interna do moinho empregado na moagem do rejeito <i>scavenger</i>	25
Figura 10: Separação magnética de baixa intensidade.....	26
Figura 11: Vista do separador magnético de alto campo.....	27
Figura 12: Matriz do equipamento de separação magnética.....	29
Figura 13: Distribuição granulométrica do rejeito da flotação <i>scavenger</i> antes e depois da moagem.....	31
Figura 14 - Difratoograma dos principais minerais da amostra	32
Figura 15: Produto magnético da separação de baixo campo	34
Figura 16: Relatório para Recuperação Mássica do produto magnético (Moída via úmida).....	35
Figura 17: Relatório para Recuperação Mássica do produto magnético (não moído via úmida).....	36
Figura 18: Comparações emparelhadas de Tukey.	37
Figura 19 - Relatório para o teor de <i>P2O5</i> do produto magnético (<i>Moída via úmida</i>)	39

Figura 20: Relatório para o teor de P_2O_5 do produto magnético (não moído via úmida).....	39
Figura 21: Teste estatístico ANOVA para o teor de P_2O_5 obtido no magnético de baixo campo.	40
Figura 22: Gráfico de cubo para recuperação do produto não magnético..	42
Figura 23: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados	43
Figura 24: Gráfico Half Normal dos efeitos padronizados	44
Figura 25: Gráfico de Cubo para o teor de TiO_2	45
Figura 26: Gráfico de Cubo para o teor de Fe_2O_3	45
Figura 27: Gráfico de Cubo para o teor de P_2O_5	46
Figura 28: Teste de hipótese para avaliação da diferença de Recuperação mássica de magnético.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planejamento fatorial da separação magnética de alto campo...	28
Tabela 2: Teores em percentagem dos óxidos do rejeito.....	32
Tabela 3: Composição mineralógica da flotação scavenger.	33
Tabela 4: Recuperação magnética da SMBI para os produtos com moagem.	34
Tabela 5 - Recuperação magnética da SMBI para os produtos sem moagem	35
Tabela 6: Média dos teores dos resultados de SMBI.....	38
Tabela 7: Resultados Teste fatorial da separação magnética de alto campo	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Minério Fosfático	12
2.1.1. Beneficiamento da apatita	13
2.2. Flotação	14
2.2.1. Circuitos de flotação	16
2.3. Moagem	16
2.4. Separação Magnética	18
2.4.1. Equipamentos de separação magnética	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 Materiais	24
3.2. Preparação das amostras	24
3.3. Caracterização da amostra	25
3.4. Ensaio de separação magnética	25
3.4.1. Separação magnética de baixa intensidade.....	25
3.4.2. Separação magnética de alta intensidade	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Caracterização da amostra	31
4.2. Testes de SMBI (Separação magnética de baixo campo)	33
4.3. Separação Magnética de Alto Campo (SMAI)	40
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

Após a extração e o tratamento dos minérios, ocorre a produção de rejeitos, que consistem na porção do minério sem valor econômico e que é normalmente depositada em barragens, que são estruturas usadas para contê-los.

Com a população mundial em crescimento, há o aumento na demanda de produtos cuja origem é a mineração. Mesmo com os avanços nas tecnologias de extração das minas, essa atividade tem se mostrado cada vez mais desafiadora devido aos menores teores, à complexidade e às pressões da sociedade. Com isso, as empresas vêm trabalhando em rotas de processo que aproveitem ao máximo o recurso mineral, aumentem a receita, reduzindo assim o tempo de retorno e diminuindo a massa de rejeito enviada para as barragens.

O uso de estruturas de barragens de rejeitos na mineração se tornou crítico após os rompimentos recentes das barragens de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Devido a estes desastres, empresas de mineração estão eliminando o uso desta estrutura. Para isso, torna-se fundamental não apenas estudar ou implementar novas técnicas de estocagem de rejeitos, mas também desenvolver novas aplicações para esses rejeitos.

De acordo com o IBRAM (2019), startups têm emergido com foco específico no reaproveitamento de rejeitos. A EcoMud, por exemplo, utiliza lama de rejeitos para desenvolver pavimentação de alta durabilidade. Esse tipo de inovação não só resolve um problema de descarte, mas também oferece uma solução de infraestrutura duradoura e econômica. Da mesma forma, a Element aproveita rejeitos arenosos provenientes da Samarco para desenvolver ferrosilício, essencial na fabricação de aços especiais. A GMTech, por sua vez, desenvolveu uma argamassa para construção civil que utiliza 50% de rejeito arenoso em sua composição, demonstrando como os rejeitos podem ser transformados em produtos valiosos.

A Vale, uma das maiores mineradoras do mundo, tem trabalhado para aproveitar seus rejeitos em projetos de construção civil. Esse esforço não apenas ajuda a mitigar impactos ambientais, mas também cria novos produtos e soluções para a indústria da construção. Outras mineradoras consideram analisar seus rejeitos

para evitar levar grandes quantidades de material para as barragens e aumentar sua vida útil, além de melhorar a conformidade com as normas ambientais.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar por meio de separação magnética o rejeito da etapa de flotação *scavenger* de minério fosfático do Complexo Minerioindustrial de Serra do Salitre. Como objetivos específicos, realizar a caracterização do rejeito da flotação *scavenger*, as separações magnéticas de baixo (700 Gauss) e alto campo (10.430 Gauss) em duas granulometrias, e a análise estatística dos resultados.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentados a introdução e a motivação em estudar esse tema. No segundo capítulo são abordados os conceitos gerais sobre rejeitos de mineração e os aspectos da técnica de separação magnética. No terceiro capítulo são descritos os procedimentos experimentais adotados nesse trabalho. No capítulo quatro são descritos os resultados obtidos em testes de laboratório. Por fim, o capítulo final considera os objetivos propostos e apresenta a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão baseada na literatura, contextualizando os temas pertinentes a este trabalho.

2.1. Minério Fosfático

O fósforo, símbolo químico “P”, é um elemento pertencente ao grupo metalóide, parte do Grupo V da tabela periódica dos elementos, e possui número atômico 15. Esse mineral está amplamente distribuído pelo globo através de seus diversos compostos, mais comumente encontrados na forma de sais chamados fosfatos, que são muito ativos mesmo em baixas temperaturas. Devido a esta propriedade não existe livremente na natureza. Principalmente pela função e/ou papel que desempenha, como principal responsável pela geração de energia para a produção vegetal, é indispensável nos processos de crescimento e sustentação corporal de plantas e animais. Ressalta-se que o fósforo possui uma ampla gama de aplicações, mas tem seu principal uso na agricultura na forma de fertilizantes (DNPM, 2009).

O fósforo ocorre em depósitos de rochas sedimentares, ígneas e biogenéticas. Os mais importantes no ponto de vista econômico são os depósitos sedimentares e ígneos. Os depósitos biogenéticos apresentam um volume reduzido e se destacam pela presença de concentrações de matéria orgânica rica em nitrogênio, proveniente dos resíduos de aves. No Brasil, aproximadamente 80% das jazidas de fosfatos naturais têm origem ígnea, caracterizadas por uma notável presença de rochas carbonatíticas e minerais micáceos, que geralmente possuem um baixo teor de fósforo, comumente expresso em termos de P_2O_5 . Em contraste, a nível global, essa proporção fica em torno de 17% (DNPM, 2009).

A maioria dos minerais de minérios de fósforo encontrados nessas rochas pertencem ao grupo da apatita, representada pela fórmula: $Ca_5(F, Cl, OH)(PO_4)_3$. A apatita é um fosfato de cálcio cristalino que pode variar em cor, apresenta brilho vítreo, dureza cinco, densidade entre 3,1 e 3,2 g/cm³ e exibe fratura conchoidal. O teor de P_2O_5 nesse tipo de depósito varia tipicamente de 4 a 15% (AMARAL, 2005).

O processo de beneficiamento mineral da apatita tem como finalidade obter um concentrado apatítico com a qualidade necessária para ser utilizado como matéria-prima na produção de fertilizantes. Isso implica que o concentrado deve possuir um teor médio de P_2O_5 de aproximadamente 35% e baixos níveis de impurezas (TESTA, 2008).

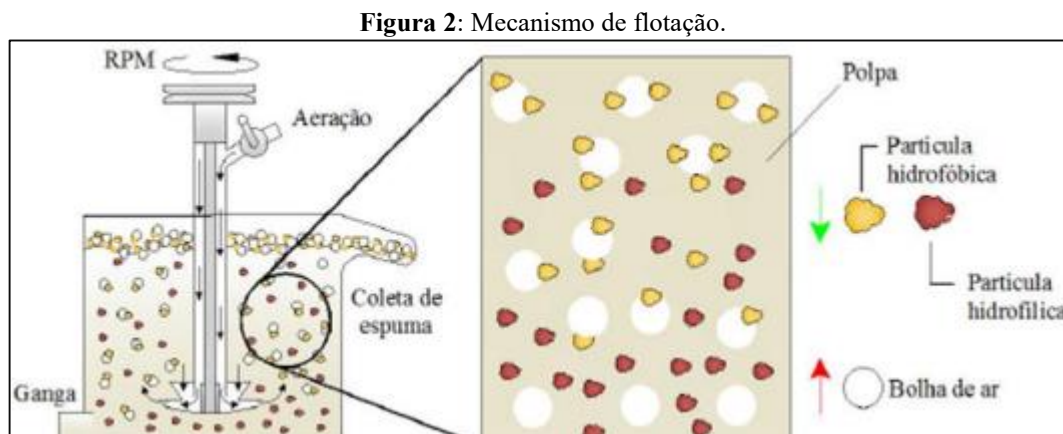
2.2. Flotação

A flotação em espuma, ou simplesmente flotação, é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas propriedades de superfície entre as diversas substâncias presentes. Este método trata de uma mistura heterogênea de partículas suspensas em uma fase aquosa (polpa) (PERES *et al.*, 2006). As partículas são forçadas a seguir um caminho e, num determinado momento, as partículas que desejam flutuar são forçadas a abandonar esse caminho e seguir uma direção ascendente.

A diferença entre as espécies minerais depende da capacidade de suas partículas se fixarem (ou aderirem) às bolhas (geralmente de ar). Se as bolhas conseguirem capturar um número suficiente de partículas, a densidade do agregado partícula-bolha torna-se menor que a do fluido, e o agregado se move verticalmente para a superfície, onde é retido e separado em espuma, enquanto as partículas de outras espécies minerais mantêm a sua rota inalterada (CHAVES *et al.*, 2010).

As partículas que se aderem às bolhas são as chamadas de hidrofóbicas, já as que continuam o caminho são as chamadas hidrofílicas. As características de hidrofiliabilidade e hidrofobicidade estão associadas as características de polaridade (apolar e polar) das superfícies das partículas. Ao usar um processo de flotação para flutuar minerais com superfícies naturalmente hidrofóbicas, um agente espumante precisa ser adicionado para auxiliar na coleta e facilitar o transporte no meio fluido. Minerais com propriedades hidrofílicas tendem a permanecer suspensos na polpa devido às suas boas propriedades umectantes. Para fazer esta partícula flutuar, a química da superfície pode ser alterada e tornada hidrofóbica, tornando a flotação viável (WILLS, 2007).

A Figura 2 representa as rotas tomadas pelas partículas hidrofóbicas que se aderem às bolhas e as rotas das partículas hidrofílicas que afundam no equipamento de flotação.



Fonte: Veras, 2010.

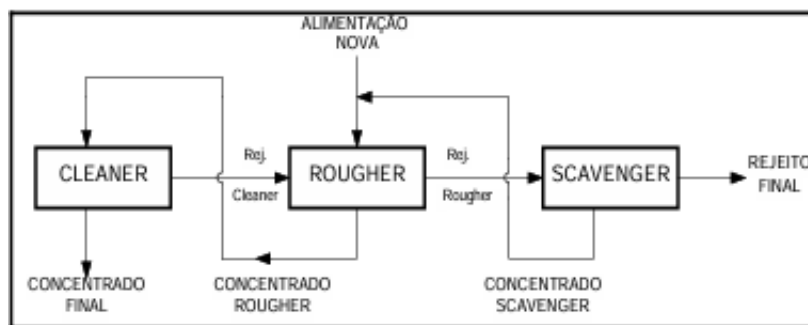
Santos (2021) teve como objetivo em seu trabalho avaliar a eficiência de reagentes depressor e coletores na flotação aniônica direta de apatita, constituinte do minério fosfático proveniente da jazida de Araxá-MG, utilizando análise do planejamento fatorial completo. O estudo visava avaliar o desempenho dos reagentes na flotação de uma amostra de minério fosfático proveniente do depósito alcalino carbonatítico do Barreiro (Araxá-MG), com foco na obtenção de recuperação e teores de P_2O_5 satisfatórios. Os resultados obtidos na avaliação dos reagentes na flotação direta de minério fosfático incluíram a observação de que os reagentes apresentaram seletividade para os carbonatos e minério de ferro. Durante os testes de flotação, foram utilizados reagentes coletores, como o Hidrocol, que resultou em um teor de P_2O_5 de 17,78% e uma recuperação metalúrgica de 66,29%. Além disso, foram observadas características distintas para os reagentes coletores utilizados, como a formação de bolhas pequenas, bem mineralizadas e bem formadas para o Hidrocol, enquanto o óleo A1 resultou em bolhas grandes, mal formadas e pouco mineralizadas.

2.2.1. Circuitos de flotação

Assim como em todas as operações de concentração, a flotação também enfrenta desafios ao buscar alcançar os níveis desejados de teor e recuperação em uma única etapa. De modo geral, inicia-se com uma primeira etapa de flotação, conhecida como *rougher*, na qual se obtém um concentrado de baixa qualidade e um rejeito que ainda mantém teores dos minerais úteis. Esse concentrado é então submetido a uma segunda etapa de flotação, chamada *cleaner*, onde são produzidos um concentrado final e um rejeito com teores elevados.

O rejeito da etapa *rougher* é direcionado para outra flotação subsequente, denominada *scavenger*, onde se obtém um rejeito de baixíssima qualidade (rejeito final) e um concentrado que recupera os minerais úteis que estavam no rejeito da etapa *rougher*, embora ainda não possa ser considerado produto devido à sua baixa qualidade. Tanto o rejeito da etapa *cleaner* quanto o concentrado da etapa *scavenger* ainda contêm minerais úteis e, por essa razão, são reintroduzidos na célula *rougher* (CHAVES *et al.*, 2010). A Figura 3 mostra o esquema do circuito de flotação.

Figura 3: Circuito de Flotação



Fonte: Chaves, 2010.

2.3. Moagem

A moagem é a etapa final do processo de fragmentação, onde se trabalha com partículas de granulometria mais fina, inferiores a 3/4". Nesse estágio, os mecanismos de fragmentação são a abrasão e o arredondamento devido à ruptura das arestas. Esses mecanismos são responsáveis pela alta relação de redução da operação, que pode ultrapassar 100 em moagens finas. O processo

de moagem geralmente ocorre em dois estágios. Primeiro, para granulometrias maiores (entre 3/4" e 3/8"), utilizam-se moinhos de barras em circuito aberto. Em seguida, para granulometrias menores (14# e 28#), são usados moinhos de bolas em circuito fechado (CHAVES e PERES, 2012).

De acordo com Araújo *et al.* (2007), os moinhos possuem um revestimento interno feito de aços especiais, ferros fundidos, borracha ou cerâmica. Esse revestimento tem como funções principais reduzir o desgaste da carcaça, diminuir o escorregamento das cargas moedoras em relação às paredes do equipamento e proporcionar trajetórias às cargas moedoras.

Nos moinhos, a fragmentação das partículas é executada pelos corpos moedores, que, juntamente com o material a ser triturado, ocupam aproximadamente 50% do volume interno do moinho. A cominuição acontece por causa do movimento das cargas, que pode incluir barras cilíndricas, bolas de aço, bolas de ferro fundido ou o próprio minério (ARAUJO *et al.*, 2007).

Segundo Wills (2007), a granulometria do produto moído é influenciada pela maneira como o mineral minério está disperso na ganga e pelo processo de concentração que será aplicado em seguida. A falta de controle no processo de moagem pode levar a dois problemas: submoagem e sobremoagem. Na submoagem, o produto moído permanece grosso, com baixo grau de liberação, o que afeta negativamente a concentração, a recuperação e o fator de enriquecimento. Na sobremoagem, tanto a ganga quanto o mineral minério são liberados, resultando em uma granulometria menor do que a necessária, além de um consumo desnecessário de energia.

A moagem pode ser realizada a seco ou a úmido. A moagem a seco é aplicada quando o mineral, ao entrar em contato com a água, sofre alterações em suas características físicas e químicas. Esse método provoca menos desgaste no revestimento do moinho e nos corpos moedores, além de produzir uma quantidade maior de finos. Por outro lado, a moagem a úmido consome menos energia, elimina a formação de poeira, permite o uso de bombeamento, tubulações e calhas, e possui uma capacidade maior de processamento (WILLS, 2007).

Para o minério fosfatado, a liberação satisfatória da apatita geralmente é alcançada em granulometrias menores que 250 μm . As frações menores que 20 μm , que podem ser geradas durante a moagem ou serem de origem natural, são removidas do circuito por meio de processos conhecidos como deslamagens. Essas determinações da granulometria ideal podem variar dependendo do processo utilizado (PERES *et al.*, 2007).

2.4. Separação Magnética

Para determinar a aplicação da separação magnética no processamento mineral, é necessário analisar a propriedade diferenciadora, ou seja, a susceptibilidade magnética, tanto dos minerais de minério quanto dos minerais contaminantes.

A propriedade que determina como um mineral responde a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa característica, os materiais ou minerais podem ser classificados em duas categorias distintas: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e aqueles que são repelidos por ele. No primeiro grupo estão os minerais ferromagnéticos, que são fortemente atraídos pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos de forma mais fraca. Os minerais que são repelidos pelo campo são conhecidos como diamagnéticos (LUZ *et al.*, 2018).

A Figura 4 apresenta a relação dos principais minerais quanto a sua susceptibilidade magnética, nota-se que a apatita se encontra no grupo 5 de minerais não magnéticos e diamagnéticos. Enquanto a magnetita está no primeiro grupo de minerais ferromagnéticos, que são facilmente magnetizados, logo, a separação magnética desses dois minerais será possível.

Figura 4: Relação dos principais minerais com propriedades magnéticas.

Grupo 1 - Ferromagnéticos - Faixa de Campo de 0,05 a 0,5 T		
Ferro	Magnetita	
Grupo 2 - Magnéticos - Faixa de Campo de 0,5 a 1 T		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3 - Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo de 1 a 1,8 T		
Hematita	Mica	Calcopirita
Siderita	Molibdenita	Molibdenita
Rodonita	Cerargirita	Talco
Limonita	Huebnerita	Titanita
Braunita	Wolframita	Calcocita
Corindon	Bornita	Cinábrio
Pirolusita	Apatita	Gesso
Manganita	Tetrahedrita	Zincita
Calamina	Willemita	Ortoclásio
Esfarelita	Cerussita	Epidoto
Siderita	Dolomita	Fluorita
Rodocrosita	Psilomelana	Augita
Granada	Arsenopirita	Hornblenda
Serpentinita		
Grupo 4 - Muito Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo acima de 1,8 T		
Pirita	Serpentinita	Cobalita
Smithsonita	Nicolita	Safira
Esfalerita	Diopsídio	Cassiterita
Estibinita	Turmalina	Ortoclásio
Criolita	Cuprita	Dolomita
Enargita	Galena	Spinélio
Berílio	Whiterita	Rubi
Magnesita	Crisocola	Covelita
Azurita	Rutilo	Feldspato
Gesso	Mica	Zircão
Malaquita		
Grupo 5 - Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Calcita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	

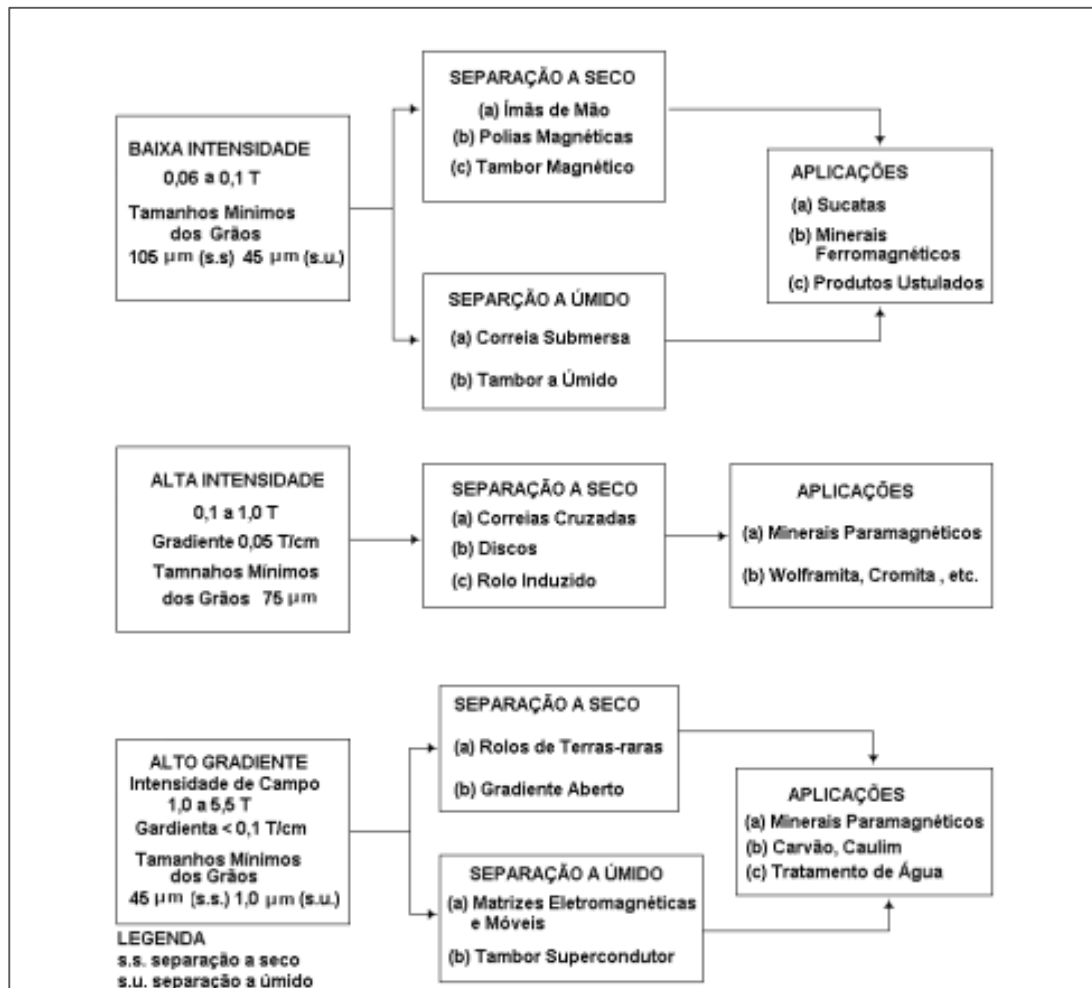
Fonte: Luz *et al.*, 2018.

2.4.1. Equipamentos de separação magnética

Existem diversos tipos de separadores magnéticos que podem ser classificados com base em sua aplicação em dois principais grupos: separadores a seco e a úmido. Além disso, esses separadores podem ser subdivididos de acordo com as características do campo de indução, resultando em separadores de baixa e alta intensidade, que podem ser utilizados tanto na operação a seco quanto na operação a úmido. A Figura 5 mostra um diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos. Dentre os

equipamentos têm-se os separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel (Luz *et al.*, 2018).

Figura 5: Diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.



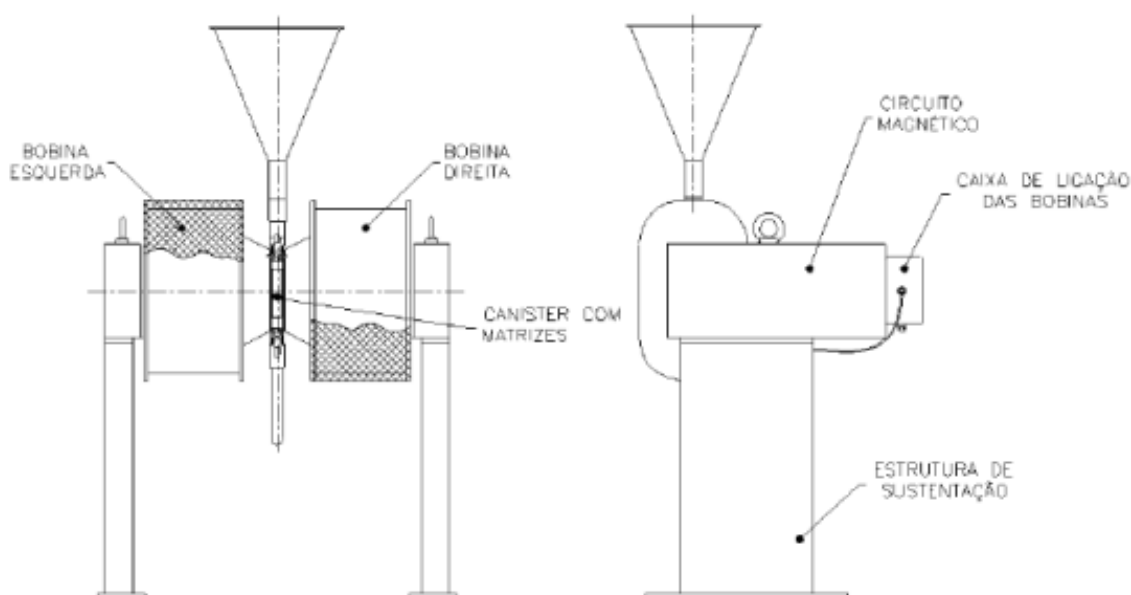
Fonte: Luz *et al.*, 2018.

No grupo de separadores magnéticos a seco, os equipamentos mais comuns incluem ímãs permanentes, correias cruzadas, rolos induzidos e discos. Para a separação magnética a úmido, destacam-se os separadores de tambor de baixa intensidade e os separadores de matrizes. Equipamentos com ímãs de terras-raras (ímã permanente) apresentam diversas vantagens em comparação com os modelos convencionais que utilizam eletroímãs. Em primeiro lugar, não requerem corrente elétrica nem dispositivos de resfriamento. Além disso, os campos magnéticos gerados são estáveis e situam-se acima de 1 Tesla (10.000 Gauss). Esses equipamentos também são compactos, de fácil operação e

consomem muito menos energia em comparação com os equipamentos que utilizam eletroímãs (SAMPAIO *et al.*, 2018).

Na Figura 6 tem-se o separador magnético de carrossel que é utilizado em laboratório, ela ilustra as principais partes do equipamento. As bobinas eletromagnéticas geram um campo magnético de alta intensidade. O circuito magnético, além de servir como estrutura do equipamento, desempenha a função de direcionar o campo magnético produzido pelas bobinas até a área onde o canister é instalado (estrutura que acomoda as matrizes) (INBRAS, 2013).

Figura 6: Esboço do separador magnético de carrossel usado em escala laboratorial.



Fonte: INBRAS (2013)

É importante saber selecionar a matriz, elas têm a função de aumentar o gradiente do campo magnético na região entre os polos onde ocorre a separação magnética. Para selecioná-las leva-se em consideração os seguintes pontos:

- gradiente máximo de campo;
- área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz;
- capacidade de limpeza da matriz (remoção das partículas magnéticas) com rapidez para manter o sistema de fluxo contínuo;

- porosidade da matriz para permitir a vazão da polpa; caso ela tenha um valor muito baixo, é necessária maior pressão para obter a vazão ideal sem obstrução;
- o material usado na fabricação das matrizes deve reter o mínimo de magnetização quando elas são removidas do campo; no caso de a matriz reter quantidade significativa de magnetização, torna-se impossível a remoção das partículas magnetizadas.

Mota (2017) trabalhou com o rejeito de minério de ferro fornecido pela empresa Minerita Minérios Itaúna. O trabalho teve como objetivo utilizar um separador magnético de alta intensidade para aumentar a recuperação de ferro global, por meio da concentração do rejeito da flotação. As variáveis utilizadas no estudo com o separador magnético de alta intensidade incluíram o campo magnético, percentual de sólidos, taxa de alimentação e configuração do equipamento. Por fim, os resultados dos testes realizados com o separador magnético de alta intensidade demonstraram um significativo aumento nas recuperações globais de ferro.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo consiste na metodologia adotada para executar o presente trabalho, que foi dividida em: preparação e caracterização do rejeito, ensaios de separação magnética em baixo e alto campo, e caracterização do concentrado final.

Os ensaios de separação magnética foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Unidade Araxá, enquanto todas as análises foram feitas nas instalações da empresa parceira. No fluxograma da Figura 7 tem-se a sequência das atividades feitas no presente trabalho.

Figura 7 - Fluxograma das etapas do estudo.



Fonte: Próprio autor

3.1 Materiais

Neste estudo, a amostra foi coletada no dia 04/04/2023 do rejeito do processo de beneficiamento do minério fosfático no Complexo de Mineração de Serra do Salitre. Durante um período de duas horas, foram coletados oito incrementos a cada intervalo de 15 minutos.

3.2. Preparação das amostras

Após ser submetida a uma secagem constante a 100 °C em estufa, a amostra foi desagregada e homogeneizada em uma pilha alongada em bancada do tipo Chevron. Esta pilha foi então dividida longitudinalmente em lotes de 500 gramas, sendo metade reservada para testes de separação magnética sem moagem, enquanto a outra metade foi moída a úmido em um moinho de bolas. Durante a moagem, variou-se o tempo entre 3, 10, 15 e 30 minutos, buscando alcançar o retido acumulado de 5% em 150 μm (100 mesh).

A porcentagem de sólidos utilizada foi de 50%, o moinho foi preenchido a um grau de enchimento de 8,98%, e a composição do corpo moedor consistiu em 50% de bolas de 20 mm e 50% de bolas de 10 mm. As Figuras 8 e 9 ilustram o moinho de bolas utilizado na moagem, localizado na mineradora de fosfato.

Figura 8: Moinho usado na cominuição do rejeito fosfático



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 9: Vista interna do moinho empregado na moagem do rejeito *scavenger*.



Fonte: Dados da pesquisa.

Após a conclusão da moagem, o produto moído foi submetido à secagem em uma estufa ajustada a 100 °C. Em seguida, foi desaglomerado e usado um quarteador do tipo Jones, resultando em porções de 100 gramas para serem utilizadas no processo de separação magnética de baixo campo.

3.3. Caracterização da amostra

A amostra de rejeito passou por caracterização granulométrica, química e mineralógica. A caracterização granulométrica foi realizada na empresa por peneiramento a úmido em malhas de 16 mesh (ABNT: 1000 µm) a 500 mesh (ABNT: 25 µm). A análise química e granuloquímica por fluorescência de raios X utilizou o equipamento modelo Axios da PanAnalytical. Já a análise mineralógica foi feita no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, utilizando o microscópio eletrônico de varredura.

3.4. Ensaios de separação magnética

Para os ensaios de separação magnética foram utilizados campos magnéticos de baixa e alta intensidade.

3.4.1. Separação magnética de baixa intensidade

Para fazer a separação magnética de baixo campo (SMBI), foi utilizada uma técnica que consiste repolpar o minério com 10% de sólidos em um béquer,

conforme Figura 10. Utilizando dentro de um saco plástico um ímã de 700 G (Gauss), valor medido por um Gaussmeter.

Figura 10: Separação magnética de baixa intensidade



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- i. Pesou-se a amostra de minério a ser processada;
- ii. Preparou-se a polpa;
- iii. Agitou-se a polpa dentro do béquer;
- iv. Utilizou-se o ímã dentro de um saco plástico para coletar os minerais magnéticos;
- v. Dispensou-se os minerais magnéticos em uma bandeja;
- vi. Os passos iii, iv e v foram repetidos durante 10 a 15 vezes;
- vii. O restante da amostra que ficou no béquer foi colocada em outra bandeja;
- viii. Colocou-se as bandejas na estufa para secagem e posterior pesagem.

Depois de secos, o produto magnético foi levado para análise química e os não magnéticos foram levados para a separação magnética de alta intensidade.

3.4.2. Separação magnética de alta intensidade

A partir dos produtos não magnéticos gerados pela etapa de SMBI, foi realizado um planejamento fatorial 2^3 com ponto central. O fatorial considerou duas variáveis quantitativas sendo elas a porcentagem de sólidos e o volume de água de lavagem, além de uma variável qualitativa, existência ou não de moagem. Os

ensaios de concentração foram realizados com os produtos não magnéticos que vieram dos testes de separação de baixo campo. O campo magnético utilizado foi de 10.430 G. Foram utilizadas amostras de 100 g para a preparação das polpas de alimentação. Utilizou-se nos testes um separador magnético de escala laboratorial, modelo L-4, fabricado pela INBRAS, ilustrado na Figura 11.

O planejamento fatorial realizado utilizando o software Minitab 21, conforme descrito na Tabela 1, abrange testes com dois níveis de percentual de sólidos na polpa de alimentação da separação magnética de alto campo: 20% no nível inferior e 40% no nível superior. Além disso, considera dois volumes de água de lavagem: 250 ml e 500 ml, e uma variável qualitativa que distingue entre o rejeito da flotação moído e não moído (já previamente submetido à separação magnética de baixo campo). Os testes foram conduzidos em ordem aleatória, utilizando aproximadamente 90 gramas de massa por batelada, e o campo magnético foi mantido constante em 10.430 Gauss. Para os pontos centrais, foi calculada a média do volume de água de lavagem (375 ml) e do percentual de sólidos (30%). No total, foram realizados 10 pontos centrais: 5 com material não magnético de baixo campo moído e 5 com material não magnético de baixo campo não moído.

Figura 11: Vista do separador magnético de alto campo.



Fonte: Próprio autor.

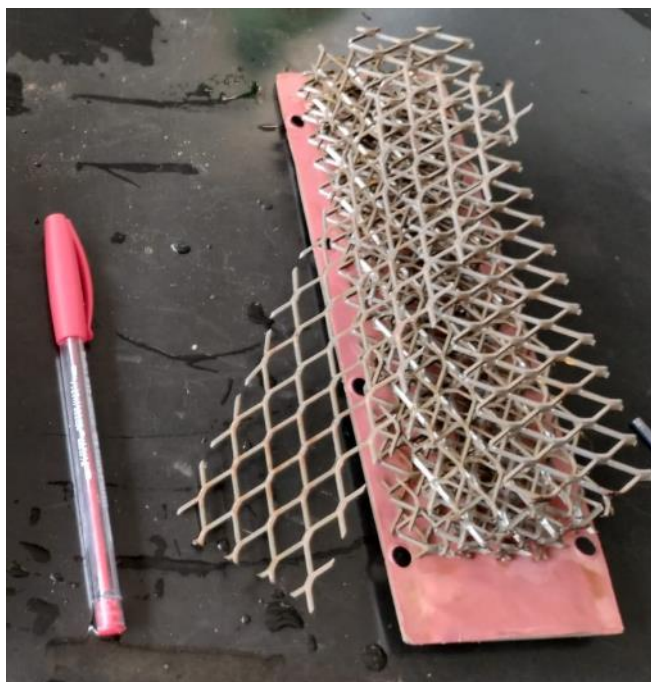
Tabela 1: Planejamento fatorial da separação magnética de alto campo.

Ensaio	Moagem (A)	% sólidos (B)	Água de lavagem (ml) (C)
N1	Sem	30	375
N2	Com	30	375
N3	Com	20	250
N4	Com	30	375
N5	Com	40	500
N6	Com	20	500
N7	Sem	20	250
N8	Sem	40	250
N9	Sem	20	500
N10	Com	40	250
N11	Sem	30	375
N12	Sem	30	375
N13	Com	30	375
N14	Com	30	375
N15	Sem	30	375
N16	Com	30	375
N17	Sem	40	500
N18	Sem	30	375

Fonte: Próprio autor.

A matriz do equipamento foi escolhida de acordo com os testes exploratórios e a granulometria das amostras utilizadas, sendo assim, a matriz 12B mostrada na Figura 12 foi a usada nos testes.

Figura 12: Matriz do equipamento de separação magnética.



Fonte: Próprio Autor

Os ensaios foram realizados de acordo com os seguintes procedimentos:

- i. Pesou-se a amostra de minério a ser processada;
- ii. Preparou-se a polpa;
- iii. Pesou-se a água de lavagem;
- iv. Colocou-se um balde limpo abaixo do duto de descarga do concentrador para coleta do não magnético;
- v. Ligou-se o equipamento e ajustou-se o campo magnético no valor máximo;
- vi. A polpa foi agitada e introduzida lentamente no silo de alimentação;
- vii. Esperou-se até que toda a polpa fosse alimentada e adicionou-se a água de lavagem;
- viii. Retirou-se o balde com o concentrado e colocou-se outro recipiente para a coleta do magnético;
- ix. Desligou-se o campo magnético e com um jato d'água direcionado para as matrizes removeu-se as partículas que ficaram presas, direcionando-as para o recipiente de coleta do concentrado;
- x. Os produtos foram levados para estufa e posteriormente pesados.

Os ensaios de separação magnética foram analisados estatisticamente usando o Gráfico de Cubo no software *Minitab 17 Statistical Software*. Isso foi feito para entender como as variáveis granulometria (A) porcentagem de sólidos na polpa (B) e volume de água de lavagem (C) afetam o processo. No *Minitab*, o gráfico de cubo é utilizado para visualizar as interações entre os três fatores mencionados em um experimento fatorial. Ele é fundamental para avaliar interações de segunda e terceira ordem entre três fatores, além de permitir visualizar como a resposta muda em função de diferentes combinações de níveis desses fatores.

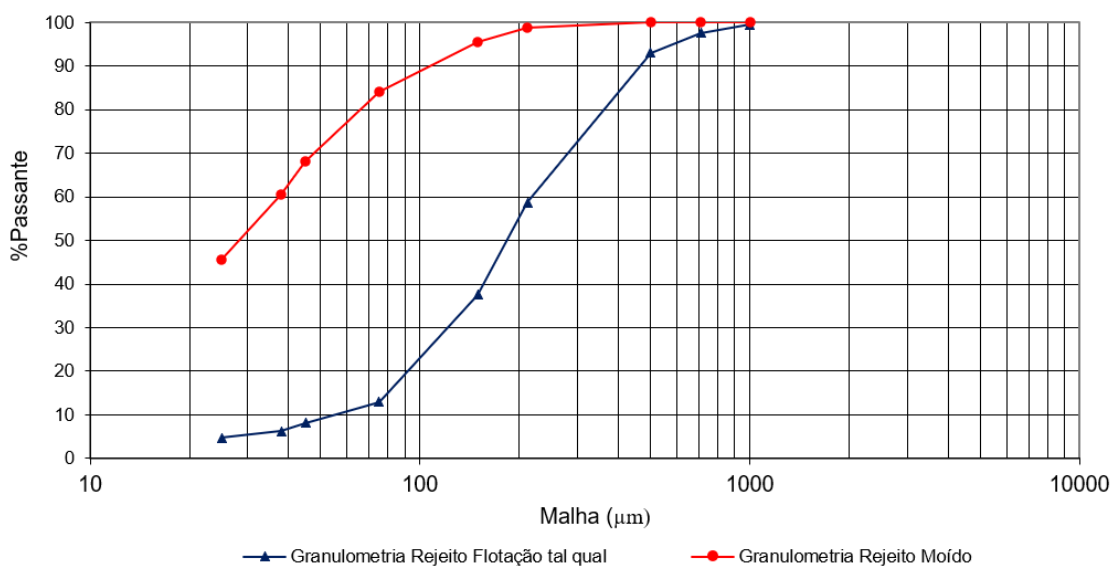
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados detalhadamente os resultados obtidos na caracterização da amostra d do rejeito do processo de beneficiamento do minério fosfático, bem como na separação magnética de alta e baixa intensidade.

4.1. Caracterização da amostra

A Figura 13 representa a distribuição granulométrica das amostras antes e depois de passarem pela moagem. Nota-se que o retido acumulado em 65 mesh (212 μm) é 41% e o total acumulado em 100 mesh (150 μm) é 62%. O passante em 500 mesh (25 μm) é apenas 4,7%. É possível observar a grande diferença de granulometria entre o rejeito moído e não moído, em que a amostra que passou pela moagem possui um d_{80} de 65 μm , enquanto a que não foi moída apresenta um d_{80} de 370 μm .

Figura 13: Distribuição granulométrica do rejeito da flotação scavenger antes e depois da moagem



Fonte: Dados da pesquisa.

As amostras de minério fosfático que serviram de alimentação da separação magnética de baixo campo foram avaliadas quanto à presença e concentração de diferentes elementos químicos, como P_2O_5 , CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , K_2O e TiO_2 de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Teores em porcentagem dos óxidos do rejeito.

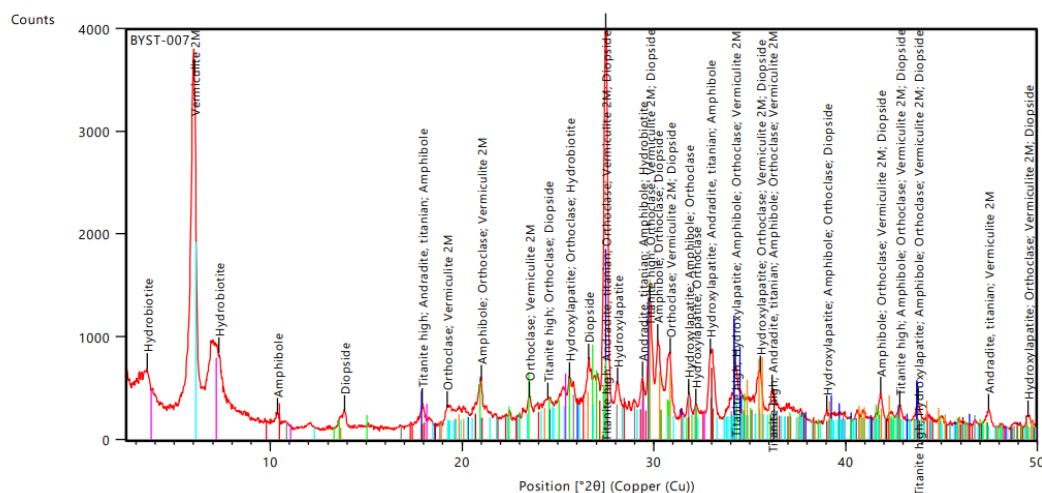
Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	P_2O_5	SiO_2	TiO_2
5,44	12,63	25,49	2,73	8,1	0,25	2,01	31,88	8,1

Fonte: Dados da pesquisa.

As análises químicas mostram que há uma quantidade considerável de ferro e sílica. A escolha da amostra foi feita especificamente para destacar esses elementos em altas concentrações, permitindo avaliar quão eficaz é a etapa de separação magnética de alto campo e baixo campo.

Os principais minerais da amostra foram identificados no difratograma da Figura 14.

Destaca-se a presença dos minerais que possuem maior presença na amostra: Titanita (5,7%), Apatita (3,7%), Mica FeMg (biotita+interestratificada) Diopsídio (12%), Clorita Vermiculita (10%), Feldspato Potássico (9,8%), Filossilicato MgFeAlK (9%), Shoorlomita Andradita (7%), Aegirina Augita (4,1%), Peroviskita (2,3%) e Ilmenita (1,2%). Em relação a caracterização mineralógica da amostra, a Tabela 3, apresenta o resultado detalhado que foi determinado via microscópio eletrônico de varredura.

Figura 14 - Difratograma dos principais minerais da amostra

Fonte: Próprio Autor

Tabela 3: Composição mineralógica da flotação scavenger.

Mineral	% massa
apatita	3,7
aluminofosfatos	<0,1
monazita	<0,1
óxido de Fe	2,1
ilmenita	1,2
anatásio	0,8
goethita	2,2
óxidos de Mn	<0,1
perovskita	2,3
schorlomite-andradita	7,0
titanita	5,7
olivina	0,2
diopsídio	12
aegirina-augita	4,1
anfibólio-MgFeNaCaK	1,1
anfibólio-Na	1,2
hialofano	<0,1
plagioclásio	<0,1
anortoclásio	<0,1
K-feldspato	9,8
quartzo	1,2
mica-Mg (flogopita)	<0,1
mica-FeMg (biotita+interstratíf)	20
muscovita	0,2
filossilicato-Fe (interstratíf)	1,8
filossilicato-MgFeAlK (interstratíf)	9,0
clorita-vermiculita	10
filossilicato-Mg	<0,1
filossilicato-FeMg	0,5
filossilicato-FeMgNaK	0,5
filossilicato-FeMnAl	0,2
serpentina	<0,1
caulinita	0,8
outros filossilicatos	<0,1
gibbsita	<0,1
aglomerados	0,4
calcita	0,1
outros	<0,1

Obs. – mica-FeMg: refere-se à filossilicato de composição química semelhante à biotita e/ou argilominerais interstratificados; clorita-vermiculita: filossilicatos isentos ou com baixo conteúdo de K; aglomerados: partículas compostas predominantemente por grãos finamente intercrescidos de aluminofosfatos, anatásio, oxi-hidróxidos de ferro e filossilicatos; outros: sulfetos, espinélio-Cr, zircão, zirkelita-zirconolita, barita.

Fonte: Dados da pesquisa.

4.2. Testes de SMBI (Separação magnética de baixo campo)

Conforme apresentado no Capítulo 3, primeiramente foram realizados testes de separação magnética de baixo campo. Primeiramente teve-se a ideia de utilizar da separação no material a seco, ou seja, fazendo a distribuição do material e passando o ímã por ele. A ideia foi descartada quando observou-se que a metodologia apresentou seletividade apenas para a amostra não moída, ou seja, quando passou-se o ímã sobre o minério moído, todas as partículas foram coletadas pelo objeto.

Na Figura 15 é possível observar como ficou a amostra magnética da separação via úmida, a cor mais escura representa a grande quantidade de magnetita presente.

Figura 15: Produto magnético da separação de baixo campo



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios para as amostras moídas, os testes foram feitos em bateladas numeradas de 1 a 9. A Massa inicial refere-se a massa de cada batelada. É possível enxergar que a recuperação média do produto magnético foi de 19,33% com um desvio padrão de 1,64. Isso mostra que os testes foram feitos de um método homogêneo e pequena perda mássica, com média de perda igual a 0,96%.

Tabela 4: Recuperação magnética da SMBI para os produtos com moagem.

Ensaio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda (%)	Magnético (%)
Com Moagem 1	100,83	97,26	-3,54	20,52
Com Moagem 2	104,71	103,43	-1,22	21,19
Com Moagem 3	101,32	99,85	-1,45	19,92
Com Moagem 4	101,34	99,56	-1,76	19,69
Com Moagem 5	101,24	100,94	-0,30	18,74
Com Moagem 6	101,49	101,09	-0,39	21,55
Com Moagem 7	101,15	100,75	-0,40	17,75
Com Moagem 8	101,19	101,52	0,33	17,05
Com Moagem 9	101,11	101,22	0,11	17,56
Média	101,69	100,62	-0,96	19,33

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 5 mostra os resultados para as amostras sem moagem. A média da recuperação do produto magnético aumentou em um percentual de 2 (21,44%) em relação ao produto moído, nesta análise o mais viável seria deixar o produto sem moagem colaborando com o fato de que para moer o material requer mais energia e capital.

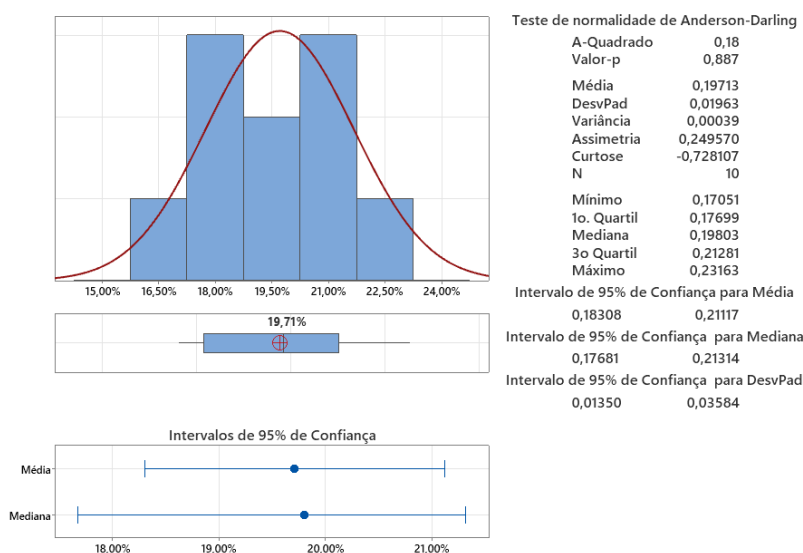
Tabela 5 - Recuperação magnética da SMBI para os produtos sem moagem

Ensaio	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda (%)	Magnético (%)
Sem Moagem 1	101,13	99,83	-1,29	21,07
Sem Moagem 2	101,41	100,8	-0,60	22,09
Sem Moagem 3	100,44	98,07	-2,36	23,52
Sem Moagem 4	101,32	99,4	-1,89	20,77
Sem Moagem 5	101,54	99,65	-1,86	20,77
Sem Moagem 6	100,53	99,07	-1,45	22,54
Sem Moagem 7	102,06	100,64	-1,39	21,75
Sem Moagem 8	102,23	101	-1,20	22,66
Sem Moagem 9	98,99	98,99	0,00	17,78
Média	101,07	99,72	-1,34	21,44

Fonte: Dados da pesquisa

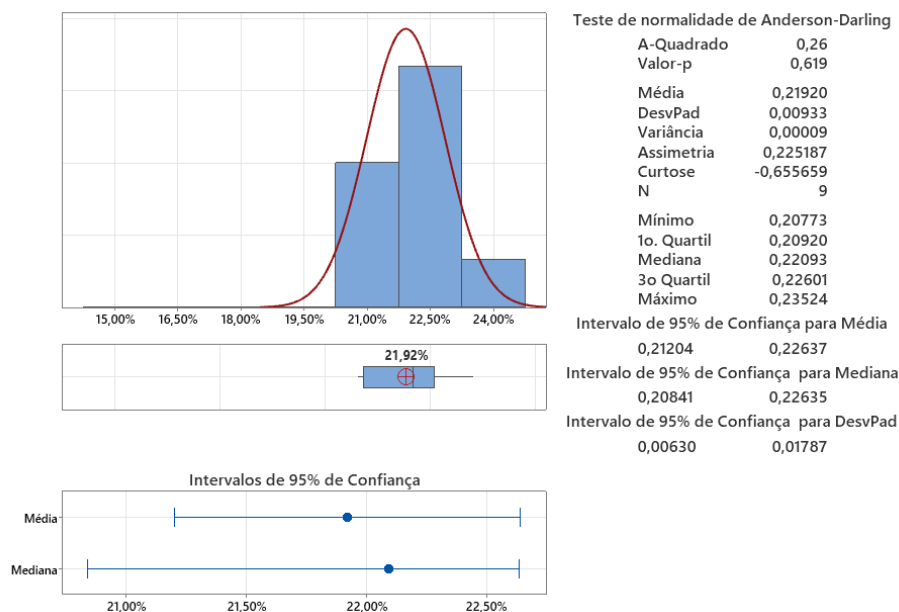
A análise feita no *software* Minitab é apresentada nas Figuras 16 e 17.

Figura 16: Relatório para Recuperação Mássica do produto magnético (Moída via úmida).



Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Relatório para Recuperação Mássica do produto magnético (não moído via úmida).



Fonte: Próprio autor.

A partir das figuras é possível observar a normalidade dos dados a partir do *valor p* maior que 0,05. As médias de recuperação mássica para os produtos úmidos foram mais satisfatórias do que os testes preliminares do produto não moído via seca, que obteve uma média de 15,8%. Essa baixa média para a separação a seco, juntamente com a baixa seletividade e a necessidade de secagem após a flotação corroboraram com a exclusão do método trazem a não viabilidade do método.

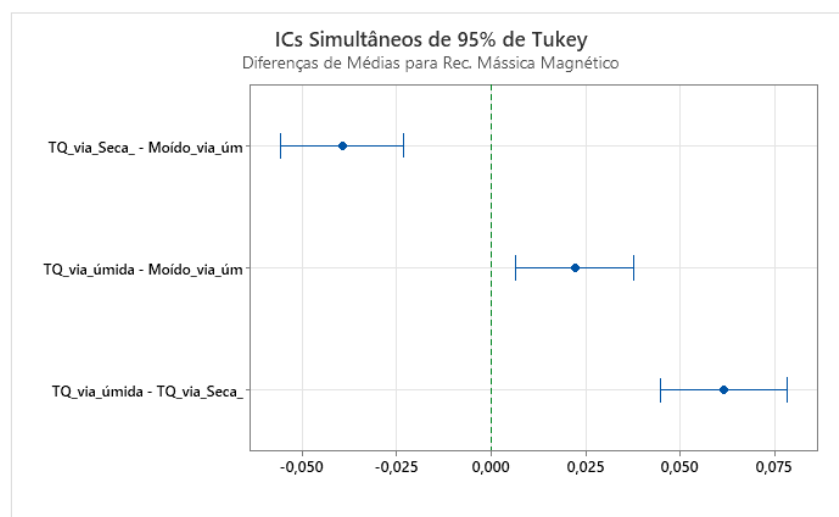
No apêndice A é apresentado o teste estatístico de Análise de Variância (ANOVA) para a recuperação mássica da separação magnética de baixo campo. Observa-se uma diferença numérica entre os valores, mas apenas através do teste estatístico é possível determinar se essa diferença é estatisticamente significativa.

A Figura 18 representa as comparações emparelhadas de Tukey, as informações dadas são de que as médias dos testes realizados são significativamente diferentes entre si já que os segmentos de reta não cruzam a linha pontilhada. Outro fator que mostra as diferenças significativas são as médias, caso fossem estatisticamente iguais, no método de Tukey teriam a mesma letra.

Figura 18: Comparações emparelhadas de Tukey.**Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança**

Condição	N	Média	Agrupamento
TQ_via_úmida_bc	9	0,21920	A
Moido_via_úmida_bc	10	0,19713	B
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	0,15772	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 18, nota-se que, com um nível de significância de 5%, o processo de separação magnética de baixo campo a úmido resulta em uma recuperação maior comparado ao processo a seco, conforme dito anteriormente. Em resumo, o gráfico de comparações emparelhadas de Tukey ajuda a identificar quais grupos são significativamente diferentes entre si em termos de médias, após a realização de testes estatísticos apropriados para confirmar essas diferenças.

Em relação aos teores dos produtos magnéticos, a Tabela 6 apresenta a média da alimentação da separação apresentada anteriormente juntamente com a média dos resultados obtidos dos testes. Todos os resultados das bateladas feitas são apresentados no Apêndice B.

Em relação à alimentação é notável que a porcentagem de Fe_2O_3 quase dobrou seu teor e o restante dos elementos diminuíram seus teores significativamente. Isso comprova o que foi dito por Luz *et al.* (2018), a magnetita possui propriedade ferromagnética e por isso tem uma susceptibilidade magnética maior que de outros minerais. Observa-se também que ainda existe uma porcentagem alta de Fe_2O_3 nas amostras não magnéticas e que pode ainda ser recuperado com a

utilização da próxima etapa que é a separação magnética de alta intensidade. Para aumentar ainda mais o teor de ferro na amostra, sugere-se que o produto magnético produzido passe por uma concentração gravítica na mesa concentradora, devido a sua densidade e à grande quantidade de sílica, a separação dos minerais poderá ser eficaz.

Tabela 6: Média dos teores dos resultados de SMBI

Condição	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Alimentação	5,44	12,63	25,49	2,73	8,1	0,25	2,01	31,88	8,1
Não moído									
Magnético	2,08	10,26	47,04	1,00	3,72	0,46	1,74	17,29	9,90
Não moído									
Não									
Magnético	6,45	13,49	20,18	3,25	9,44	0,20	2,12	36,40	7,75
Moído									
Magnético	3,35	6,82	49,28	1,66	4,61	0,47	1,12	18,38	6,68
Moído									
Não									
Magnético	6,00	14,20	20,16	3,00	9,03	0,20	2,25	35,50	8,54

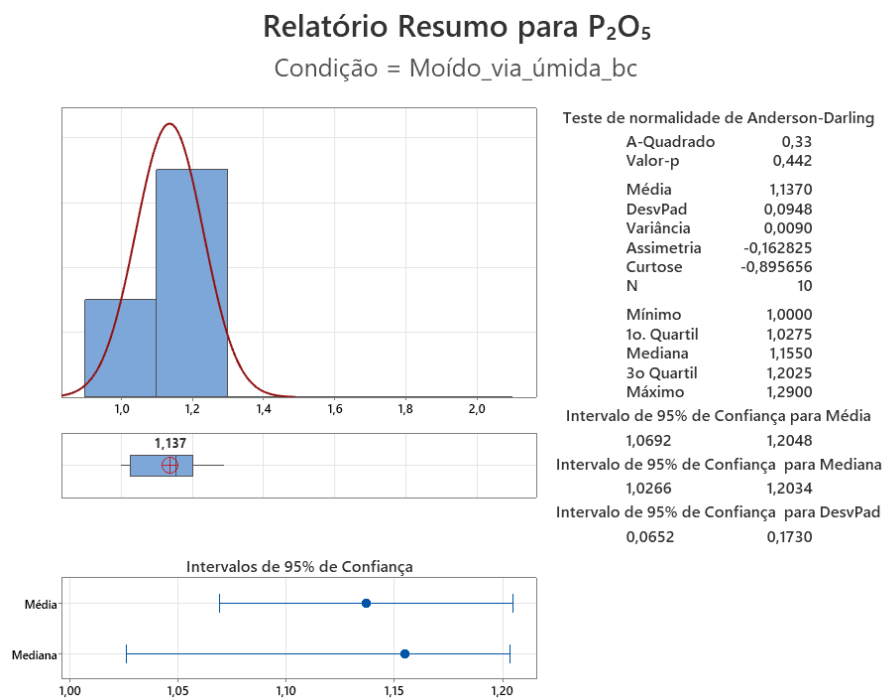
Para as amostras não magnéticas é importante observar o teor de P₂O₅ que aumentou de 0,11 a 0,24%. Com esse teor é possível retornar este material na alimentação da usina a fim de fazer um circuito fechado e diminuir geração de rejeito.

Ainda na Tabela 6 observa-se a maior recuperação de Fe₂O₃ em 2% para as amostras moídas magnéticas, assim como teores menores para P₂O₅ e TiO₂. Isso mostra que em faixas granulométricas menores a separação dos minerais é maior.

A comparação entre as amostras não magnéticas na Tabela 6 avalia a diferença entre os teores obtidos pelos testes com e sem moagem. Nas amostras magnéticas os teores de P₂O₅ e TiO₂ das operações sem moagem foram maiores, portanto, na fração não magnética os teores desses mesmos elementos foram menores e o contrário aconteceu com o teor de Fe₂O₃.

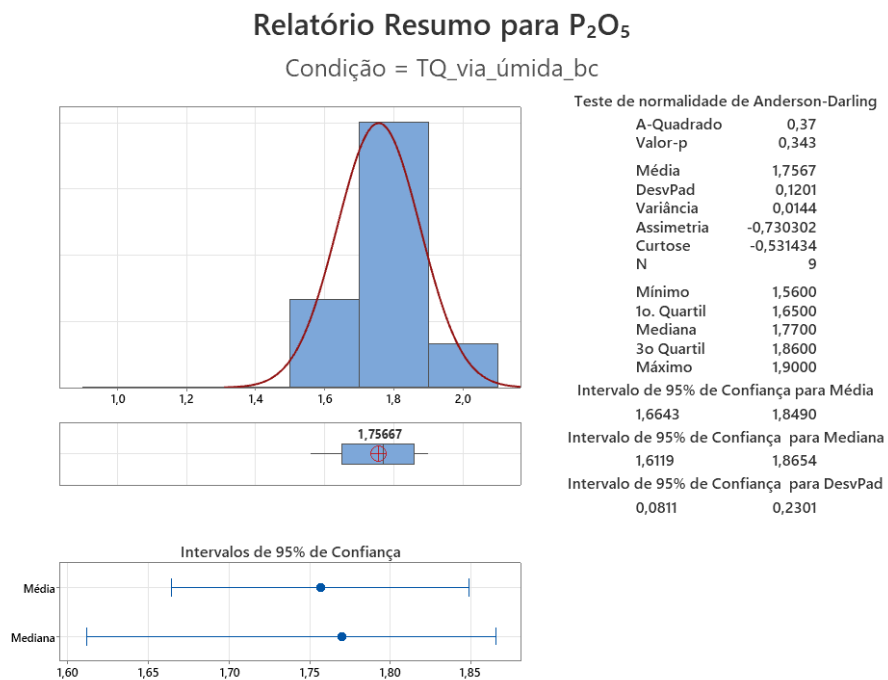
A análise estatística para o teor de P_2O_5 do produto magnético dos três métodos utilizados está apresentada nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Relatório para o teor de P_2O_5 do produto magnético (*Moída via úmida*)



Fonte: Próprio autor.

Figura 20: Relatório para o teor de P_2O_5 do produto magnético (*não moído via úmida*).



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 19 e 20 também comprovam a normalidade dos dados a partir do valor p sendo maior que 0,05. O teor de P_2O_5 se mostrou menor no teste de SMBI com o material moído em via úmida.

Na Figura 21, são exibidos os resultados do teste estatístico de ANOVA (Análise de Variância) para os teores de P_2O_5 no magnético de baixo campo. Observa-se que, além das variações numéricas, a análise confirma que os resultados possuem uma diferença estatisticamente significativa. Para verificar a relevância estatística é necessário um teste estatístico.

Figura 21: Teste estatístico ANOVA para o teor de P_2O_5 obtido no magnético de baixo campo.

ANOVA com um fator: P_2O_5 versus Condição

Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Condição	3	Moído_via_úmida_bc; TQ_via_Seca_baixo_Campo; TQ_via_úmida_bc

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Condição	2	1,8265	0,91325	78,45	0,000
Erro	24	0,2794	0,01164		
Total	26	2,1059			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,107896	86,73%	85,63%	83,17%

Fonte: Próprio Autor

4.3. Separação Magnética de Alto Campo (SMAI)

Todos os produtos não magnéticos gerados na etapa anterior foram levados para os testes de separação magnética de alta intensidade, a Tabela 7 demonstra os resultados de recuperação de massa magnética.

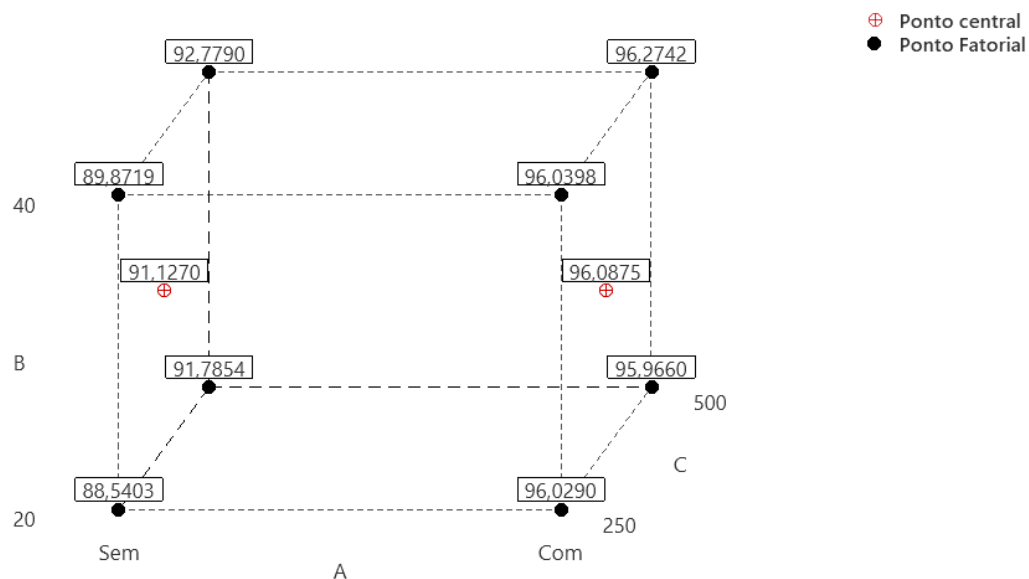
Tabela 7: Resultados Teste fatorial da separação magnética de alto campo .

Ensaio	Moagem	% sólidos	Água de lavagem (ml)	Magnético (%)
N1	Sem	30	375	13,50
N2	Com	30	375	6,67
N3	Com	20	250	5,53
N4	Com	30	375	6,07
N5	Com	40	500	4,85
N6	Com	20	500	5,00
N7	Sem	20	250	18,41
N8	Sem	40	250	12,08
N9	Sem	20	500	14,44
N10	Com	40	250	7,16
N11	Sem	30	375	20,13
N12	Sem	30	375	11,46
N13	Com	30	375	6,14
N14	Com	30	375	5,27
N15	Sem	30	375	21,43
N16	Com	30	375	4,78
N17	Sem	40	500	10,88
N18	Sem	30	375	14,28

Fonte: Próprio autor.

Todos os ensaios anteriores foram feitos a partir de um planejamento fatorial de três fatores (porcentagem de sólidos, com ou sem moagem e água de lavagem) que é observado a partir da Tabela 7, com o auxílio do *software MiniTab* foi possível obter uma análise estatística dos melhores resultados.

A Figura 22 mostra uma análise feita pelo software que é um gráfico de cubo, a partir deste é indicado que a melhor recuperação mássica foi com o minério moído, 30% de sólidos e 375 ml de água de lavagem.

Figura 22: Gráfico de cubo para recuperação do produto não magnético.

Fonte: Próprio autor.

No *Minitab*, a contribuição na análise de variância indica a proporção de variação total em uma variável de resposta que é explicada por cada fator ou interação entre fatores incluídos no modelo. Essa contribuição é expressa como uma porcentagem e fornece uma medida da importância relativa de cada fator ou interação no modelo estatístico. Geralmente, quanto maior a contribuição de um fator ou interação, mais influência ele tem na variabilidade da variável de resposta.

A Tabela 8 reflete a contribuição da variável A (com ou sem moagem) de 85,78% em cima da recuperação mássica, logo, é o parâmetro mais importante dessa análise. O Fator C (volume de água de lavagem) também apresentou 3,63% de variabilidade dos resultados de recuperação mássica. Por último, o Fator B (% de sólidos) foi o parâmetro com menor contribuição dos três analisados por isso não apareceu nas análises. Isso acontece porque o campo magnético em uma separação de alto campo é projetado para atrair partículas magnetizáveis. No entanto, a eficiência desse processo depende mais das características das partículas (como tamanho e superfície exposta) e da remoção de partículas indesejadas (por meio da água de lavagem) do que da concentração de sólidos em si. A moagem, por exemplo, aumenta a eficácia da separação ao criar mais

partículas de tamanho ideal, enquanto a água de lavagem assegura que as partículas estejam livres para serem separadas.

Tabela 8: Análise de variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	127,715	92,65%	127,715	42,572	58,83	0,000
Linear	2	123,243	89,41%	123,243	61,622	85,16	0,000
A	1	118,245	85,78%	118,245	118,245	163,41	0,000
C	1	4,999	3,63%	4,999	4,999	6,91	0,020
Interações de 2 fatores	1	4,471	3,24%	4,471	4,471	6,18	0,026
A*C	1	4,471	3,24%	4,471	4,471	6,18	0,026
Erro	14	10,131	7,35%	10,131	0,724		
Curvatura	1	0,172	0,12%	0,172	0,172	0,22	0,644
Falta de ajuste	5	1,582	1,15%	1,582	0,316	0,30	0,898
Erro Puro	8	8,377	6,08%	8,377	1,047		
Total	17	137,845	100,00%				

Fonte: Próprio autor.

Outros gráficos importantes que demonstram os efeitos mais significativos que afetam a variabilidade da resposta é o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados e o Gráfico Half Normal dos Efeitos padronizados, sendo assim, as Figuras 23 e 24 avaliam essa parametrização. É importante ressaltar que o fator C (volume de água de lavagem) também teve importância nessa análise, apesar de menor que o fator A.

Figura 23: Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados

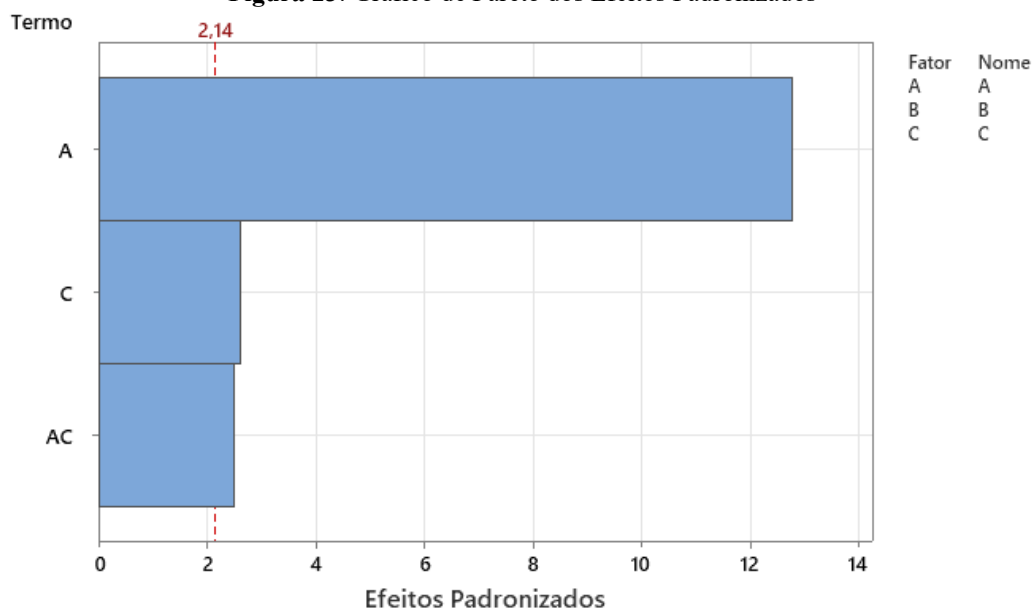
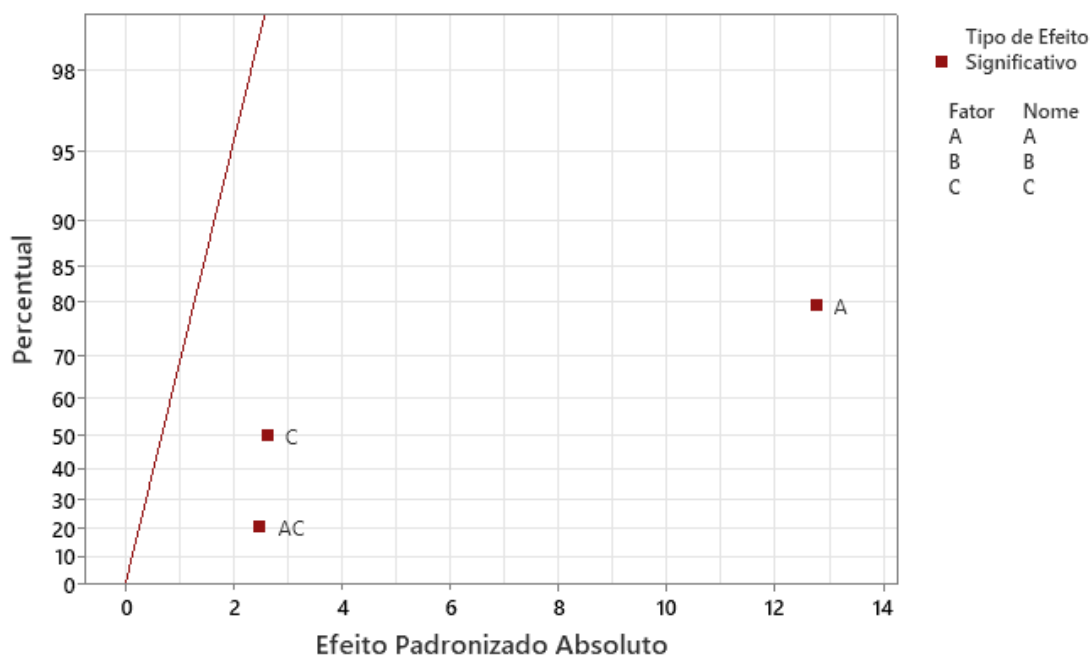


Figura 24: Gráfico Half Normal dos efeitos padronizados

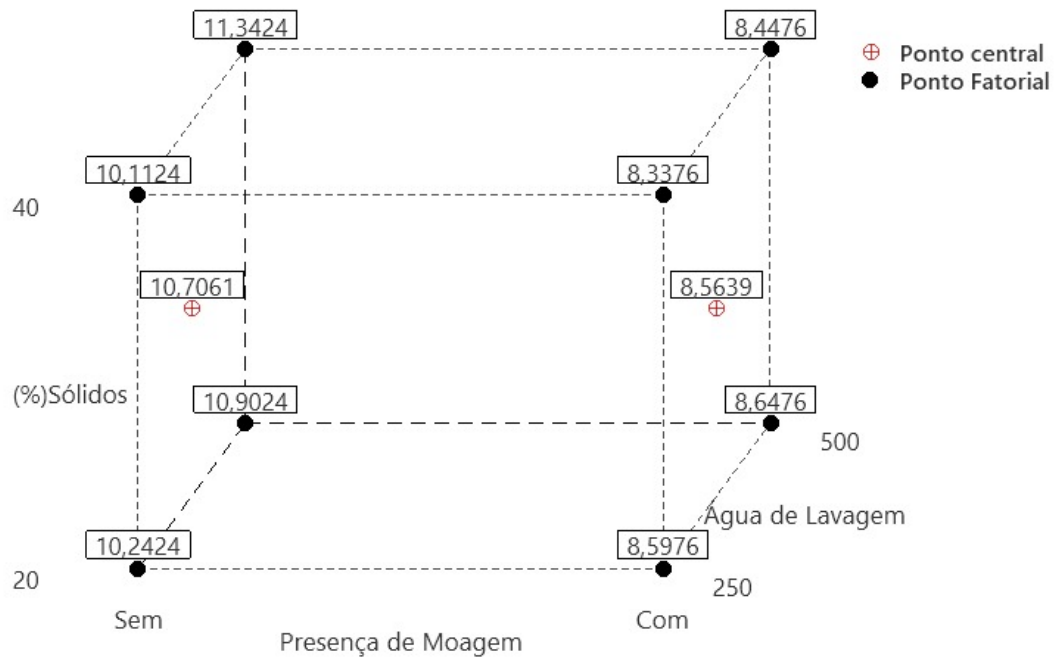


Fonte: Próprio autor.

As Figuras 23 e 24 corroboram com a afirmação da Tabela 10 de que a variável com ou sem moagem é a mais importante das que foram utilizadas.

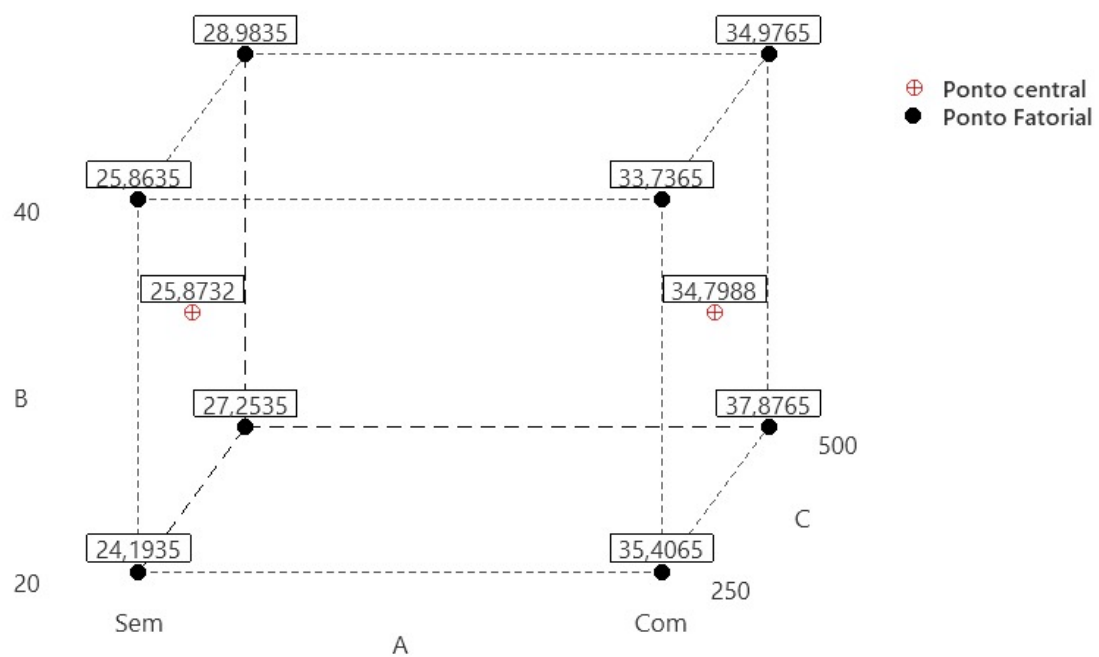
A Figura 25 mostra como a recuperação de TiO_2 na amostra magnética se comporta com a mudanças das variáveis. Sua maior recuperação se dá com 40% de sólidos, 500 ml de água com as amostras não moídas, já a menor aconteceu na fração 40% de sólidos, 250 ml de água e moída. Assim, a separação magnética de alto campo também comprova que a realização de moagem não é necessária para a concentração dos minerais provenientes da flotação *scavenger*. O aumento do teor de titanita foi significativo visto que a alimentação tinha uma média de 7,75%.

Para uma maior concentração de titânio sugere-se levar o produto magnético para uma flotação a fim de concentrar ainda mais a amostra com titanita.

Figura 25: Gráfico de Cubo para o teor de TiO_2 

Fonte: Próprio Autor

Para a Figura 26 a recuperação de Fe_2O_3 foi analisada no gráfico de 3 variáveis.

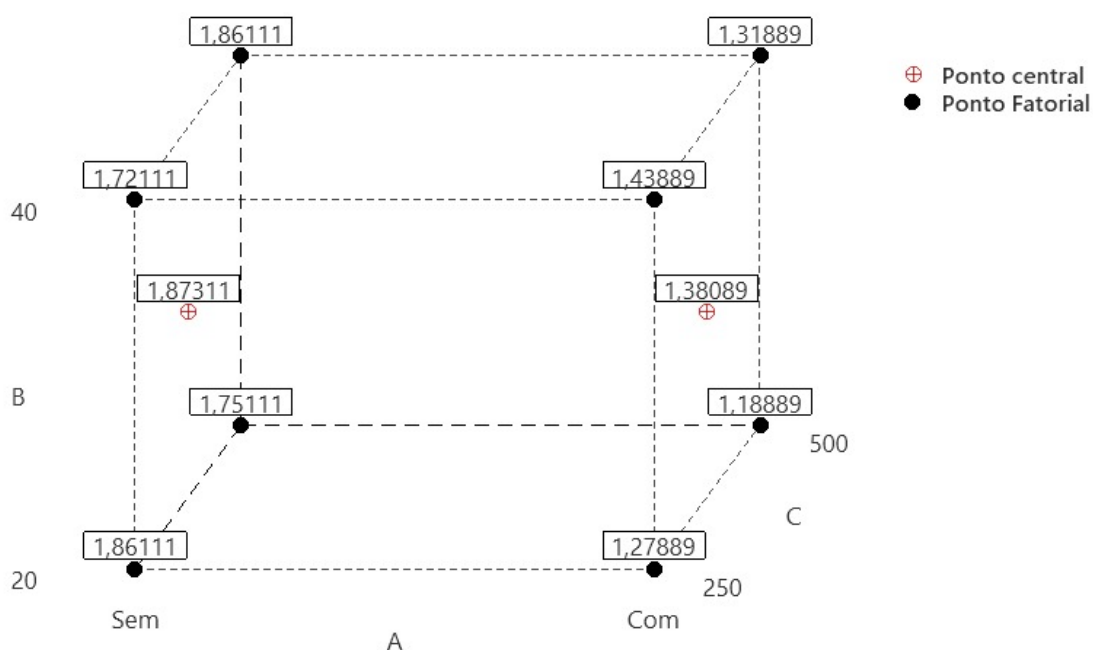
Figura 26: Gráfico de Cubo para o teor de Fe_2O_3 

Fonte: Próprio Autor

A maior recuperação de Fe_2O_3 foi com 500 ml de água, 20% de sólidos com moagem e a menor recuperação foi com 20% de sólidos, 250 ml de água e sem moagem. Em relação a alimentação houve um enriquecimento de ferro em torno de 10 a 15%. Apesar do alto enriquecimento, a SMAI causa um grande custo energético, o que não compensaria pela dificuldade de conhecimento de aplicação da magnetita com este teor.

A Figura 27 mostra o Gráfico de Cubos da recuperação de P_2O_5 em relação às variáveis utilizadas.

Figura 27: Gráfico de Cubo para o teor de P_2O_5



Observa-se a maior recuperação no ponto central sem moagem e altos teores também para 20% de sólidos, sem moagem e com 250 ml assim como o mesmo valor para 40% de sólidos, sem moagem e com 500 ml de água. O menor valor de recuperação de P_2O_5 foi com 20% de sólidos, 500 ml de água e com moagem.

Apesar de algumas recuperações altas na separação magnética de alto campo, devido a seu custo energético, suas recuperações não foram satisfatórias quanto a separação magnética de baixo campo em que se encontrou algumas rotas ou aplicações para as amostras encontradas.

5. CONCLUSÕES

As duas separações magnéticas utilizadas no trabalho resultaram em um enriquecimento das amostras do rejeito da flotação *scavenger*. Para a avaliação de amostras moídas e não moídas, apesar de que a recuperação das amostras moídas terem sido ligeiramente maiores não foi compensatório em relação aos custos de energia de moagem que são muito elevados.

Os teores de P_2O_5 tiveram bons resultados nas amostras não magnéticas da SMBI de até 2,25%, revelando uma rota para retornar à alimentação da usina com um intuito de realizar um circuito fechado. Com esse circuito, a diminuição de rejeitos gerados pela mineração seria maior.

Para o Fe_2O_3 houve um enriquecimento de mais de 20% em relação à alimentação da SMBI. É possível testar uma rota para levar este produto para a separação gravítica, a fim de concentrar mais a magnetita.

Em relação à separação magnética de alto campo, apesar de ter concentrado mais o ferro, observou-se que os resultados não foram satisfatórios para encontrar rota ou aplicação para o teor encontrado. Para o óxido de titânio, sugere-se avaliar uma rota de flotação para o concentrado magnético a fim de avaliar os teores que serão encontrados de titânio.

REFERÊNCIAS

AMARAL, A. J. R **Principais Depósitos Minerais do Brasil** – Cap. 1 – Geologia do Fosfato – p. 3-15), DNPM, 2005.

ARAUJO, A.C.; GALERY, R.; VALADÃO, G.E.S.; VIANA, P.R.M. Fragmentação. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.5. p.85-103.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. **Flotação**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Ed(s)). **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 465-513 p.

CHAVES, A.P; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**. São Paulo. Oficina do texto, 2012. v.3.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, DNPM. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF: DNPM, 2009.

BORGES, C. B. **Concentração de minério de ferro proveniente do depósito Jambreiro da região de Guanhanes-mg via métodos gravíticos e magnéticos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educações Tecnológicas de Minas Gerais, 2015.

FERREIRA, D.H.O. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. 50p. (Monografia, Pós-Graduação, Engenharia de Recursos Minerais).

GUIMARÃES, R. C.; PERES, A. E. C. **Experiencia brasileira de produção de concentrado fosfático a partir de lamas: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA**. 19, Recife, 2002.

INBRAS. **Separador Eletromagnético modelo L-4: Manual de Instrução, Operação e Manutenção**. Diadema - SP, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Startups apresentam soluções no Demoday do Desafio MinerALL.** Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/startups-apresentam-solucoes-no-demoday-do-desafio-minerall/>. Acesso em: 29 ago. 2024.

KAWATRA, S.K.; CARLSON, J.T. **Beneficiation of Phosphate Ore.** Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Incorporated, 2014.

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

JONES, H; BOGER, D. V. **Sustainability and waste management in the resource industries.** Ind. Eng. Chem. Res., 51 (2012), pp. 10057–10065

MOTA, L. F. **Recuperação de rejeito de minério de ferro através da concentração magnética visando a obtenção de Pellet Feed.** Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educações Tecnológicas de Minas Gerais, 2017.

PERES, A. E. C.; VIANAP. R. M.; OLIVEIRA J. F. **Flotação de minérios de ferro.** In: CHAVES, A. P. (Ed.) Teoria e Prática do Tratamento de Minérios volume 4, 1^a edição: A Flotação no Brasil. Signus Editora, São Paulo, p. 317-330, 2006.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A.C.; EL-SHALL, H.; ZHANG, P.; ABDEL-KHALEK, N. A., Part 5- **Plant Practice: Nonsulfite Minerals.** In: FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G.; YOON, R. H., **FROTH FLOTATION: A Century of Innovation.** Ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Colorado, USA, 2007. p.845-857.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. **Separação magnética e eletrostática. In: Tratamento de minérios.** 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018, cap. 9, p. 365- 395.

SANTOS, A. M. **Avaliação de reagentes na flotação direta de minério fosfático, utilizando planejamento fatorial completo.** Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Unidade Araxá. 2021.

SIMÕES, F. F. **Avaliação da concentração de apatita utilizando etapas de flotação e separação magnética de alto campo.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2023.

TESTA, F.G. 2008. 98f. **Avanço na flotação de finos de minérios com condicionamento de alta intensidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

VERAS, M. M. – **Influência do tipo de espumante nas características de espuma produzida na flotação** - Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral-PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, 2010

WILLS, B. A. - **Minerals processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** Queensland: Pergamon Press, 2007. 7th ed. Oxford: Elsevier.

WILLS, B.; FINCH, J. A. **Will's Mineral Processing Technology:** an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8th Edition, Elsevier, 2016.

APÊNDICE A – Testes da SMBI

Figura 28: Teste de hipótese para avaliação da diferença de Recuperação mássica de magnético.

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
 Hipótese alternativa Nem todas as médias são iguais
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Condição	3	Moído_via_úmida_bc; TQ_via_Seca_baixo_Campo; TQ_via_úmida_bc

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Condição	2	0,016309	0,008155	43,27	0,000
Erro	24	0,004523	0,000188		
Total	26	0,020832			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0137281	78,29%	76,48%	72,97%

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE B – Testes da SMBI

Tabela I – Teores das amostras magnéticas moídas

Ensaio	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Com Moagem 1	3,50	7,17	46,73	1,74	4,97	0,46	1,12	19,44	6,88
Com Moagem 2	3,65	7,36	46,36	1,79	5	0,45	1,21	19,95	6,85
Com Moagem 3	3,48	7,02	47,58	1,73	4,76	0,46	1,14	19,1	6,76
Com Moagem 4	3,37	6,99	48,95	1,66	4,54	0,47	1,19	18,55	6,71
Com Moagem 5	3,34	6,74	50,32	1,61	4,49	0,48	1,17	18,00	6,66
Com Moagem 6	3,70	7,42	45,10	1,85	5,04	0,45	1,20	20,35	6,87
Com Moagem 7	3,08	6,26	52,23	1,53	4,25	0,49	1,02	16,83	6,47
Com Moagem 8	3,05	6,12	53,46	1,50	4,27	0,50	1,00	16,54	6,39
Com Moagem 9	3,02	6,31	52,75	1,50	4,18	0,50	1,03	16,62	6,53
Média	3,35	6,82	49,28	1,66	4,61	0,47	1,12	18,38	6,68

Tabela II - Teores das amostras não magnéticas moídas.

Ensaio	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Com Moagem 1	6,19	14,62	21,18	3,11	9,28	0,21	2,33	36,56	8,79
Com Moagem 2	6,01	14,25	20,28	3,03	9,06	0,20	2,26	35,59	8,56
Com Moagem 3	6,03	14,26	20,46	3,03	9,08	0,20	2,26	35,65	8,58
Com Moagem 4	6,07	14,29	20,31	3,05	9,15	0,20	2,26	35,86	8,62
Com Moagem 5	5,94	14,03	19,86	3,00	8,96	0,20	2,21	35,20	8,46
Com Moagem 6	5,95	14,12	20,23	2,99	8,98	0,20	2,24	35,21	8,48
Com Moagem 7	5,98	14,07	19,84	3,00	8,97	0,20	2,23	35,28	8,49
Com Moagem 8	5,91	13,92	19,64	2,97	8,86	0,20	2,21	34,91	8,42
Com Moagem 9	5,95	13,96	19,65	2,99	8,92	0,20	2,22	35,09	8,42
Média	6,00	14,20	20,16	3,00	9,03	0,20	2,25	35,50	8,54

Tabela III - Teores das amostras magnéticas não moídas

Ensaio	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Sem Moagem									
1	1,84	10,50	45,57	0,88	3,47	0,47	1,58	16,62	10,27
Sem Moagem									
2	2,06	9,76	46,11	0,95	3,69	0,47	1,56	17,01	9,66
Sem Moagem									
3	2,35	10,74	42,82	1,18	3,97	0,45	1,9	18,67	9,96
Sem Moagem									
4	1,82	10,4	46,58	0,85	3,45	0,48	1,76	16,25	10,27
Sem Moagem									
5	1,76	10,78	45,54	0,82	3,5	0,47	1,8	16,35	10,43
Sem Moagem									
6	2,43	10,2	43,86	1,21	3,99	0,46	1,77	18,62	9,68
Sem Moagem									
7	2,19	10,11	45,54	1,05	3,72	0,47	1,85	17,54	9,61
Sem Moagem									
8	2,35	10,59	42,85	1,19	3,87	0,45	1,87	18,64	9,81
Sem Moagem									
9	1,91	9,25	64,49	0,9	3,84	0,43	1,58	15,94	9,41
Média	2,08	10,26	47,04	1,00	3,72	0,46	1,74	17,29	9,90

Tabela IV - Teores das amostras não magnéticas não moídas

Ensaio	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Sem Moagem									
1	6,49	13,41	20,55	3,27	9,47	0,20	2,16	36,48	7,65
Sem Moagem									
2	6,44	13,54	19,84	3,26	9,41	0,19	2,15	36,34	7,72
Sem Moagem									
3	6,56	13,61	20,96	3,29	9,63	0,20	2,11	36,95	7,78
Sem Moagem									
4	6,52	13,52	20,58	3,29	9,52	0,20	2,12	36,76	7,73
Sem Moagem									
5	6,54	13,42	20,84	3,30	9,50	0,20	2,11	36,72	7,68
Sem Moagem									
6	6,42	13,58	20,63	3,22	9,45	0,19	2,12	36,34	7,79
Sem Moagem									
7	6,44	13,56	20,38	3,25	9,46	0,19	2,09	36,44	7,83
Sem Moagem									
8	6,43	13,43	20,80	3,22	9,47	0,20	2,08	36,26	7,73
Sem Moagem									
9	6,20	13,36	17,06	3,13	9,02	0,21	2,10	35,33	7,82
Média	6,45	13,49	20,18	3,25	9,44	0,20	2,12	36,40	7,75