



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE MINAS

SANTIAGO HENRIQUE CRUZ

DESENVOLVIMENTO DE COPRODUTOS A PARTIR DO REJEITO *SCAVENGER*
DA FLOTAÇÃO DE APATITA DE SERRA DO SALITRE -MG

Araxá/MG

2025

SANTIAGO HENRIQUE CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE COPRODUTOS A PARTIR DO REJEITO *SCAVENGER*
DA FLOTAÇÃO DE APATITA DE SERRA DO SALITRE-MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica, como requisito à obtenção do título de Mestre.

Mês/ano de ingresso: 03/2023

Área de concentração: Engenharia de Minas

Linha de Pesquisa: Processamento de minérios e rejeitos

Orientadora: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

APROVADA: 27 de fevereiro de 2025

Santiago Henrique Cruz

Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Araxá/MG

2025

**ATA DA 48ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS –
MESTRADO PROFISSIONAL**

Aos 27 (vinte e sete) dias do mês de fevereiro do ano de 2025 (dois mil e vinte cinco), às 19h21min (dezenove horas e vinte e um minutos), através da Plataforma Microsoft TEAMS, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando Santiago Henrique Cruz, *sob a forma parcialmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pela Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira (Presidente) – CEFET- MG, Prof.Dr. Natal Junio Pires (Membro Interno) - CEFET-MG, Me. Fabiano Nunes Capponi (Membro externo) – CBMM e Prof_Dr. Luciano Fernandes de Magalhães – UFMG. Dando início aos trabalhos a Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando Santiago Henrique Cruz, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado “*Desenvolvimento de Coprodutos a Partir do Rejeito Scavenger da Flotação De Apatita de Serra Do Salitre –MG*”, na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Processamento de Minério e Rejeitos*. Terminada a exposição, a Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, a Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi aprovado, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 27 de fevereiro de 2025

Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira
Presidente (CEFET-MG)

Prof. Dr. Natal Junio Pires
Membro interno (CEFET-MG)

Engª Me. Fabiano Nunes Capponi
Membro externo (CBMM)

Prof_Dr. Luciano Fernandes de Magalhães
Membro externo (UFMG)

Engº Santiago Henrique Cruz
Discente

Cruz, Santiago Henrique.
C957d Desenvolvimento de coprodutos a partir do rejeito scavenger da flotação de apatita de Serra do Salitre -MG / Santiago Henrique Cruz. – 2025.
 143 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2025.

Bibliografia.

1. Beneficiamento de minérios – Teses. 2. Rejeitos – Aproveitamento – Teses. 3. Flotação – Teses. 4. Fosfato – Teses. I. Oliveira, Michelly dos Santos. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 622.7

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus Araxá* – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

O SENHOR firma os passos de um homem quando a conduta deste o agrada; ainda que tropece, não cairá, pois o SENHOR o toma pela mão.

Salmo 37:23-24

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por Sua presença constante em minha vida, guiando meus passos, protegendo-me, direcionando-me e corrigindo-me quando necessário. Nos momentos de incerteza e angústia, sua força e sabedoria sempre estiveram comigo, renovando minha fé e me dando coragem para seguir em frente.

Agradeço a minha orientadora Professora Dra. Michelly dos Santos Oliveira pelos ensinamentos transmitidos nas disciplinas e o tempo dedicado nas orientações e discussões que melhoraram este trabalho e me tornaram um profissional melhor.

Agradeço ao Professor Dr. Natal Junio Pires pela orientação nos planejamentos fatoriais, pelas recomendações de correções passadas na participação na banca de qualificação e por todo o conhecimento de estatística e planejamento fatorial compartilhado na disciplina de Estatística, Planejamento e Análise de Experimentos.

Agradeço ao Professor Dr. Luciano Fernandes de Magalhães pela participação na banca de defesa deste trabalho e pelas recomendações de correção e melhorias deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro M.Sc. Fabiano Nunes Capponi pela participação nas bancas de qualificação e de defesa e pelas recomendações de correção e melhorias deste trabalho.

Agradeço a equipe da planta piloto da Eurochem Serra do Salitre, Diego Rocha, Marcos Melo, Rafael Jhonatan, Victor Angelo, Viviane Araújo, e Wesley Cruz pela realização dos testes de flotação, pelos momentos de conquistas e alegrias que partilhamos e acima de tudo pela amizade que construímos ao longo destes últimos 5 anos juntos na planta piloto.

Agradeço ao gerente de produção Vagner da Costa Freitas pelo apoio e confiança na realização deste trabalho.

Agradeço aos técnicos de laboratório do CEFET-MG, Kelly de Souza Pires e Ricardo Jerônimo Ventura pelo suporte na realização dos testes de separação magnética de baixo, alto campo, mesa oscilatória e acima de tudo pela amizade que construímos.

Agradeço a todos os professores do CEFET-MG – campus Araxá – pelo valioso conhecimento compartilhado ao longo da minha trajetória, desde o ensino médio, entre os anos de 2003 e 2006, até o presente momento, com a realização deste mestrado em Engenharia de Minas.

Agradeço, com todo o meu carinho, à minha amada esposa, Priscilla Borges, e à minha filha, Rebeca Borges, pelo suporte incondicional, companheirismo e compreensão ao longo de toda

a jornada deste mestrado. Estendo minha gratidão aos meus pais, irmãos, sogro e sogra, que sempre acreditaram em mim e torceram pelo meu sucesso. Agradeço, ainda, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Devido ao elevado custo de produção do fosfato brasileiro em comparação ao importado, torna-se essencial que as empresas deste setor busquem estratégias para aumentar a receita e agregar valor ao negócio. Uma alternativa promissora é o desenvolvimento de coprodutos, que não apenas ampliam o portfólio comercial, mas também contribuem para a redução da massa de rejeitos gerada no processo produtivo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de rotas para a produção de coprodutos a partir do rejeito de flotação da etapa *scavenger* de uma mina de fosfato localizada no município de Serra do Salitre (MG). O objetivo principal foi avaliar a melhor rota para a obtenção de um concentrado com baixo teor de P_2O_5 (alvo de 24%). Para isso, foram realizados experimentos fatoriais com três rotas distintas: (1) flotação direta do rejeito *scavenger* tal qual gerado no processo; (2) flotação de apatita após a aplicação de separação magnética de baixo campo; e (3) flotação de apatita após separação magnética de baixo e alto campo. A melhor rota para a produção do concentrado secundário de fosfato foi a segunda opção. Os resultados indicaram que a separação magnética de baixo campo antes da flotação de apatita melhora significativamente o teor e a recuperação mássica, além de reduzir o consumo de depressor. O estudo também demonstrou o potencial de concentração de magnetita em mesa oscilatória e o potencial de obtenção de um concentrado de titânio por flotação aniônica direta, utilizando carboxilato de sódio como coletor dos minerais titanita (esfeno) e perovskita, em condições de pH entre 8 e 9. Essa abordagem evidencia a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência econômica do setor mineral.

Palavras-chave: reaproveitamento de rejeitos, coprodutos, fosfato, mineração, flotação, titanita, perovskita, mesa oscilatória.

ABSTRACT

Due to the high production cost of Brazilian phosphate compared to imported phosphate, it is essential for companies in this sector to seek strategies to increase revenue and add value to their business. One promising alternative is the development of co-products, which not only expand the commercial portfolio but also help reduce the mass of tailings generated during the production process. This study presents the development of routes for the production of co-products from the scavenger flotation tailings of a phosphate mine located in Serra do Salitre (Minas Gerais, Brazil). The main objective was to evaluate the best route to obtain a concentrate with a low P_2O_5 content (target of 24%). For this purpose, factorial experiments were carried out with three distinct routes: (1) direct flotation of the scavenger tailings as generated in the process; (2) apatite flotation after low-intensity magnetic separation; and (3) apatite flotation after both low- and high-intensity magnetic separation. The best route for the production of the secondary phosphate concentrate was the second option. The results indicated that low-intensity magnetic separation prior to apatite flotation significantly improves grade and mass recovery, in addition to reducing depressant consumption. The study also demonstrated the potential for magnetite concentration using a shaking table, as well as the potential to obtain a titanium concentrate through direct anionic flotation, using sodium carboxylate as a collector for the titanium minerals titanite (sphene) and perovskite, under pH conditions between 8 and 9. This approach highlights the technical feasibility of tailings utilization, contributing to the sustainability and economic efficiency of the mining sector.

Keywords: tailings reuse, co-products, phosphate, mining, flotation, titanite, perovskite, shaking table.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa do gradiente total contendo a separação aproximada dos complexos Serra Negra e Salitre I, II e III.....	22
Figura 2: Separação magnética de baixo campo.	25
Figura 3: Flotação de apatita da em coluna de flotação (Serra do Salitre-MG).	27
Figura 4: Representação esquemática de uma coluna de flotação.	27
Figura 5: Flotação de apatita em célula mecânica (Catalão-GO).....	28
Figura 6: Fluxograma geral de desenvolvimento da pesquisa.....	37
Figura 7: Local de coleta da amostra de rejeito da flotação <i>scavenger</i>	38
Figura 8: Moinho de bolas empregado na cominuição de parte do rejeito da flotação industrial.	39
Figura 9: Vista interna do moinho de bolas utilizado na cominuição de parte do rejeito industrial.	39
Figura 10: <i>Gaussmeter</i> empregado para a terminação do campo magnético do ímã de mão utilizado na separação magnética de baixo campo.	41
Figura 11: Produto magnético removido do baixo campo.	41
Figura 12: Separador Magnético de alto campo Inbras.....	43
Figura 13: Matriz separação magnética de alto campo.	43
Figura 14: Mesa oscilatória utilizada no processo de concentração do magnético de baixo campo.	44
Figura 15: Em (a) coluna de flotação empregada nos testes de batelada e em (b) representação esquemática do sistema de flotação em coluna.	46
Figura 16: Em (a) Condicionamento da polpa para realização da flotação de bancada. Em (b) transbordo do flotado na coluna de flotação.	48
Figura 17: Pilha alongada de não magnético de baixo campo confeccionada em bancada.	50
Figura 18: Em (a) Célula mecânica Brastorno empregada nos testes de flotação de titânio. Em (b) escumadeira automática realizando a descarga do flotado da célula mecânica.	53
Figura 19: Composição mineralógica - Total -0,50 + 0,020 mm (MEV-EDS-MLA).....	55
Figura 20: Difratograma com identificação dos principais minerais.	56
Figura 21: Imagem ilustrativa das partículas classificadas por MEV-EDS-MLA (fração menor que 500 μm e maior que 150 μm).	56
Figura 22: Distribuição granulométrica do rejeito da flotação <i>scavenger</i> de apatita.	57
Figura 23: Distribuição dos óxidos do produto moído por malha analisada (retido simples).	59
Figura 24: Gráfico normal dos efeitos padronizados.	64
Figura 25: Resíduos deletados versus valor ajustado.	64
Figura 26: Gráfico de cubo da recuperação mássica de magnético da separação magnética de alto campo.	65
Figura 27: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto magnético.	66
Figura 28: Resíduos deletados versus valor ajustado.	67
Figura 29: Gráfico de cubo dos teores de Fe_2O_3 obtidos no produto magnético de alto campo.	67
Figura 30: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético.	69
Figura 31: Resíduos deletados versus valor ajustado.	69
Figura 32: Gráfico de cubo da recuperação de Fe_2O_3 obtidos no produto magnético de alto campo. ..	70
Figura 33: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto não magnético que irá alimentar a etapa de flotação.	71
Figura 34: Resíduos deletados versus valor ajustado.	72
Figura 35: Gráfico de cubo dos teores de Fe_2O_3 obtidos no produto não magnético de alto campo. ...	72

Figura 36: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de TiO_2 no produto magnético de alto campo.	74
Figura 37: Resíduos deletados versus valor ajustado.	75
Figura 38: Gráfico de cubo dos teores de TiO_2 obtidos no produto magnético de alto campo.	75
Figura 39: Curva granulométrica de alimentação da mesa concentradora em comparativo com a curva do rejeito da flotação Tal Qual coletado (amostra inicial do trabalho).	77
Figura 40: Gráfico de distribuição de massa das bateladas na mesa oscilatória.	78
Figura 41: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.	82
Figura 42: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.	82
Figura 43: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica.	83
Figura 44: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5	85
Figura 45: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.	85
Figura 46: Gráfico de contorno para a recuperação de P_2O_5	86
Figura 47: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	87
Figura 48: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	88
Figura 49: Gráfico de contorno da resposta de teor de P_2O_5 no concentrado final.	88
Figura 50: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.	92
Figura 51: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.	92
Figura 52: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica, em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.	93
Figura 53: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5	95
Figura 54: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.	95
Figura 55: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de P_2O_5 , em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.	96
Figura 56: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	98
Figura 57: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	98
Figura 58: Gráfico de contorno para a resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.	99
Figura 59: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.	102
Figura 60: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.	102
Figura 61: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica, em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após a separação magnética de baixo e alto campo.	103
Figura 62: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5	105
Figura 63: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.	105
Figura 64: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de P_2O_5 , em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após a separação magnética de baixo e alto campo.	106
Figura 65: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	108
Figura 66: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.	108
Figura 67: Gráfico de contorno para a resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após as separações magnéticas de baixo e alto campo.	109
Figura 68: Gráficos de contorno para as respostas teor de P_2O_5 e recuperação mássica (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após as separações magnéticas de baixo e alto campo.	110
Figura 69: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.	116

Figura 70: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.....	116
Figura 71:Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica da flotação de titânio.	117
Figura 72: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de TiO_2	118
Figura 73: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica de TiO_2	119
Figura 74: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de TiO_2	119
Figura 75: Teste de cinética de flotação do titânio em pH 5,5, dosagem de 450 g/t de carboxilato de sódio e de 30 g/t de espumante.....	120
Figura 76: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de TiO_2 no concentrado da flotação de titânio.....	122
Figura 77: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de TiO_2 no concentrado final.	122
Figura 78: Gráfico de contorno para a resposta teor de TiO_2 no concentrado final da flotação de titânio.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planejamento fatorial testes de bancada separação magnética de alto campo.	42
Tabela 2: Níveis planejamento fatorial flotação rejeito <i>scavenger</i> Tal Qual.	46
Tabela 3: Planejamento fatorial para avaliação do depressor e coletor na flotação do rejeito <i>scavenger</i>	47
Tabela 4: Planejamento fatorial estrela para teste de flotação de apatita após a realização da separação magnética de baixo campo.	50
Tabela 5: Planejamento fatorial estrela para teste de flotação após a realização da separação magnética de baixo campo.	51
Tabela 6: Níveis planejamento fatorial flotação da titanita.	52
Tabela 7: Teste Fatorial para avaliação do coletor de titanita.	53
Tabela 8: Análise granulométrica e química do rejeito <i>scavenger</i>	57
Tabela 9: Distribuição dos óxidos de P_2O_5 , TiO_2 e SiO_2 do rejeito da flotação <i>scavenger</i> de apatita. .	58
Tabela 10: Teste estatístico de hipótese para avaliação da recuperação mássica de magnético. (para análise completa ver Apêndices 2 e 3).	60
Tabela 11: Teste estatístico de hipótese para os teores de Fe_2O_3 no magnético de baixo campo. (para análise completa ver Apêndice 4).	60
Tabela 12: Teste estatístico de hipótese para o teor de TiO_2 no magnético de baixo campo. (Apêndices 5 e 6).	61
Tabela 13: Teste de hipótese para os teores de P_2O_5 presentes no magnético de baixo campo. (Apêndice 7).	61
Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos com a separação magnética de baixo campo.	61
Tabela 15: Resultados do teste fatorial de separação magnética de alto campo.	62
Tabela 16: Análise estatística do experimento para a resposta recuperação mássica. (Apêndice 8).	63
Tabela 17: Análise estatística do experimento para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo. (Apêndice 9).	66
Tabela 18: Análise estatística do experimento para a resposta recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo. (Apêndice 10).	68
Tabela 19: Análise estatística do experimento para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo. (Apêndice 11).	71
Tabela 20: Análise estatística do experimento para a resposta teor de TiO_2 no produto não magnético de alto campo. (Apêndice 12).	73
Tabela 21: Análise química alimentação mesa oscilatória.	76
Tabela 22: Distribuição granuloquímica da alimentação da mesa oscilatória.	77
Tabela 23: Resultados preliminares do processo de concentração na mesa oscilatória.	78
Tabela 24: análise granuloquímica do rejeito <i>scavenger</i> Tal Qual coletado em campo (alimentação flotação de apatita para a produção de um coproduto).	80
Tabela 25: Resultados obtidos a partir dos testes de flotação do rejeito <i>scavenger</i> Tal Qual coletado na planta de beneficiamento.	80
Tabela 26: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial da flotação Tal Qual rejeito coletado. (Apêndice 13).	81
Tabela 27: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 14).	84
Tabela 28: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 15).	87
Tabela 29: Comparativo entre testes com e sem o uso de depressor na flotação de apatita do rejeito Tal Qual.	89

Tabela 30: Teste de hipótese para o teor de P_2O_5 no concentrado final comparando com e sem o uso do depressor. (Apêndice 16).....	89
Tabela 31: Resultados obtidos a partir dos testes de flotação do rejeito <i>scavenger</i> após a separação magnética de baixo campo.	90
Tabela 32: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação após a separação magnética de baixo campo. (Apêndice 17).	91
Tabela 33: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica de P_2O_5 do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 18).	94
Tabela 34: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 19).	97
Tabela 35: Resultados obtidos na flotação de apatita após separação magnética de baixo e alto campo.	100
Tabela 36: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita após a separação magnética de baixo e alto campo. (Apêndice 20). ...	101
Tabela 37: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita do rejeito <i>scavenger</i> submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo. (Apêndice 21).	104
Tabela 38: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita do rejeito <i>scavenger</i> submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo. (Apêndice 22).....	107
Tabela 39: Regressão recuperação mássica x teor de P_2O_5 no concentrado final da flotação.....	112
Tabela 40: Resultados comparativos entre os resultados das 3 flotações de apatita sem considerar o balanço global.	112
Tabela 41: Balanços globais com as três configurações de rotas de processo estudadas para a flotação de apatita.	113
Tabela 42: Análise granuloquímica da alimentação da flotação de titânio.	114
Tabela 43: Resultados do planejamento fatorial da flotação de titânio.	114
Tabela 44: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de titânio. (Apêndice 23).....	115
Tabela 45: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica de TiO_2 do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de titânio. (Apêndice 24).	118
Tabela 46: Análise estatística da resposta de teores de TiO_2 no concentrado final da flotação de titânio. (Apêndice 25).....	121

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Aspectos gerais sobre o fosfato	19
2.2 Aspectos gerais sobre o titânio.....	20
2.3 Geologia	21
2.4 Beneficiamento	22
2.5 Separação magnética.....	23
2.6 Concentração gravítica em mesa oscilatória	25
2.7 Flotação	26
2.7.1 Flotação de apatita a partir de rejeito	30
2.7.2 Flotação de titanita (ou esfeno, CaTiSiO_5).....	31
2.7.2 Flotação de Perovskita (CaTiO_3).....	32
2.8 Planejamento experimental	33
3. METODOLOGIA	37
3.1 Coleta e preparação da amostra.....	38
3.2 Caracterização da amostra de rejeito.....	40
3.3 Separação magnética de baixo campo.....	40
3.4 Separação magnética de alto campo.....	42
3.5 Concentração do magnético de baixo campo em mesa oscilatória	44
3.6 Flotação do rejeito <i>scavenger</i>	45
3.6.1 Teste de verificação da influência do depressor na resposta da flotação	49
3.7 Flotação do rejeito <i>scavenger</i> após separação magnética de baixo campo	49
3.8 Flotação do rejeito <i>scavenger</i> após separação magnética de baixo e alto campo	51
3.9 Ensaio de flotação de titânio (titanita e perovskita).....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Caracterização mineralógica da amostra.....	55
4.2 Caracterização granulométrica da amostra.....	57
4.3 Moagem da amostra	58
4.4 Separação magnética de baixo campo.....	59
4.5 Separação magnética de alto campo.....	62
4.5.1 Recuperação mássica do produto magnético de alto campo	63
4.5.2 Teor de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo.....	65
4.5.3 Recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo.....	68

4.5.4 Teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo	70
4.5.5 Teor de (TiO_2) no magnético de alto campo	73
4.6 Concentração em mesa oscilatória	76
4.7 Flotação	79
4.7.1 Flotação de apatita a partir do rejeito <i>scavenger</i> Tal Qual coletado industrialmente.	79
4.7.2 Flotação de apatita a partir do rejeito <i>scavenger</i> submetido a separação magnética de baixo campo	90
4.7.3 Flotação de apatita a partir do rejeito <i>scavenger</i> submetido a separação magnética de baixo e alto campo	100
4.8 Flotação de titânio	114
4.8.1 Recuperação mássica da flotação de TiO_2	115
4.8.2 Recuperação metalúrgica de TiO_2 na flotação	117
4.8.3 Teores de TiO_2 no concentrado final.....	120
5. CONCLUSÃO	124
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	125
7. REFERÊNCIAS.....	126
8. APÊNDICES	130

1. INTRODUÇÃO

A extração e produção de concentrado fosfático, matéria prima para a produção de fertilizantes no Brasil é realizada predominantemente em jazidas ultramáficas de carbonatitos, rocha de magma alcalino de origem ígnea plutônica. As principais jazidas ultrabásicas brasileiras de fosfato são Angico dos Dias (PI), Araxá (MG), Cajati (SP), Catalão (GO), Serra do Salitre (MG), Tapira (MG) e Patrocínio (MG).

Diferentemente do fosfato produzido por grandes *players* mundiais como a China, Marrocos, Estados Unidos, Jordânia, Arábia Saudita e Egito, cujas jazidas são de origem sedimentar e possuem elevado teor de P_2O_5 , as jazidas brasileiras têm baixo teor e grande complexidade de concentração. Esse processo envolve etapas onerosas de beneficiamento, como: britagem, moagem, separação magnética de baixo campo, classificação, deslamagem, flotação, separação magnética de alto campo, desaguamento e estocagem de rejeitos. Toda essa complexidade impacta diretamente no custo de produção final do fertilizante.

De forma estratégica, na década de 70, após a crise mundial do petróleo, o governo brasileiro implementou um forte programa de substituição de importações, investindo na construção e desenvolvimento dos Complexos Minerquímicos como os de Araxá, Tapira/Uberaba e Catalão, visando reduzir a dependência externa de fertilizantes fosfatados. As minas, plantas de beneficiamento e plantas químicas que entraram em operação nas décadas de 70 e 80, viabilizaram a produção de fertilizantes em território nacional. Isto foi fundamental para a redução da dependência desta matéria-prima importada, diminuindo assim o risco de falta de fertilizantes, o que poderia impactar o agronegócio brasileiro.

Devido ao elevado custo de produção do fosfato brasileiro em relação ao importado, é fundamental que as empresas do setor busquem soluções para o aumento de receita. Um caminho pode ser o desenvolvimento de coprodutos. A exemplo a empresa CMOC Fosfatos empresa pertencente ao grupo CMOC (*China Molybdenum Company*), responsável pela lavra e beneficiamento do fosfato em Ouvidor (GO). Em 2008 esta empresa implementou uma planta denominada de *Tailings*, visando a recuperação de nióbio a partir do rejeito da flotação de apatita, e em 2014 implementou um circuito de concentração por flotação de barita. Ambos os projetos de produção destes coprodutos posicionaram a empresa em uma situação de elevada atração mercadológica, devido à redução do custo operacional e aumento de receitas.

Outros exemplos no setor de fosfato, são as minas de Cajati (SP) e Siilinjärvi (Finlândia), que produzem concentrado de calcita, a partir de seus rejeitos, matéria-prima destinada a indústria cimenteira. Há diversos outros exemplos de empresas no Brasil e no mundo, que ao longo dos anos, vêm desenvolvendo rotas para aproveitamento de seus rejeitos, aumentando assim a rentabilidade do empreendimento.

Além da importância de agregar valor ao negócio, o desenvolvimento de coprodutos é importante para a redução de massa de rejeitos gerada. Cada vez mais as empresas estão sendo pressionadas pelos órgãos ambientais e pela sociedade civil a darem destinos mais seguros aos seus rejeitos gerados nas etapas de beneficiamento. Portanto, desenvolver novas linhas de produtos é uma oportunidade de redução de massa estocada, isso também aumenta a vida útil das barragens existentes. Além disso, reduz a massa movimentada em pilhas no caso de empresas que já migraram do sistema de barragens para o sistema de filtragem e empilhamento de rejeitos.

Este estudo tem como objetivo avaliar o desenvolvimento de rotas de processamento para a produção de coprodutos a partir do rejeito da etapa *scavenger* da flotação de apatita em Serra do Salitre-MG. Especificamente, busca analisar a viabilidade técnica de obtenção de três concentrados distintos: um concentrado fosfático de baixo teor de P_2O_5 , um concentrado de titânio e um concentrado de magnetita.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Avaliar o potencial de produção de coprodutos a partir do rejeito da flotação *scavenger* de apatita de Serra do Salitre-MG.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a separação magnética de baixo campo com ou sem a moagem do rejeito;
- Avaliar a separação magnética de alto campo com ou sem a moagem do rejeito;
- Determinar a melhor rota para a produção de um concentrado de P_2O_5 de baixo teor;
- Avaliar o potencial de produção de um concentrado de magnetita a partir do magnético de baixo campo em mesa oscilatória;
- Avaliar o potencial de produção de um concentrado de TiO_2 por flotação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos empregados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, abordando aspectos gerais sobre geologia, fosfato e seu processo de beneficiamento. Também são discutidos temas relevantes como separação magnética, flotação de apatita, flotação de minerais de titânio e o planejamento fatorial de experimentos.

2.1 Aspectos gerais sobre o fosfato

Segundo Gilmour (2014), a descoberta e o isolamento do fósforo por Hennig Brandt, em Hamburgo, Alemanha, em 1669, são frequentemente considerados como o marco que encerrou a era da alquimia e deu início à ciência moderna da química. Esse feito também representa o começo da história contemporânea do fósforo. Hennig Brandt, que era vidreiro de profissão e serviu como soldado, recebeu um dote substancial de sua primeira esposa, o que lhe permitiu se dedicar à prática da alquimia. Em sua busca pela pedra filosofal, que acreditava ser a chave para transformar metais comuns em ouro, Brandt estava convencido de que o segredo se encontrava na preparação da urina. Seu método envolvia o aquecimento a altas temperaturas de grandes quantidades de urina evaporada e envelhecida. No entanto, o processo era ineficaz, e Brandt acabava descartando uma proporção significativa do material durante o procedimento. O que Brandt obteve foi uma substância branca, com consistência de graxa, que brilhava no escuro e, ao entrar em contato com o ar, gerava chamas devido a um processo simples de oxidação. O hidrogênio fosfato sódico amoniacal, quando aquecido, produzia fosfito de sódio. Este fosfito, por sua vez, ao ser aquecido com carvão, se decompunha, resultando na formação de fósforo branco e pirofosfato de sódio. Brandt nomeou o elemento como "fósforo", derivado do latim pōs (luz) e phoros (portador), e do grego φωσφόρος (fosfóros), que significa "portador de luz". No entanto, para produzir 1 grama de fósforo, eram necessários 50 litros de urina, o que tornava o processo extremamente caro.

Em 1769, o fósforo foi isolado pelo químico sueco Karl Scheele, ao descobrir que o elemento é um dos constituintes do osso e desenvolveu um método mais simples para sua extração, processo semelhante à pasteurização.

Segundo Ruttenberg (2003) o fósforo é essencial aos seres vivos e seu ciclo envolve plantas, animais e microrganismos. Encontrado na forma de íon fosfato na natureza, este nutriente tem como principal reservatório as rochas e pode ser obtido pelos seres vivos a partir do solo e da

água ou através da cadeia alimentar. O fósforo é essencial na composição dos ácidos nucleicos e em reações bioquímicas envolvendo material genético, na transferência de energia (na forma de ATP) e na estrutura dos organismos, presente nos fosfolipídeos das membranas e na hidroxiapatita, principal constituinte mineral na composição dos ossos e dentes.

O fósforo é o segundo elemento mais abundante no organismo animal, estando em sua maior parte presente em ossos e dentes e o restante distribuído entre tecidos moles e fluido. Está envolvido em quase todos os aspectos do metabolismo animal, incluindo o metabolismo energético, contração muscular, funcionamento do tecido nervoso, metabolismo de carboidratos, gorduras e aminoácidos, equilíbrio ácido básico, transporte de metabólitos e estruturação de ácidos nucleicos e membrana lipoprotéica celular. Nos ossos apresenta-se na forma de cristais de hidroxiapatita em uma relação aproximada de duas partes de cálcio (Ca) para uma de fósforo (P).

Os fosfatos de origem ígnea, que são as maiores jazidas de fosfato em operação no Brasil, são utilizados na indústria de fertilizantes após serem submetidos à concentração nas plantas de beneficiamento. Normalmente, o teor de P_2O_5 do minério proveniente da mina é enriquecido de proximamente 10% para próximo de 35% no concentrado final. Os concentrados fosfáticos são comercialmente expressos sob a forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5). A maioria dos minerais de minérios de fósforo dessas rochas pertencem ao grupo da apatita, representado pela fórmula: $Ca_5 (F, Cl, OH) (PO_4)_3$ – que é um fosfato cristalino de cálcio com flúor, de cor variável, brilho vítreo, dureza cinco, densidade entre 3,1 e 3,2 g/cm³, apresentando fratura conchoidal, com teor de P_2O_5 nesse tipo de depósito oscilando de 4 a 15% (Amaral, 2005).

2.2 Aspectos gerais sobre o titânio

Segundo Zhai et al. (2020), em 1791, William Justin Gregor, na Inglaterra, descobriu o titânio no mineral ilmenita ($FeTiO_3$). No entanto, o elemento só recebeu seu nome em 1794, quando o químico alemão Heinrich Klaproth o isolou a partir de uma amostra de rutilo (TiO_2). Na natureza, o titânio é encontrado em minerais que fazem parte de rochas ígneas e de sedimentos derivados dessas rochas. Os principais minerais que contêm titânio são os dióxidos de titânio (TiO_2), como anatásio, brookita e rutilo; ilmenita ($FeTiO_3$); perovskita ($CaTiO_3$); titanita ($CaTiSiO_5$); algumas granadas (minerais silicatos, como schorlomita, $Ca_3[TiFe^{3+}Al]_2((SiFe^{3+}Fe^{2+})_3O_{12})$). De maneira direta, apenas ilmenita e rutilo são economicamente exploráveis.

Austrália e China são os dois países com maiores reservas de titânio, mas com diferentes mecanismos metalogênicos. Os recursos de titânio na Austrália são principalmente do tipo sedimentar. Por outro lado, na China os recursos são de origem ígnea semelhantes aos que ocorrem no Brasil.

2.3 Geologia

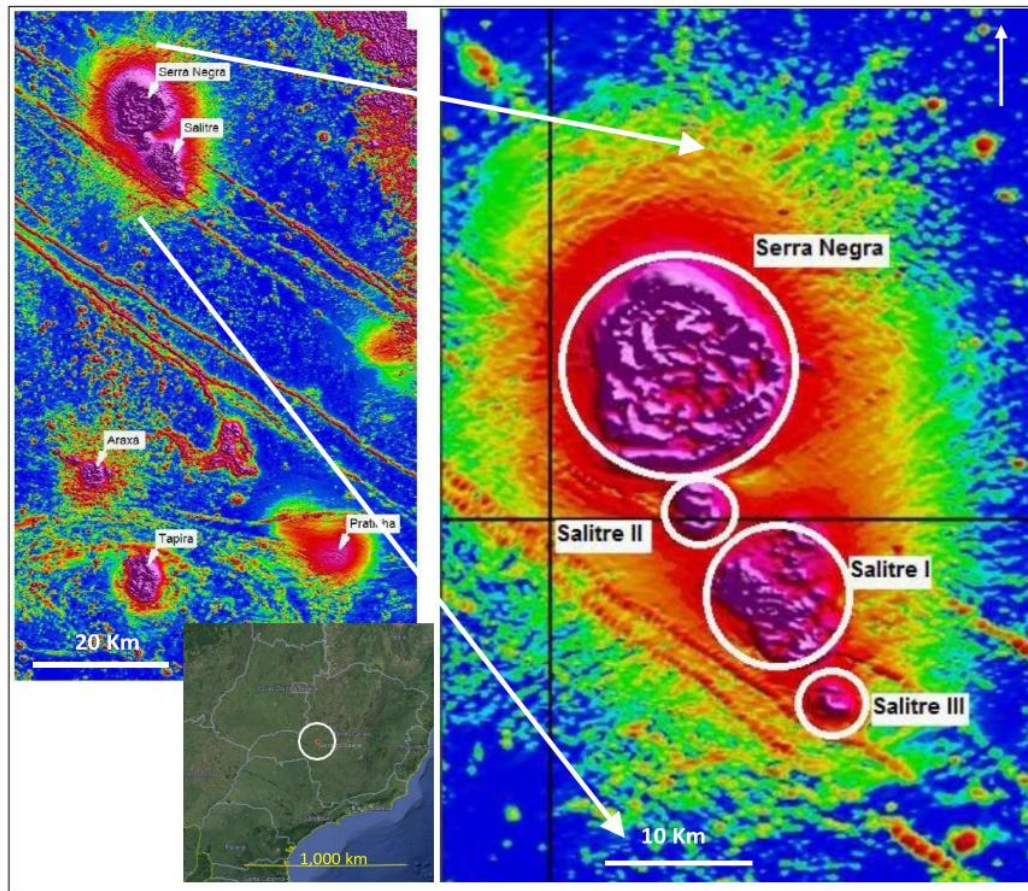
A Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP) destaca-se entre as áreas de ocorrência de Complexos Alcalino-Carbonatíticos no Brasil por sua complexidade petrológica decorrente da associação entre carbonatitos e rochas alcalinas ultrapotássicas e pelo grande número e variedade de depósitos minerais desenvolvidos nesses complexos (Brod *et al.*, 2004).

Nesse contexto encontra-se o Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I (Barbosa *et al.*, 2012) com importantes mineralizações de fosfato resultantes dos processos magmáticos e enriquecidos de forma supergênica, gerando depósitos economicamente viáveis de fosfato e nióbio.

Segundo Brod *et al.* (2004) na região de Patrocínio existem quatro intrusões alcalinas distintas, de dimensões variadas. As anomalias magnéticas provenientes dos complexos assim como a separação aproximada entre eles podem ser visualizadas na Figura 1.

Os complexos de Salitre I, II e III e Serra Negra estão encaixados em rochas metassedimentares dos Grupos Canastra e Bambuí. Uma descrição mais detalhada dos grupos Canastra e Bambuí presentes na região é dada por Seer *et al.* (2015). Segundo eles o Grupo Canastra se constitui basicamente de um conjunto de camadas de filitos e quartzitos com texturas e composições variadas e possuem laminação ou estratificação plano-paralela. No grupo Bambuí, por sua vez, predominam ardósias, com presença também de metasiltitos, metaargilitos, metarenitos, quartzitos e filitos.

Figura 1: Mapa do gradiente total contendo a separação aproximada dos complexos Serra Negra e Salitre I, II e III. Mapa magnetométrico regional. Os valores mais baixos de magnetismo são representados em azul, enquanto os mais altos são representados em rosa.



Fonte: Levantamento aerogeofísico de Minas Gerais CODEMIG, 2005/2006.

2.4 Beneficiamento

Segundo Chaves (2007), o tratamento de minérios pode ser considerado como um tipo de arte, uma vez que estabelecer uma sequência correta de operações e combiná-las de modo a obter o melhor teor no concentrado e a máxima recuperação do elemento ou substância útil exige conhecimento prático e teórico, sensibilidade, experiência anterior e envolve sempre trabalho experimental em laboratório ou usina piloto.

Segundo Araújo (2007) o tratamento ou processamento de minérios pode ser conceituado como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis.

Segundo Gupta e Yan (2006) na natureza os minerais de interesse estão fisicamente e quimicamente combinados com a rocha hospedeira. Remover os minerais de ganga visando

aumentar a concentração do minério com viabilidade econômica é à base do processamento mineral. O grande desafio para o engenheiro de processos é produzir um concentrado com alto teor do elemento útil com a máxima recuperação do corpo de minério. As operações de concentração (separação seletiva de minerais) baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se destacam: massa específica (ou densidade), susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse (Luz, 2010).

Segundo Wills (2016), os métodos de processamento mineral possuem duas operações fundamentais, a liberação e a separação. A liberação consiste em desprender os minerais de valor dos minerais de ganga. A separação, conhecida como concentração, é o processo de separar os minerais de interesse econômico da ganga. Dentre os métodos de separação, destacam-se a separação magnética e a flotação.

Os processos de beneficiamento de minérios fosfáticos, no Brasil, segundo Loureiro *et al.* (2005), compreendem, normalmente: britagem (primária, secundária e até terciária, por vezes), homogeneização, moagem primária, separação magnética de baixo campo, moagem secundária, classificação, deslamagem, concentração por flotação, separação magnética de alto campo e as operações de desaguamento: espessamento, filtragem e secagem de concentrado.

2.5 Separação magnética

Segundo Valadão (2007) a separação magnética utiliza como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas minerais submetidas à ação de um campo magnético. Os separadores magnéticos têm sido utilizados em separações minerais do tipo magnetita e hematita de quartzo. Pode-se destacar a aplicação pioneira de separação magnética de alta intensidade a úmido, para o sistema hematita/quartzo, feita pela Companhia Vale do Rio Doce na usina Cauê, implantada no início da década de 1970.

Segundo Sampaio *et al.* (2007) a separação magnética pode ser classificada em quatro categorias, dependendo do meio utilizado e da intensidade de campo. Assim, tem-se a separação magnética, a seco, de baixa e alta intensidade e, a úmida, de baixa e alta intensidade. A aplicação desse método de separação no processamento mineral estende-se desde a remoção de sucatas metálicas, aos separadores criogênicos ou supercondutores.

De acordo com Chaves (2013), os separadores de tambor de baixa intensidade a úmido, consistem na alimentação de uma polpa no tambor que gira e tem em seu interior um setor com ímãs. As partículas magnéticas são atraídas a superfície do tambor pelo campo magnético e as partículas não magnéticas continuam seu caminho até serem descarregadas. As Figuras 2 (a) e (b) apresentam um conjunto de separadores magnéticos de baixo campo utilizados no processamento de apatita visando à remoção de magnetita.

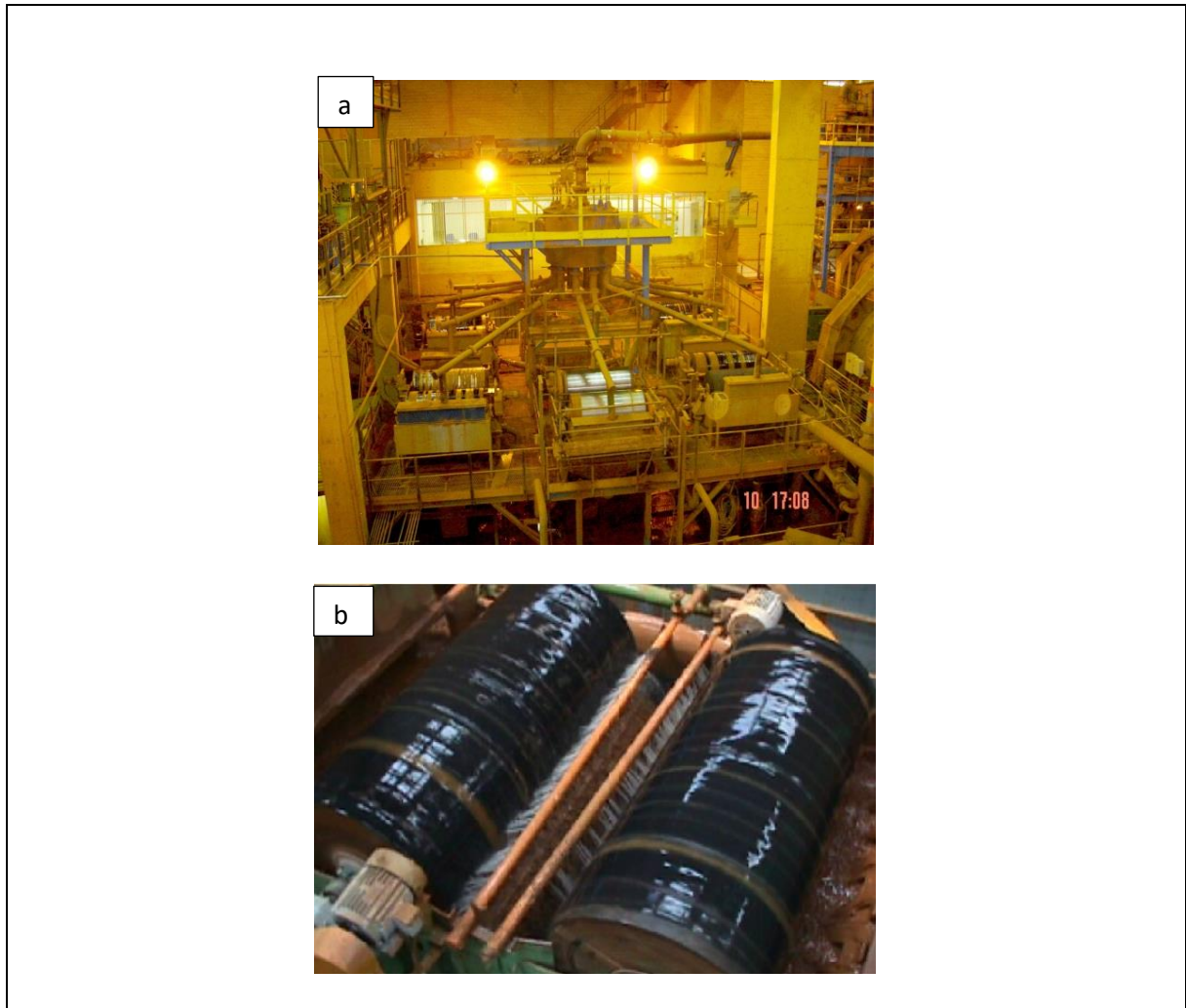
Segundo Seifelnassr *et al.* (2013), quando a granulometria está abaixo de 150 μm a liberação dos minérios de ferro é superior a 90%. Dessa forma, a granulometria do teste deve estar próxima a este valor.

O atual desenvolvimento da ciência dos materiais e da tecnologia do magnetismo permite a fabricação de separadores com gradientes e campos muito mais elevados que os convencionais. Desse modo, surgiram os separadores, com campos da ordem de 6 Teslas (60.000 Gauss), que empregam a tecnologia dos supercondutores. Nesta linha incluem-se também os separadores com ímãs permanentes, fabricados com base em elementos de terras-raras. Registra-se aí um marco significativo nos avanços técnicos e científicos relacionados à separação magnética aplicada à área de beneficiamento de minérios (Luz, 2010).

No beneficiamento do fosfato, além da separação magnética de baixo campo ilustrada na Figura 2, algumas usinas utilizam a separação magnética de alta intensidade (SMAI) após a etapa de flotação.

Essa técnica tem como objetivo remover minerais óxidos e hidróxidos de ferro, melhorando a qualidade do concentrado fosfático, reduzindo o impacto deste na acidulação e na reação de produção do ácido fosfórico das plantas de fertilizantes. Simões (2023) demonstrou potencial ganho de desempenho industrial com a SMAI como operação de pré-concentração de apatita. Além disso, o estudo mostrou que a remoção de minerais contaminantes (ilmenita, rutilo, perovskita e óxidos de ferro) resultou em uma melhor recuperação de apatita na flotação do produto não magnético.

Figura 2: Separação magnética de baixo campo.



Fonte: O autor, 2024.

2.6 Concentração gravítica em mesa oscilatória

Segundo Seifelnassr *et al.* (2013), a separação por gravimétrica é amplamente utilizada nas práticas de beneficiamento mineral devido ao baixo custo, facilidade de operação, controle simples e natureza ambientalmente correta. Esses métodos são baseados nas diferentes velocidades de sedimentação das partículas constituintes do minério.

A concentração gravimétrica baseia-se na separação de minerais por densidade, tamanho da partícula, formato e sua movimentação em um meio particular (exemplo aquoso). As limitações em torno da separação gravimétrica baseiam-se na grande quantidade de água necessária para sua operação e no tamanho das partículas, que não podem ser demasiadamente pequenas, menor que 20 μm ou ABNT: 635 Tyler/Mesh.

Especificamente, a ilmenita possui maior peso específico que os demais minerais silicatados, sendo assim, um processo bastante utilizado para essa separação em práticas industriais com minérios silicatados. O processo de concentração gravimétrica pode eficientemente concentrar a ilmenita entre materiais de granulometria grossa a média com baixo custo, sem poluição e alta eficiência energética. Contudo, a eficiência deste método pode decair caso o material apresente granulometrias fina (Zhai, *et al.*, 2020).

2.7 Flotação

Segundo Reis *et al.* (2019), a flotação em espuma é comumente usada para separar partículas de diferentes propriedades de superfície e é amplamente empregada para concentrar minerais-minério. O processo de flotação direta é baseado no conceito de que partículas valiosas são capturadas pelas bolhas na fase líquida e levadas até a interface polpa-espuma, enquanto partículas hidrofílicas são mantidas na polpa e descarregadas no fluxo de rejeito.

A flotação é a principal técnica de concentração de minérios utilizada no mundo sendo considerada de baixo custo, tendo em vista a grande capacidade de processamento de matéria prima e o baixo custo dos reagentes empregados neste processo. Segundo Nunes *et al.* (2009), o processo de flotação vem sendo utilizado desde o início do século XX na separação seletiva de minerais, e mais recentemente, no tratamento de efluentes em escala industrial. Esse processo consiste na adesão de partículas às bolhas de ar introduzidas na polpa, sistema à fase dispersa (partículas), sendo o conjunto bolha-partícula formado carregado para a superfície da célula de flotação, onde ocorre a recuperação das partículas hidrofóbicas. A Figura 3 apresenta a vista superior de uma coluna de flotação utilizada na concentração de fosfato em Serra do Salitre. A flotação de apatita é direta, portanto, a espuma contém um concentrado rico em apatita.

Segundo Baltar (2021), a flotação é, atualmente, a técnica de processamento mineral mais importante e versátil para a concentração de minerais. Esse processo envolve a separação seletiva de partículas hidrofóbicas, que são fixadas e aderem à superfície das bolhas de gás que sobem através da polpa. Como resultado, essas partículas são concentradas ou separadas da polpa na forma de espuma, um produto que pode ser facilmente coletado. A flotação é amplamente utilizada em diversas indústrias, especialmente para minerais sulfetados, fosfatados, carbonatados e outros, e é eficaz para separar minerais com características físicas e químicas distintas.

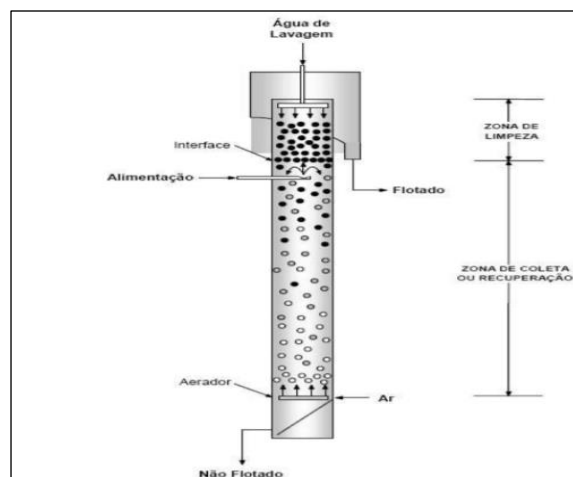
Figura 3: Flotação de apatita da em coluna de flotação (Serra do Salitre-MG).



Fonte: O autor, 2024.

Industrialmente pode-se dividir os equipamentos de flotação em dois grupos, células mecânicas e colunas de flotação. Colunas de flotação são equipamentos de larga utilização na mineração nos quais é possível separar minerais hidrofóbicos ou que tiveram suas superfícies hidrofilizadas dos minerais hidrofílicos. Essa separação se dá por meio de introdução de ar na polpa fazendo com que os minerais hidrofóbicos se aderem nas bolhas e venham a flotar na superfície da coluna de flotação que possui calhas para coletar a espuma com esses minerais hidrofobizados. A Figura 4 ilustra a dinâmica do processo de flotação em coluna.

Figura 4: Representação esquemática de uma coluna de flotação.



Fonte: Caldara e Correia, 2010.

O processo de flotação possui como principais variáveis: o pH da polpa de minério, dosagem de reagentes, água de lavagem de espuma e vazão de ar. Sendo o ar introduzido na base do equipamento, conforme pode ser observado na Figura 4.

Por outro lado, o funcionamento da célula mecânica de flotação envolve a introdução de polpa (mistura de minério e água) no tanque da célula, onde um sistema de rotor e estator promove intensa agitação e dispersão de ar. O rotor, ao girar em alta velocidade, gera um fluxo turbulento que promove a suspensão das partículas e a dispersão homogênea do ar, formando bolhas pequenas. O estator, por sua vez, direciona o fluxo da polpa e estabiliza a dispersão do ar, facilitando a adesão das bolhas às partículas hidrofóbicas (Reis *et al.*, 2019). A Figura 5 ilustra a célula mecânica utilizada no processo de flotação de apatita.

Figura 5: Flotação de apatita em célula mecânica (Catalão-GO).



Fonte: O autor, 2024.

A célula mecânica de flotação possui algumas vantagens em relação à coluna de flotação, conforme discutido por Almeida *et al.* (2015): Maior flexibilidade operacional, permitindo ajustes rápidos nas variáveis do processo; melhor desempenho para minérios de granulometria mais grossa; menor tempo de residência da polpa, tornando o processo mais dinâmico.

Por outro lado, a coluna de flotação apresenta maior seletividade, menor consumo de energia e melhor eficiência na flotação de partículas finas, sendo frequentemente utilizada na etapa de *cleaner* (Ferreira *et al.*, 2019). Dessa forma, a escolha entre a célula mecânica e a coluna de flotação deve considerar as características do minério e os objetivos do processo de beneficiamento.

Segundo Bulatovic (2007), a flotação é uma combinação de fenômenos químicos, físico-químicos e físicos que governam o sistema trifásico. As interfaces sólido-líquido, sólido-gás e líquido-gás, são consideradas possuidoras de uma energia de superfície que desempenha um papel decisivo na maioria dos aspectos do fenômeno da flotação. Como os átomos e íons, que fazem parte da superfície mineral, estão sujeitos a diferentes transformações devido às

mudanças no ambiente, o mesmo pode acontecer com as fases aquosa e gasosa. A fase sólida é um sistema multimineral, composto por uma variedade de diferentes minerais com diferentes propriedades químicas, cristalográficas e de superfície.

O líquido, ou seja, a água é a fase em que ocorre a separação dos minerais na flotação. A fase de ar sempre esteve associada à aeração da polpa de flotação e dos gases dissolvidos. O processo de flotação é regido por um fenômeno complexo que ocorre na superfície de partículas minerais e bolhas de ar formadas na fase aquosa. Do ponto de vista prático, a hidrofobicidade e a mineralização das bolhas são talvez os dois fatores mais importantes na flotação e governam a cinética do sistema e a seletividade da flotação.

Os reagentes são a parte mais importante do processo de flotação, segundo Bulatovic (2007). No estágio inicial do desenvolvimento do processo de flotação, os principais avanços ocorreram devido aos melhores reagentes de flotação. No desenvolvimento de um processo de tratamento, muito tempo, energia e atenção são dedicados à seleção de reagentes para obter os resultados mais eficazes de separação e concentração. Em plantas comerciais, o controle das adições de reagentes é a parte mais importante da estratégia de flotação. A classificação moderna dos reagentes é baseada na função de um reagente específico. Com base nisso, os reagentes são divididos em coletores, espumantes e modificadores, como os reguladores de pH. Vários milhares de produtos químicos foram testados ou sugeridos como reagentes de flotação. Atualmente, cerca de duzentas variedades de reagentes são amplamente empregados no processo de flotação (Baltar, 2021).

Os coletores são um grupo consideravelmente grande de compostos químicos orgânicos, que diferem em composição química e função. O objetivo básico do coletor é formar seletivamente uma camada hidrofóbica em uma dada superfície mineral na polpa de flotação e, assim, proporcionar condições para a fixação das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar e a recuperação dessas partículas no produto da espuma.

De acordo com a capacidade dos coletores de se dissociarem na água, eles podem ser divididos em grupos distintos. Coletores ionizantes consistem em moléculas orgânicas heteropolares. Dependendo da carga resultante, o coletor assume o caráter de um cátion ou ânion. Coletores aniônicos são ainda classificados em coletores oxidrilas e sulfidrilas com base em sua propriedade solidofílico.

Coletores catiônicos são compostos químicos nos quais o radical hidrocarboneto é protonado. Esses reagentes são aminas das quais as aminas primárias são os coletores de flotação mais importantes ($R-NH_2$). Este tipo de reagente é empregado na flotação de silicatos.

Coletores não ionizantes também são divididos em dois grupos. Os membros do primeiro grupo são os reagentes que contêm enxofre bivalente. O segundo grupo contém óleos de hidrocarbonetos não polares.

Espumantes são compostos heteropolares ativos em superfície que reduzem a tensão superficial da água e têm a capacidade de adsorver na interface líquido-gás. Sua presença na fase líquida aumenta a resistência do filme das bolhas de ar, proporcionando melhor fixação das partículas hidrofóbicas às bolhas. A tensão superficial também afeta o tamanho das bolhas de ar. A eficácia de alguns dos espumantes é muito dependente do pH da polpa. Seu desempenho é ótimo quando o espumante está na forma molecular.

2.7.1 Flotação de apatita a partir de rejeito

Oliveira *et al.* (2011) utilizando um mix de coletor vegetal de óleo de arroz e um coletor sintético de composição de sulfosuccinato demonstrou a possibilidade de recuperação da apatita a partir do rejeito da flotação elevando o teor deste de 9,52% de P_2O_5 na alimentação da flotação para 29,4% no concentrado final, sendo obtido uma recuperação de 46,2% de P_2O_5 . Os autores trabalharam com depressor em 500 g/t, dosagem de coletor de 80 g/t e mix entre oleato de sódio e sulfosuccinato de 80/20, em pH 11,3. O uso de óleo vegetal, como sabão de óleo de arroz, combinado com um coletor sintético, no caso o sulfossuccinato, visou aproveitar a maior seletividade desse coletor sintético e a capacidade de recuperação mais forte dos ácidos graxos.

Severov *et al.* (2022), realizou a flotação de rejeitos finos de apatita provenientes da planta de concentração de Kovdor, em uma célula de laboratório e uma coluna piloto. A flotação foi conduzida com uma amostra contendo >85% de partículas passante em 38 μm (400 mesh), utilizando ácidos graxos em combinação com éter cetílico polioxietilenado (2 grupos EO) como alternativa aos etoxilatos de nonilfenol. Foi alcançada uma recuperação de 45,5% de P_2O_5 com teor de concentrado de 31,2% de P_2O_5 a partir de uma alimentação de 9,1% de P_2O_5 , após estágios de desbaste e um estágio de limpeza em uma coluna piloto, utilizando o coletor misto com modificador de fosfato e o amido como depressor.

2.7.2 Flotação de titanita (ou esfeno, CaTiSiO_5)

Segundo Deer *et al.* (1992), o esfeno, também conhecido como titanita, é um mineral de silicato de cálcio e titânio, amplamente reconhecido por sua importância em diversas disciplinas geológicas, especialmente devido às suas propriedades físicas, químicas e geocronológicas. Sua composição química é CaTiSiO_5 , podendo apresentar substituições de elementos como alumínio, ferro e metais raros. Cristalograficamente, pertence ao sistema monoclinico, com cristais frequentemente prismáticos ou tabulares. Suas características incluem cor variável (incolor a marrom, verde, amarelo ou vermelho), dureza entre 5 e 5,5 na escala de Mohs, densidade de 3,5 a 3,6 g/cm³ e brilho que varia de vítreo a adamantino.

Estudos sobre o comportamento de flotação da titanita são relativamente limitados. Segundo Bayraktar *et al.* (1997a), este mineral pode ser flotado utilizando ácido oléico ou seu derivado carboxilato de sódio como coletores. A eficiência da flotação, no entanto, é sensível à presença de lamas, que podem afetar negativamente a recuperação mássica e a seletividade.

No trabalho de Bayraktar *et al.* (1997b), que buscou a remoção de titânio para o beneficiamento de feldspato na indústria cerâmica, observou-se que o oleato de sódio apresentou resultados superiores em relação a outros tipos de coletores (amina, sulfonato e succinatos alquil). Este desempenho pode ser atribuído à sua capacidade de interagir com a superfície da titanita, promovendo uma flotação eficiente. Apesar disso, estudos mineralógicos indicaram que a quantidade de titanita nos rejeitos era relativamente baixa em comparação com outros minerais, como o rutilo, sugerindo que ajustes nas condições de flotação poderiam melhorar a recuperação.

A relação entre pH e flotação do esfeno também é amplamente discutida na literatura. Fuerstenau *et al.* (2007) observaram que o oleato de sódio é mais eficaz em condições alcalinas (pH entre 8 e 10), pois essas condições favorecem a ionização do coletor e a interação com a superfície mineral. Por outro lado, Hu *et al.* (2012) destacaram que o comportamento de adsorção do oleato em minerais de cálcio-titânio é altamente dependente do pH, com maior eficiência de adsorção em pH próximo a 9. Nessas condições, a superfície do mineral apresenta cargas complementares às do coletor, favorecendo a flotação.

Além disso, Laskowski *et al.* (1999) sugerem que a presença de argilas e partículas ultrafinas no sistema pode impactar negativamente a recuperação do esfeno. As partículas finas podem

atuar como uma barreira física, impedindo a interação entre o coletor e a superfície mineral, especialmente em pH mais baixos, onde a eficiência do coletor já é reduzida.

Embora o oleato de sódio seja o coletor mais amplamente utilizado, Gupta e Yan (2006) discutem o uso de sulfonatos e succinatos como coletores alternativos. Esses reagentes oferecem a vantagem de maior seletividade, embora possam apresentar menor eficiência global de recuperação.

A aplicação de carboxilato de sódio como coletor para o esfeno é promissora, mas requer um controle rigoroso do pH para otimizar a eficiência da flotação. O intervalo ideal, segundo os estudos revisados, está entre 8 e 10, onde a adsorção do coletor é maximizada e as interações prejudiciais com lamas e partículas ultrafinas podem ser mitigadas.

2.7.2 Flotação de Perovskita (CaTiO_3)

A perovskita é um mineral óxido de cálcio e titânio, com fórmula geral CaTiO_3 . Cristaliza no sistema ortorrômbico, mas frequentemente apresenta desvios estruturais devido a substituições de elementos como lantânio, cério e metais de transição (Mitchell, 2002). É reconhecida por sua relevância em aplicações tecnológicas, especialmente na produção de células solares, além de ser explorada no beneficiamento mineral como fonte de titânio. Possui dureza de 5 a 5,5 na escala de Mohs, densidade de aproximadamente $4,0 \text{ g/cm}^3$ e brilho geralmente vítreo a resinoso (Deer *et al.*, 1992).

Segundo Hu *et al.* (2012), a perovskita pode ser flotada de forma eficiente utilizando coletores aniônicos, como ácido oleico ou seus derivados. Esses coletores se adsorvem na superfície do mineral, interagindo com os cátions de cálcio e titânio, que atuam como sítios ativos. A adsorção é favorecida em condições ligeiramente alcalinas, geralmente em pH 8 a 9.

Estudos realizados por Laskowski *et al.* (1999) destacam que a presença de lamas pode afetar negativamente a flotação da perovskita, reduzindo a recuperação devido ao bloqueio dos sítios ativos na superfície do mineral. Esse comportamento é semelhante ao observado em outros minerais de titânio, como rutilo e titanita.

Bayraktar *et al.* (1997b) relatam que o uso de oleato de sódio apresenta melhor desempenho em comparação com outros coletores, como sulfonatos e succinatos. Essa superioridade se deve à alta afinidade do oleato por minerais contendo cálcio e titânio, promovendo maior recuperação e seletividade. Entretanto, a presença de íons em solução, como cálcio e magnésio provenientes

da água de processo, pode competir com os sítios de adsorção, diminuindo a eficiência do coletor. De acordo com Fuerstenau *et al.* (2007), a eficiência do oleato de sódio na flotação da perovskita é maximizada em condições alcalinas, pois a dissociação do ácido oleico aumenta, promovendo maior adsorção do coletor na superfície mineral. O uso de reguladores de pH, como carbonato de sódio, auxilia na estabilização do pH e melhora o desempenho do coletor.

Gupta e Yan (2006) sugerem que a flotação da perovskita pode ser otimizada com o uso de sulfonatos ou coletores mistos, como combinações de ácidos graxos e sulfonatos, para melhorar a seletividade em relação à ganga silicática. Além disso, o uso de modificadores, como hexametáfosfato de sódio, pode reduzir os efeitos adversos das lamas, promovendo melhores recuperações.

A flotação da perovskita é uma etapa crucial no processamento de minérios complexos contendo titânio. "A recuperação de minerais de titânio, incluindo perovskita, é de grande interesse devido à sua crescente demanda nas indústrias química e de materiais avançados" (Mitchell, 2002). Testes laboratoriais indicam que a combinação de oleato de sódio com ajustes no pH e uso de água de qualidade controlada pode resultar em recuperações acima de 80% em flotação seletiva.

2.8 Planejamento experimental

Segundo Barros Neto *et al.* (2010), no planejamento de qualquer experimento, a primeira coisa que devemos fazer é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores, em geral, são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar. Podem ser qualitativos, como o tipo de catalisador, ou quantitativos, como a temperatura, dosagem de um regeante ou pH. Às vezes, num determinado experimento, sabemos que existem fatores que podem afetar as respostas, mas que não temos condições de, ou não estamos interessados em controlar.

Para executar um planejamento fatorial, começamos especificando os níveis em que cada fator deve ser estudado, isto é, os valores dos fatores (ou classes, nos casos qualitativos) que vamos usar para fazer os experimentos.

Segundo Montgomery *et al.* (2009), para um planejamento fatorial, queremos dizer que em cada tentativa completa ou réplica do experimento todas as combinações possíveis dos níveis

dos fatores são investigadas. Experimentos fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre variáveis.

Segundo Montgomery *et al.* (2009) o tipo mais simples de planejamento 2^k é o 2^2 , ou seja, dois fatores A e B, cada um com dois níveis, baixo e alto. O planejamento pode ser representado geometricamente como um quadrado, com $2^2=4$ corridas, ou combinações de tratamentos, formando os vértices do quadrado.

Ao realizar uma ANOVA (*Analysis of variance*) para testes fatoriais, os seguintes elementos e estatísticas são considerados:

Fatores: Os fatores são as variáveis independentes que estão sendo investigadas no estudo. Por exemplo, se estiver interessado em estudar o efeito de duas variáveis independentes, A e B, terá um teste fatorial de dois fatores.

Níveis dos fatores: Cada fator tem seus níveis, que representam as diferentes categorias ou níveis de cada fator. Por exemplo, o fator A pode ter níveis A1 e A2, enquanto o fator B pode ter níveis B1 e B2.

Grupos ou células: Os grupos ou células representam a combinação dos níveis dos fatores. Por exemplo, no caso de um teste fatorial de dois fatores, tem-se quatro grupos: A1B1, A1B2, A2B1 e A2B2.

Variável de resposta: É a variável que está sendo medida ou observada no estudo. É a variável que será analisada em relação aos efeitos dos fatores e suas interações. Hipóteses de interesse: As hipóteses testadas na ANOVA para testes fatoriais são relacionadas aos efeitos principais dos fatores e suas interações. Por exemplo, pode-se testar se há um efeito principal significativo para o fator A, para o fator B e se há uma interação significativa entre os dois fatores.

GL (Graus de Liberdade): Os graus de liberdade representam o número de observações independentes menos o número de restrições impostas pelo modelo. Na ANOVA, são calculados graus de liberdade para diferentes componentes da variância, como graus de liberdade do modelo, graus de liberdade do erro e graus de liberdade totais. Os graus de liberdade são importantes para calcular estatísticas de teste e determinar a significância estatística dos resultados.

SQseg (Soma de Quadrados Entre Grupos): A soma de quadrados entre grupos mede a variação da variável de resposta explicada pelas diferenças entre os grupos. Ela é calculada

como a soma dos quadrados das diferenças entre as médias dos grupos e a média global, ponderadas pelos tamanhos dos grupos.

A SQseg representa a variabilidade que pode ser explicada pelos fatores ou tratamentos aplicados aos grupos. Contribuição: A contribuição é a proporção da variância total explicada por um determinado componente da ANOVA. No caso da contribuição da SQseg, ela representa a proporção da variabilidade total explicada pelas diferenças entre os grupos. É calculada dividindo a SQseg pela soma total de quadrados (SQT) e multiplicando por 100 para obter uma porcentagem.

SQ (aj.) (Soma de Quadrados Ajustada): A soma de quadrados ajustada é uma versão modificada da SQseg, que leva em consideração o número de observações e o número de grupos na análise. É calculada dividindo a SQseg pelo número de graus de liberdade do modelo, obtendo assim a média quadrática ajustada.

AM (aj.) (Média Quadrática Ajustada): A média quadrática ajustada é calculada dividindo a SQ (aj.) pelo número de graus de liberdade do modelo. Ela representa a variação média explicada pelo modelo, ajustada para o número de graus de liberdade. A AM (aj.) é usada para calcular o valor F na ANOVA.

Valor F: O valor F é uma estatística de teste usada para determinar se existe uma diferença significativa entre as médias dos grupos na ANOVA. É calculado como a razão entre a AM (aj.) e a média quadrática do erro (MQE). Um valor F maior indica uma maior probabilidade de que as diferenças observadas entre os grupos não sejam devidas ao acaso.

Valor P: O valor P é uma medida de probabilidade associada ao valor F. Ele indica a probabilidade de obter um valor F igual ou mais extremo do que o observado, se a hipótese nula (ausência de diferenças entre os grupos) fosse verdadeira. Um valor P menor que um nível de significância pré-determinado (geralmente 0,05) indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os grupos.

As informações e dados obtidos em um experimento fatorial e análise de variância muita das vezes envolve cálculos complexos. Atualmente existem vários *softwares* capacitados em tratar as informações e gerar os dados necessários para realização de uma análise. Dentre eles tem-se o Minitab *Statistical Software*®. Com este *software* é possível gerar a matriz para o plano fatorial, realizar análise de variância (ANOVA) dentre outras várias análises.

A seguir serão detalhados os principais parâmetros utilizados para avaliar modelos (BARROS NETO *et al.*, 2002):

R^2 (Coeficiente de Determinação): É uma medida de quanta variação dos valores observados é explicada pelo modelo de regressão. É calculado como a proporção da variação total (Soma dos Quadrados dos Resíduos - SQRes) explicada pela variação total (Soma dos Quadrados Totais - SQT). R^2 varia de 0 a 1, onde 0 indica que o modelo não explica nenhuma variação e 1 indica que o modelo explica toda a variação.

R^2 (aj) (Coeficiente de Determinação Ajustado): É uma versão ajustada do R^2 que leva em consideração o número de preditores (variáveis independentes) no modelo. Ele penaliza o uso excessivo de preditores e é uma medida mais conservadora do ajuste do modelo. R^2 (aj) leva em consideração o grau de liberdade do modelo e tende a ser menor que R^2 quando há muitos preditores.

PRESQ (PRESS Residual Sum of Squares): É uma medida do erro de previsão do modelo. É calculado como a soma dos quadrados dos resíduos de previsão, onde os valores ajustados são obtidos excluindo cada observação uma de cada vez. PRESQ fornece uma estimativa do erro de previsão do modelo para novas observações.

R^2 (pred) (Coeficiente de Determinação de Previsão): É uma medida de quanta variação dos valores futuros é explicada pelo modelo de regressão. É calculado como a proporção da variação de previsão (Soma dos Quadrados de Previsão - SQP) explicada pela variação total (Soma dos Quadrados Totais - SQT). R^2 (pred) fornece uma estimativa da capacidade do modelo de fazer previsões precisas para novas observações.

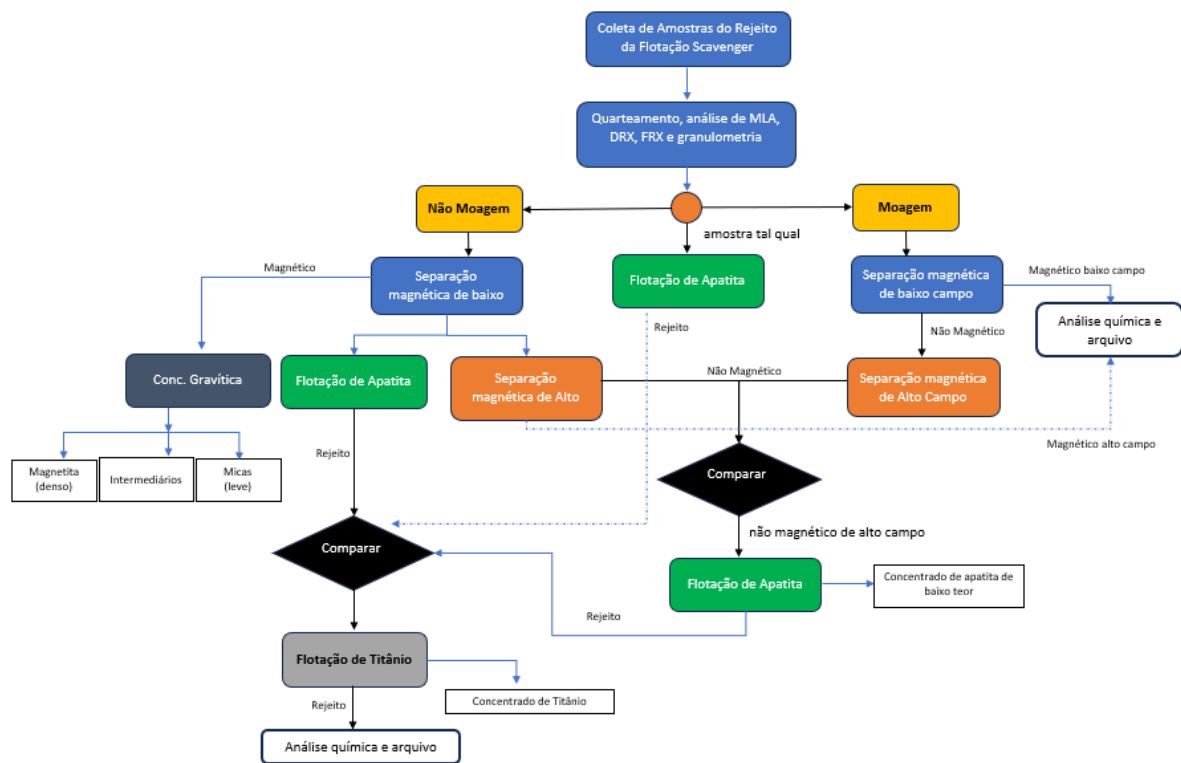
AICc (Akaike Information Criterion corrigido): É um critério de seleção de modelo que leva em consideração a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo. Quanto menor o valor do AICc, melhor o ajuste do modelo é considerado. O AICc é útil para comparar diferentes modelos e escolher o mais adequado.

3. METODOLOGIA

A finalidade desta pesquisa é aplicada, envolvendo campos interdisciplinares da ciência, possui objetivos exploratórios e explicativos, utiliza-se de procedimentos bibliográficos e experimentais e a abordagem deste trabalho é quantitativa. O tipo de raciocínio é o hipotético dedutivo, sendo este fundamental no método científico, onde as teorias são constantemente testadas com base em evidências empíricas. Este método também é usado em diversas áreas para explorar relações entre ideias, fazer previsões e resolver problemas de forma lógica e sistêmica.

A Figura 6 apresenta o fluxograma global dos experimentos desenvolvidos nesta pesquisa, foram avaliadas as operações unitárias de moagem, separação magnética e flotação.

Figura 6: Fluxograma geral de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: O autor, 2023.

A partir da coleta da amostra, realizou-se a preparação, caracterização e moagem de parte desta, fazendo um comparativo da separação magnética de baixo campo com e sem o emprego da moagem desta amostra. Posteriormente, realizou-se a separação magnética de alto campo, a partir do não magnético de baixo campo. Com o produto magnético do baixo campo, realizaram-se os testes de concentração gravítica em mesa oscilatória, visando produzir um

concentrado denso, com predomínio de magnetita, e um concentrado leve, rico em minerais micáceos.

Com o rejeito Tal Qual coletado e os produtos não magnéticos da separação de baixo e alto campo, foi realizada a flotação aniônica direta de apatita, visando entender qual seria a melhor rota de processo para a produção de um concentrado de fosfático de baixo teor de P_2O_5 : sendo (1) flotação do rejeito *scavenger* tal qual coletado, (2) flotação do rejeito *scavenger* após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo e (3) flotação do rejeito *scavenger* após este ter sido submetido a separação magnética de baixo e alto campo.

Por fim, com o rejeito da flotação de apatita, realizou-se a flotação de titânio, tendo o carboxilato de sódio como coletor dos minerais portadores de titânio.

A seguir será detalhado em cada um dos tópicos a metodologia de planejamento, realização de cada um dos testes e a forma de cálculo dos indicadores de desempenho destes como a recuperação mássica e metalúrgica.

3.1 Coleta e preparação da amostra

A amostra utilizada neste estudo foi coletada no dia 04/04/2023 no rejeito da flotação *scavenger* do processo de beneficiamento de fosfato do Complexo de Mineração de Serra do Salitre. Foram coletados um total de 100 kg de amostras em oito incrementos a cada 15 minutos durante duas horas. A pilha processada foi a denominada de 301. A Figura 7 apresenta o local de coleta da amostra.

Figura 7: Local de coleta da amostra de rejeito da flotação *scavenger*.



Fonte: O autor, 2023.

A amostra foi submetida à secagem em estufa à temperatura constante de 100 °C. Posteriormente esta foi desagregada e formou-se uma pilha alongada em bancada, tipo *Chevron*. Em seguida, esta foi quarteada de forma longitudinal em alíquotas de 500 gramas, definidas previamente por ser a massa padrão empregada nos testes de flotação de bancada.

Posteriormente, realizou-se a moagem em bateladas em um moinho de Bond (12" x 12") de 500 gramas, em um total de 6 kg (ou 12 alíquotas de 500 gramas), conforme apresentado nas Figuras 8 e 9. Para a realização desta moagem, variou-se o tempo em 3, 10, 15 e 30 minutos, visando determinar o tempo de moagem adequado a atingir o objetivo de 5% retido em 100 mesh (150 µm), a percentagem de sólidos empregada foi de 50%, o grau de enchimento do moinho foi de 20% e a composição do corpo moedor é de 50% bolas de diâmetro de 20 mm e 50% de bolas de diâmetro de 10 mm.

Figura 8: Moinho de bolas empregado na cominuição de parte do rejeito da flotação industrial.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 9: Vista interna do moinho de bolas utilizado na cominuição de parte do rejeito industrial.



Fonte: O autor, 2023.

Após a moagem, secou-se a 100 °C o produto moído em estufa, em seguida este foi desaglomerado e quarteado utilizando um quarteador tipo Jones, obtendo alíquotas de 100 gramas para emprego nos testes de separação magnética de baixo campo.

Uma alíquota de 200 gramas deste produto moído foi enviada para análise granuloquímica entre as malhas de 32 mesh (500 μm) a 500 mesh (25 μm).

3.2 Caracterização da amostra de rejeito

A amostra de rejeito coletada, foi analisada em um equipamento de fluorescência de raios X Axios da marca Panalytical para determinação dos óxidos. Em termos de caracterização granulométrica esta foi peneirada a úmido entre as séries de peneiras de 16 mesh (1000 μm) a 500 mesh (25 μm). A análise mineralógica, foi realizada no laboratório LCT via microscópio eletrônico de varredura (MEV) no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.3 Separação magnética de baixo campo

Para a realização da separação magnética de baixo campo, visando a remoção da magnetita, um mineral ferromagnético, preparou-se uma polpa com concentração de sólidos em peso de 10%. Portanto, para cada alíquota de 500 gramas foram adicionados 5 litros de água. A repolpagem foi realizada para a amostra sem moagem (denominada aqui de “Tal Qual”) e para a amostra moída. Utilizando um ímã de ferrite de barion, de intensidade conhecida através de leitura de um *Gaussmeter* da série TLMP-HALL fabricado pela Global Mag, conforme apresentado na Figura 10, fez-se a separação do produto magnético aderido ao ímã.

Figura 10: *Gaussmeter* empregado para a terminação do campo magnético do ímã de mão utilizado na separação magnética de baixo campo.



Fonte: O autor, 2023.

Fez-se a remoção do magnético, com auxílio de um saco plástico sobre a superfície do ímã e mantendo em suspensão a polpa, através do emprego contínuo uma colher para revolvimento manual dos sólidos mantendo-os em suspensão na polpa. Quando se identifica a não coleta de material pelo ímã de mão, finaliza-se o processo. Geralmente em torno de 10 passadas do ímã pela polpa foram suficientes para a remoção do magnético.

Conforme apresentado na Figura 11, o magnético coletado pelo ímã de baixo campo foi transferido para uma bandeja e direcionado para secagem em estufa a 100 °C. Após a secagem, este foi pesado e enviado para análise de fluorescência de raios X.

Figura 11: Produto magnético removido do baixo campo.



Fonte: O autor, 2023.

3.4 Separação magnética de alto campo

A separação magnética de alto campo foi realizada a partir do produto não magnéticos do rejeito moído e sem moagem (rejeito *scavenger* Tal Qual), obtidos na separação magnética de baixo campo. Os testes foram realizados seguindo o planejamento fatorial 2^3 com ponto central. Este fatorial contemplando 3 variáveis em dois níveis, sendo duas delas quantitativas: percentagem de sólidos e volume água de lavagem e uma qualitativa, presença de moagem.

O planejamento fatorial gerado via *software* Minitab 21, apresentado na Tabela 1, contempla os testes considerando 2 níveis para percentual de sólidos na polpa na alimentação da separação magnética de alto campo, sendo o nível inferior de 20% e o superior de 40%, volume de água de lavagem, 250 mL e 500 mL e a variável qualitativa com moagem e sem moagem do rejeito da flotação. Os testes foram executados em ordem aleatória com massa em cada batelada em torno de 90 gramas e o campo magnético foi mantido constante em 10.430 Gauss, valor este definido como a máxima capacidade do equipamento. Os pontos centrais foram determinados através da média do volume de água (375 mL) e do percentual de sólidos (30%). Ao todo são 10 pontos centrais, sendo: 5 testes realizados com material não magnético de baixo campo moído e 5 com material não magnético de baixo campo sem moagem.

Tabela 1: Planejamento fatorial testes de bancada separação magnética de alto campo.

Ordem	Ordem	Ponto		Com ou sem	(%) de Sólidos	Água de
Pad	Ens	Central	Blocos	moagem	em peso na	Lavagem
					polpa	(cm ³)
9	1	0	1	Sem	30	375
14	2	0	1	Com	30	375
2	3	1	1	Com	20	250
12	4	0	1	Com	30	375
8	5	1	1	Com	40	500
6	6	1	1	Com	20	500
1	7	1	1	Sem	20	250
3	8	1	1	Sem	40	250
5	9	1	1	Sem	20	500
4	10	1	1	Com	40	250
17	11	0	1	Sem	30	375
15	12	0	1	Sem	30	375
10	13	0	1	Com	30	375
18	14	0	1	Com	30	375
13	15	0	1	Sem	30	375
16	16	0	1	Com	30	375
7	17	1	1	Sem	40	500
11	18	0	1	Sem	30	375

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 12, apresenta o separador magnético de alto campo do Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG de Araxá, empregado nos testes de batelada de separação magnética de alto campo. O modelo deste equipamento é L4, fabricado pela empresa Inbras.

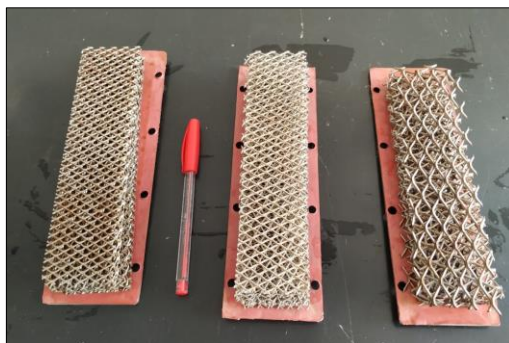
Figura 12: Separador Magnético de alto campo Inbras.



Fonte: O autor, 2024.

Primeiramente, ajustou-se a corrente do equipamento para 22 A para o alcance do campo magnético de 10.430 Gauss. Esse campo magnético é fixo e foi empregado em todos os testes. Alimentou-se a polpa no cone de alimentação do equipamento, com o campo magnético ligado, na parte inferior da matriz do separador, colocou-se um balde para a coleta da fração não magnética, sendo que a fração ferromagnética ficou retida na matriz do equipamento. A matriz empregada foi a 12B, apresentada na Figura 13, a terceira da esquerda para a direita. Esta foi empregada no teste de alto campo, devido a granulometria do minério e aos testes exploratórios realizados.

Figura 13: Matriz separação magnética de alto campo.



Fonte: O autor, 2024.

Concluída a alimentação do equipamento, adicionou-se a água de lavagem e em seguida removeu-se o balde contendo a fração não magnética e colocou-se um novo balde para a coleta da fração magnética que ficou aprisionada na matriz magnética. Posteriormente, desligou-se o campo magnético e adicionou-se água em abundância, visando descarregar a fração magnética retida na matriz do equipamento.

Após a realização dos testes de separação magnética de alto campo, realizou-se a secagem dos produtos em estufa, com temperatura constante de 100 °C. Posteriormente, os produtos foram pesados e enviados para análise de teores por fluorescência de raios-X.

3.5 Concentração do magnético de baixo campo em mesa oscilatória

A Figura 14 apresenta a mesa oscilatória do laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG Araxá, utilizada nos testes de concentração do produto magnético de baixo campo.

Figura 14: Mesa oscilatória utilizada no processo de concentração do magnético de baixo campo.



Fonte: O autor, 2024.

Os valores dos seguintes parâmetros foram mantidos constantes durante os testes: a taxa de alimentação, que foi controlada por meio do alimentador vibratório de calha, operando a uma frequência de 12 hertz; a vazão de água de lavagem; a frequência e a amplitude de oscilação da mesa. O ângulo de inclinação da mesa utilizado nesses testes foi fixo em 3°, um valor determinado a partir de testes exploratórios prévios, com o objetivo de otimizar as condições de separação e garantir a eficiência do processo de concentração.

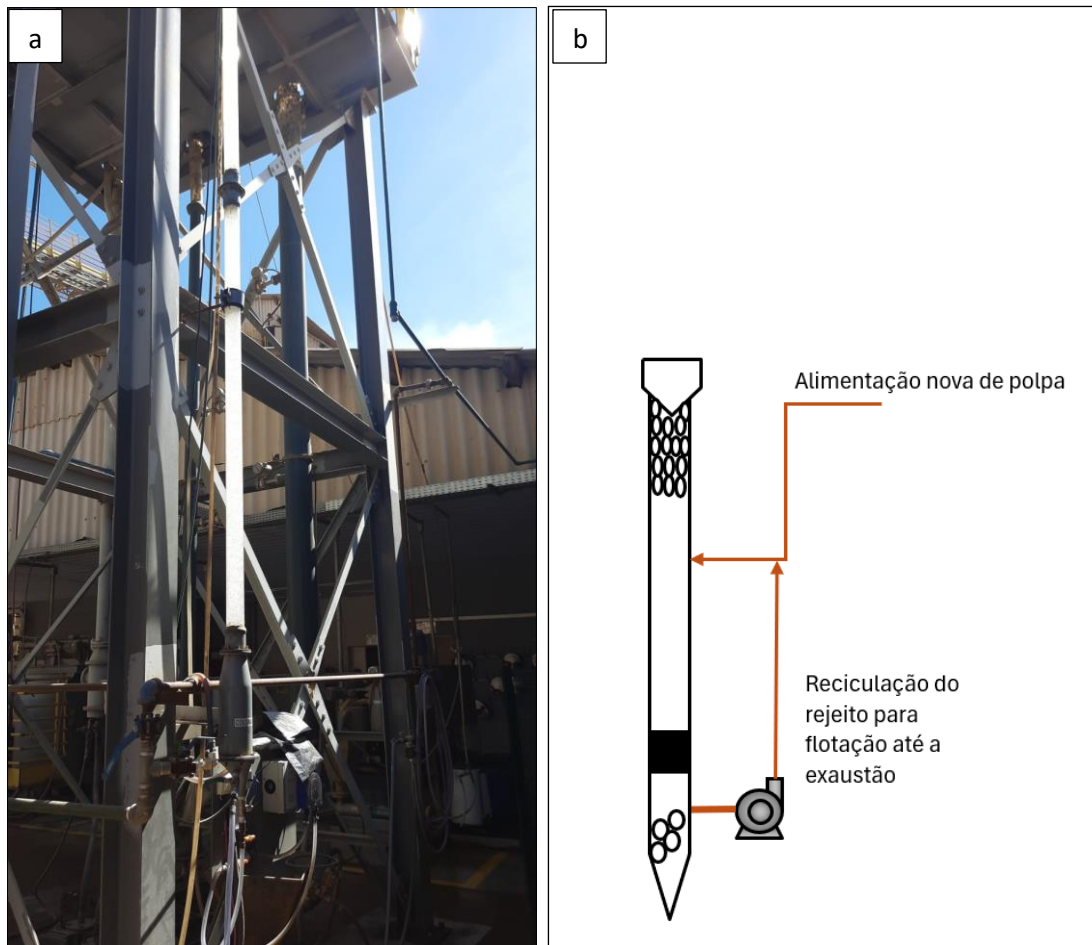
Em cada batelada, processou-se cerca de 1,5 kg de material, previamente homogeneizada. Transferiu-se este para o alimentador vibratório, posteriormente, com auxílio de um clinômetro,

ajustou-se a inclinação da mesa em 3°, em seguida, ajustou-se o fluxo de água de lavagem e de diluição, utilizando um rotâmetro conectado à saída da mangueira. Posteriormente, ajustou-se a alimentação do equipamento, assim que a superfície da mesa estava completamente coberta pela água, entrando em regime operacional, os produtos gerados foram coletados durante 180 segundos para determinação de massa. Simultaneamente, amostras dos produtos denso, leve e intermediário foram coletadas com o auxílio de bandejas e um cronômetro digital. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 100 °C e analisadas por fluorescência de raios X para determinação dos teores.

3.6 Flotação do rejeito *scavenger*

A flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado industrialmente, foi realizada em coluna de flotação de dimensões de diâmetro 50 mm por 5,6 metros de altura, conforme apresentada na Figura 15, na empresa localizada em Serra do Salitre, a qual esta amostra foi coletada. O objetivo deste teste é a produção de um concentrado que alcance em torno de 24% de P_2O_5 .

Figura 15: Em (a) coluna de flotação empregada nos testes de batelada e em (b) representação esquemática do sistema de flotação em coluna.



Fonte: O autor, 2024.

Realizou-se os testes seguindo um planejamento fatorial de dois níveis com ponto central, 2^2 , conforme apresentado na Tabela 2. O depressor e o coletor foram as variáveis independentes investigadas nos experimentos. Utilizando o *software* Minitab 21, gerou-se o planejamento fatorial com duplicata nas extremidades e 3 pontos centrais para avaliação do erro experimental e curvatura. Portanto, um total de 11 experimentos, foram executados em sequência aleatória.

Tabela 2: Níveis planejamento fatorial flotação rejeito *scavenger* Tal Qual.

Níveis	Depressor (g/t)	Coletor (g/t)
+1	450	800
0	375	600
-1	300	400

Fonte: Dados da pesquisa.

Após a análise dos resultados, foram realizados mais 4 testes para a avaliação de superfície de resposta (planejamento fatorial estrela) e mais 2 no ponto central, portanto, a configuração de

dosagem para avaliação de coletor e depressor esta apresentada na Tabela 3. No total, após este ajuste, foram realizados 17 testes, visando avaliar a superfície de resposta. Não houve modulação do pH, tendo em vista que industrialmente não é necessário este ajuste.

Tabela 3: Planejamento fatorial para avaliação do depressor e coletor na flotação do rejeito *scavenger*.

Depressor (Nível)	Coletor (Nível)	Depressor (g/t)	Coletor (g/t)
-1,41	0	269	600
1	1	450	800
1,41	0	481	600
0	0	375	600
0	-1,41	375	317
1	-1	450	400
0	1,41	375	883
-1	1	300	800
0	0	375	600
0	0	375	600
1	-1	450	400
0	0	375	600
0	0	375	600
-1	-1	300	400
-1	-1	300	400
1	1	450	800
-1	1	300	800
1	-1	450	400

Fonte: Dados da pesquisa.

Em cada teste de flotação utilizou-se 500 gramas de minério, repolpando-se este a 50% de sólidos em peso, utilizando-se água de processo (a mesma água que é utilizada no processo industrial, sem armazenamento, tal qual é utilizada na planta de beneficiamento). Condicionou-se o depressor por 5 minutos e em seguida o coletor por mais 5 minutos. Posteriormente, a percentagem de sólidos em peso foi ajustada para 14% para a realização da flotação em coluna de batelada.

Os testes de batelada foram executados sem uso do modulador de pH, conforme realiza-se industrialmente e a flotação foi realizada até a exaustão, ou seja, o processo de coleta de concentrado é encerrado quando toda a camada de espuma verte na calha de concentrado, portanto, a flotação é realizada até a exaustão. A Figura 16 apresenta imagens do condicionamento e do flotado sendo descarregado no topo da coluna de flotação.

Figura 16: Em (a) Condicionamento da polpa para realização da flotação de bancada. Em (b) transbordo do flotado na coluna de flotação.



Fonte: O autor, 2024.

Após a realização dos testes de flotação, realizou-se a secagem em estufa a 100 °C do concentrado e do rejeito, pesou-se estas massas e realizou-se as análises químicas, via fluorescência de raios-X.

Para a avaliação da performance, além da análise dos teores de P₂O₅ nos concentrados e rejeitos, foram calculados outros dois indicadores relevantes para a avaliação de um processo de flotação: a recuperação metalúrgica e a recuperação mássica. As fórmulas para o cálculo desses indicadores são apresentadas a seguir.

A recuperação metalúrgica foi calculada de acordo com o descrito na Equação 1:

$$(\%) \text{Recuperação metalúrgica} = \left(\frac{C * c}{A * a} \right) * 100$$

Equação (1)

Na Equação 1, tem-se:

C= Massa de concentrado produzida em (g);

c= Teor do elemento útil no concentrado em %;

A= Massa de minério alimentada em (g);

a= Teor do elemento útil na alimentação em %.

A recuperação mássica foi determinada dividindo-se a massa de concentrado pela massa alimentada no equipamento ou processo, conforme apresentado na Equação 2.

$$(\%) \text{Recuperação mássica} = \left(\frac{C}{A} \right) * 100$$

Equação (2)

3.6.1 Teste de verificação da influência do depressor na resposta da flotação

Visando avaliar a resposta do depressor no processo de flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual, realizou-se cinco testes adicionais de flotação sem o emprego de depressor. Portanto, a flotação foi realizada apenas com 600 g/t de coletor.

Utilizando o *software* Minitab 21, foi realizada a análise estatística dos dados centrais do experimento fatorial (com dosagem de coletor em 600 g/t e depressor em 375 g/t) comparando-os com os 5 testes realizados sem a dosagem do depressor. O objetivo da análise foi avaliar se há diferença significativa na performance do processo de flotação, com base nos indicadores de recuperação metalúrgica e mássica.

O teste de hipótese foi conduzido para verificar se a inclusão ou não do depressor resultaria em uma diferença significativa na performance do processo. A análise foi realizada ao nível de significância de 5%, ou seja, com um valor-p inferior a 0,05 indicando que a diferença observada é estatisticamente significativa.

O teste de hipótese utilizado foi o teste t de duas amostras visando comparar os resultados dos dois grupos (com e sem dosagem de depressor). Caso o valor-p obtido fosse menor que 0,05, rejeitaria-se a hipótese nula de que não há diferença significativa entre os grupos, indicando que o uso do depressor impacta de forma significativa a performance do processo de flotação.

3.7 Flotação do rejeito *scavenger* após separação magnética de baixo campo

Submeteu-se o rejeito da flotação *scavenger* a uma separação magnética de baixo campo, em maior escala, bateladas de 500 gramas repolpados a 10% de sólidos em peso, na qual produziu-se massa suficiente de não magnético para a realização da flotação de apatita. Este produto não magnético foi empilhado em pilha longitudinal, conforme Figura 17, quarteado em alíquotas de 500 gramas para a realização de flotação em coluna.

Figura 17: Pilha alongada de não magnético de baixo campo confeccionada em bancada.



Fonte: O autor, 2024.

O planejamento fatorial estabelecido foi realizado empregando-se os mesmos limites da flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual. A Tabela 4 apresenta os 13 testes gerados através do uso do *software* Minitab 21, para o planejamento fatorial estrela. Os testes foram executados de forma aleatória. Os limites do depressor foram 300 e 450, inferior e superior, respectivamente, com central em 375 g/t. Por outro lado, para o coletor os limites foram 400 e 800 g/t, inferior e superior, respectivamente, com central em 600 g/t. A vantagem destes experimentos em relação aos realizados no rejeito Tal Qual deve-se a menor quantidade, apenas 13 contra 17 realizados anteriormente.

Tabela 4: Planejamento fatorial estrela para teste de flotação de apatita após a realização da separação magnética de baixo campo.

Ordem Padrão	Ordem do Ensaio	Bloco	Depressor Nível	Coletor Nível	Depressor (g/t)	Coletor (g/t)
9	1	1	0	0	375	600
12	2	1	0	0	375	600
3	3	1	-1	1	300	800
5	4	1	-1,41	0	269	600
2	5	1	1	-1	450	400
11	6	1	0	0	375	600
7	7	1	0	-1,41	375	317
13	8	1	0	0	375	600
1	9	1	-1	-1	300	400
6	10	1	1,41	0	481	600
4	11	1	1	1	450	800
10	12	1	0	0	375	600
8	13	1	0	1,41	375	883

Fonte: Dados da pesquisa.

A metodologia de condicionamento e flotação são as mesmas aplicadas para a flotação do rejeito Tal Qual. Os parâmetros de avaliação de performance, teores de indicadores, assim como recuperação metalúrgica e a recuperação mássica também se mantêm para este conjunto de testes.

3.8 Flotação do rejeito *scavenger* após separação magnética de baixo e alto campo

Após a realização da separação magnética de baixo campo, realizou-se a separação magnética de alto campo tomando os melhores parâmetros de processo, determinados no teste fatorial da separação magnética de alto campo. Produziu-se através de bateladas de 100 gramas no separador magnético de alto campo, massa suficiente para alimentar os testes de bancada de flotação de apatita, desta vez, após a separação de baixo e alto campo. O magnético do alto campo foi analisado quimicamente e arquivado para estudo futuro. Secou-se o não magnético em estufa a 100 °C, pesou-se para verificação e avaliação da variação da recuperação mássica das bateladas produzidas.

Posteriormente, o não magnético de alto campo foi empilhado em pilha alongada e quarteado em alíquotas de 500 gramas para a realização de flotação em bancada. O planejamento fatorial estabelecido foi realizado empregando-se os mesmos limites da flotação com o não magnético de baixo campo. A Tabela 5 apresenta os 13 testes gerados pelo Minitab para o planejamento fatorial estrela. Os testes foram executados de forma aleatória.

Tabela 5: Planejamento fatorial estrela para teste de flotação após a realização da separação magnética de baixo campo.

Ordem Padrão	Ordem do Ensaio	Bloco	Depressor Nível	Coletor Nível	Depressor (g/t)	Coletor (g/t)
9	1	1	0	0	375	600
12	2	1	0	0	375	600
3	3	1	-1	1	300	800
5	4	1	-1,41	0	269	600
2	5	1	1	-1	450	400
11	6	1	0	0	375	600
7	7	1	0	-1,41	375	317
13	8	1	0	0	375	600
1	9	1	-1	-1	300	400
6	10	1	1,41	0	481	600
4	11	1	1	1	450	800
10	12	1	0	0	375	600
8	13	1	0	1,41	375	883

Fonte: Dados da pesquisa.

A metodologia de condicionamento e flotação são as mesmas aplicadas para a flotação do rejeito Tal Qual. Os parâmetros de avaliação de performance, teores de indicadores, assim como recuperação metalúrgica e a recuperação mássica também se mantêm para este conjunto de testes.

3.9 Ensaios de flotação de titânio (titanita e perovskita)

A partir deste tópico a flotação passa a ser realizada em célula mecânica devido aos seguintes motivos: 1) a granulometria deste material é ideal para este tipo de equipamento e 2) demonstrada a viabilidade técnica e econômica de flotação do titânio, entende-se que a aquisição de células mecânicas é a decisão que faz mais sentido do ponto de vista de processos.

A alimentação da flotação de titânio é o rejeito da flotação de apatita que anteriormente fora submetido a separação magnética de baixo campo.

Primeiramente foi realizado um teste para avaliar a cinética de flotação do titânio. Para a realização deste teste, separou-se 6 bandejas para a coleta de concentrado a cada 30 segundos. Portanto, coletou-se o concentrado nos tempos de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos. Para este teste utilizou-se pH em 5,5, dosagem de coletor carboxilato de sódio em 450 g/t e uso de 30 g/t de espumante que foi adicionado na água de diluição da flotação.

Posterior a realização do teste de avaliação da cinética de flotação do titânio, realizou-se o teste fatorial, conforme apresentado na Tabela 6, as variáveis e os níveis a serem explorados no planejamento fatorial estrela.

Tabela 6: Níveis planejamento fatorial flotação da titanita.

Níveis	Coletor	
	(g/t)	pH
+1	600	7,5
0	450	5,5
-1	300	3,5

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 7 gerada no *software* Minitab 21 apresenta os 13 testes do planejamento fatorial estrela. Os testes de flotação do titânio foram executados em sequência aleatória.

Tabela 7: Teste Fatorial para avaliação do coletor de titanita.

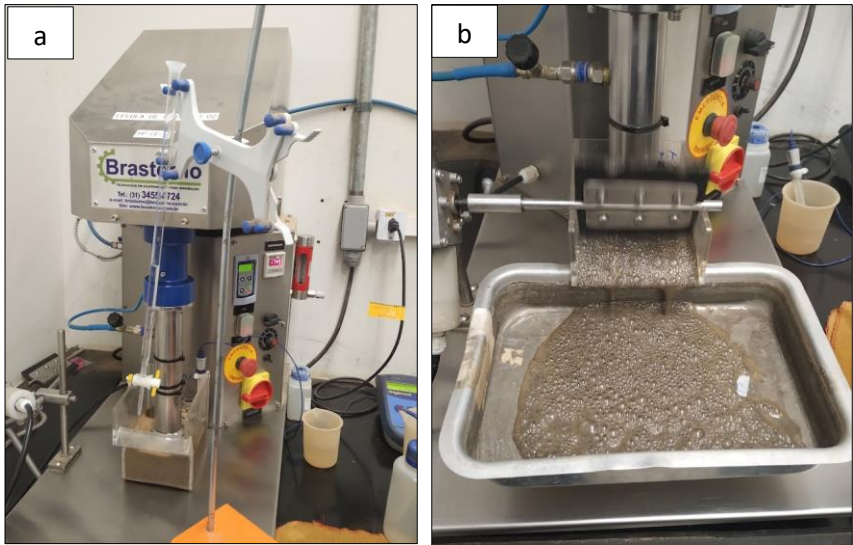
Ordem do Padrão	Ordem do Ensaio	Blocos	Nível Coletor	Nível pH	Coletor g/t	pH
11	1	1	0	0	450	5,50
7	2	1	0	-1,41	450	2,67
12	3	1	0	0	450	5,50
4	4	1	1	1	600	7,50
5	5	1	-1,41	0	238	5,50
13	6	1	0	0	450	5,50
8	7	1	0	1,41	450	8,33
1	8	1	-1	-1	300	3,50
3	9	1	-1	1	300	7,50
6	10	1	1,41	0	662	5,50
9	11	1	0	0	450	5,50
2	12	1	1	-1	600	3,50
10	13	1	0	0	450	5,50

Fonte: Dados da pesquisa.

O coletor empregado nos testes foi o carboxilato de sódio e o ácido fluossilícico como modulador de pH e ativador da superfície. Não foi empregado depressor nestes testes de flotação.

Os testes foram realizados em célula mecânica de bancada, conforme apresentado na Figura 18 (a) e (b).

Figura 18: Em (a) Célula mecânica Brastorno empregada nos testes de flotação de titânio. Em (b) escumadeira automática realizando a descarga do flotado da célula mecânica.



Fonte: O autor, 2024.

Antes da realização dos testes de flotação de titânio fez-se uma pilha alongada com a alimentação da flotação de titânio. A partir desta pilha retirou-se alíquotas de 500 gramas que foram embaladas para serem consumidas em cada um dos testes de flotação.

O teste de bancada foi realizado com água de processo e nesta água foi adicionado 30 g/t de espumante polipropileno glicol metileter fornecido pela empresa Clariant, calculados com base na massa a ser flotada de 500 gramas. Primeiramente, realizou-se o condicionamento da polpa, inserindo as 500 gramas de amostra quarteada em uma cuba de 1000 mL, em seguida adicionou-se 409 gramas de água, ajustando assim a percentagem de sólidos para 55%. Ligou-se o rotor da célula e o ajustou para 1002 rpm. Mediu-se o pH inicial ajustando-o para o valor definido no teste fatorial. Em seguida adicionou-se o coletor carboxilato de sódio deixando a agitação do condicionamento por 5 minutos.

Após o condicionamento iniciou-se a etapa de flotação. Posicionou-se uma bandeja para coleta do concentrado, ajustou-se a espátula da escumadeira, ajustou-se a rotação da célula em 1002 rpm, adicionou-se 400 g de água na polpa diluindo está para 37% sólidos.

Posteriormente, ligou-se a escumadeira e a aeração em 200 NL/h e durante o tempo do teste, que teve como padrão de duração 3 minutos, completou-se o nível da cuba com água, através do uso de uma pisseta, conforme o nível da polpa dentro da célula vai abaixando.

Finalizado o processo de flotação, lavou-se a escumadeira e o rotor de tal forma que não perdesse concentrado ou deixasse resíduos no equipamento que poderia contaminar a próxima batelada.

O concentrado e o rejeito obtidos foram submetidos a um processo de secagem em estufa a 100 °C. Após a secagem, as amostras foram fracionadas utilizando um quarteador do tipo Jones, que proporciona uma divisão homogênea e representativa das amostras para análise. Em seguida, as frações foram enviadas para análise de óxidos, realizada por meio de fluorescência de raios-X (FRX).

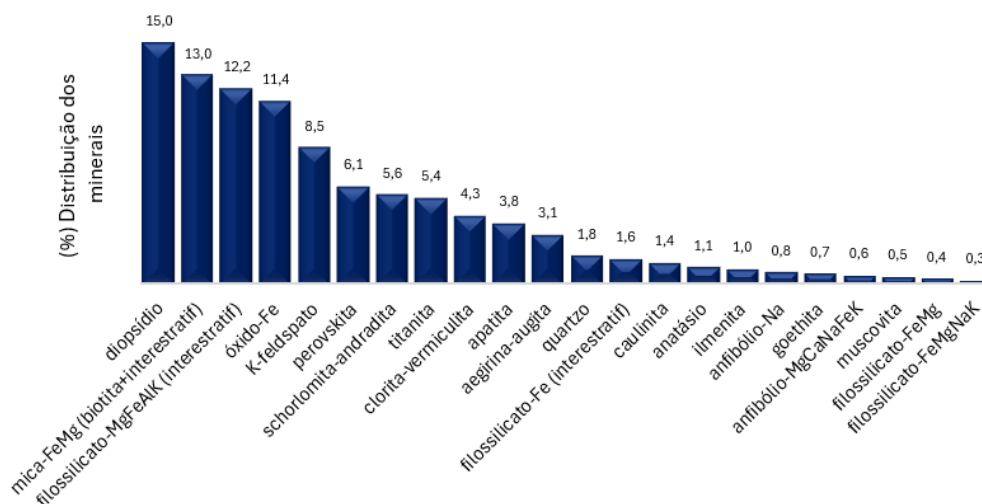
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão organizados de forma sequencial, abrangendo as seguintes etapas: caracterização da amostra, seguida pelos ensaios de moagem, separação magnética de baixo campo, concentração em mesa oscilatória, separação magnética de alto campo e flotação da apatita. A flotação da apatita é apresentada em três condições distintas: (1) a partir do rejeito da flotação *scavenger* tal qual coletado, (2) após o rejeito *scavenger* industrial ter sido submetido à separação magnética de baixo campo e (3) após a separação magnética de baixo e alto campo. Por fim, são apresentados os resultados preliminares do desenvolvimento da flotação de titânio.

4.1 Caracterização mineralógica da amostra

Na Figura 19 é apresentado o gráfico de distribuição da composição mineralógica do rejeito da flotação *scavenger*, obtida via microscópio eletrônico de varredura (MEV) no laboratório de caracterização tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Apêndice 1 apresenta documento na versão completa).

Figura 19: Composição mineralógica - Total $-0,50 + 0,020$ mm (MEV-EDS-MLA).

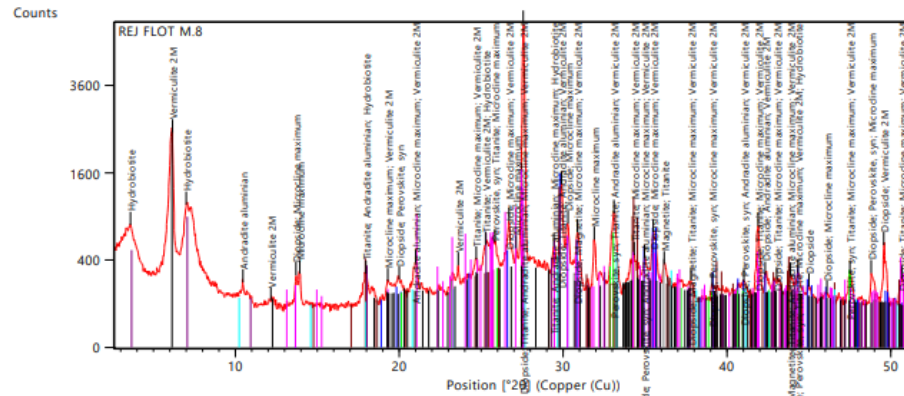


Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 19, destaca-se que o somatório dos elementos identificados revela que as micas correspondem a 30,3% do total, incluindo mica-FeMg (biotita), filossilicato-MgFeAlK, clorita e vermiculita. Além disso, 12,6% são minerais portadores de titânio, sendo 6,1% de perovskita, 5,4% de titanita e 1,1% de anatásio. Por fim, a apatita representa 3,8% do total.

A Figura 20 apresenta o difratograma dos principais minerais identificados na amostra do rejeito da flotação *scavenger*, material prima do presente estudo.

Figura 20: Difratoograma com identificação dos principais minerais.



Obs.: Foram identificados por DRX argilomineral 12-14A e camadas mistas, perovskita, andradita, titanita, K-feldspato, apatita e piroxênio (diopsídio e/ou aegirina-augita).

Fonte: Dados da pesquisa.

A imagem ilustrativa das partículas referentes à fração menor que 500 µm e maior que 150 µm é apresentada na Figura 21, segundo relatório do laboratório de caracterização tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o grau de liberação da apatita em 85% da área ou perímetro exposto é de 54%.

Figura 21: Imagem ilustrativa das partículas classificadas por MEV-EDS-MLA (fração menor que 500 µm e maior que 150 µm).



Fonte: Dados da pesquisa.

4.2 Caracterização granuloquímica da amostra

A Tabela 8 apresenta a distribuição granulométrica do rejeito da flotação *scavenger* de apatita. É interessante notar que a amostra apresenta aproximadamente 44% retido acumulado em 100 *mesh* (150 μm).

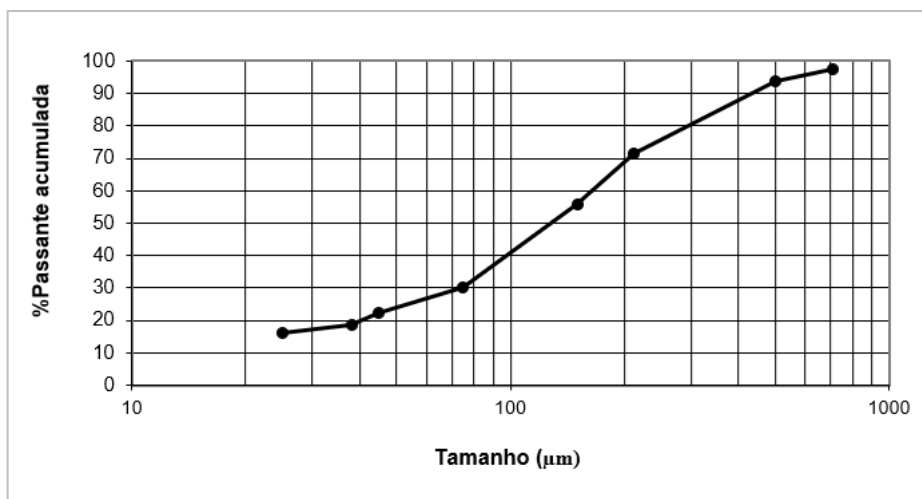
Tabela 8: Análise granulométrica e química do rejeito *scavenger*.

Distribuição granulométrica de P_2O_5						Óxidos por faixa granulométrica							
Mesh (#)	μm	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Dist. P_2O_5	Dist. Acumulada de P_2O_5	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	K_2O
24	710	2,4%	2,4%	2,1%	2,1%	1,86	16,97	9,14	8,32	8,20	38,21	5,41	4,47
32	500	4,0%	6,4%	4,9%	6,9%	2,64	18,79	9,22	10,12	7,41	35,69	6,22	3,90
65	212	22,1%	28,5%	26,7%	33,6%	2,63	21,80	9,30	11,90	6,61	34,16	6,92	3,17
100	150	15,6%	44,1%	17,2%	50,8%	2,39	26,94	8,40	13,46	4,83	31,55	8,24	2,51
200	75	25,6%	69,7%	26,1%	76,9%	2,21	29,25	7,57	13,86	4,24	30,18	9,61	2,26
325	45	7,9%	77,6%	6,9%	83,8%	1,91	31,21	6,32	13,78	3,82	29,74	10,61	2,09
400	38	3,7%	81,3%	3,5%	87,3%	2,05	28,45	6,33	14,84	3,98	30,08	9,95	2,17
500	25	2,6%	83,9%	1,4%	88,6%	1,13	30,03	6,31	12,69	4,11	30,52	9,95	2,11
<500	<25	16,1%	100,0%	11,4%	100,0%	1,53	27,31	6,96	8,69	5,65	33,27	6,96	2,04
Total		100,0%	-	100,0%		2,17	26,36	7,91	12,25	5,26	32,16	8,24	2,56
Teores globais da amostra						2,01	25,49	8,10	12,63	5,44	31,88	8,10	2,73

Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico da Figura 22 apresenta a distribuição granulométrica acumulada por faixa. Nota-se que o P_{80} desta amostra é de 303 μm .

Figura 22: Distribuição granulométrica do rejeito da flotação *scavenger* de apatita.



Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 9 apresenta o gráfico de distribuição dos óxidos por faixa, sendo importante destacar que acima da fração de 100 *mesh* (150 μm) há 50,8% do elemento de interesse, P_2O_5 .

Tabela 9: Distribuição dos óxidos de P_2O_5 , TiO_2 e SiO_2 do rejeito da flotação *scavenger* de apatita.

Mesh (#)	μm	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Dist. P_2O_5 por faixa	Dist. Acumulada de P_2O_5	Dist. TiO_2 por faixa	Dist. Acumulada de TiO_2	Dist. SiO_2 por faixa	Dist. Acumulada de SiO_2
24	710	2,4%	2,4%	2,1%	2,1%	1,6%	1,6%	2,9%	2,9%
32	500	4,0%	6,4%	4,9%	6,9%	3,0%	4,6%	4,4%	7,3%
65	212	22,1%	28,5%	26,7%	33,6%	18,5%	23,1%	23,4%	30,7%
100	150	15,6%	44,1%	17,2%	50,8%	15,6%	38,8%	15,3%	46,1%
200	75	25,6%	69,7%	26,1%	76,9%	29,9%	68,6%	24,0%	70,1%
325	45	7,9%	77,6%	6,9%	83,8%	10,1%	78,8%	7,3%	77,4%
400	38	3,7%	81,3%	3,5%	87,3%	4,4%	83,2%	3,4%	80,8%
500	25	2,6%	83,9%	1,4%	88,6%	3,2%	86,4%	2,5%	83,3%
<500	<25	16,1%	100,0%	11,4%	100,0%	13,6%	100,0%	16,7%	100,0%

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda de acordo com a Tabela 9, tem-se que 46,1% do total de SiO_2 está acima de 100 *mesh* e 38,8% do total de TiO_2 também está acima desta faixa.

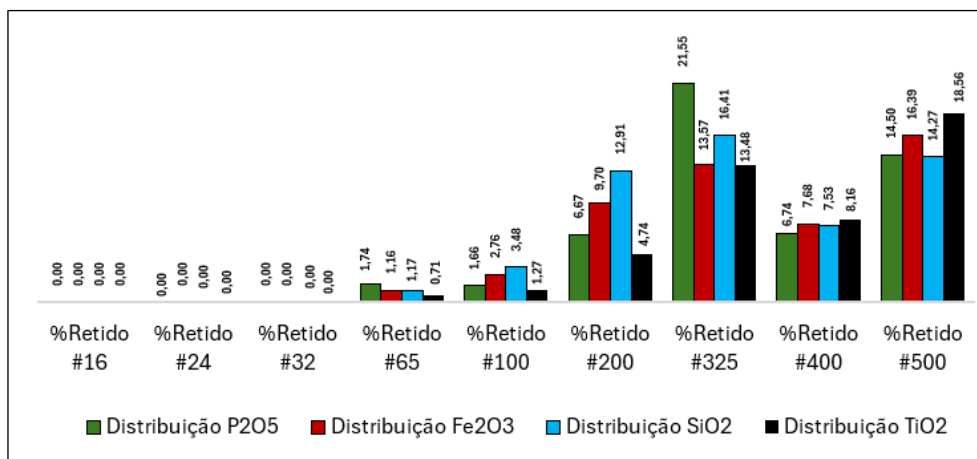
4.3 Moagem da amostra

Segundo *Seifelnassr et al.* (2013), quando a granulometria está abaixo de 150 μm (ou 100 *mesh*) a liberação dos minérios de ferro é superior a 90%. Portanto foi decidido cominuir em moinho de bolas, 6 kg desta amostra de rejeito da flotação *scavenger*, coletada para avaliação comparativa com os testes de separação magnética sem a realização desta etapa de moagem.

Tendo em vista os resultados de distribuição granulométrica, realizou-se a moagem do rejeito visando determinar o tempo adequado de cominuição em que se obtém apenas 5% retido em 100 *mesh* (150 μm).

Com o tempo de moagem de 30 minutos alcançou-se o objetivo de 5,1% retido em 100 *mesh* (150 μm). Outro detalhe importante é a elevação da quantidade de passante em 500 *mesh* (25 μm) que foi de 45%.

No gráfico apresentado na Figura 23, observa-se o deslocamento dos óxidos para as frações mais finas. Analisando o comportamento do titânio, têm-se que antes da moagem 68,6% do TiO_2 estava retido em 200# (*mesh*), após a execução da moagem de trinta minutos, 93% do TiO_2 está abaixo desta granulometria.

Figura 23: Distribuição dos óxidos do produto moído por malha analisada (retido simples).

Fonte: Dados da pesquisa.

4.4 Separação magnética de baixo campo

A separação magnética de baixo campo foi realizada de forma manual utilizando ímãs de ferrite barion com intensidade próxima de 650 Gauss. Inicialmente havia sido planejado aplicar a separação magnética a seco, distribuindo a amostra sobre a bancada e realizando a passagem do ímã sobre esta. Para a amostra sem moer, o processo funcionou de forma satisfatória, com excelente seletividade, no entanto para a aplicação desta metodologia para o minério moído, não foi alcançado separabilidade dinâmica, ou seja, ao passar o ímã sobre amostra moída, grande parte da massa foi deslocada para a superfície do mesmo não demonstrando seletividade.

Visando reverter este problema, foi decidido realizar este processo repolpando o minério a 10% de sólidos em peso, visto que segundo Peres *et al.* (2007), abaixo de 70 μm (200 mesh), o processo de separação magnética recomendado é por via úmida. O minério moído apresenta P_{80} de 67 μm .

A Tabela 10 mostra o teste estatístico de hipótese, para a recuperação mássica da separação magnética de baixo campo. Nota-se que há uma diferença numérica, no entanto apenas a partir de um teste estatístico que se pode afirmar se esta diferença possui relevância em termos estatísticos. Para a amostra que não foi submetida a moagem, refere-se esta como Tal Qual, sendo que ambas foram repolpadas para a realização da separação magnética em via úmida.

Tabela 10: Teste estatístico de hipótese para avaliação da recuperação mássica de magnético. (para análise completa ver Apêndices 2 e 3).

Estatísticas descritivas: (%) Recuperação Mássica			
Método	N	Média	Desv. Padrão
Com Moagem	9	19,33	1,64
Sem Moagem	9	21,92	0,93
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor-T	GL	Valor-p	
-4,12	16	0,001	

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 10, observa-se ao nível de significância de 5% que o processo de separação magnética de baixo campo a úmido da amostra sem a realização de moagem, apresenta maior recuperação mássica de magnético que aquele que foi submetido a moagem.

Por apresentar maior recuperação mássica, o enriquecimento é menor, como pode-se observar na Tabela 11 na qual os teores de Fe_2O_3 no magnético da amostra que foi submetida a moagem atingiu 49,28% e a amostra sem moagem, um valor de 44,64%. Estas diferenças nos teores de Fe_2O_3 são significativas ao nível de significância de 5% e são explicadas pela maior liberação do ferro na amostra moída reduzindo o arraste que aconteceu na amostra sem moagem, que alcançou maior recuperação mássica arrastando partículas mistas.

Tabela 11: Teste estatístico de hipótese para os teores de Fe_2O_3 no magnético de baixo campo. (para análise completa ver Apêndice 4).

Estatísticas descritivas: (%) Fe_2O_3 no magnético			
Método	N	Média	Desv. Padrão
Com Moagem	9	49,28	3,06
Sem Moagem	9	44,64	1,52
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor-T	GL	Valor-p	
4,07	16	0,001	

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 12, está apresentado o teste de estatístico de hipótese, para os teores de TiO_2 no magnético do baixo campo (análise completa ver apêndice 4). Nota-se que a análise comprova que além da diferença numérica, os resultados são estatisticamente diferentes.

Tabela 12: Teste estatístico de hipótese para o teor de TiO_2 no magnético de baixo campo. (Apêndices 5 e 6)

Estatísticas descritivas: (%) TiO_2 no magnético			
Método	N	Média	Desv. Padrão
Com Moagem	9	6,68	0,181
Sem Moagem	9	9,98	0,304
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor-T	GL	Valor-p	
-27,6	16	0,001	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 13 apresenta o resultado do teste ANOVA para os teores de P_2O_5 no magnético, sendo que a amostra do rejeito *scavenger* foi submetida a separação magnética de baixo campo que foi moída e apresentou recuperação mássica de 19,71% e teor de P_2O_5 de 1,14%. Por outro lado, a amostra sem moagem processada via úmida, apresentou recuperação mássica de 21,92% e teor de P_2O_5 de 1,75%. Estas diferenças nos teores de P_2O_5 são significativas ao nível de significância de 5%, e decorrem do fato de que a separação magnética de baixo campo na amostra Tal Qual arrastou mais massa e mais partículas mistas obtendo um magnético com menor teor de Fe_2O_3 e maiores teores de P_2O_5 e TiO_2 .

Tabela 13: Teste de hipótese para os teores de P_2O_5 presentes no magnético de baixo campo. (Apêndice 7).

Estatísticas descritivas: (%) P_2O_5 no magnético			
Método	N	Média	Desv. Padrão
Com Moagem	9	1,12	0,08
Sem Moagem	9	1,76	0,12
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor-T	GL	Valor-p	
-13,09	16	0,001	

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 14 apresenta os resultados sumarizados obtidos na separação magnética de baixo campo.

Tabela 14: Resumo dos resultados obtidos com a separação magnética de baixo campo.

Método	Teores da Alim Sep Mag Baixo Campo			Teores do magnético de baixo campo			(%) Recuperação Mássica para o Magnético	Teores do não magnético de baixo campo		
	(%) P_2O_5	(%) TiO_2	(%) Fe_2O_3	(%) P_2O_5	(%) TiO_2	(%) Fe_2O_3		(%) P_2O_5	(%) TiO_2	(%) Fe_2O_3
Com moagem	2,01	8,10	25,49	1,12	6,68	49,28	19,33	2,25	8,54	20,20
Sem moagem	2,01	8,10	25,49	1,76	9,98	44,64	21,92	2,12	7,73	20,62

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme apresentado na Tabela 14, o teor mais elevado de Fe_2O_3 no magnético foi alcançado com a separação magnética com a moagem resultando um produto magnético com menor teor de P_2O_5 , de apenas 1,12% e Fe_2O_3 de 49,28%. O não magnético da amostra moída e da amostra sem a moagem foram encaminhados para a realização da separação magnética de alto campo, que será abordada no próximo tópico. Por outro lado, o magnético gerado pelas amostras sem moagem foram encaminhados para serem processados na mesa oscilatória visando enriquecê-los.

O teor de Fe_2O_3 na alimentação da separação magnética de baixo campo foi de 25,49%, após a realização desta etapa, o teor obtido no não magnético foi reduzido para valores em torno de 20% de Fe_2O_3 .

4.5 Separação magnética de alto campo

A partir do não magnético obtido na separação magnética de baixo campo, realizou-se a separação magnética de alto campo, visando comparar a performance da amostra não magnética moída contra a amostra não magnética sem a realização de moagem. Os testes fatoriais, 2^3 foram realizados de forma aleatória. As variáveis contínuas observadas foram: percentual de sólidos e volume de água de lavagem e a variável qualitativa é a realização ou não de moagem, ou seja, amostra não magnética de baixo campo moída e sem a realização de moagem. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos na realização deste fatorial.

Tabela 15: Resultados do teste fatorial de separação magnética de alto campo.

Ordem	Ordem	Presença de	(%) Sólidos	Água de	(%) Rec.	(%) Rec.	Fe_2O_3	Fe_2O_3 Não	TiO_2	TiO_2
Padrão	Ensaio	Moagem	na polpa	Lavagem (mL)	Mássica Não Magnético	Mássica Magnético	magnético	Magnético	Magnético	Magnético
9	1	Sem	30	375	92,1	7,9	27,0	14,8	11,2	7,9
14	2	Com	30	375	97,0	3,0	36,9	15,7	8,4	8,5
2	3	Com	20	250	96,0	4,0	35,8	15,7	8,6	8,5
12	4	Com	30	375	96,2	3,8	35,5	15,8	8,5	8,6
8	5	Com	40	500	96,3	3,7	35,4	15,8	8,5	8,6
6	6	Com	20	500	96,0	4,0	38,3	15,7	8,7	8,6
1	7	Sem	20	250	88,5	11,5	23,8	14,9	10,2	7,9
3	8	Sem	40	250	89,9	10,1	25,5	14,8	10,1	7,9
5	9	Sem	20	500	91,8	8,2	26,9	14,9	10,9	8,0
4	10	Com	40	250	96,0	4,0	34,1	15,8	8,4	8,5
17	11	Sem	30	375	89,9	10,1	25,3	14,8	10,7	8,1
15	12	Sem	30	375	90,6	9,4	25,9	14,9	10,8	8,0
10	13	Com	30	375	95,1	4,9	31,7	15,7	8,5	8,6
18	14	Com	30	375	95,7	4,3	34,1	15,7	8,5	8,6
13	15	Sem	30	375	90,3	9,7	25,5	14,8	10,7	8,1
16	16	Com	30	375	96,4	3,6	34,3	15,8	8,9	8,6
7	17	Sem	40	500	92,8	7,2	28,6	15,1	11,3	8,1
11	18	Sem	30	375	92,8	7,2	27,1	14,9	10,3	8,1

Fonte: Dados da pesquisa.

4.5.1 Recuperação mássica do produto magnético de alto campo

A partir dos dados experimentais obtidos, realizou-se a análise deste utilizando o *software* Minitab 21. Primeiramente, foi verificado se apresentavam comportamento que segue uma distribuição normal e foi realizado o teste de igualdade de variância. Na Tabela 16 é apresentado a análise estatística deste experimento para a recuperação mássica do magnético. Observa-se que foi obtido um R^2 de predição de 78,52% e o R^2 ajustado de 88,31%. Essas são, métricas estatísticas muito importantes para avaliar a qualidade dos modelos e a sua capacidade de predição. Além disso, pode-se observar que o fator A (com e sem moagem da amostra) explica 85,78% da variabilidade da resposta recuperação mássica do magnético e que o fator C (volume de água de lavagem em mL) é responsável por explicar 3,63% da variabilidade da resposta recuperação mássica, apesar deste estar próximo do limite de rejeição (*p-value* encontrado de 0,047), para ser considerado relevante para o modelo ao nível de significância de 5%. O fator B, percentagem de sólidos em peso da polpa, não apresenta contribuição significativa ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* obtido foi de 0,362 na faixa avaliada no estudo.

Tabela 16: Análise estatística do experimento para a resposta recuperação mássica. (Apêndice 8).

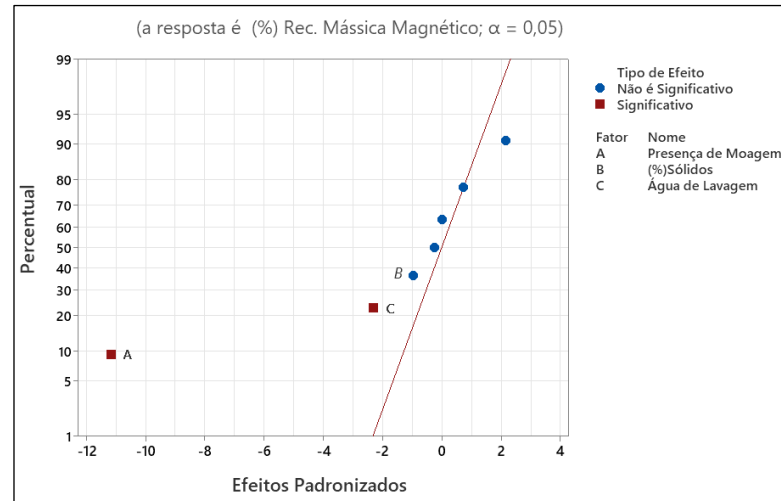
Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	88,31%	78,52%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	8	93,81%	0,000
Linear	3	90,04%	0,000
A: Presença de moagem	1	85,78%	0,000
B: (%) de sólidos em peso	1	0,63%	0,362
C: volume de água de lavagem	1	3,63%	0,047
Interações de 2 fatores	3	3,61%	0,226
A*B	1	0,36%	0,485
A*C	1	3,24%	0,058
B*C	1	0,00%	0,989
Interações de 3 fatores	1	0,04%	0,823
A*B*C	1	0,04%	0,823
Curvatura	1	0,12%	0,680
Erro	9	6,19%	
Falta de ajuste	1	0,11%	0,711
Erro puro	8	6,08%	
Total	17	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda na Tabela 16, pode-se observar que o erro aleatório contribui com 6,19% na construção do modelo, no entanto a falta de ajuste não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,711.

A Figura 24 apresenta o gráfico normal dos efeitos padronizados, no qual nota-se que os fatores A e C impactam em reduzir a resposta do experimento. Ou seja, a moagem e o aumento no volume de água de lavagem diminuem a recuperação mássica.

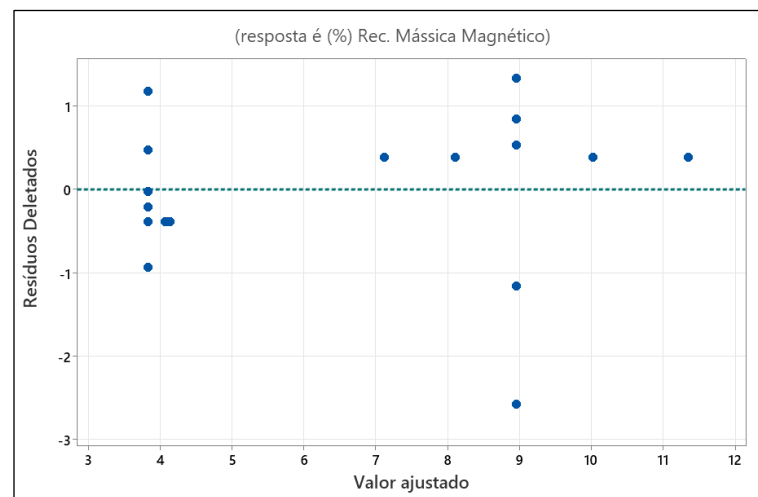
Figura 24: Gráfico normal dos efeitos padronizados.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 25 são apresentados os resíduos deletados, nota-se que o comportamento destes é aleatorizado como não há padrão na disposição destes.

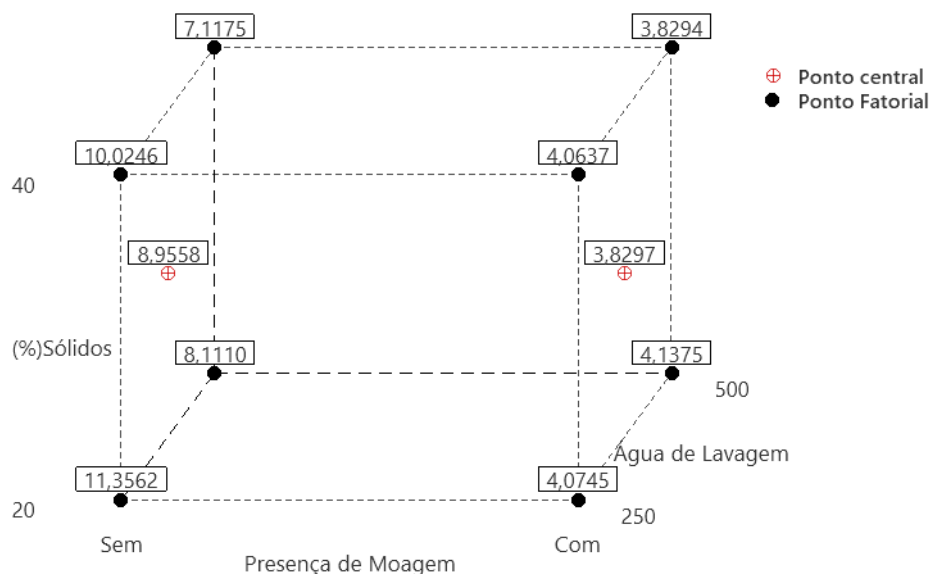
Figura 25: Resíduos deletados versus valor ajustado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 26 é apresentado o gráfico de cubo representando os resultados da recuperação mássica de magnético. Para o Fator A observa-se a maior recuperação mássica de magnético sem a realização de moagem. Ainda neste cubo, observa-se menor diferença nas informações no eixo B, percentagem de sólidos e no eixo do fator C, quantidade de água de lavagem.

Figura 26: Gráfico de cubo da recuperação mássica de magnético da separação magnética de alto campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 26 nota-se que sem a realização de moagem, maior é a recuperação mássica e que o percentual de sólidos não apresenta influência na resposta do experimento.

4.5.2 Teor de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo

O teor médio de Fe_2O_3 no magnético de alto campo obtido foi de 25,90% para os testes sem moagem e 34,80% para os testes com o material moído.

Observa-se na Tabela 17 que foi obtido um R^2 de predição de 35,93% e o R^2 ajustado de 90,74%. Além disso, pode-se afirmar que o fator A (com e sem moagem da amostra), contribui com 89,21% da variabilidade da resposta do teor de Fe_2O_3 no produto magnético e que o fator B, percentagem de sólidos não apresenta relevância para a construção do modelo, ao nível de significância de 5%. O Fator C, quantidade de água de lavagem, apresenta contribuição de 3,04% na construção do modelo.

Ainda na Tabela 17, pode-se observar que o erro aleatório contribui com apenas 4,90% na construção do modelo e a falta de ajuste não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,369, dando confiabilidade ao modelo.

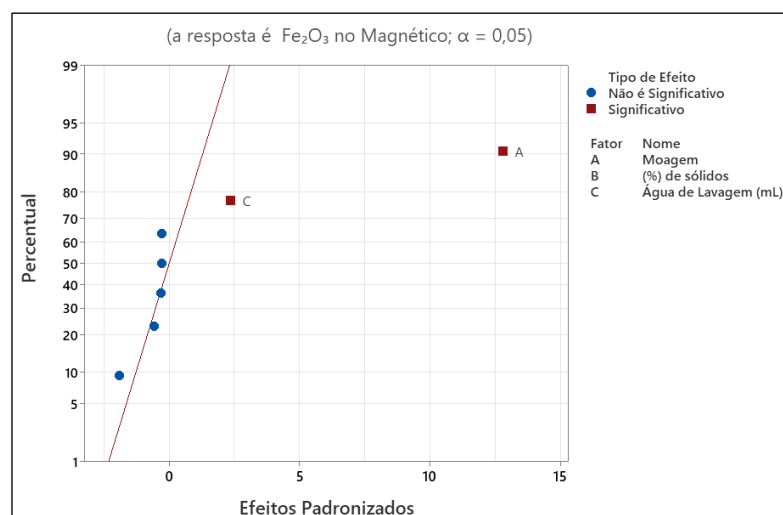
Tabela 17: Análise estatística do experimento para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo. (Apêndice 9).

Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	90,74%	35,93%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	8	95,10%	0,000
Linear	3	92,29%	0,000
A: Presença de moagem	1	89,21%	0,000
B: (%) de sólidos em peso	1	0,04%	0,786
C: volume de água de lavagem	1	3,04%	0,042
Interações de 2 fatores	3	2,21%	0,318
A*B	1	1,98%	0,089
A*C	1	0,19%	0,570
B*C	1	0,04%	0,786
Interações de 3 fatores	1	0,05%	0,765
A*B*C	1	0,05%	0,765
Curvatura	1	0,54%	0,345
Erro	9	4,90%	
Falta de ajuste	1	0,50%	0,369
Erro puro	8	4,40%	
Total	17	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

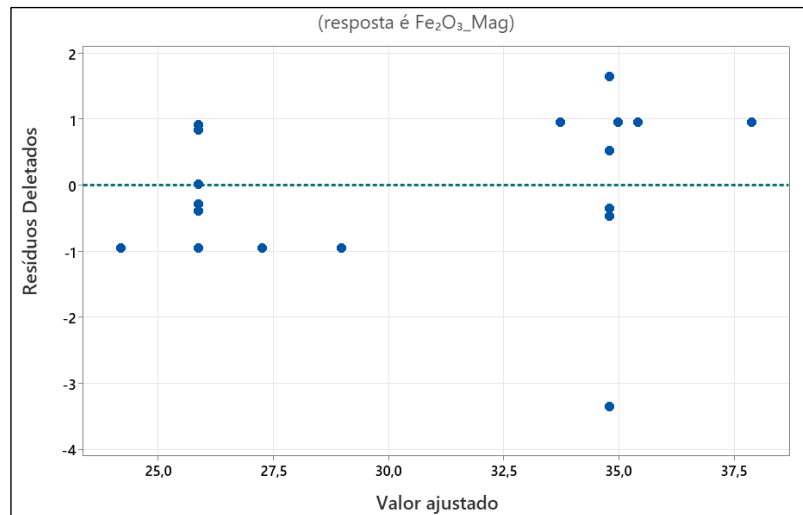
A Figura 27 mostra o gráfico normal dos efeitos padronizados. Nota-se que os fatores A e C apresentam efeitos em aumentar a resposta do experimento, ou seja, a moagem e a água de lavagem aumentam o teor de Fe_2O_3 no magnético de alto campo, tendo em vista que o teor de Fe_2O_3 no magnético moído foi em média de 25,87% e por outro lado, um teor de 34,80% de Fe_2O_3 foi obtido no magnético sem a realização de moagem.

Figura 27: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto magnético.



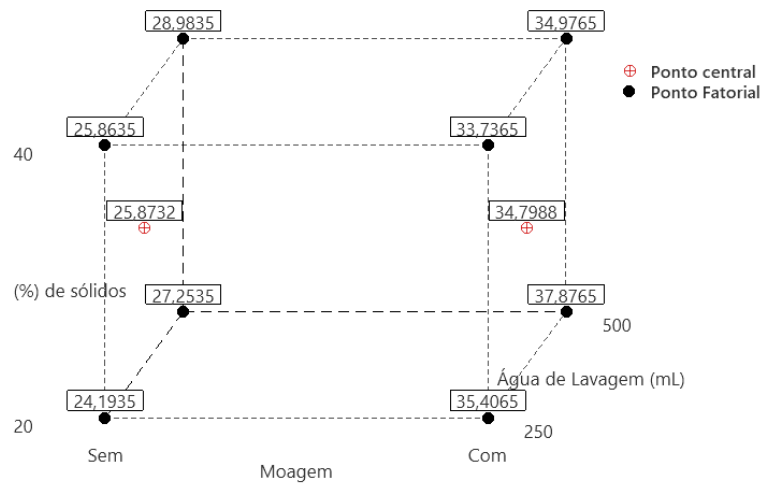
Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 28 é apresentado os resíduos deletados, na qual nota-se que o comportamento destes é aleatorizado.

Figura 28: Resíduos deletados versus valor ajustado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 29 é apresentado o gráfico de cubo dos resultados de teores de Fe_2O_3 no produto magnético obtidos na separação magnética de alto campo.

Figura 29: Gráfico de cubo dos teores de Fe_2O_3 obtidos no produto magnético de alto campo.

Fonte: Dados da pesquisa.

Com relação ao fator presença de moagem, observa-se menores teores de Fe_2O_3 no produto magnético sem a aplicação da moagem. Avaliando o fator percentagem de sólidos, não se observa variações relevantes nos resultados da resposta do teor de Fe_2O_3 no magnético, por fim observando o eixo da água de lavagem, observa-se evolução na qualidade dos teores de Fe_2O_3 do magnético com o aumento da água de lavagem, tanto para o processo realizado com o minério moído quanto sem moagem.

4.5.3 Recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo

O objetivo da separação magnética de alto campo é recuperar o máximo de conteúdo de Fe_2O_3 para o produto magnético. Conforme abordado no primeiro tópico deste capítulo, a maior recuperação mássica obtida foi sem a realização de moagem. No entanto no tópico anterior foi demonstrado que a moagem do minério contribuiu de forma significativa para a obtenção de um magnético com maior teor de Fe_2O_3 . Neste tópico será avaliado qual a configuração apresenta maior recuperação metalúrgica de Fe_2O_3 .

Observa-se na Tabela 18 que foi obtido um R^2 de predição de 90,42% e o R^2 ajustado de 87,39% para os resultados de recuperação metalúrgica de Fe_2O_3 no produto magnético.

Pode-se afirmar que o fator A (com e sem moagem da amostra), contribui com 87,02% da variabilidade da resposta de recuperação metalúrgica de Fe_2O_3 e que os fatores B e C, percentagem de sólidos e quantidade de água de lavagem, respectivamente, não apresentam relevância para a construção do modelo, ao nível de significância de 5%.

Tabela 18: Análise estatística do experimento para a resposta recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo. (Apêndice 10).

R^2 (aj)	R^2 pred		
87,39%	90,42%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	8	93,33%	0,000
Linear	3	90,04%	0,000
A: Presença de moagem	1	87,02%	0,000
B: (%) de sólidos em peso	1	0,80%	0,325
C: volume de água de lavagem	1	2,22%	0,118
Interações de 2 fatores	3	2,93%	0,329
A*B	1	0,00%	0,945
A*C	1	2,87%	0,081
B*C	1	0,05%	0,794
Interações de 3 fatores	1	0,03%	0,848
A*B*C	1	0,03%	0,848
Curvatura	1	0,33%	0,521
Erro	9	6,67%	
Falta de ajuste	1	0,00%	0,963
Erro puro	8	6,67%	
Total	17	100,0%	

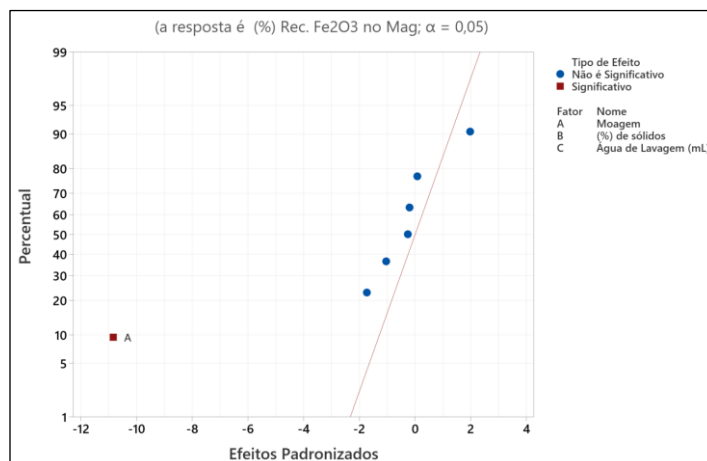
Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda na Tabela 18, pode-se observar que o erro aleatório contribui com apenas 6,67% na construção do modelo e a falta de ajuste não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,963 dando confiabilidade ao modelo.

Na Figura 30 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados. Nota-se que o fator A, presença ou não de moagem, apresenta efeito em reduzir a resposta do experimento, ou seja, a

moagem reduz a recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de alto campo, tendo em vista que a média de recuperação metalúrgica de Fe_2O_3 no magnético moído foi de 8,12% e por outro lado, sem a realização de moagem, esta recuperação média foi de 14,63%.

Figura 30: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético.

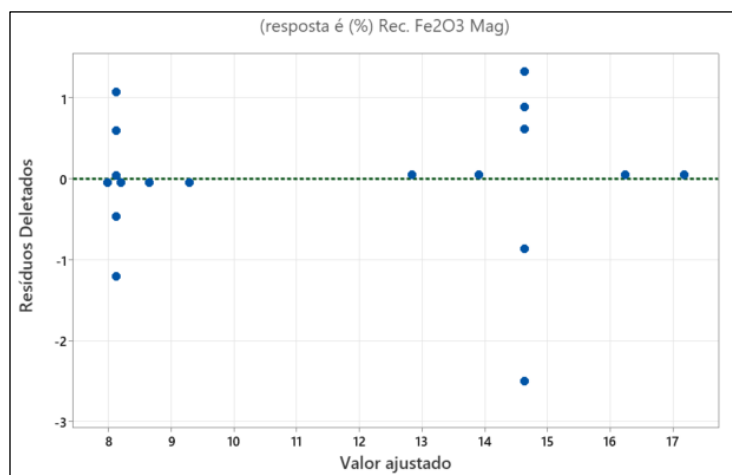


Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 31 é apresentado os resíduos deletados, na qual nota-se que o comportamento destes é aleatorizado. A Figura 32 exibe o gráfico de cubo dos resultados de recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético obtidos na separação magnética de alto campo.

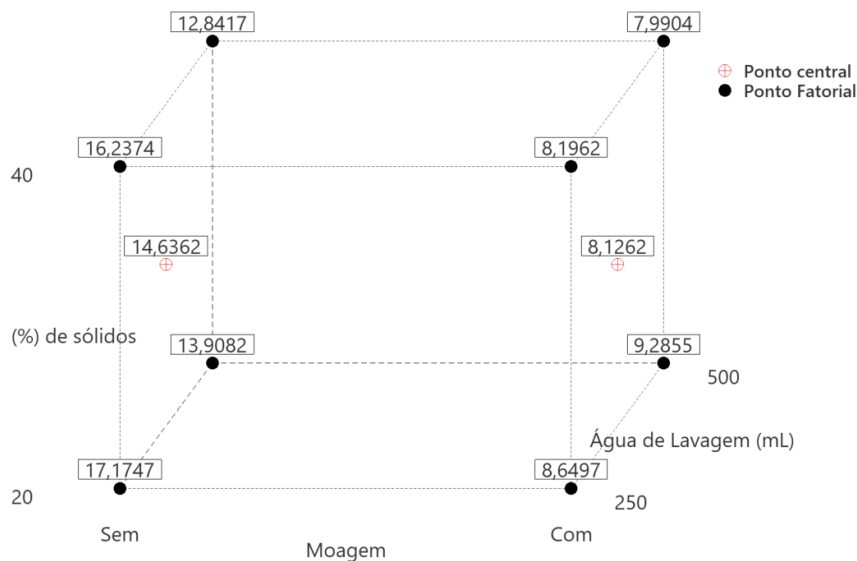
Com relação ao fator presença de moagem, observa-se menores recuperações de Fe_2O_3 no produto magnético com a aplicação da moagem. Nos tópicos anteriores a recuperação mássica de magnético foi maior na configuração sem a realização de moagem, e o teor de Fe_2O_3 obtido no produto magnético foi maior com a realização da moagem.

Figura 31: Resíduos deletados versus valor ajustado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 32: Gráfico de cubo da recuperação de Fe_2O_3 obtidos no produto magnético de alto campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

No balanço entre estes dois indicadores, recuperação mássica e teor de Fe_2O_3 no magnético, tem-se que a recuperação metalúrgica é maior sem a realização da moagem. Isso indica que há maior eficiência desta etapa sem a realização de moagem, tendo em vista que uma quantidade maior de contaminante será removida do processo e não estará presente na alimentação da flotação de apatita após a separação magnética de baixo e alto campo.

4.5.4 Teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo

A separação magnética de alto campo tem o objetivo de remover os minerais paramagnéticos, neste caso, os hidróxidos de ferro, visando aumentar a eficiência da flotação de apatita. Portanto, quanto menos óxido de ferro alimentar a flotação, menos massa inerte haverá, ou seja, menos minerais de ganga irão consumir reagente e maior será o teor de P_2O_5 que alimenta esta etapa. A Tabela 19 mostra a análise estatística deste experimento para o teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo.

Observa-se que foi obtido um R^2 de predição de 82,43% e o R^2 ajustado de 98,04%. Além disso, pode-se observar que o fator A (com e sem moagem da amostra), contribui com 96,98% da variabilidade da resposta do teor de Fe_2O_3 no produto não magnético e que os fatores B e C, respectivamente, percentagem de sólidos e volume de água de lavagem não apresentam relevância para a construção do modelo, ao nível de significância de 5%.

Tabela 19: Análise estatística do experimento para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo. (Apêndice 11).

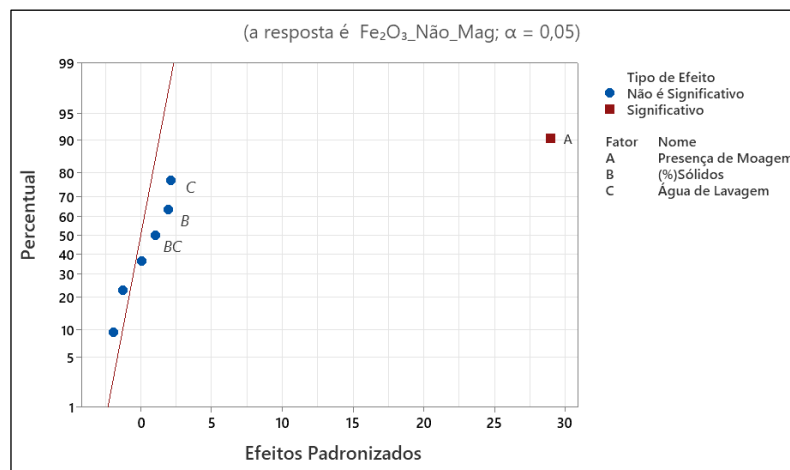
Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	98,04%	82,43%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	8	98,96%	0,000
Linear	3	97,93%	0,000
A: Presença de moagem	1	96,98%	0,000
B: (%) de sólidos em peso	1	0,43%	0,087
C: volume de água de lavagem	1	0,53%	0,061
Interações de 2 fatores	3	0,31%	0,480
A*B	1	0,00%	0,957
A*C	1	0,18%	0,238
B*C	1	0,13%	0,324
Interações de 3 fatores	1	0,43%	0,087
A*B*C	1	0,43%	0,087
Curvatura	1	0,29%	0,145
Erro	9	1,04%	
Falta de ajuste	1	0,14%	0,295
Erro puro	8	0,90%	
Total	17	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda na Tabela 19, pode-se observar que o erro aleatório contribui com apenas 0,14% na construção do modelo e a falta de ajuste não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,295, dando confiabilidade para os resultados.

Na Figura 33 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados. Nota-se que o fator A apresenta efeito em aumentar a resposta do experimento, ou seja, a moagem aumentou o teor de Fe_2O_3 no não magnético de alto campo, tendo em vista que o teor de Fe_2O_3 no não magnético moído foi de 15,84% e por outro lado, um teor de 14,86% de Fe_2O_3 foi obtido no não magnético sem a realização de moagem.

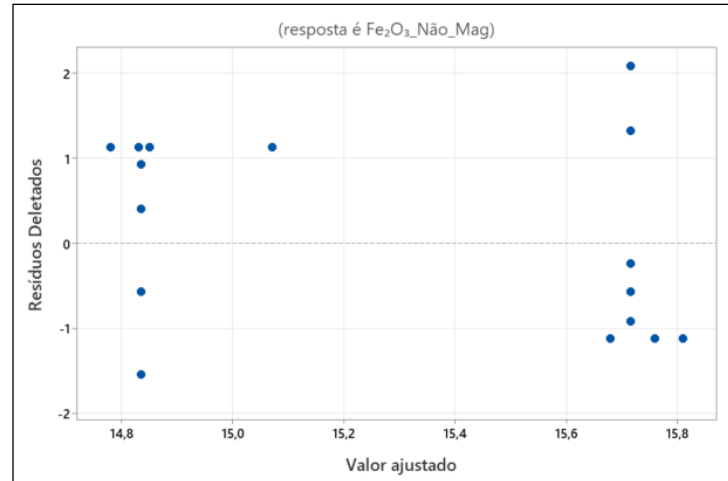
Figura 33: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto não magnético que irá alimentar a etapa de flotação.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 34 são apresentados os resíduos deletados, na qual nota-se que o comportamento destes é aleatorizado.

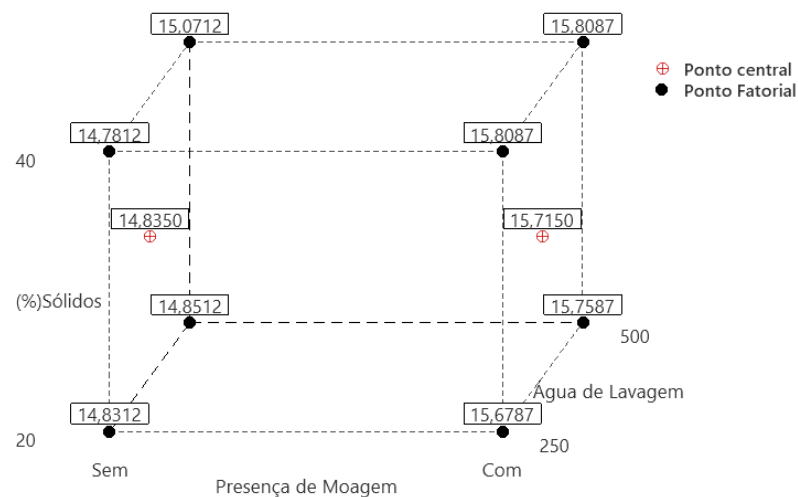
Figura 34: Resíduos deletados versus valor ajustado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 35 é apresentado o gráfico de cubo dos resultados de teores de Fe_2O_3 no produto não magnético obtidos na separação magnética de alto campo.

Figura 35: Gráfico de cubo dos teores de Fe_2O_3 obtidos no produto não magnético de alto campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Com relação ao fator presença de moagem, observa-se menores teores de Fe_2O_3 no produto não magnético sem a aplicação da moagem. Por outro lado, em relação aos fatores, percentagem de sólidos e volume de água de lavagem, não se observa variações relevantes nos resultados da resposta de teor de Fe_2O_3 do não magnético. Portanto, a configuração que enviará menor teor de Fe_2O_3 para a flotação de apatita é a sem a necessidade de moagem.

O teor de Fe_2O_3 que alimentou esta etapa de separação magnética de alto campo foi em média de 20,40%. Com a realização da separação magnética de alto campo, este teor foi reduzido para a média de 14,84% nos testes cujo material não foi moído e para 15,72% em média o teor de Fe_2O_3 para o material que passou pela moagem. Em ambos os casos são reduções significativas de conteúdo de contaminante, o que contribui para o melhor desempenho da etapa seguinte, neste caso a flotação de apatita.

4.5.5 Teor de (TiO_2) no magnético de alto campo

O titânio também é um alvo desta pesquisa, foi verificado, através dos resultados obtidos na fluorescência de raios X que o teor de TiO_2 no magnético é consideravelmente maior que no produto não magnético. Pode-se observar na Tabela 20, a estatística deste experimento para o teor de TiO_2 no magnético de alto campo. Observa-se que foi obtido um R^2 de predição de 92,48 % e o R^2 ajustado de 98,84%. Além disso, pode-se observar que o fator A (com e sem moagem da amostra), contribui com 92,47% da variabilidade da resposta do teor de TiO_2 no produto magnético deste experimento e que o fator B, percentagem de sólidos, não apresenta relevância para a construção do modelo ao nível de significância de 5%. O fator B, apresenta *p-value* obtido de 0,843, por outro lado, o fator C, volume de água de lavagem, apresenta *p-value* de 0,021, contribuindo com 2,35% na explicação na variabilidade de resposta do modelo. A interação AC também é relevante para o modelo.

Tabela 20: Análise estatística do experimento para a resposta teor de TiO_2 no produto não magnético de alto campo. (Apêndice 12).

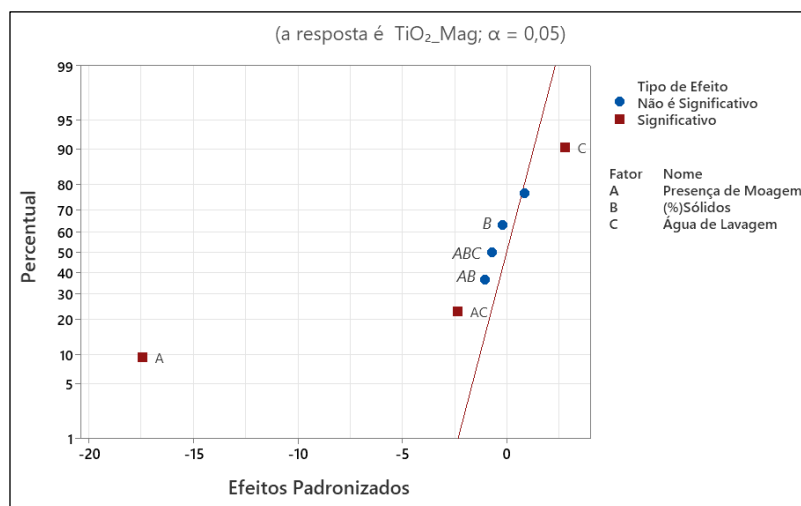
Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	98,84%	92,48%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	8	97,27%	0,000
Linear	3	94,83%	0,000
A: Presença de moagem	1	92,47%	0,000
B: (%) de sólidos em peso	1	0,01%	0,843
C: volume de água de lavagem	1	2,35%	0,021
Interações de 2 fatores	3	2,23%	0,131
A*B	1	0,33%	0,323
A*C	1	1,68%	0,043
B*C	1	0,22%	0,415
Interações de 3 fatores	1	0,15%	0,506
A*B*C	1	0,15%	0,506
Curvatura	1	0,06%	0,660
Erro	9	2,73%	
Falta de ajuste	1	0,03%	0,765
Erro puro	8	2,70%	
Total	17	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Ainda na Tabela 20, pode-se observar que o erro aleatório contribui com apenas 2,73% na construção do modelo e a falta de ajuste não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,765.

A Figura 36 ilustra o gráfico normal dos efeitos padronizados, neste nota-se que o fator A apresenta efeito em reduzir a resposta do experimento, o fator C, água de lavagem aumenta a resposta do experimento ao sair do nível inferior para o nível superior avaliado, o teor de TiO_2 no magnético aumenta com o aumento da água de lavagem. Ou seja, com a moagem o teor médio de TiO_2 no magnético foi de 8,54% e sem a realização da moagem o teor médio de TiO_2 no magnético foi de 10,72%.

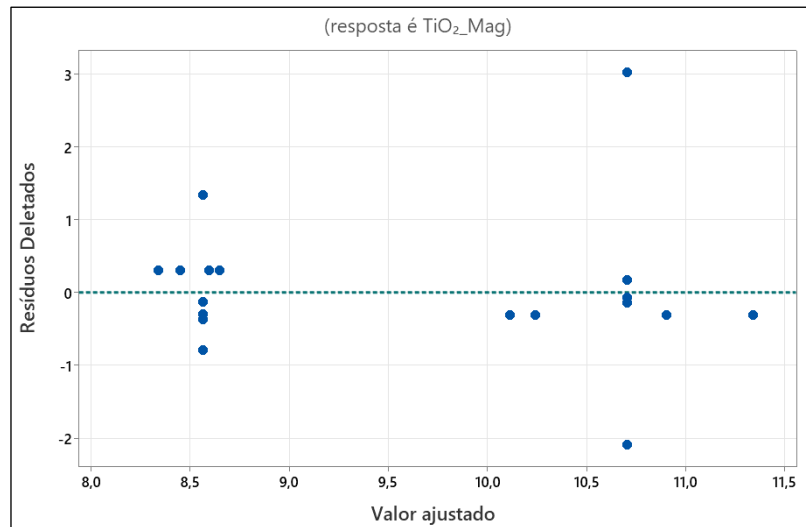
Figura 36: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a resposta teor de TiO_2 no produto magnético de alto campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

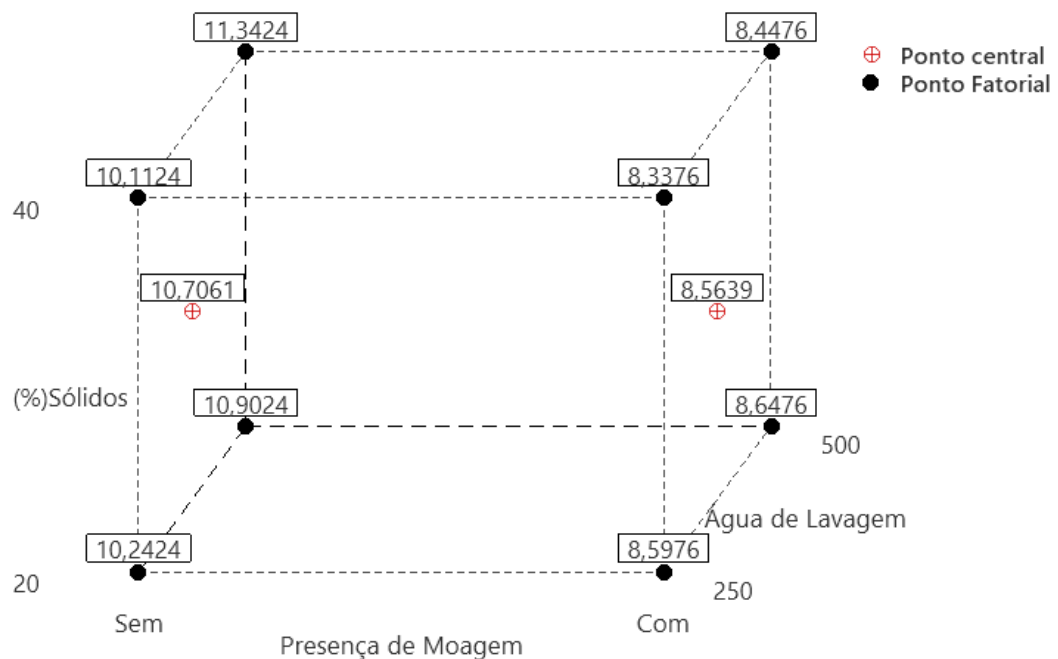
A interação AC (presença de moagem com água de lavagem) tende a reduzir a resposta de TiO_2 no magnético, no entanto nota-se que a água de lavagem aumenta a resposta do titânio no magnético e a moagem reduz esta resposta, logo a interação entre essas duas variáveis predomina-se a presença de moagem.

Na Figura 37 são apresentados os resíduos deletados, cujo comportamento é aleatório.

Figura 37: Resíduos deletados versus valor ajustado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 38 é apresentado o gráfico de cubo dos resultados de teores de TiO_2 no produto magnético obtidos neste experimento.

Figura 38: Gráfico de cubo dos teores de TiO_2 obtidos no produto magnético de alto campo.

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se menores teores de TiO_2 no produto magnético com a aplicação da moagem. No eixo do fator percentagem de sólidos, não se observa variações com o aumento do percentual de

sólidos. No entanto no eixo do fator de água de lavagem, observa-se variações relevantes nos resultados. Há aumento no teor de TiO_2 no magnético com o aumento da quantidade de água de lavagem.

Observado estes resultados, foi decidido preparar o não magnético do alto campo para a flotação de apatita utilizando o maior percentual de sólidos, 40%, o máximo volume de água de lavagem e sem a realização de moagem. Foram produzidos 8 kg de não magnético de alto campo e gerados 600 gramas de magnético, esse não magnético de alto campo foi encaminhado para flotação de coluna em bancada para avaliação de produção de um coproduto (concentrado de baixo teor de P_2O_5).

O magnético de alto campo foi arquivado para estudo futuro tendo em vista que o teor de TiO_2 deste foi elevado de 8,64% para um teor médio de 10,71%, sem a necessidade de moagem.

4.6 Concentração em mesa oscilatória

A partir do magnético de baixo campo, alimentou-se a mesa oscilatória, visando obter um concentrado denso de magnetita e um leve predominantemente constituído por micas e outros minerais de baixa densidade. A Tabela 21 apresenta os resultados da análise química, realizada em duplicata do magnético de baixo campo.

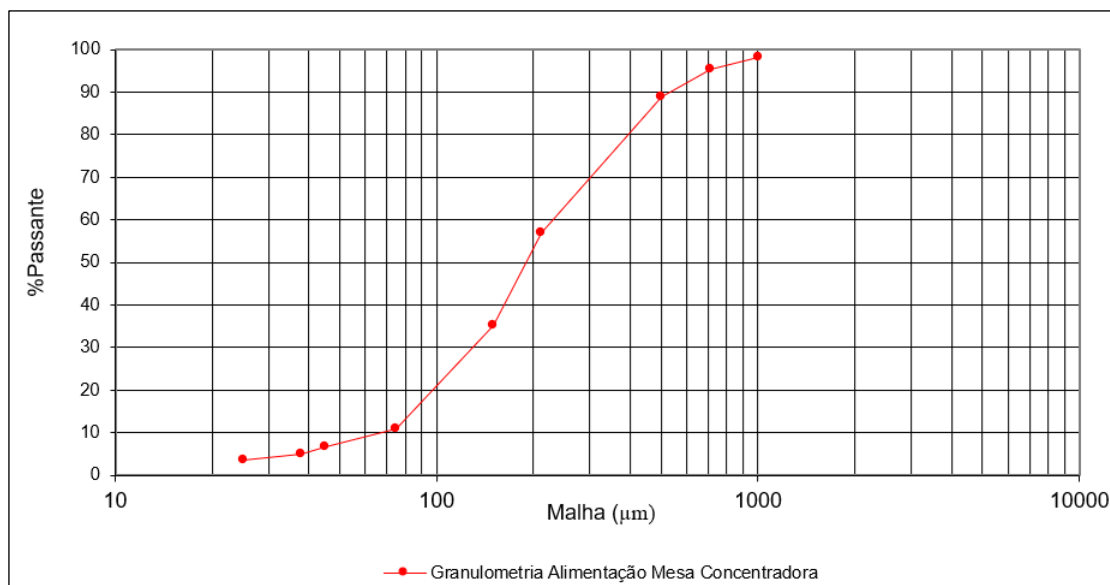
Tabela 21: Análise química alimentação mesa oscilatória.

Item	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	P_2O_5	SiO_2	TiO_2
Análise Amostra 1	1,38	6,69	59,09	0,48	2,9	0,52	1,28	13,05	9,99
Análise Amostra 2	1,30	6,74	59,32	0,47	2,93	0,52	1,25	12,97	10,01
Média	1,34	6,72	59,21	0,48	2,93	0,52	1,27	13,01	10,00

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 39 apresenta a curva granulométrica do magnético de baixo campo que alimenta a mesa oscilatória. O P_{80} desta amostra de alimentação da mesa é 407 μm , por outro lado, o P_{80} da amostra rejeito flotação *scavenger* Tal Qual é 303 μm , portanto, a separação magnética de baixo campo recuperou as partículas mais grossas.

Figura 39: Curva granulométrica de alimentação da mesa concentradora em comparativo com a curva do rejeito da flotação Tal Qual coletado (amostra inicial do trabalho).



Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 22 apresenta a distribuição granuloquímica da alimentação da mesa oscilatória. Nesta nota-se que o retido acumulado em 100 *mesh* (150 μm) é de 68% e que 63,5% do Fe_2O_3 está acima desta granulometria.

Tabela 22: Distribuição granuloquímica da alimentação da mesa oscilatória.

Distribuição granulométrica e de Fe_2O_3						Óxidos por faixa					
Abertura em Mesh (#)	Abertura em μm	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Dist. Fe_2O_3 por faixa	Dist. Acum. de Fe_2O_3	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	SiO_2	TiO_2
16	1000	1,6%	1,6%	1,7%	1,7%	0,91	60,63	1,36	4,08	11,71	9,50
24	710	2,5%	4,2%	2,3%	4,0%	1,57	52,81	2,53	6,23	13,22	11,52
32	500	6,8%	10,9%	5,8%	9,9%	1,75	49,97	3,29	7,23	14,15	11,72
65	210	34,8%	45,7%	31,0%	40,8%	1,52	51,59	3,56	6,99	14,28	10,49
100	147	22,3%	68,0%	22,7%	63,5%	0,97	58,89	2,95	5,62	12,42	9,26
200	74	22,1%	90,1%	24,7%	88,2%	0,59	64,81	2,35	4,63	10,47	8,32
325	45	4,0%	94,2%	5,2%	93,4%	0,35	74,26	1,51	2,83	7,09	6,72
400	37	1,8%	96,0%	2,0%	95,4%	0,82	63,61	2,36	4,62	11,50	7,65
500	25	1,1%	97,0%	1,4%	96,8%	0,36	78,86	1,07	2,13	5,00	6,00
<500	<25	3,0%	100,0%	3,2%	100,0%	0,75	62,38	2,78	2,69	13,98	5,76
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	1,10	57,95	2,92	5,72	12,50	9,44

Fonte: Dados da pesquisa.

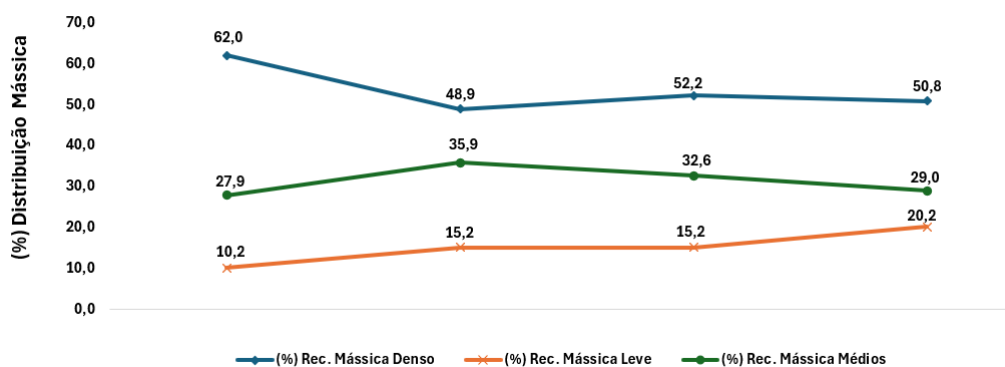
Na Tabela 23 estão apresentados os resultados do processo de concentração em mesa oscilatória. Os resultados apresentados referem-se a cinco coletas distintas dos produtos da mesa em que foram mantidas as condições de operação, visando o entendimento da repetibilidade dos resultados obtidos nesse equipamento.

Tabela 23: Resultados preliminares do processo de concentração na mesa oscilatória.

Alimentação da mesa oscilatória								
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
1,38	6,69	59,09	0,48	2,93	0,52	1,28	13,05	9,99
1,30	6,74	59,32	0,47	2,93	0,52	1,25	12,97	10,01
Produto Leve								
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
4,57	8,29	29,88	1,81	6,11	0,35	2,51	29,21	7,90
3,70	8,53	35,27	1,43	5,48	0,38	2,45	25,86	8,96
4,05	8,55	32,42	1,57	5,82	0,37	2,43	27,68	8,60
3,73	8,89	33,01	1,49	5,46	0,37	2,53	26,60	9,16
Produto Denso								
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
0,40	6,34	67,20	1,49	2,01	0,56	0,87	8,22	10,92
0,33	5,64	70,09	0,06	1,80	5,85	0,69	7,14	10,52
0,35	5,72	69,42	0,09	1,86	0,58	0,77	7,51	10,42
0,40	5,80	69,24	0,10	1,89	0,58	0,80	7,56	10,46
Produto Intermediário								
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
1,22	6,49	60,59	0,49	2,93	0,53	1,40	12,95	9,34
0,97	6,61	61,80	0,38	2,74	0,54	1,37	11,91	9,65
1,11	6,98	59,76	0,43	2,92	0,53	1,49	12,81	9,89
1,06	7,24	59,45	0,39	2,89	0,53	1,58	12,53	10,38

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos apresentaram potencial de emprego da mesa oscilatória, mas precisam ser otimizados. O Fe₂O₃ enriqueceu de 59,21% para em média 68,99% ainda longe da meta de 92%. O gráfico da Figura 40 apresenta os resultados de distribuição mássica dos produtos obtidos na mesa, a saber o denso, leve e intermediário.

Figura 40: Gráfico de distribuição de massa das bateladas na mesa oscilatória.

Fonte: Dados da pesquisa.

O processo ainda precisa de otimização, pois os intermediários estão representando 30% de massa que não está sendo processada, seguindo por um curto-circuito (*by pass*) e não apresentam nenhum enriquecimento em relação a alimentação do equipamento.

4.7 Flotação

Avaliando o rejeito da flotação industrial *scavenger*, a primeira proposta foi realizar a concentração por flotação com o objetivo de produzir um concentrado de fosfato com teor em torno de 24% de P_2O_5 . Este concentrado teria uma aplicação alternativa à convencional, como, por exemplo, um remineralizador ou, ainda, na produção de fertilizantes a partir de um concentrado de menor teor de P_2O_5 , como o superfosfato simples (SSP).

Os tópicos a seguir abordam os resultados dos testes fatoriais da flotação aniônica direta de apatita, com foco na produção de um concentrado secundário de fosfato. O primeiro tópico trata da flotação de apatita Tal Qual, utilizando o rejeito *scavenger* coletado industrialmente, sem nenhum tratamento ou preparação prévia, apenas o condicionamento necessário.

O segundo tópico foca na flotação de apatita após a separação magnética de baixo campo via úmida (650 Gauss).

O terceiro tópico explora a aplicação de separação magnética de baixo e alto campo sobre o rejeito da flotação *scavenger* de apatita.

A partir da avaliação dos resultados dessas três rotas de concentração de apatita, será determinada a alternativa mais interessante para a produção deste coproduto, que será denominado concentrado fosfático de baixo teor de P_2O_5 .

4.7.1 Flotação de apatita a partir do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado industrialmente

A Tabela 24 apresenta a distribuição granulométrica e química por faixa da alimentação dos testes de flotação de apatita em bancada. Nota-se que 50,8% do P_2O_5 está acima de 100 mesh (150 μm).

Tabela 24: análise granulométrica do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado em campo (alimentação flotação de apatita para a produção de um coproduto).

Distribuição granulométrica de P_2O_5						Óxidos por faixa granulométrica							
Mesh (#)	μm	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Dist. P_2O_5	Dist. Acumulada de P_2O_5	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	K_2O
24	710	2,4%	2,4%	2,1%	2,1%	1,86	16,97	9,14	8,32	8,20	38,21	5,41	4,47
32	500	4,0%	6,4%	4,9%	6,9%	2,64	18,79	9,22	10,12	7,41	35,69	6,22	3,90
65	212	22,1%	28,5%	26,7%	33,6%	2,63	21,80	9,30	11,90	6,61	34,16	6,92	3,17
100	150	15,6%	44,1%	17,2%	50,8%	2,39	26,94	8,40	13,46	4,83	31,55	8,24	2,51
200	75	25,6%	69,7%	26,1%	76,9%	2,21	29,25	7,57	13,86	4,24	30,18	9,61	2,26
325	45	7,9%	77,6%	6,9%	83,8%	1,91	31,21	6,32	13,78	3,82	29,74	10,61	2,09
400	38	3,7%	81,3%	3,5%	87,3%	2,05	28,45	6,33	14,84	3,98	30,08	9,95	2,17
500	25	2,6%	83,9%	1,4%	88,6%	1,13	30,03	6,31	12,69	4,11	30,52	9,95	2,11
<500	<25	16,1%	100,0%	11,4%	100,0%	1,53	27,31	6,96	8,69	5,65	33,27	6,96	2,04
Total		100,0%	-	100,0%		2,17	26,36	7,91	12,25	5,26	32,16	8,24	2,56
Teores globais da amostra						2,01	25,49	8,10	12,63	5,44	31,88	8,10	2,73

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 25 apresenta os resultados obtidos a partir do teste fatorial 2^2 aplicado ao rejeito Tal Qual coletado na flotação *scavenger* industrial. A dosagem do coletor foi testada entre 400 e 800g/t, níveis inferior e superior, respectivamente, o ponto central em 600g/t. Por outro lado, a dosagem de depressor testada esteve entre 300g/t e 450g/t sendo que o ponto central foi de 375g/t. Foram realizados 17 testes, sendo 5 pontos centrais e 4 pontos axiais para a aplicação da metodologia de superfície de resposta. Os testes foram realizados em ordem aleatória.

Tabela 25: Resultados obtidos a partir dos testes de flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado na planta de beneficiamento.

Nível Depressor	Nível Coletor	Depressor (g/t)	Coletor (g/t)	(%) Rec. Mássica	(%) Rec. P2O5	P_2O_5 _CF	Fe_2O_3 _CF	SiO_2 _CF	TiO_2 _CF	P_2O_5 _Rej	Fe_2O_3 _Rej	SiO_2 _Rej	TiO_2 _Rej
-1,41	0	269	600	17,90	56,20	6,19	24,60	21,67	13,69	1,05	24,46	33,66	7,06
1	1	450	800	15,80	53,30	6,93	18,88	21,65	15,12	1,14	17,77	36,26	7,61
1,41	0	481	600	11,30	54,80	9,39	18,82	20,97	12,60	0,99	26,19	32,51	7,72
0	0	375	600	10,20	48,50	9,87	15,59	21,16	13,55	1,19	18,50	35,11	8,32
0	-1,41	375	317	2,60	31,80	23,38	8,11	13,70	5,15	1,36	27,14	31,31	8,42
1	-1	450	400	2,70	31,90	24,79	6,54	12,83	3,81	1,47	18,48	34,72	8,86
0	1,41	375	883	21,70	59,20	5,34	25,25	22,08	13,86	1,02	23,30	34,45	6,49
-1	1	300	800	21,00	54,80	5,34	19,27	24,21	14,71	1,17	17,89	36,36	7,28
0	0	375	600	9,20	46,80	10,18	15,55	20,06	13,93	1,17	18,31	35,50	8,34
0	0	375	600	7,60	45,70	11,97	14,34	19,31	12,98	1,17	18,79	35,26	8,79
0	0	375	600	13,40	52,70	7,54	23,37	20,60	13,53	1,05	25,34	32,93	7,41
0	0	375	600	11,90	54,50	8,67	21,74	19,98	13,14	0,98	26,43	32,36	7,66
-1	-1	300	400	3,40	37,20	22,66	7,60	13,92	4,60	1,36	18,68	34,58	9,06
-1	-1	300	400	3,30	35,80	21,94	7,91	14,26	4,86	1,35	18,64	34,76	9,26
1	1	450	800	16,50	53,10	6,42	19,16	22,06	15,38	1,12	18,47	36,33	8,00
-1	1	300	800	22,30	57,40	5,30	20,25	23,20	15,04	1,13	17,85	36,85	7,17
1	-1	450	400	2,60	30,00	24,73	6,46	12,82	3,71	1,56	18,49	34,81	9,05

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 25 observa-se que a meta de produção de um concentrado de 24% de P_2O_5 foi alcançada nas seguintes configurações: (1) dosagem de depressor em 375g/t, coletor em 317g/t; (2) com depressor em 450g/t, coletor em 400g/t; e (3) depressor em 300g/t; coletor em 400g/t com repetibilidade das repostas. A recuperação de P_2O_5 ao atingir a meta de 24% de P_2O_5 ficou entre 30% e 32% e a mássica de 2,6% a 2,7%.

4.7.1.1 Recuperação mássica a partir do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado industrialmente

A resposta de recuperação mássica desta flotação obtida a partir do teste fatorial variou entre 2,6% e 22,30%. A Tabela 26 apresenta o relatório de análise estatística. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 92,03% e o R^2 de predição foi de 86,01%. Observa-se ainda na Tabela 26 que o fator coletor contribuiu com 86,53% na variabilidade da recuperação mássica e que o depressor contribuiu com 5,0% na variabilidade da resposta deste experimento. Observa-se também que a interação entre coletor e depressor não apresenta significância ao nível de 5%, pois o *p-value* desta interação foi de 0,114.

Tabela 26: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial da flotação Tal Qual rejeito coletado. (Apêndice 13).

Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	92,03%	86,01%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	94,52%	0,000
Linear	2	91,53%	0,000
Depressor	1	5,00%	0,009
Coletor	1	86,53%	0,000
Quadrado	2	1,52%	0,260
Depressor*Depressor	1	1,52%	0,109
Coletor*Coletor	1	0,00%	0,959
Interação com 2 Fatores	1	1,47%	0,114
Depressor*Coletor	1	1,47%	0,114
Erro	11	5,48%	
Falta de ajuste	3	2,69%	0,126
Erro puro	8	2,79%	
Total	16	100,0%	

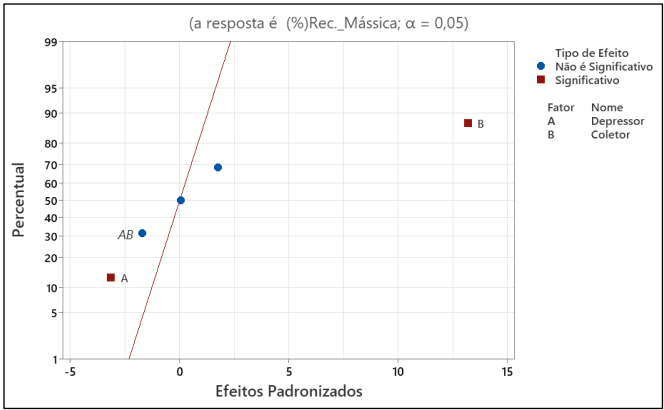
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se ainda na Tabela 26 que apesar da contribuição do erro aleatório ter sido de 5,48%, a falta de ajuste não foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,126.

Na Figura 41 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados, neste nota-se que o fator B (dosagem de coletor) aumenta a resposta do experimento e o fator A (dosagem de depressor) reduz a resposta do experimento, recuperação mássica ao sair do nível inferior para o nível superior. Esse comportamento já era esperado, tendo em vista que o coletor atua realizando a ligação iônica com os minerais portadores de cálcio e magnésio, hidrofobizando os minerais e aumentando a recuperação mássica. Enquanto o depressor garante a seletividade evitando que

o coletor realize a ligação química com os minerais de ganga (diopsídio, titanita, dentre outros), como demonstrado na literatura (Baltar, 2021).

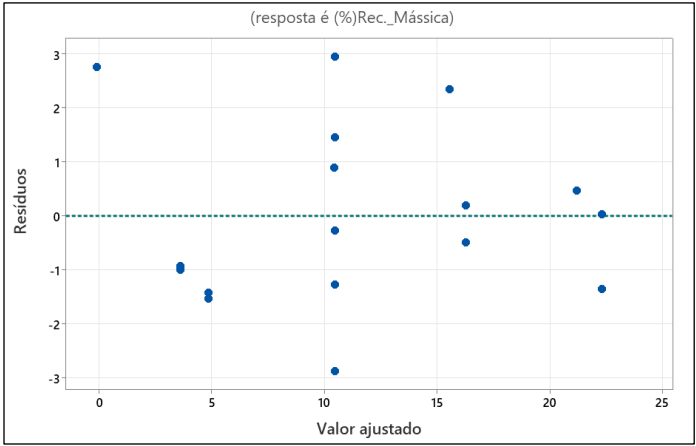
Figura 41: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 42 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

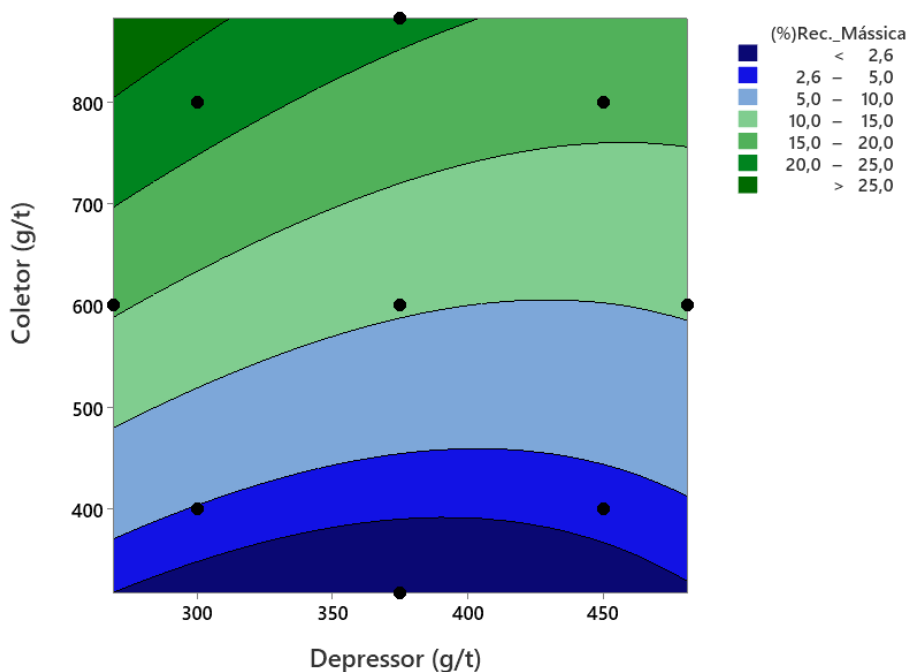
Figura 42: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.



Fonte: Dados da pesquisa.

No gráfico de contorno apresentado na Figura 43, nota-se que os pontos em preto representam os testes realizados seguindo a configuração proposta de coletor e depressor. Nota-se que ligando os pontos, forma-se uma estrela de 8 pontas. A influência dos resultados obtidos, forma esta área de influência indicada na legenda ao lado da figura.

Figura 43: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.7.1.2 Recuperação metalúrgica a partir do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado industrialmente

A resposta de recuperação metalúrgica, ou também denominada de recuperação de P_2O_5 , obtida a partir do teste fatorial variou entre 30% e 59,2%. A Tabela 27 apresenta o relatório de análise estatística das informações. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 83,73% e o R^2 de predição foi de 68,05%. Além disso, o Fator B (dosagem de coletor em g/t) contribuiu com 77,98% na variabilidade da resposta recuperação de P_2O_5 da flotação.

Por outro lado, o fator A, dosagem de depressor, não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,201. A contribuição da interação entre coletor e depressor (A*B) também não foi significativa ao nível de significância de 5% (*p-value* de 0,654).

Tabela 27: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 14).

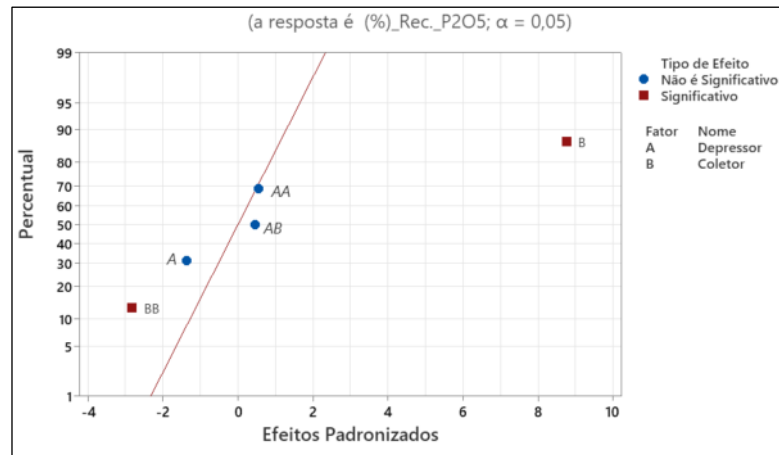
Sumário do Modelo			
R ² (aj)	R ² pred		
83,73%	68,05%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	88,81%	0,000
Linear	2	79,86%	0,000
Depressor	1	1,88%	0,201
Coletor	1	77,98%	0,000
Quadrado	2	8,73%	0,042
Depressor*Depressor	1	0,55%	0,588
Coletor*Coletor	1	8,18%	0,016
Interação com 2 Fatores	1	0,22%	0,654
Depressor*Coletor	1	0,22%	0,654
Erro	11	11,19%	
Falta de ajuste	3	7,19%	0,034
Erro puro	8	3,99%	
Total	16	100.0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se ainda na Tabela 27 que a contribuição do erro puro foi de 3,99%, valor este relativamente baixo, isso significa que provavelmente há alguma outra variável que está influenciando neste processo, mas não está sendo contemplada neste modelo. A falta de ajuste foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,034. No entanto, a falta de ajuste, embora importante para a melhoria do modelo, não afeta a interpretação dos efeitos significativos dos fatores no sistema. Ou seja, a análise continua válida para determinar quais variáveis têm um impacto significativo no processo, pois a magnitude dos efeitos (ou seja, o impacto real de cada variável sobre a resposta) não é comprometida pela falta de ajuste. O que realmente se perde aqui é a precisão do modelo de previsibilidade, o que significa que ele pode não prever com exatidão os resultados futuros, mas ainda consegue identificar quais fatores são mais importantes para o sistema. Em resumo, a falta de ajuste sugere que o modelo poderia ser melhorado com mais variáveis ou uma abordagem diferente, mas ainda é útil para a avaliação dos efeitos dos fatores em estudo, sem comprometer a análise da importância relativa de cada um desses fatores.

O gráfico normal dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 44, demonstra que o fator B, dosagem de coletor contribui para aumentar a recuperação de P₂O₅, visto que aumentando sua dosagem há maior arraste de massa para o concentrado.

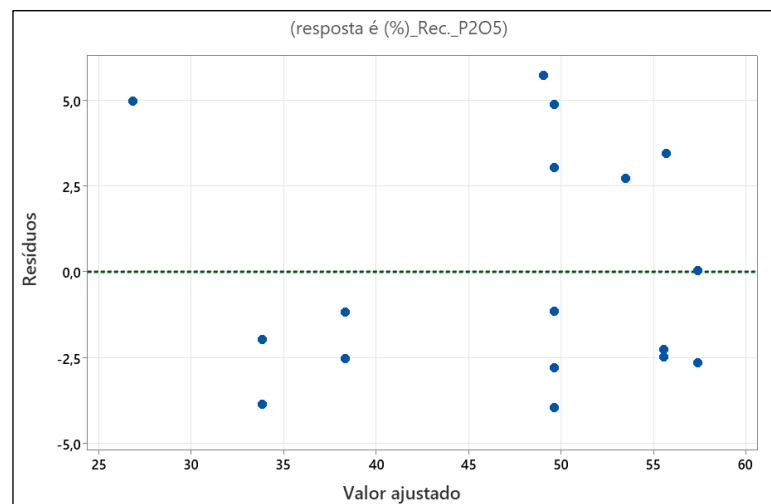
Figura 44: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5 .



Fonte: Dados da pesquisa.

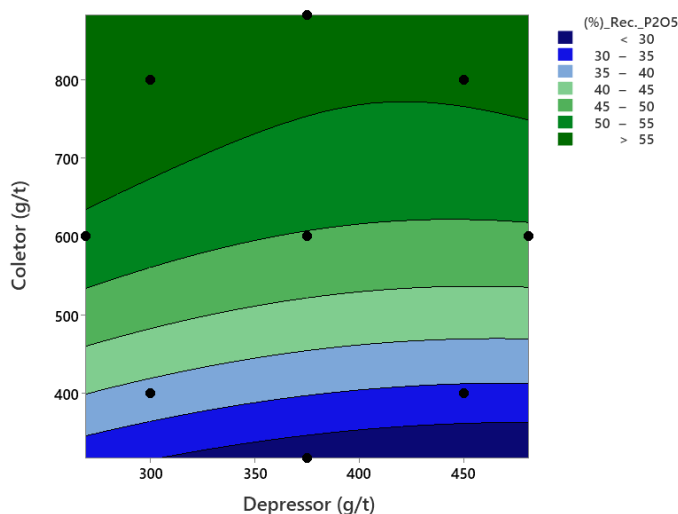
Na Figura 45, é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa um comportamento aleatório desses resíduos. Isso indica que os resíduos não seguem um padrão sistemático, o que sugere que o modelo está adequadamente ajustado aos dados. O comportamento aleatório dos resíduos é uma característica desejável, pois significa que não há influência de variáveis não incluídas no modelo e que os erros de previsão são distribuídos de maneira uniforme, sem tendência ou viés.

Figura 45: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 46 é apresentado o gráfico de contorno para a recuperação de P_2O_5 , neste observa-se uma ampla faixa de recuperação acima de 40% e não se observa variações do resultado com o aumento da dosagem do depressor, apenas mudanças no sentido vertical do gráfico, com o aumento da dosagem de coletor.

Figura 46: Gráfico de contorno para a recuperação de P_2O_5 .

Fonte: Dados da pesquisa.

4.7.1.3 Teor de P_2O_5 do concentrado final obtido a partir do rejeito *scavenger* Tal Qual coletado industrialmente

A resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, obtida a partir do teste fatorial variou entre 5,3% e 24,8%. A Tabela 28 apresenta o relatório de análise estatística. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 90,16% e o R^2 de predição foi de 78,56%. Observa-se também, ainda na Tabela 28 que o Fator B (coletor em g/t) contribuiu com 81,54% na variabilidade da resposta deste experimento. Por outro lado, o fator A, dosagem de depressor em g/t, não apresenta relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* obtido foi de 0,171.

A contribuição do erro puro foi de 1,23%, um valor relativamente baixo, o que sugere que o modelo é bastante eficaz em explicar a variabilidade dos dados. No entanto, esse valor também indica que provavelmente há alguma outra variável que está influenciando o processo, mas que não foi incluída no modelo. Isso implica que, embora o modelo seja bom, ele não capture completamente todos os fatores que afetam o processo.

Embora a falta de ajuste tenha sido considerada relevante, o mais importante é que a análise de contribuição das variáveis não foi prejudicada. Ou seja, mesmo com a presença de erro e falta de ajuste, as conclusões sobre a importância das variáveis estudadas continuam válidas. A presença de erro no modelo impacta a capacidade de previsibilidade, ou seja, o modelo pode não ser tão preciso para prever novos dados, mas não compromete a avaliação da magnitude da influência de cada variável sobre o processo. Portanto, as afirmações sobre o efeito das variáveis

e como elas influenciam o sistema são aceitas e ainda são confiáveis para a interpretação dos resultados, mesmo que o modelo não seja totalmente perfeito para previsões futuras.

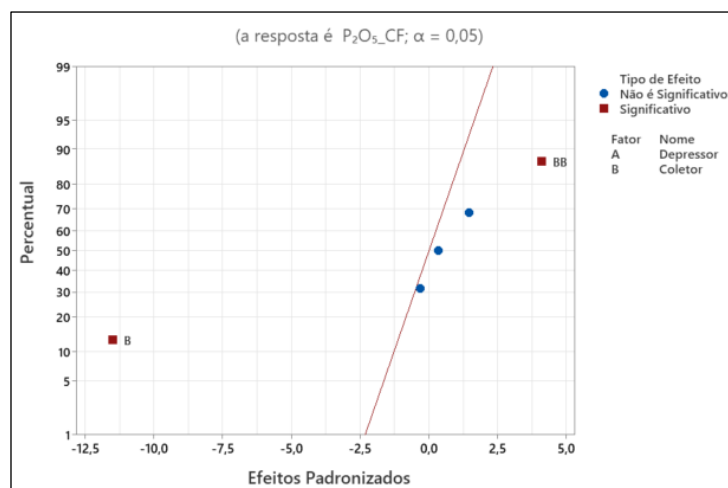
Tabela 28: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 15).

Sumário do Modelo			
R ² (aj)	R ² pred		
90,16%	78,56%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	93,24%	0,000
Linear	2	82,85%	0,000
Depressor	1	1,32%	0,171
Coletor	1	81,54%	0,000
Quadrado	2	10,32%	0,006
Depressor*Depressor	1	0,01%	0,735
Coletor*Coletor	1	10,31%	0,002
Interação com 2 Fatores	1	0,07%	0,751
Depressor*Coletor	1	0,07%	0,751
Erro	11	6,76%	
Falta de ajuste	3	5,53%	0,003
Erro puro	8	1,23%	
Total	16	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico normal dos efeitos padronizados da Figura 47 mostra que o teor de P_2O_5 no concentrado final indica que a dosagem de coletor (fator B) reduz a resposta do experimento.

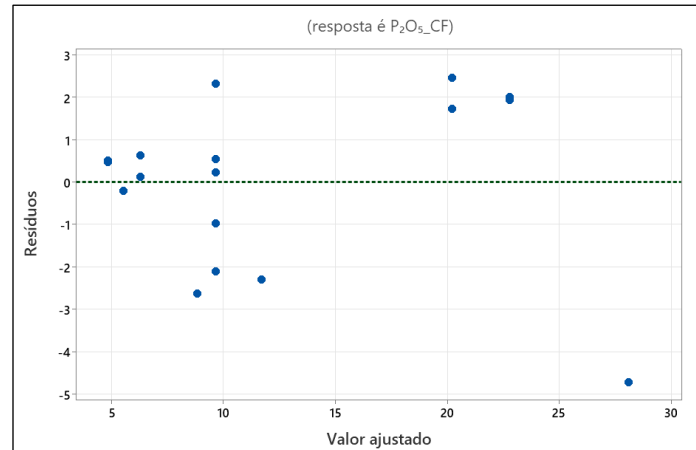
Figura 47: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 48 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

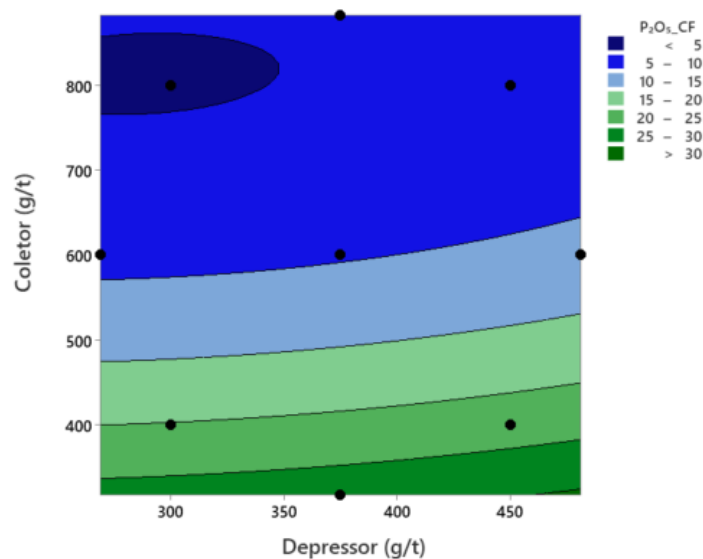
Figura 48: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 49 apresenta o gráfico de contorno para a o teor de P_2O_5 , neste observa-se uma elipse, que representa a área de influência onde o teor de P_2O_5 é menor que 5%. A área de influência deste ponto testado deve-se a dosagem de coletor de 800 g/t e de depressor de apenas 300 g/t. Por outro lado, observa-se áreas com teores de P_2O_5 interessantes, acima de 20% nas quais a dosagem de coletor estará abaixo de 400 g/t com dosagem de depressor em torno de 300 g/t, o que viabiliza o processo, tendo em vista que neste ponto a recuperação mássica estará em torno de 2,6 a 3,6%.

Figura 49: Gráfico de contorno da resposta de teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.7.1.5 Teste de hipótese para verificação da influência do depressor na resposta da flotação do rejeito *scavenger*

O depressor apresentou pouca influência na variabilidade da resposta do experimento em termos de recuperação mássica, metalúrgica e teor de P_2O_5 no concentrado final. Visando entender se haveria a possibilidade de trabalhar sem este reagente, realizou-se 5 testes de flotação sem o uso de depressor, apenas com o uso de coletor em 600 g/t. Na Tabela 29 são apresentados os resultados com e sem o uso do depressor.

Tabela 29: Comparativo entre testes com e sem o uso de depressor na flotação de apatita do rejeito Tal Qual.

Depressor (g/t)	Coletor (g/t)	(%) Rec. Mássica	(%) Rec. P_2O_5	P_2O_5 _CF	Fe_2O_3 _CF	Al_2O_3 _CF	SiO_2 _CF	TiO_2 _CF	P_2O_5 _Rej	Fe_2O_3 _Rej	SiO_2 _Rej	TiO_2 _Rej
375	600	10,2	48,5	9,9	15,6	1,2	21,2	13,6	1,2	18,5	35,1	8,3
375	600	9,2	46,8	10,2	15,6	1,1	20,1	13,9	1,2	18,3	35,5	8,3
375	600	7,6	45,7	12,0	14,3	1,0	19,3	13,0	1,2	18,8	35,3	8,8
375	600	13,4	52,7	7,5	23,4	1,3	20,6	13,5	1,1	25,3	32,9	7,4
375	600	11,9	54,5	8,7	21,7	1,3	20,0	13,1	1,0	26,4	32,4	7,7
0	600	30,4	53,6	3,6	33,2	1,5	23,9	13,7	1,3	22,9	35,0	5,8
0	600	30,5	52,3	3,5	33,4	1,5	23,6	13,7	1,4	22,2	35,4	5,7
0	600	29,6	53,1	3,5	35,2	1,2	22,2	14,5	1,3	22,9	35,6	5,8
0	600	30,9	54,2	3,6	34,2	1,3	23,1	14,0	1,3	22,7	35,3	5,8
0	600	29,3	51,4	3,6	33,9	1,4	23,2	14,0	1,4	22,8	35,8	5,8

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da verificação de normalidade dos dados, fez-se o teste de hipótese conforme apresentado na Tabela 30, se a hipótese nula for rejeitada, a probabilidade de erro é de 0,1%, portanto ao nível de significância de 5%, pode-se rejeitar a hipótese nula.

Tabela 30: Teste de hipótese para o teor de P_2O_5 no concentrado final comparando com e sem o uso do depressor. (Apêndice 16).

Estatísticas descritivas: P_2O_5 CF			
Condição	N	Média	Desv. Padrão
Com depressor	5	9,65	1,67
Sem depressor	5	3,53	0,0308
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor-T	GL	Valor-p	
8,2	4	0,001	

Fonte: Dados da pesquisa.

Logo, sem o uso de depressor, o teor do concentrado da flotação é numericamente e estatisticamente menor que a condição com o uso deste. Portanto, este exerce influência fundamental para o atingimento da meta estabelecida de qualidade de teor de P_2O_5 no concentrado final.

4.7.2 Flotação de apatita a partir do rejeito *scavenger* submetido a separação magnética de baixo campo

A Tabela 31 apresenta os resultados obtidos a partir do teste fatorial 2^2 aplicado ao rejeito da flotação *scavenger* após a realização de separação magnética de baixo campo. O coletor foi testado entre 400 g/t e 800 g/t, respectivamente níveis inferior e superior, sendo o central em 600 g/t. Por outro lado, o depressor foi empregado entre 300 g/t e 450 g/t sendo que o central foi de 375 g/t. Foram incluídos 4 pontos adicionais visando a análise em fatorial estrela, estes pontos consistem em uma inclinação em 45° a partir dos pontos citados das variáveis estudadas neste experimento.

Tabela 31: Resultados obtidos a partir dos testes de flotação do rejeito *scavenger* após a separação magnética de baixo campo.

Depressor (g/t)	Coletor (g/t)	(%) Rec. Mássica	(%) Rec. P_2O_5	$P_2O_5_CF$	$Fe_2O_3_CF$	SiO_2_CF	TiO_2_CF	$P_2O_5_Rej$	$Fe_2O_3_Rej$	SiO_2_Rej	TiO_2_Rej
375	600	11,46	54,31	11,39	10,38	21,19	14,28	1,24	16,30	36,73	7,42
375	600	11,50	55,72	11,13	10,47	21,24	14,51	1,15	16,17	36,98	7,55
300	800	23,41	60,71	6,42	11,85	25,89	15,25	1,27	15,89	37,47	6,62
269	600	15,30	59,75	8,38	11,26	23,57	15,23	1,02	16,10	37,34	7,13
450	400	3,51	40,28	26,33	5,03	12,11	4,59	1,42	16,20	36,09	8,22
375	600	7,43	56,23	16,01	8,58	18,56	11,34	1,00	16,22	36,32	8,31
375	317	1,79	28,00	32,57	2,85	6,80	2,44	1,53	16,11	35,52	8,42
375	600	7,02	52,88	16,21	8,37	17,69	11,73	1,09	16,20	36,22	8,25
300	400	3,19	42,58	27,47	4,59	10,93	4,41	1,22	16,30	35,55	8,90
481	600	6,02	53,81	18,72	7,49	16,86	9,10	1,03	16,28	36,06	8,20
450	800	12,44	60,27	10,14	10,71	21,31	15,21	0,95	16,19	37,09	7,43
375	600	10,06	59,08	12,39	9,81	20,99	12,95	0,96	16,27	36,18	8,06
375	883	19,92	65,29	6,88	11,86	24,74	15,83	0,91	15,81	37,44	6,85

Fonte: Dados da pesquisa.

O planejamento fatorial estrela (ou planejamento fatorial composto), como descrito, foi realizado com 13 testes, sendo 5 pontos centrais e 8 pontos nas extremidades, formando uma estrela de oito pontas. Esse tipo de planejamento é utilizado para melhorar a precisão da estimativa dos efeitos dos fatores e explorar as interações entre as variáveis.

Nesse contexto:

- 5 pontos centrais: São os testes realizados na combinação dos valores médios dos fatores, que ajudam a determinar a variabilidade do processo ao redor do ponto central e a identificar qualquer curvatura na resposta (não linearidade).
- 8 pontos nas extremidades: Esses pontos estão localizados nas extremidades da faixa de variáveis dos fatores, o que permite testar as condições extremas do sistema e detectar possíveis efeitos não lineares ou interações mais complexas.

4.7.2.1 Recuperação mássica da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido a separação magnética de baixo campo

A recuperação mássica obtida nos testes fatoriais variou entre 3,19% e 23,4%, enquanto nos testes realizados sem a etapa de separação magnética de baixo campo, os valores variaram entre 2,6% e 22,30%. A Tabela 32 apresenta o relatório de análise estatística das informações obtidas neste processo. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 92,86% e o R^2 de predição foi de 90,90%. O Fator B (dosagem de coletor em g/t) contribuiu com 74,58% na variabilidade da resposta recuperação mássica deste experimento e que a dosagem de depressor contribuiu com 14,03%, uma participação maior na resposta se comparado com o teste de flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual, no qual o depressor contribuiu com apenas 5% na variabilidade da resposta.

Tabela 32: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação após a separação magnética de baixo campo. (Apêndice 17).

Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	92,86%	90,90%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	95,83%	0,000
Linear	2	88,61%	0,000
Depressor	1	14,03%	0,002
Coletor	1	74,58%	0,000
Quadrado	2	0,90%	0,505
Depressor*Depressor	1	0,31%	0,426
Coletor*Coletor	1	0,59%	0,354
Interação com 2 Fatores	1	6,33%	0,014
Depressor*Coletor	1	6,33%	0,014
Erro	7	4,17%	
Falta de ajuste	3	0,47%	0,913
Erro puro	4	3,70%	
Total	12	100,0%	

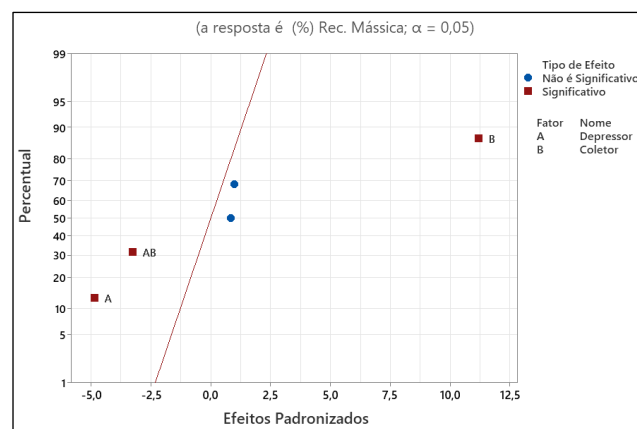
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se também que a interação entre coletor e depressor se apresentou relevante, tendo em vista que *p-value* foi de 0,014 e o nível de significância adotado de 5%. Portanto, após a realização da separação magnética de baixo campo, consegue-se observar a interação entre esses dois fatores, ao contrário do que aconteceu com a flotação Tal Qual, na qual o *p-value* desta interação foi de 0,114.

Verifica-se ainda na Tabela 32 que apesar da contribuição do erro aleatório ter sido de 4,17%, a falta de ajuste não foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,913.

Na Figura 50 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados, nesse nota-se que o fator B (dosagem de coletor) aumenta a resposta do experimento e o fator A (dosagem de depressor), assim como a interação entre coletor e depressor, reduz a resposta do experimento, recuperação mássica.

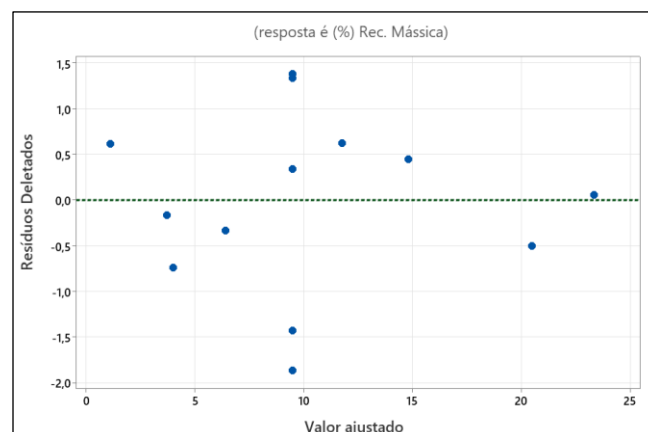
Figura 50: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 51 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

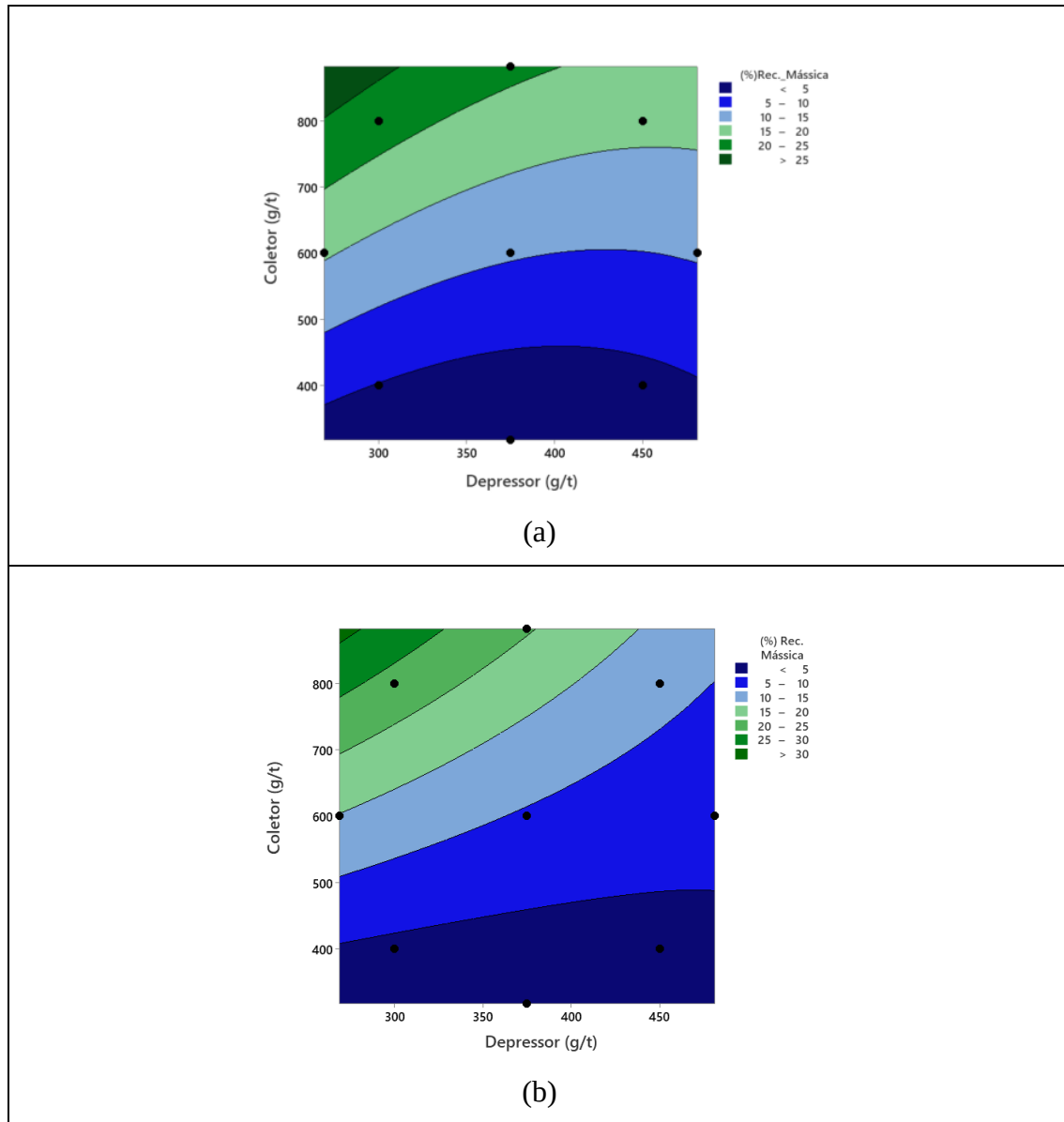
Figura 51: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 52, apresenta um comparativo entre a recuperação mássica da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual e a recuperação mássica da flotação de apatita após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo.

Figura 52: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica, em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Houve uma amplificação da área de recuperação mássica de 5-10% e uma redução nas áreas de altas recuperações mássicas. A hipótese levantada para explicar este fenômeno, deve-se a remoção da magnetita no baixo campo, disponibilizando o depressor para atuar nos minerais de ganga portadores de elementos alcalinos terrosos, como cálcio e magnésio, os quais o coletor carboxilato de sódio possui alta afinidade.

4.7.2.2 Recuperação metalúrgica da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido a separação magnética de baixo campo

A resposta de recuperação metalúrgica, obtida a partir do teste fatorial variou entre 28% e 65,3%, enquanto nos testes sem separação magnética ficou entre 30% e 59,2%. A Tabela 33 apresenta o relatório de análise estatística. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 92,73% e o R^2 de predição foi de 79,36%. O fator dosagem de coletor, contribuiu com 81,79% na variabilidade da resposta deste experimento.

Tabela 33: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica de P_2O_5 do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 18).

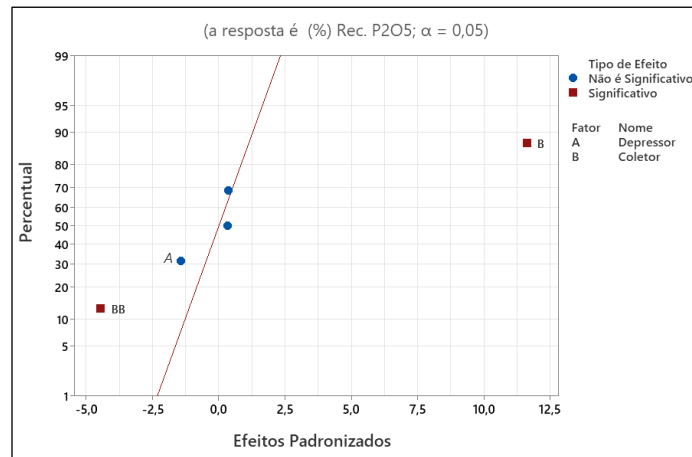
Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	92,73%	79,36%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	95,76%	0,000
Linear	2	83,02%	0,000
Depressor	1	1,23%	0,197
Coletor	1	81,79%	0,000
Quadrado	2	12,67%	0,008
Depressor*Depressor	1	0,55%	0,727
Coletor*Coletor	1	12,12%	0,003
Interação com 2 Fatores	1	0,07%	0,746
Depressor*Coletor	1	0,07%	0,746
Erro	7	4,24%	
Falta de ajuste	3	2,53%	0,261
Erro puro	4	1,71%	
Total	12	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Por outro lado, o fator dosagem de depressor não apresentou relevância ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* foi de 0,197. A contribuição da interação entre coletor e depressor (A*B) também não foi significativa ao nível de significância de 5% (*p-value* de 0,746). Observa-se ainda na Tabela 33 que a contribuição do erro aleatório foi de 4,24%, a falta de ajuste foi considerada irrelevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,261.

O gráfico apresentado na Figura 53, demonstra que o fator B, dosagem de coletor, contribui para aumentar a resposta do experimento e que a dosagem de depressor, Fator A, contribui para reduzir a resposta, apesar de que dentro dos limites testados este não apresentou efeito significativo na variabilidade da resposta do experimento.

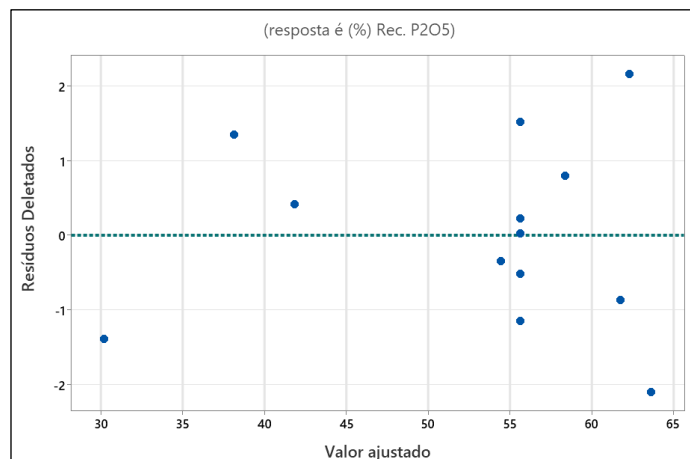
Figura 53: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5 .



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 54 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

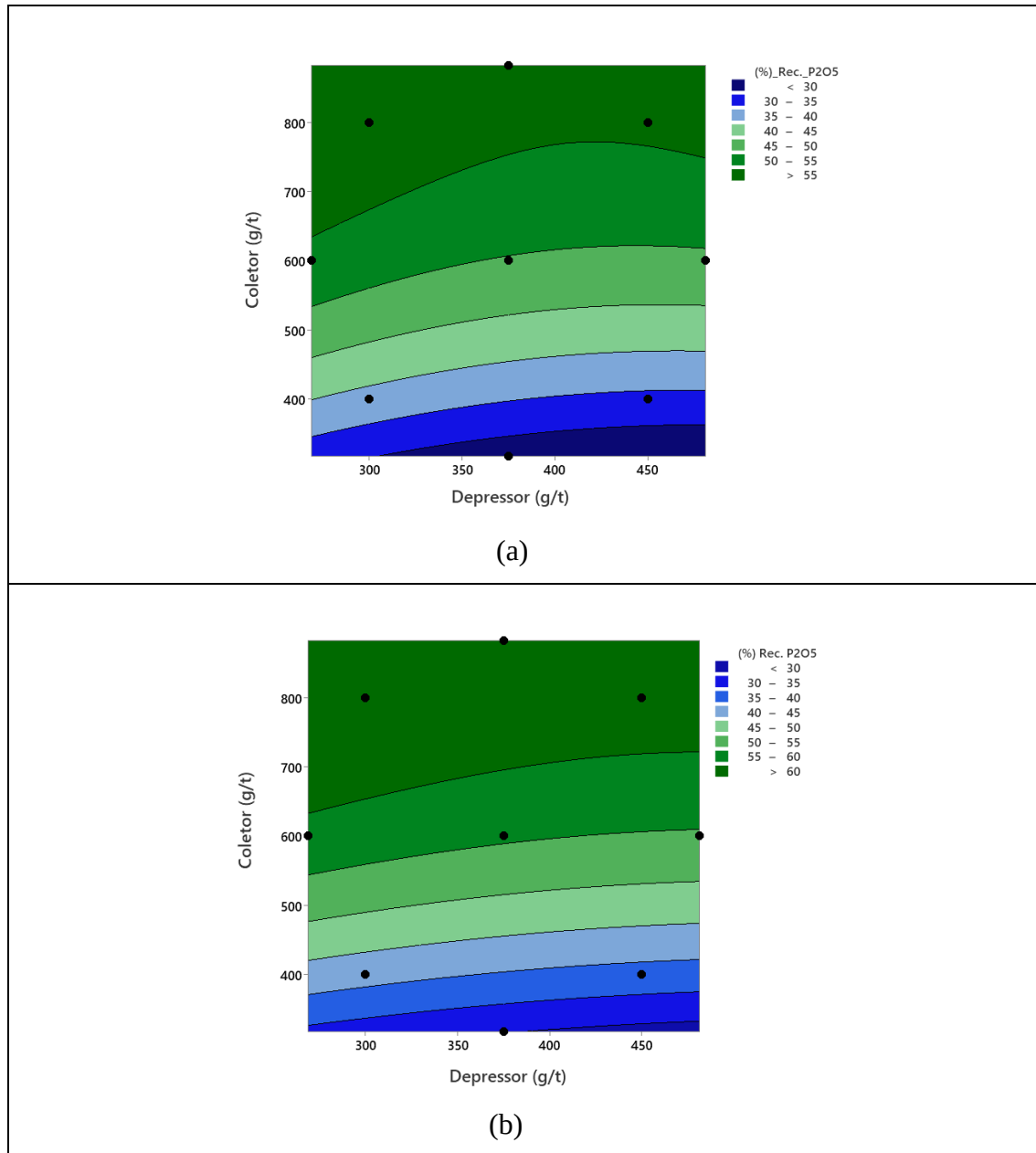
Figura 54: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 55, apresenta um comparativo entre a recuperação de P_2O_5 da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual e a recuperação de P_2O_5 da flotação de apatita após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo.

Figura 55: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de P_2O_5 , em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Houve uma grande amplificação das regiões de maiores recuperações, ganho médio de 10% absoluto de recuperação de P_2O_5 . Isso se deve a remoção de massa inerte antes da flotação, ou seja, a remoção da magnetita contribuiu para a eficiência da flotação. Isso deve-se ao fato de não haver essa massa inerte dentro da coluna de flotação, ocupando espaço do mineral de interesse e ao enriquecimento maior da alimentação da flotação em termos de teor de P_2O_5 devido a remoção desta ganga de minerais de óxidos de ferro.

4.7.2.3 Teor de P_2O_5 do concentrado final da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido a separação magnética de baixo campo

O teor de P_2O_5 no concentrado final, obtido a partir do teste fatorial, variou entre 6,42% e 32,57% enquanto no teste sem a realização da separação magnética, o intervalo dos teores ficou entre 5,3% e 24,8%. A Tabela 34 apresenta o relatório de análise estatística das informações. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 90,87% e o R^2 de predição foi de 78,51%.

Tabela 34: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação. (Apêndice 19).

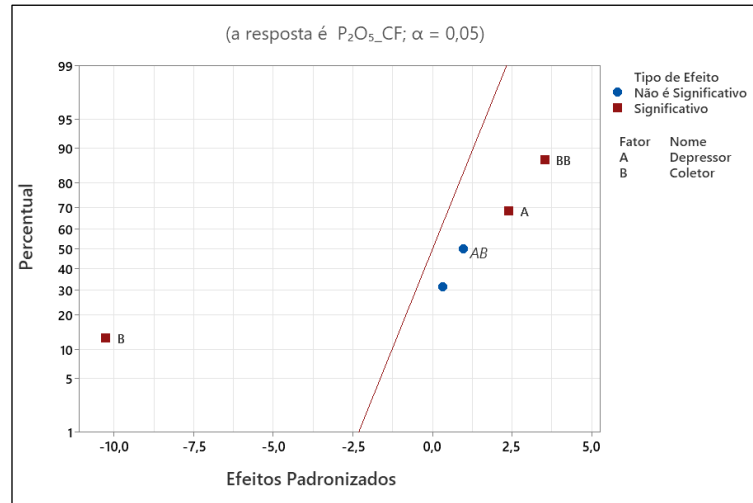
Sumário do Modelo			
R ² (aj)	R ² pred		
90,87%	78,51%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	94,68%	0,000
Linear	2	84,50%	0,000
Depressor	1	4,38%	0,047
Coletor	1	80,12%	0,000
Quadrado	2	9,47%	0,028
Depressor*Depressor	1	0,02%	0,764
Coletor*Coletor	1	9,45%	0,010
Interação com 2 Fatores	1	0,70%	0,370
Depressor*Coletor	1	0,70%	0,370
Erro	7	5,32%	
Falta de ajuste	3	2,37%	0,455
Erro puro	4	2,95%	
Total	12	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

O coletor contribuiu com 80,12% na variabilidade da resposta deste experimento. Por outro lado, o fator de dosagem de depressor, apresenta-se relevante ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* obtido foi de 4,7%. A contribuição do erro aleatório foi de 5,32%, mas a falta de ajuste foi considerada irrelevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5% (*p-value* de 45,5%).

O gráfico normal dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 56, para o teor de P_2O_5 no concentrado final apresenta que a dosagem de coletor, fator B, reduz a resposta do experimento, teor no concentrado final e a dosagem de depressor, fator A, eleva essa resposta.

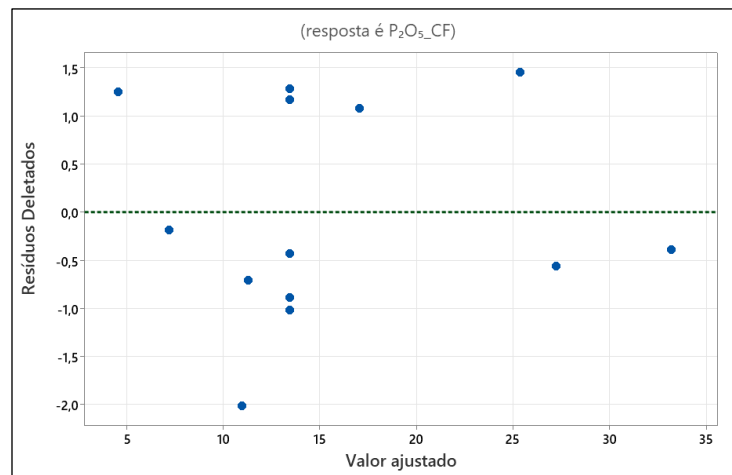
Figura 56: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 57 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório.

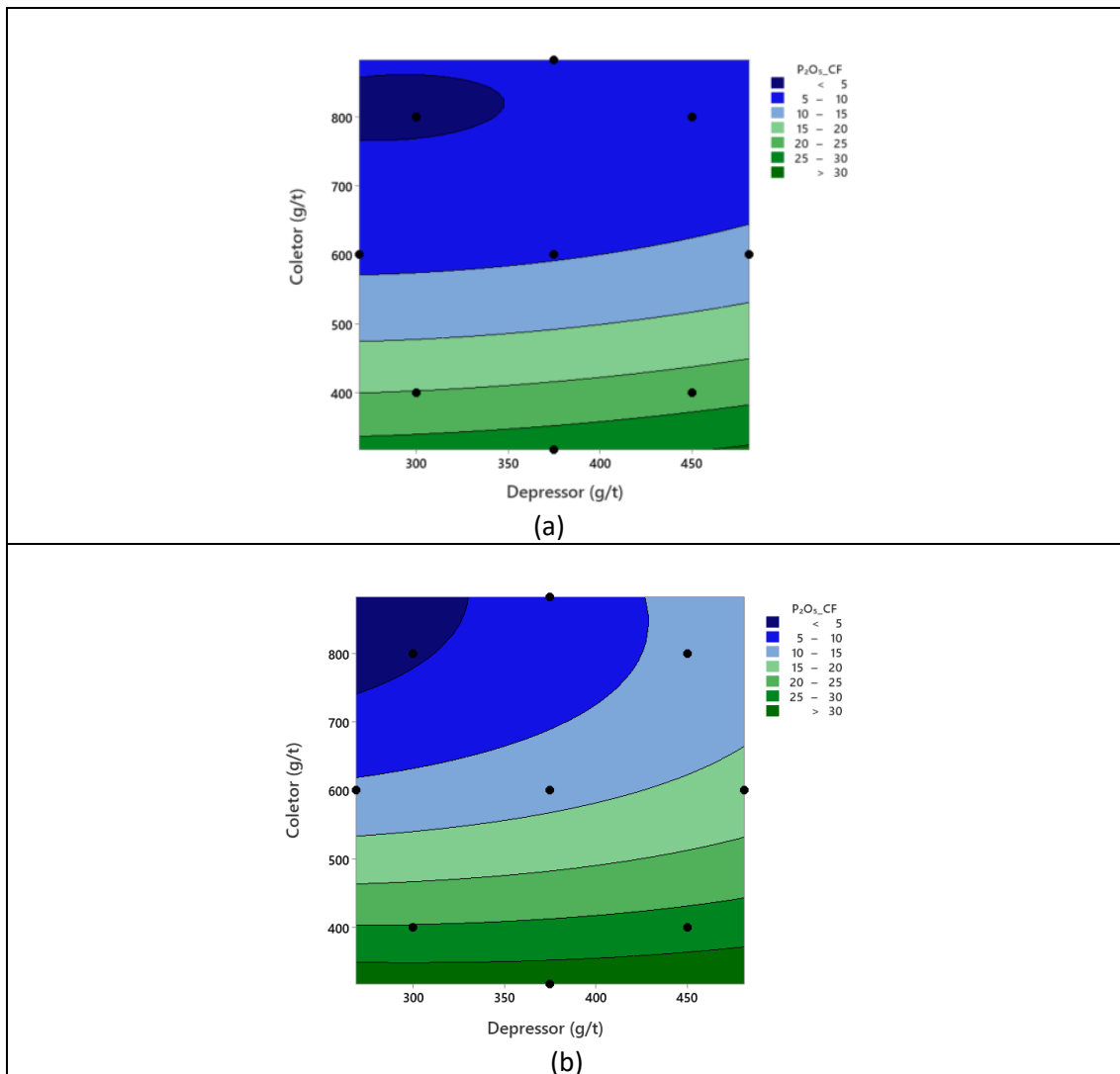
Figura 57: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os gráficos de contornos apresentados na Figura 58, apresenta um comparativo entre o teor de P_2O_5 do concentrado da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual e após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo.

Figura 58: Gráfico de contorno para a resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, em (a) flotação do rejeito Tal Qual e em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se maior seletividade no concentrado final da flotação, com ampliação das regiões de maiores teores e redução das regiões de menores teores de P_2O_5 no concentrado final. Neste sentido, verifica-se os teores maiores que 30% na qual na Figura 58 (a) é bem limitada e em 58 (b) apresenta-se bem dilatada, isso se deve a remoção da massa inerte de magnetita, que ocupa espaço no equipamento e consome depressor.

4.7.3 Flotação de apatita a partir do rejeito *scavenger* submetido a separação magnética de baixo e alto campo

A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos a partir dos testes de flotação *scavenger*, após a realização da separação magnética de baixo e alto campo. O coletor foi testado em uma faixa de dosagens entre 400 g/t (nível inferior) e 800 g/t (nível superior), com o ponto central estabelecido em 600 g/t. Por sua vez, o depressor foi utilizado em dosagens variando de 300 g/t (nível inferior) a 450 g/t (nível superior), com o ponto central definido em 375 g/t.

Tabela 35: Resultados obtidos na flotação de apatita após separação magnética de baixo e alto campo.

Depressor (g/t)	Coletor (g/t)	(%) Rec. Mássica	(%) Rec. P ₂ O ₅	P ₂ O ₅ -CF	Fe ₂ O ₃ -CF	SiO ₂ -CF	TiO ₂ -CF	P ₂ O ₅ -Rej	Fe ₂ O ₃ -Rej	SiO ₂ -Rej	TiO ₂ -Rej
375	600	10,49	63,06	13,26	9,05	20,50	13,20	0,91	15,15	37,35	7,56
375	600	9,89	61,55	13,13	9,01	20,24	13,85	0,90	15,16	37,12	7,60
300	800	19,64	69,13	7,97	10,71	24,28	15,88	0,87	15,00	38,65	6,13
269	600	14,02	63,93	9,89	10,16	22,19	15,92	0,91	15,04	38,17	6,72
450	400	3,62	42,64	25,57	5,02	12,41	5,41	1,29	15,16	36,87	8,04
375	600	8,43	57,02	14,26	8,69	19,79	12,73	0,99	15,37	37,68	7,43
375	317	1,75	26,31	32,20	3,09	7,35	2,56	1,61	15,06	36,19	8,08
375	600	8,22	58,54	15,76	7,97	18,31	12,37	1,00	15,23	36,76	8,10
300	400	4,18	46,86	24,66	5,20	12,81	6,55	1,22	15,26	36,70	8,18
481	600	7,69	57,32	16,28	7,87	18,54	11,51	1,01	15,35	37,26	7,69
450	800	13,81	60,34	9,40	10,21	22,53	15,75	0,99	15,04	38,00	6,92
375	600	10,42	62,71	12,86	9,20	20,48	14,44	0,89	15,26	37,41	7,53
375	883	18,01	67,03	8,33	10,61	23,65	15,94	0,90	14,93	38,50	6,52

Fonte: Dados da pesquisa.

Além desses pontos centrais e extremos, foram incluídos 4 pontos adicionais, com o objetivo de realizar uma análise fatorial estrela. Esses pontos adicionais consistem em uma inclinação de 45° a partir dos pontos centrais e extremos das variáveis estudadas neste experimento. A inclusão dos pontos adicionais do fatorial estrela tem como objetivo explorar melhor as possíveis não-linearidades do sistema e verificar a interação entre as variáveis, fornecendo uma análise mais completa dos efeitos dos parâmetros no processo de flotação.

Este tipo de configuração experimental permite uma investigação mais aprofundada das condições operacionais e seus impactos sobre a eficiência do processo de flotação, possibilitando identificar não apenas os efeitos principais, mas também as interações entre os fatores envolvidos.

4.7.3.1 Recuperação mássica da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo

A resposta de recuperação mássica obtida a partir do teste fatorial variou entre 1,75% e 19,64% enquanto no processo de flotação a partir do não magnético de baixo campo o intervalo foi de 3,19% e 23,41% e no teste utilizando o rejeito Tal Qual ficou entre 2,6% e 22,30%. A Tabela 36 apresenta o relatório de análise estatística das informações obtidas neste processo. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 96,77% e o R^2 de predição foi de 94,28%.

O fator de dosagem de coletor contribuiu com 86,54% na variabilidade da resposta recuperação mássica e o depressor contribuiu com 8,61%, menor que a participação se comparado com o teste de flotação a partir do não magnético de baixo campo no qual a contribuição foi de 14,03%, mas maior que na flotação do rejeito *scavenger* Tal Qual. Observa-se também que a interação entre coletor e depressor se apresentou relevante, tendo em vista que *p-value* foi de 0,029 e o nível de significância adotado de 5%.

Tabela 36: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita após a separação magnética de baixo e alto campo. (Apêndice 20).

Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	96,77%	94,28%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	98,11%	0,000
Linear	2	95,16%	0,000
Depressor	1	8,61%	0,001
Coletor	1	86,54%	0,000
Quadrado	2	0,93%	0,247
Depressor*Depressor	1	0,86%	0,109
Coletor*Coletor	1	0,07%	0,633
Interação com 2 Fatores	1	2,03%	0,029
Depressor*Coletor	1	2,03%	0,029
Erro	7	1,89%	
Falta de ajuste	3	0,50%	0,713
Erro puro	4	1,39%	
Total	12	100,0%	

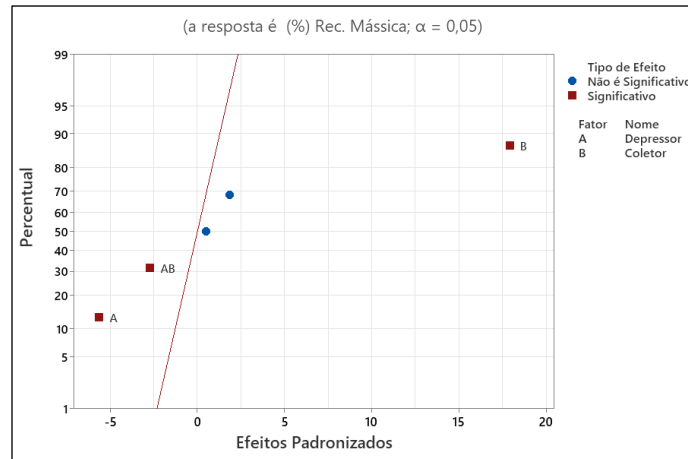
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se ainda na Tabela 36 que a contribuição do erro aleatório foi de apenas 1,89% e a falta de ajuste não foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,713.

Na Figura 59 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados, nesse nota-se que o fator B (dosagem de coletor) aumenta a resposta do experimento e o fator A (dosagem de depressor),

assim como a interação entre coletor e depressor, reduz a resposta do experimento, recuperação mássica.

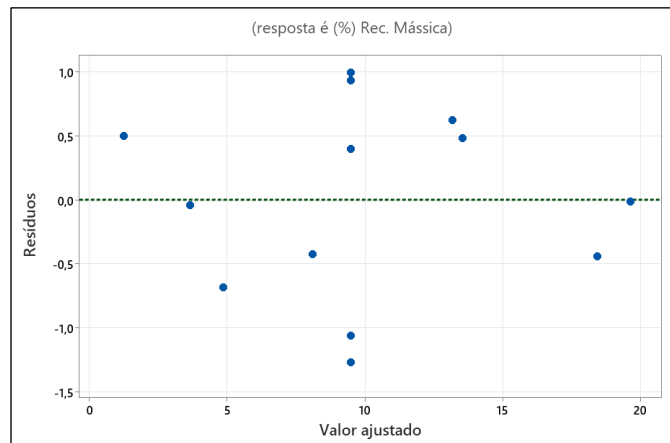
Figura 59: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 60 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

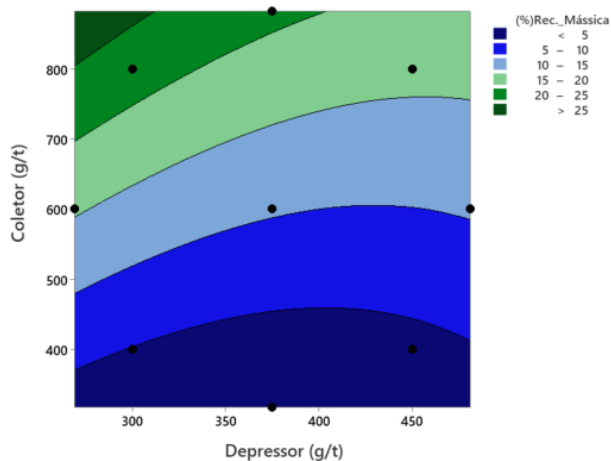
Figura 60: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.



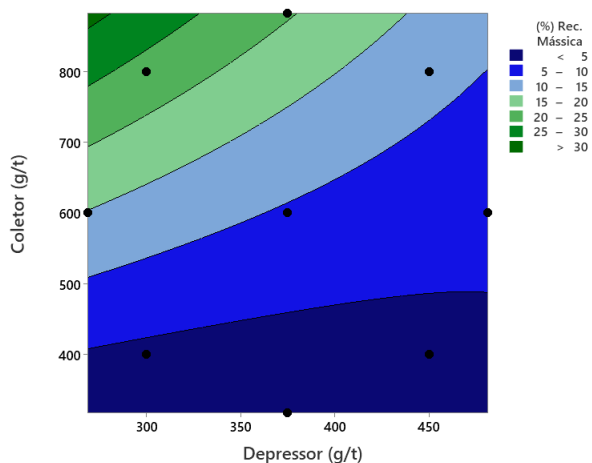
Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 61, mostra um comparativo entre a recuperação mássica da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual, recuperação mássica da flotação de apatita após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo e alto campo.

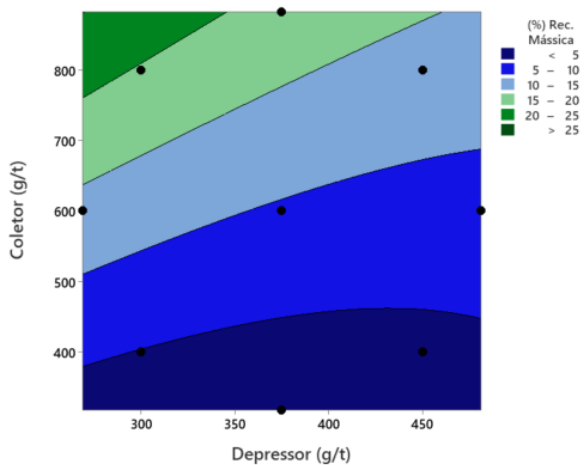
Figura 61: Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica, em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após a separação magnética de baixo e alto campo.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que a recuperação mássica da rota 3 manteve o patamar já alcançado com a separação magnética de baixo campo (rota 2) sem grande evolução.

4.7.3.2 Recuperação metalúrgica da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo

A resposta de recuperação metalúrgica, obtida a partir do teste fatorial variou entre 26,31% e 69,13%, enquanto a recuperação da flotação a partir do não magnético de baixo campo esteve entre 28% e 65,3%, e no teste sem separação magnética ficou entre 30% e 59,2%. A Tabela 38 apresenta o relatório de análise estatística. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 92,58% e o R^2 de predição foi de 78,80%. Verifica-se também, ainda na Tabela 37 que o Fator B (dosagem de coletor em g/t) contribuiu com 72,16% na variabilidade da resposta deste experimento.

Tabela 37: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo. (Apêndice 21).

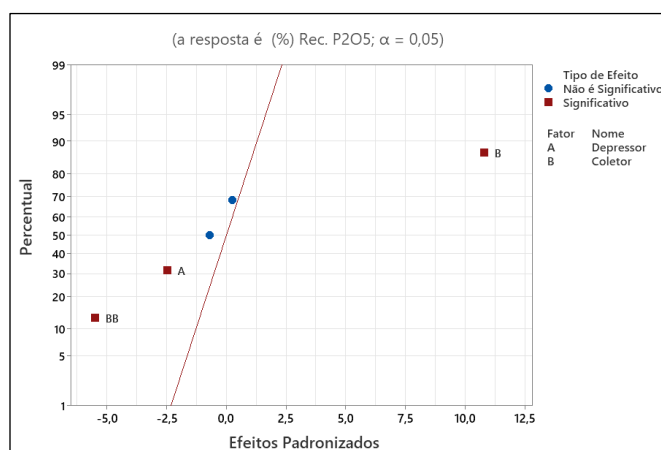
Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	92,58%	78,80%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	95,67%	0,000
Linear	2	75,95%	0,000
Depressor	1	3,79%	0,042
Coletor	1	72,16%	0,000
Quadrado	2	19,41%	0,003
Depressor*Depressor	1	0,59%	0,813
Coletor*Coletor	1	18,82%	0,001
Interação com 2 Fatores	1	0,32%	0,496
Depressor*Coletor	1	0,32%	0,496
Erro	7	4,33%	
Falta de ajuste	3	2,60%	0,255
Erro puro	4	1,72%	
Total	12	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Por outro lado, o fator dosagem de depressor apresentou contribuição de apenas 3,79% na variabilidade da resposta recuperação de P_2O_5 , sendo significativo ao nível de ao nível de significância de 0,05. Verifica-se também que a interação entre coletor e depressor ($A*B$) não foi significativa ao nível de significância de 5% (p -value de 0,746). Consta-se ainda na Tabela 37 que a contribuição do erro aleatório foi de apenas 2,60%, sendo a falta de ajuste considerada irrelevante para a construção do modelo, ao nível de significância de 5%.

O gráfico normal dos efeitos padronizados apresentado na Figura 62, demonstra que o fator B, dosagem de coletor, contribui para aumentar a resposta do experimento e que o fator A, dosagem de depressor, contribui para reduzir a resposta do experimento.

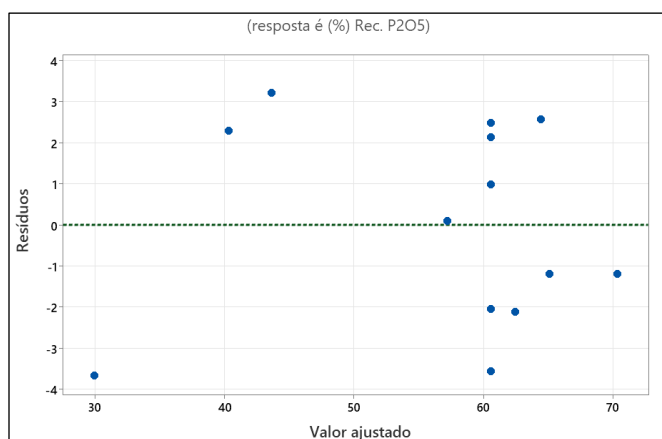
Figura 62: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de P_2O_5 .



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 63 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório nestes.

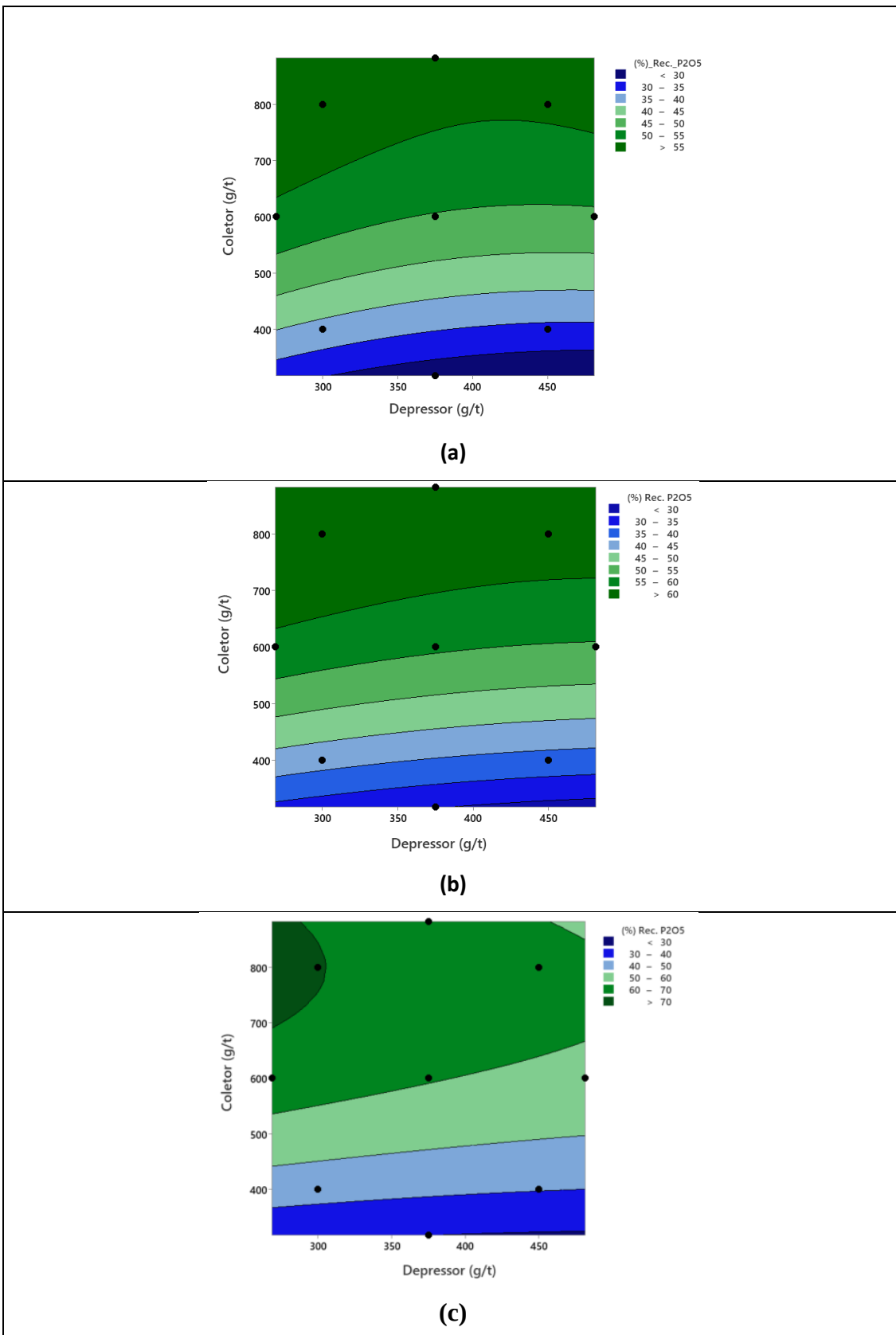
Figura 63: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 64, exibe um comparativo entre as três rotas estudadas: (1) recuperação de P_2O_5 da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual, (2) recuperação de P_2O_5 da flotação de apatita após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo e (3) recuperação de P_2O_5 da flotação de apatita após este ter sido submetido a separação magnética de baixo e alto campo.

Figura 64: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de P_2O_5 , em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após a separação magnética de baixo e alto campo.



Verifica-se na Figura 64 a ampliação da área de elevada recuperação de P_2O_5 com a aplicação da separação magnética de baixo campo e posteriormente com a aplicação da separação magnética de alto campo, isso deve a remoção de ganga, minerais como a magnetita e outros hidróxidos de ferro, aumentando o enriquecimento da alimentação da flotação.

4.7.3.3 Teor de P_2O_5 do concentrado final da flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo

A resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, obtida a partir do teste fatorial variou entre 8,33% e 32,2%, enquanto o concentrado da flotação de apatita obtido a partir da flotação do não magnético de baixo campo, variou entre 6,42% e 32,57% e na flotação do rejeito Tal Qual o intervalo dos teores ficou entre 5,3% e 24,8%. A Tabela 38 apresenta o relatório de análise estatística das informações obtidas neste processo. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 97,02% e o R^2 de predição foi de 92,41%. Observa-se também que o fator coletor contribuiu com 83,99% na variabilidade da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final.

Tabela 38: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita do rejeito *scavenger* submetido as separações magnéticas de baixo e alto campo. (Apêndice 22).

Sumário do Modelo			
R ² (aj)	R ² pred		
97,02%	92,41%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	98,26%	0,000
Linear	2	86,44%	0,000
Depressor	1	2,45%	0,016
Coletor	1	83,99%	0,000
Quadrado	2	11,81%	0,001
Depressor*Depressor	1	0,61%	0,521
Coletor*Coletor	1	11,21%	0,000
Interação com 2 Fatores	1	0,01%	0,845
Depressor*Coletor	1	0,01%	0,845
Erro	7	1,74%	
Falta de ajuste	3	0,88%	0,373
Erro puro	4	0,86%	
Total	12	100,0%	

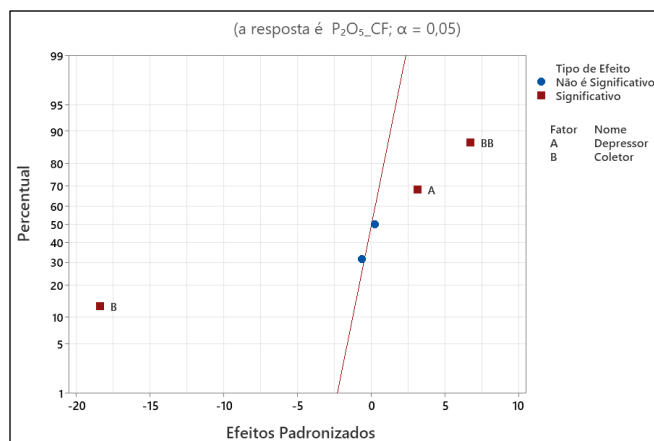
Fonte: Dados da pesquisa.

Por outro lado, o fator dosagem de depressor, contribuiu com 2,45% na variabilidade da resposta deste experimento e apresenta-se relevante ao nível de significância de 5%, tendo em vista que o *p-value* obtido foi de 0,016. A contribuição do erro aleatório de apenas 1,74% e a

falta de ajuste é considerada irrelevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 37,3%.

Na Figura 65 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final. A dosagem de coletor, fator B, reduz a resposta do experimento, teor no concentrado final e a do depressor, fator A, tem efeito em elevar a resposta do experimento.

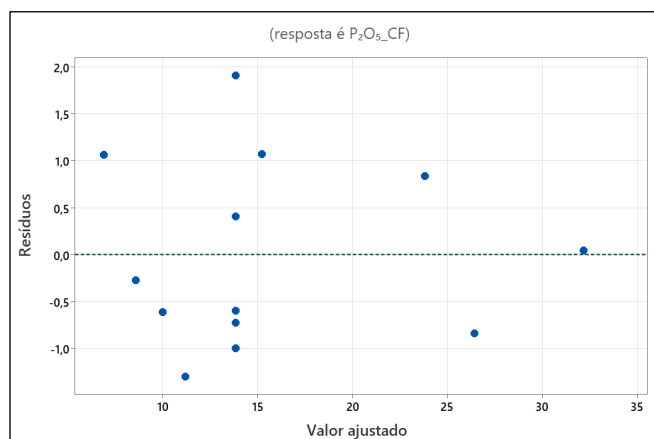
Figura 65: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 66 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório.

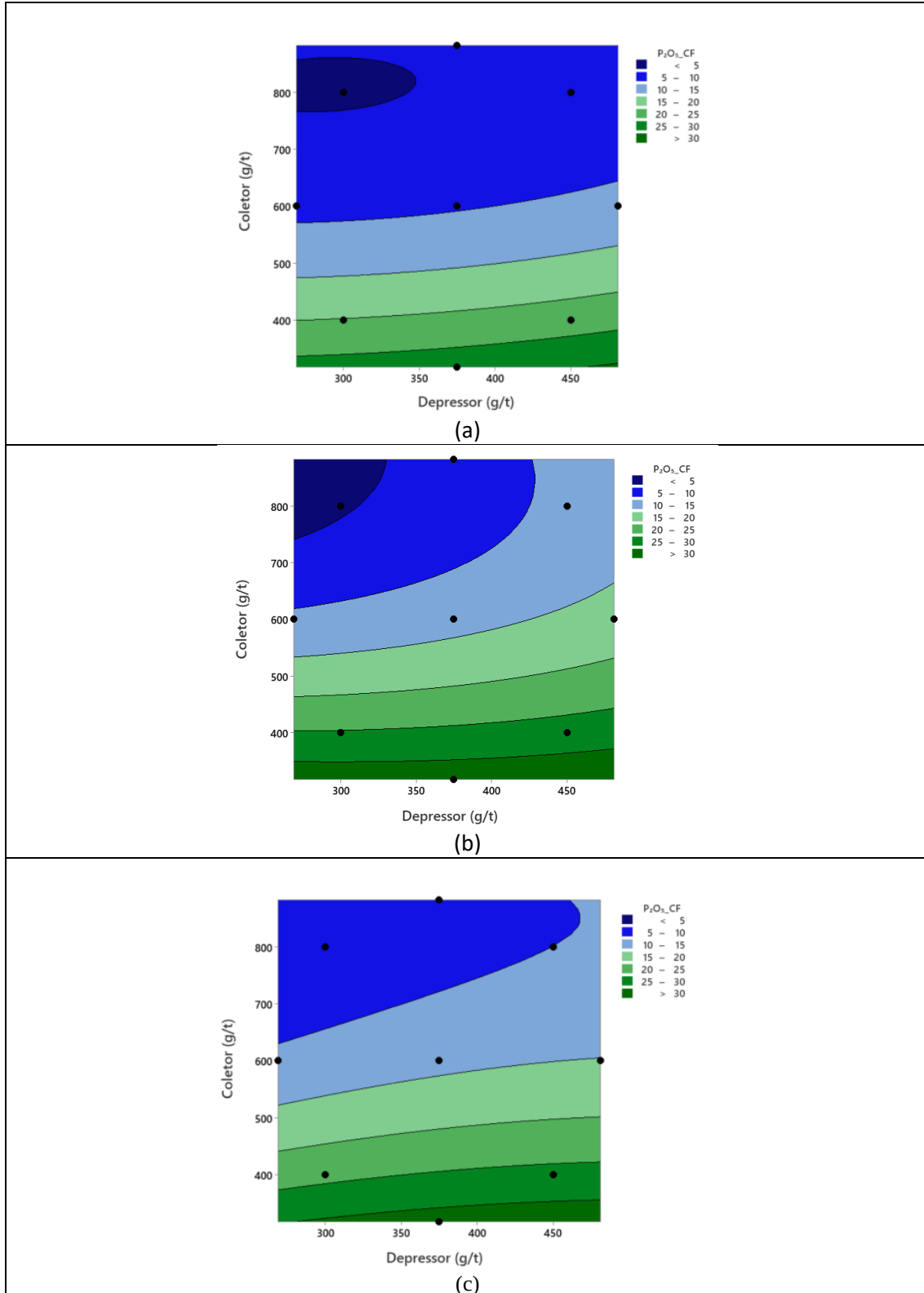
Figura 66: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de P_2O_5 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 67, apresenta um comparativo entre o teor de P_2O_5 do concentrado da flotação de apatita a partir do rejeito Tal Qual, após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo e após ter sido submetido a separação magnética de baixo e alto campo.

Figura 67: Gráfico de contorno para a resposta teor de P_2O_5 no concentrado final, em (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após as separações magnéticas de baixo e alto campo.



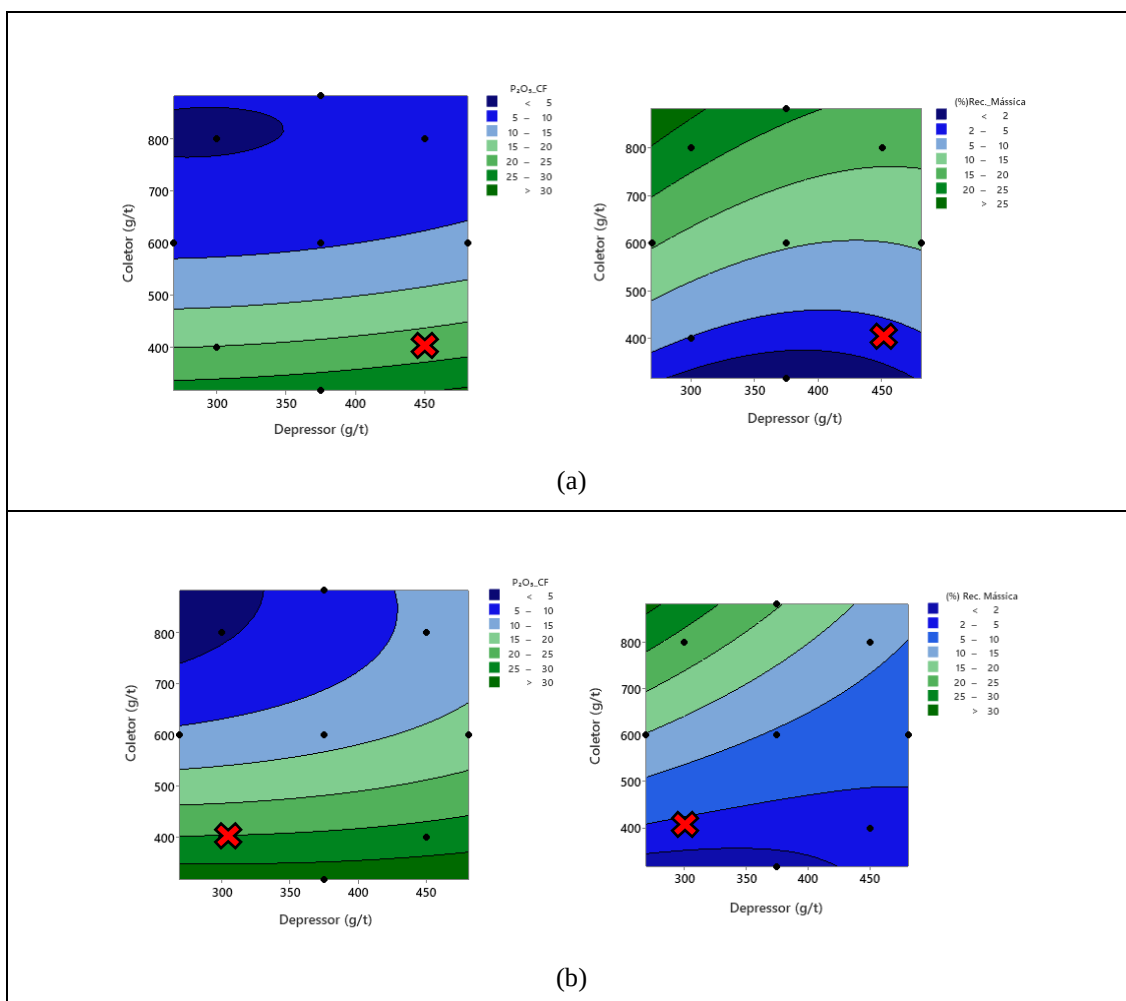
Fonte: Dados da pesquisa.

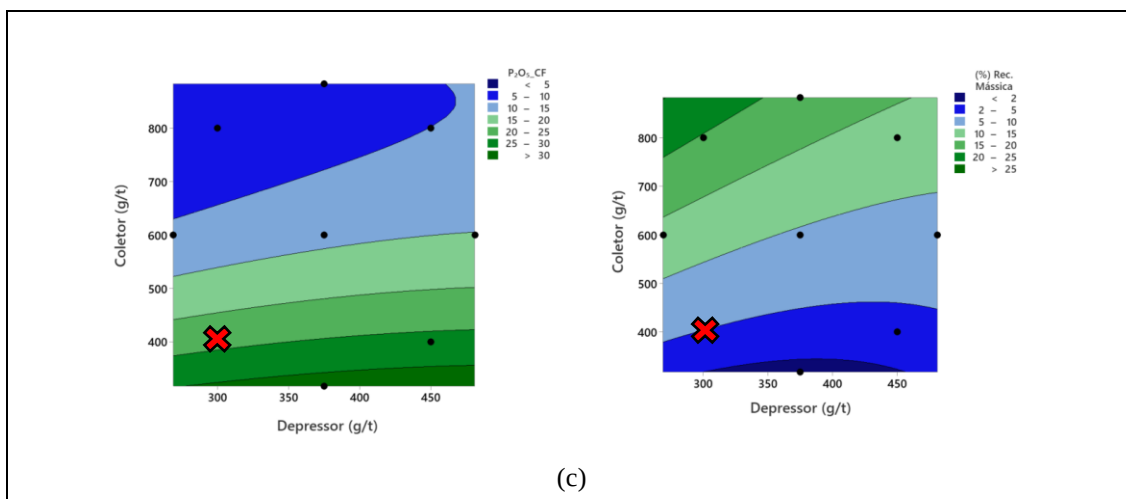
Observa-se a elevação da seletividade do concentrado final com a extinção da área de teores menores que 5% no concentrado com a aplicação da rota da flotação após a separação magnética de baixo e alto campo. No gráfico de contorno 67 (a), observa-se que a área de teores acima de 30% é quase insignificante e que esta evoluiu de forma considerável com a aplicação da separação magnética de baixo e de alto campo.

4.7.3.4 Comparativo de otimização das respostas dos experimentos da flotação de apatita

O gráfico de contorno da Figura 68 apresenta uma consolidação dos resultados obtidos, apontando através do uso de um símbolo x em destaque o ponto ótimo de trabalho escolhido para alcançar a meta de qualidade do concentrado final em 24% de P_2O_5 .

Figura 68: Gráficos de contorno para as respostas teor de P_2O_5 e recuperação mássica (a) flotação do rejeito Tal Qual, em (b) flotação após a separação magnética de baixo campo, e em (c) flotação após as separações magnéticas de baixo e alto campo.





Fonte: Dados da pesquisa.

Visando produzir um coproduto, um concentrado de baixo teor de P_2O_5 para aplicações secundárias, foi definida a meta de atingir teor de P_2O_5 em torno de 24%. Para o alcance deste teor de P_2O_5 , na condição da flotação do rejeito Tal Qual, a recuperação de P_2O_5 ficará próxima de 31% com dosagens de 400 g/t de coletor e 450 g/t de depressor.

Por outro lado, para a flotação de apatita realizada após a separação magnética de baixo campo, faz-se necessário avaliar a curva de regressão entre teor do concentrado final e a recuperação mássica, tendo em vista que os resultados obtidos no teste fatorial apresentaram qualidade acima da meta de 24%. Portanto, avaliando a equação de regressão entre recuperação mássica e teor de P_2O_5 no concentrado final será possível prever a recuperação mássica para alcançar o teor alvo e assim ter as 3 rotas estudadas na mesma base de comparação.

A Tabela 39 apresenta a avaliação de regressão entre recuperação mássica da flotação e teor de P_2O_5 no concentrado final da flotação. Nesta verifica-se excelentes valores de R^2 ajustado e R^2 de predição. Sendo estas duas métricas robustas para avaliar um modelo de regressão.

Tabela 39: Regressão recuperação mássica x teor de P_2O_5 no concentrado final da flotação.

Equação de Regressão					
$(\%) \text{ Rec. Mássica} = 17,07 - 0,5138 P_2O_5_CF$					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	17,07	1,01	16,96	0,000	
$P_2O_5_CF$	-0,5138	0,0531	-9,69	0,000	1,00
Sumário do Modelo					
S	R2	R2(aj)	R2(pred)		
1,35351	91,25%	90,27%	85,54%		

Fonte: Dados da pesquisa.

Para o alcance de um concentrado que tenha teor com 24,66% de P_2O_5 a recuperação mássica da flotação ficará em torno de 4,42%.

Por outro lado, para a flotação de apatita após a realização das separações magnéticas de baixo e alto campo, visando o alcance do teor proposto, a recuperação mássica estará em torno de 4,20% com dosagem de depressor de 300 g/t e de coletor de 400 g/t. A Tabela 40 apresenta um comparativo entre as características da alimentação de cada uma das flotações e o concentrado obtido em cada uma das rotas estudadas.

Tabela 40: Resultados comparativos entre os resultados das 3 flotações de apatita sem considerar o balanço global.

Indicador	Fluxo	Flotação de Apatita tal qual	Flotação de Apatita após baixo campo	Flotação de Apatita após baixo e alto campo
(%)Fe ₂ O ₃	Alimentação	25,49	15,61	14,82
(%)P ₂ O ₅		2,01	2,21	2,26
(%)Ret.100# acum.		62,5	67,3	64,2
(%)<500#		4,74	4,6	5,76
(%)TiO ₂		8,1	8,8	8,81
(%)SiO ₂		32,42	37,57	32,2
(%)P ₂ O ₅	Concentrado	24,76	32,57	32,2
(%)Rec. Mássica		2,65	1,79	1,75
(%)Rec.P ₂ O ₅		30,95	28,00	26,31
Depressor	g/t	450	375	375
Coletor		400	317	317
Para atingir o alvo em torno de 24% de P ₂ O ₅ no concentrado final				
(%)P ₂ O ₅	Concentrado	24,76	24,66	24,66
(%)Rec. Mássica		2,65	4,42	4,20
(%)Rec.P ₂ O ₅		30,95	49,40	46,90
Depressor	g/t	450	300	300
Coletor		400	400	400

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 41 é apresentado o balanço de massa das três rotas, sendo a rota 1, a flotação de apatita realizada a partir do rejeito da flotação *scavenger* Tal Qual, a rota 2 após este ter sido submetido a separação magnética de baixo campo e a rota 3 após este ter sido submetido a separações magnéticas de baixo e alto campo.

Tabela 41: Balanços globais com as três configurações de rotas de processo estudadas para a flotação de apatita.

Rota 1	(%) P_2O_5	(%) Distr. Mássica	(%) Distr. P_2O_5
Rejeito tal qual	2,14	100	100
Rej. Flot. Apatita	1,52	97,35	69,3
Conc. Flot. Apatita	24,76	2,65	30,72
Rota 2	(%) P_2O_5	(%) Distr. Mássica	(%) Distr. P_2O_5
Rejeito tal qual	2,14	100	100
Magnético baixo campo	1,74	15,45	12,58
Não Magnético baixo campo	2,21	84,55	87,42
Conc. Flot. Apatita	24,66	3,72	42,95
Rej. Flot. Apatita	1,18	80,83	44,47
Rota 3	(%) P_2O_5	(%) Distr. Mássica	(%) Distr. P_2O_5
Rejeito tal qual	2,14	100,00	100,00
Magnético baixo campo	1,74	15,45	12,58
Não Magnético baixo campo	2,21	84,55	87,42
Magnético alto campo	1,82	9,57	8,15
Não Magnético alto campo	2,26	74,98	79,27
Conc. Flot. Apatita	24,66	3,13	36,18
Rej. Flot. Apatita	1,28	71,85	43,08

Fonte: Dados da pesquisa.

Avaliando os resultados obtidos recomenda-se o uso da rota 2, em que se realiza apenas da separação magnética de baixo campo, visto que para se obter o teor alvo de 24% de P_2O_5 no concentrado final alcança-se uma recuperação global de P_2O_5 de 42,95%, maior que a alcançada nas rotas 1 e 3. O enriquecimento do teor de P_2O_5 na alimentação na flotação realizada na rota 3 não compensa a perda deste elemento útil, que foi de 8,15% no magnético de alto campo, logo globalmente este processo obteve uma recuperação de P_2O_5 de 36,18%, valor este acima da rota 1, mas inferior a obtida na rota 2.

Este resultado está em conformidade com a prática industrial, na qual a separação magnética de alto campo é aplicada após a flotação, e não antes. Isso ocorre porque o arraste de apatita para a fração magnética é significativo, o que justifica a adoção, até o momento, da rota consolidada no beneficiamento de fosfato: a separação magnética de baixo campo precedendo a flotação da apatita. Dessa forma, os resultados apresentados neste estudo reforçam que a

abordagem industrialmente estabelecida para a flotação de apatita continua sendo a mais eficiente em termos de recuperação de P_2O_5 .

4.8 Flotação de titânio

A Tabela 42 apresenta a distribuição granulométrica e química por faixa da alimentação dos testes de flotação de titânio. Nota-se que 80,2% do TiO_2 está acima de 200 mesh (75 μm).

Tabela 42: Análise granuloquímica da alimentação da flotação de titânio.

Distribuição granulométrica e de TiO ₂						Óxidos por faixa								
Abertura em mesh (#)	Abertura em µm	Retido Simp. (%)	Retido Acum. (%)	Dist. TiO ₂ por faixa	Dist. TiO ₂ acumulada	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	MnO	K ₂ O
24	710	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	1,10	12,52	9,10	11,03	6,24	39,14	7,39	0,21	3,21
32	500	4,7%	6,6%	2,7%	4,7%	1,60	11,60	8,42	6,20	8,96	43,36	4,31	0,21	5,21
65	212	32,2%	38,8%	26,5%	31,2%	1,94	11,91	8,59	9,46	7,44	40,26	6,09	0,22	4,15
100	150	18,2%	57,0%	19,4%	50,6%	1,39	12,69	8,82	11,91	6,01	38,25	7,86	0,21	3,28
200	75	25,7%	82,8%	29,7%	80,2%	0,92	12,60	8,79	12,72	5,35	38,35	8,52	0,20	2,93
325	45	6,1%	88,9%	7,6%	87,8%	0,63	12,02	8,55	12,99	4,99	38,62	9,18	0,20	2,73
400	38	2,5%	91,4%	3,2%	91,1%	0,59	11,54	7,97	12,98	5,01	39,39	9,50	0,20	2,68
500	25	0,5%	91,9%	0,6%	91,7%	0,58	11,77	7,44	13,08	4,78	39,14	9,93	0,20	2,59
<500	<25	8,1%	100,0%	8,3%	100,0%	0,97	15,08	7,95	9,79	5,69	38,53	7,57	0,24	2,24
Teores amostra global						1,10	12,52	9,10	11,03	6,24	39,14	7,39	0,21	3,21

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 43 apresenta todos os resultados obtidos a partir do teste fatorial 2^2 aplicado na flotação de titânio. O coletor foi testado com nível inferior de 300 g/t e superior de 600 g/t. Por outro lado, o pH foi testado em nível inferior de 3,5 e superior de 7,5. Foram incluídos 5 pontos centrais (em destaque na Tabela 44), nos quais o pH utilizado foi de 5,5 e a dosagem de coletor foi de 450 g/t. Em todos os testes, foi aplicada uma dosagem de 30 g/t do espumante Flotanol D25 BR, da Clariant, polipropileno glicol metileter.

Tabela 43: Resultados do planejamento fatorial da flotação de titânio.

Ordem	Ordem	Nível	Nível	Coletor		Teor de	Teor de	Teor de	(%) Rec.	(%) Rec.	Razão de	Razão de	Teor de
Padrão	do Ensaio	Coletor	pH	g/t	pH	TiO_2 no CF	P_2O_5 no CF	CaO no CF	Mássica	TiO_2	Enriquecimento TiO_2	Enriquecimento CaO	TiO_2 no Rej
11	1	0	0	450	5,50	15,46	0,98	18,78	29,63	61,98	2,09	1,70	3,99
7	2	0	-1,41	450	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	3	0	0	450	5,50	13,64	1,38	18,66	38,10	70,33	1,85	1,69	3,54
4	4	1	1	600	7,50	12,49	1,35	18,57	50,42	85,21	1,69	1,68	2,20
5	5	-1,41	0	238	5,50	11,48	0,89	13,70	16,48	25,60	1,55	1,24	6,58
13	6	0	0	450	5,50	14,81	1,44	19,75	34,26	68,61	2,00	1,79	3,53
8	7	0	1,41	450	8,33	12,10	1,52	16,77	42,48	69,55	1,64	1,52	3,91
1	8	-1	-1	300	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	9	-1	1	300	7,50	12,49	2,03	16,85	28,44	48,11	1,69	1,53	5,36
6	10	1,41	0	662	5,50	15,28	1,50	20,09	32,42	67,13	2,07	1,82	3,59
9	11	0	0	450	5,50	16,12	1,15	19,78	23,74	51,72	2,18	1,79	4,68
2	12	1	-1	600	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	13	0	0	450	5,50	13,93	1,43	18,86	36,51	68,68	1,88	1,71	3,65

Fonte: Dados da pesquisa.

No total foram realizados 13 testes, sendo 5 pontos centrais e 8 pontos nas extremidades formando uma estrela de oito pontas. Com isso tem-se 7 graus de liberdade para o cálculo do erro aleatório do experimento.

4.8.1 Recuperação mássica da flotação de TiO_2

A Tabela 44 apresenta o relatório de análise estatística das informações de recuperação mássica obtidas neste fatorial. Observa-se, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 89,88% e o R^2 de predição foi de 80,29%. Os Fatores dosagem de coletor em g/t e pH são significativos ($p\text{-value} < 0,05$) ao nível de significância de 5%. A dosagem de coletor contribuiu com 7,34% na variabilidade da resposta recuperação mássica deste experimento e o pH contribuiu com 71,49% na variabilidade da resposta recuperação mássica deste experimento.

Tabela 44: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de titânio. (Apêndice 23).

Sumário do Modelo			
	R^2 (aj)	R^2 pred	
	89,88%	80,29%	
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	94,09%	0,000
Linear	2	78,84%	0,000
Coletor g/t	1	7,34%	0,021
pH	1	71,49%	0,000
Quadrado	2	11,68%	0,022
Coletor*Coletor	1	3,27%	0,050
pH*pH	1	8,41%	0,016
Interação com 2 Fatores	1	3,58%	0,078
Coletor*pH	1	3,58%	0,078
Erro	7	5,91%	
Falta de ajuste	3	1,89%	0,635
Erro puro	4	4,02%	
Total	12	100,0%	

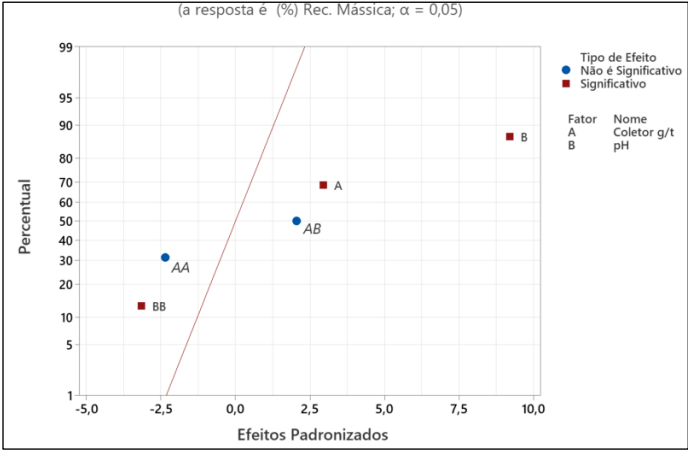
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que a interação entre coletor e pH não é significativa para a construção do modelo. Por outro lado, o quadrado tanto do pH e do coletor são relevantes para a construção do modelo sendo que este último ficou no limite da rejeição.

Observa-se ainda na Tabela 44 que apesar da contribuição do erro aleatório ter sido de 5,91%, a falta de ajuste não foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, uma vez que o $p\text{-value}$ determinado foi de 63,5%.

Na Figura 69 é apresentado o gráfico normal dos efeitos padronizados, nesse nota-se que os fatores A e B, dosagem de coletor e pH, aumentam a resposta do experimento e o fator BB (quadrado do pH) reduz a resposta do experimento, recuperação mássica.

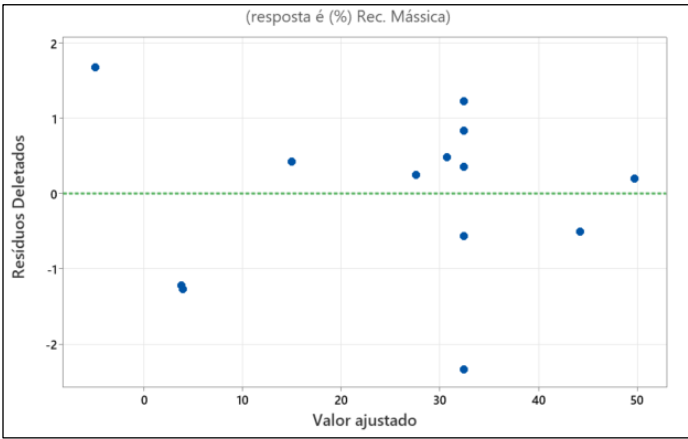
Figura 69: Gráfico normal dos efeitos padronizados da recuperação mássica obtida no experimento.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 70 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório destes.

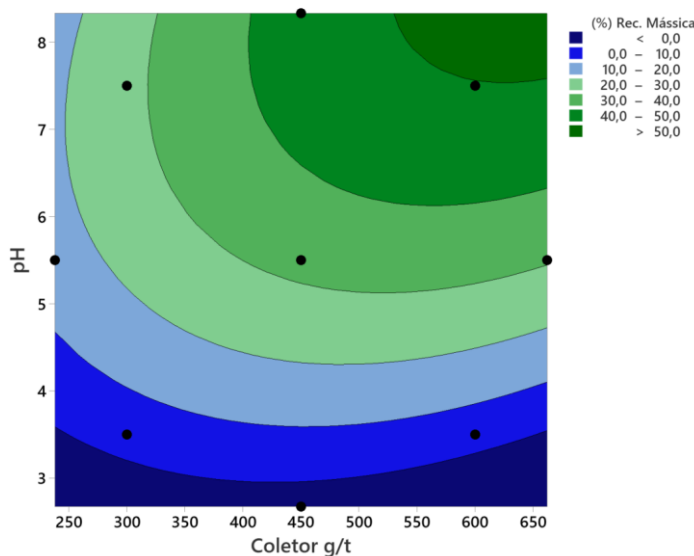
Figura 70: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação mássica.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 71, apresenta o comportamento da recuperação mássica em diferentes valores de pH e dosagem de coletor carboxilato de sódio.

Figura 71:Gráfico de contorno para a resposta recuperação mássica da flotação de titânio.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se no gráfico de contorno da Figura 71 que a recuperação mássica aumenta com a elevação do pH, por isso a grande contribuição desta variável na resposta do experimento. No pH ácido (< 5), o esfeno (titanita) e a perovskita, não são adequadamente coletados devido à protonação excessiva da superfície e devido a isso a faixa de flotação esperada é entre 6 a 8, além disso, tem-se o fato da distribuição das espécies iônicas ou molecular do coletor, dependendo do pH, em meio ácido temos predominância da espécie molecular e menor disponibilidade da espécie iônica que interage com a superfície e age como coletor carboxilato de sódio da titanita está entre pH 6,0 e 8,0.

4.8.2 Recuperação metalúrgica de TiO_2 na flotação

A resposta de recuperação metalúrgica de TiO_2 , obtida a partir do teste fatorial variou entre 0% e 85,21%. A Tabela 45 apresenta o relatório de análise estatística. Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 91,51% e o R^2 de predição foi de 76,59%. O fator dosagem de coletor, contribuiu com 10,26% e o pH em 59,99% na variabilidade da resposta deste experimento. Observa-se que a interação entre coletor e pH não é significativa para a construção do modelo. Por outro lado, o quadrado tanto do coletor quanto do pH são relevantes para a construção do modelo.

Tabela 45: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica de TiO_2 do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de titânio. (Apêndice 24).

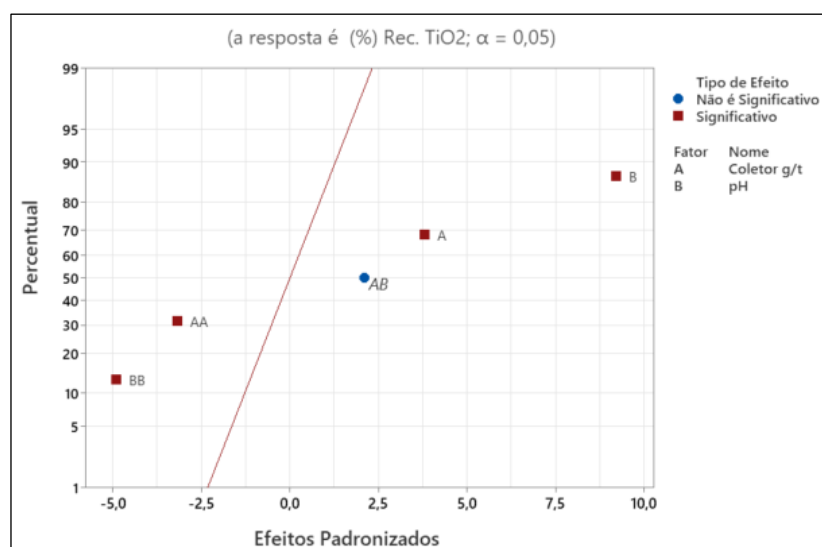
Sumário do Modelo			
R^2 (aj)	R^2 pred		
91,51%	76,59%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	95,05%	0,000
Linear	2	70,25%	0,000
Coletor g/t	1	10,26%	0,007
pH	1	59,99%	0,000
Quadrado	2	21,72%	0,003
Coletor*Coletor	1	4,68%	0,015
pH*pH	1	17,04%	0,002
Interação com 2 Fatores	1	3,08%	0,075
Coletor*pH	1	3,08%	0,075
Erro	7	4,95%	
Falta de ajuste	3	2,83%	0,291
Erro puro	4	2,13%	
Total	12	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se ainda na Tabela 45 que a contribuição do erro aleatório foi de 4,95%, a falta de ajuste foi considerada irrelevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,291.

O gráfico apresentado na Figura 72, demonstra que os fatores dosagem de coletor e pH, contribui para aumentar a resposta do experimento no nível mais alto. O quadrado de ambos coletor e pH, reduzem a resposta do experimento.

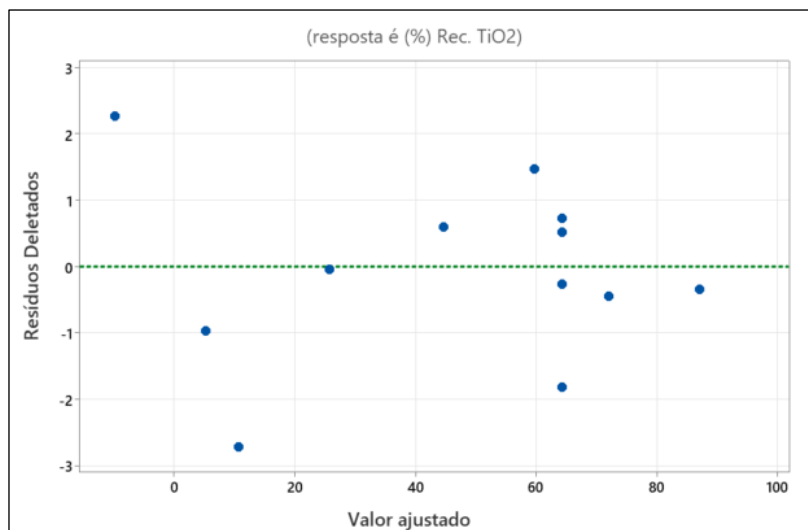
Figura 72: Gráfico normal dos efeitos padronizados para a recuperação de TiO_2 .



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 73 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento aleatório destes.

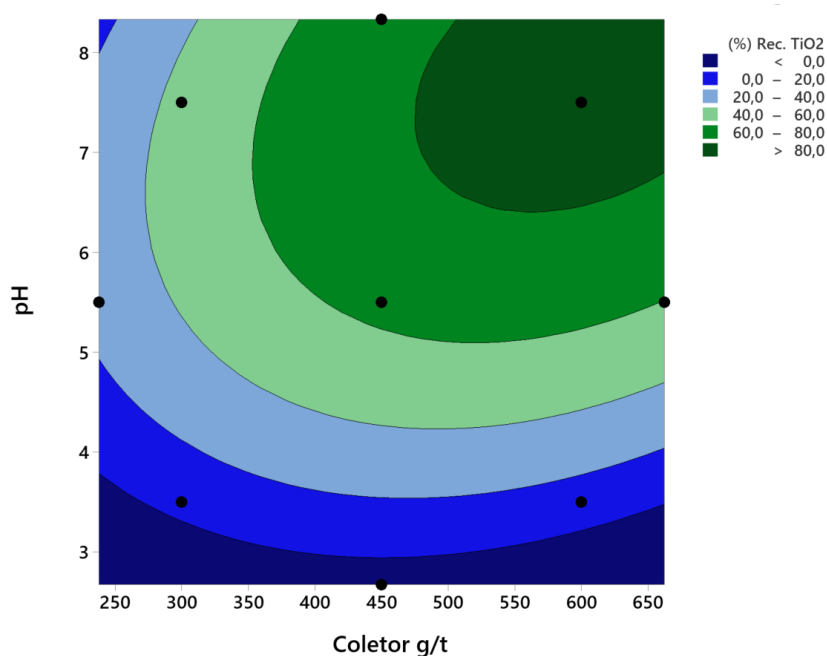
Figura 73: Gráfico dos resíduos deletados para a recuperação metalúrgica de TiO_2 .



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 74, apresenta o comportamento da recuperação de TiO_2 para diferentes dosagens de coletor e pH.

Figura 74: Gráfico de contorno para a resposta recuperação de TiO_2 .



Fonte: Dados da pesquisa.

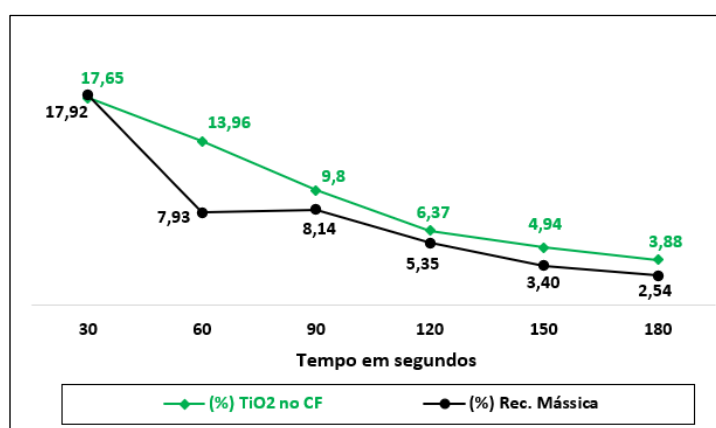
A região com maior recuperação metalúrgica, neste caso, 80% apresentam pH entre 6,5 e 8,5 e dosagem de coletor entre 500 e 650 g/t nesta região o teor de TiO_2 foi de 12,49% e recuperação

mássica de 50,4%. Avaliando que se pode realizar etapas *cleaner* e *recleaner* esta configuração apresenta-se interessante a ser explorada em trabalhos futuros.

4.8.3 Teores de TiO_2 no concentrado final

Primeiramente foram realizados os testes de cinética de flotação de titânio. Conforme gráfico apresentado na Figura 75 no qual foi realizado a coleta de concentrado a cada 30 segundos desta flotação analisando a massa e os teores em cada um destes intervalos.

Figura 75: Teste de cinética de flotação do titânio em pH 5,5, dosagem de 450 g/t de carboxilato de sódio e de 30 g/t de espumante.



Fonte: Dados da pesquisa.

O resultado dos teores de TiO_2 e a recuperação mássica, conforme apresentados na Figura 75 demonstraram que nos primeiros 90 segundos têm-se o concentrado com maiores concentrações e que a recuperação mássica total deste intervalo é de 34% com teor médio de 14,90% de TiO_2 .

Posteriormente realizou-se a flotação conforme planejamento fatorial. A Tabela 46 apresenta o relatório de análise estatística das informações obtidas neste processo.

Pode-se observar, primeiramente que o R^2 ajustado obtido a partir dos dados experimentais foi de 85,24% e o R^2 de predição foi de apenas 43,93%. O fator dosagem de coletor, contribuiu com apenas 0,78% não apresentando significância para a variabilidade da resposta teor de TiO_2 no concentrado ao nível de significância de 0,05, para a faixa avaliada no estudo. Por outro lado, o pH contribuiu com 48,01% na variabilidade da resposta deste experimento. Observa-se que a interação entre coletor e pH não foi significativa para a construção do modelo.

Tabela 46: Análise estatística da resposta de teores de TiO_2 no concentrado final da flotação de titânio. (Apêndice 25).

Sumário do Modelo			
R ² (aj)	R ² pred		
85,24%	43,93%		
Análise de Variância			
Fonte	GL	Contribuição	Valor-P
Modelo	5	91,39%	0,001
Linear	2	48,79%	0,001
Coletor g/t	1	0,78%	0,451
pH	1	48,01%	0,000
Quadrado	2	42,60%	0,002
Coletor*Coletor	1	1,22%	0,125
pH*pH	1	41,38%	0,001
Interação com 2 Fatores	1	0,00%	1,000
Coletor*pH	1	0,00%	1,000
Erro	7	8,61%	
Falta de ajuste	3	7,68%	0,021
Erro puro	4	0,93%	
Total	12	100,0%	

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se ainda na Tabela 46 que a contribuição do erro aleatório foi de 7,68%, indicando que uma parte da variação nos resultados não foi explicada pelos fatores do modelo. A falta de ajuste foi considerada relevante para a construção do modelo ao nível de significância de 5%, pois o *p-value* determinado foi de 0,021. Isso significa que a discrepância entre o modelo e os dados observados é estatisticamente significativa. No entanto, apesar dessa falta de ajuste, não compromete a avaliação do que é ou não é significativo para o sistema. Em outras palavras, as conclusões sobre a importância dos fatores permanecem válidas, mas o modelo perde apenas a capacidade de previsibilidade, ou seja, ele pode não ser tão eficaz para prever resultados futuros, mas ainda é útil para identificar quais variáveis têm um impacto significativo.

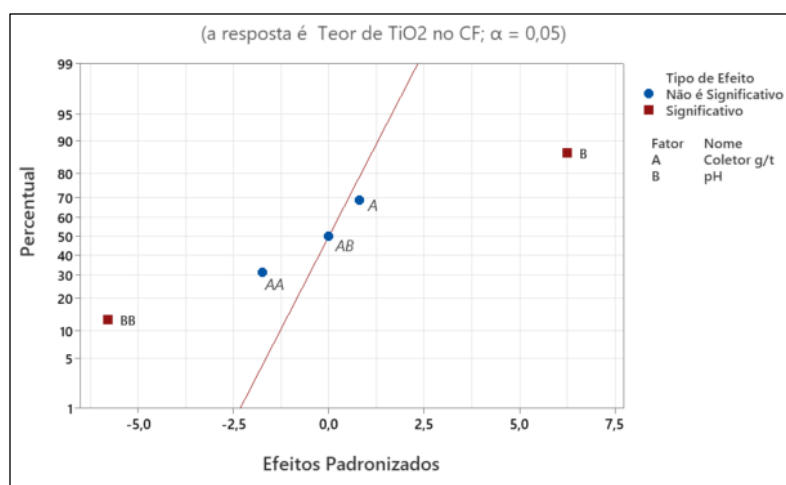
Uma das hipóteses para o erro aleatório ter sido considerado relevante está relacionada à curva de análise de fluorescência de raios X (FRX), que não está padronizada para a análise de concentrado de titânio. Para melhorar a precisão da análise, seria necessário gerar uma curva apropriada com padrões específicos deste óxido, o que permitiria continuar o desenvolvimento dessa rota de concentração do titânio de forma mais confiável.

O gráfico apresentado na Figura 76 mostra o gráfico normal dos efeitos padronizados, no qual se observa que o fator B (pH) contribui para aumentar a resposta do experimento, ou seja, o teor de TiO_2 , no nível mais alto de pH. A explicação técnica para esse comportamento pode ser encontrada na revisão bibliográfica de Hu et al. (2012), que aponta que a melhor faixa de pH para a flotação dos minerais de titânio, como perovskita e titanita, está entre 7 e 9. O estudo indica que, dentro dessa faixa de pH, o carboxilato de sódio apresenta melhor adsorção na

superfície dos minerais de titânio, aumentando sua hidrofobicidade e, conseqüentemente, sua recuperação durante o processo de flotação. Por outro lado, quando o pH é muito baixo ou muito alto, a ionização dos coletores pode ser desfavorável, reduzindo a eficiência do processo e comprometendo a recuperação dos minerais de titânio.

Assim, esses resultados sugerem que, para otimizar a flotação de minerais de titânio, é essencial manter o pH dentro da faixa ideal, conforme indicado pela literatura, e ajustar as condições de análise para melhorar a precisão dos resultados, especialmente no que se refere ao uso da fluorescência de raios-X.

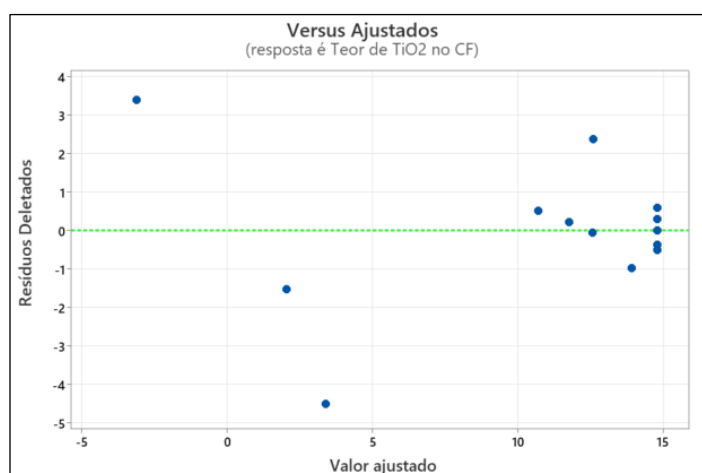
Figura 76: Gráfico normal dos efeitos padronizados para o teor de TiO_2 no concentrado da flotação de titânio.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 77 é apresentado o gráfico dos resíduos deletados, no qual se observa comportamento agrupado dos resíduos visto que a falta de ajuste foi considerada significativa.

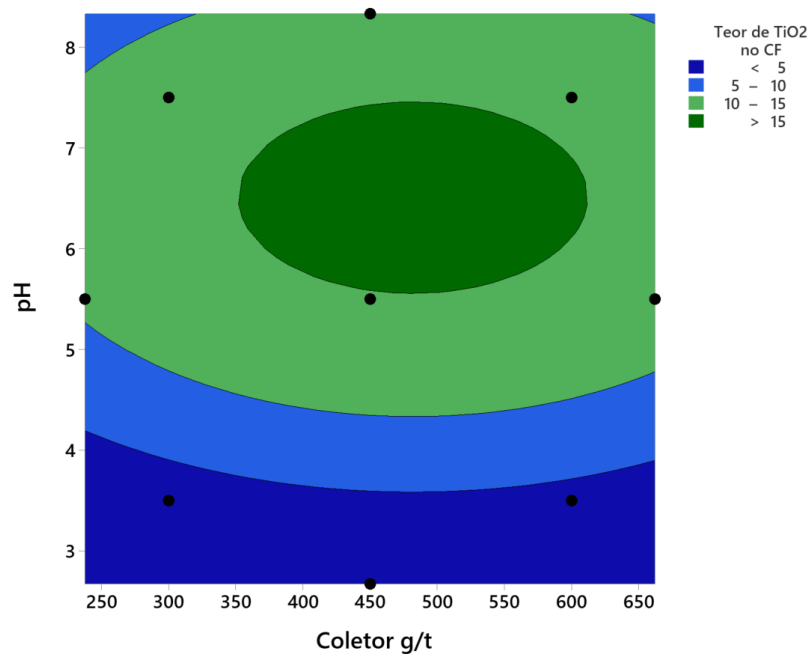
Figura 77: Gráfico dos resíduos deletados para o teor de TiO_2 no concentrado final.



Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 78, apresenta o comportamento da recuperação de TiO_2 para diferentes dosagens de coletor e pH.

Figura 78: Gráfico de contorno para a resposta teor de TiO_2 no concentrado final da flotação de titânio.



Fonte: Dados da pesquisa.

A região com maior qualidade do concentrado de titânio, neste caso maior que 15% de TiO_2 , apresentam pH entre 6,5 e 7,5 e dosagem de coletor entre 350 e 600 g/t.

5. CONCLUSÃO

O objetivo geral de avaliar o potencial de produção de coprodutos a partir do rejeito *scavenger* da flotação de apatita do trabalho foi alcançado, sendo que este trabalho demonstrou caminhos para a produção de um concentrado secundário de fosfato, concentrado de magnetita e concentrado de titânio.

A avaliação dos resultados demonstrou que não há necessidade de moagem visto que não houve ganhos significativos ao se submeter o rejeito *scavenger* (matéria prima deste trabalho) às separações magnéticas de baixo e alto campo.

A melhor rota para a produção do concentrado secundário de fosfato determinada através dos testes de bancada foi a de submeter o rejeito da flotação *scavenger* industrial à separação magnética de baixo campo e o produto não magnético à flotação de apatita, alcançando assim maiores teores e recuperação de P_2O_5 , esta rota além de reduzir o consumo de depressor, pode ser implementada industrialmente com o uso de coluna de flotação, equipamento que a empresa já possui como recurso que pode ser adaptado para aplicação neste projeto.

Os resultados de concentração da mesa oscilatória demonstraram potencial de enriquecimento dos teores de Fe_2O_3 do magnético, no entanto necessitam de mais testes visando alcançar a meta de teor de 92% de Fe_2O_3 .

Os testes de flotação do titânio demonstraram que este apresenta potencial de concentração, sendo que os experimentos de bancada convergiram para a teoria de que o pH desta flotação deve estar entre 7 e 9. Utilizando pH de 7,5 e dosagem de 600 g/t de carboxilato de sódio, obteve-se um concentrado com teor de 12,49% de TiO_2 , logo enriquecendo de 7,39 para 12,49%, o que significa uma razão de enriquecimento de 1,69 vezes. A recuperação mássica foi de 50,42% e a metalúrgica de 85,21% de TiO_2 .

Recomenda-se a continuidade deste estudo de concentração do titânio aplicando-se estágios *cleaners*, atentando-se ao teor de P_2O_5 que se elevou de 1,10% na alimentação da flotação de titânio para 1,39% no concentrado desta, considerando que este elemento é deletério para a metalurgia do titânio, recomenda-se aumentar a recuperação de apatita na flotação de apatita, etapa anterior a flotação de titânio, visando reduzir ao máximo o teor de P_2O_5 no rejeito que é a alimentação da flotação de titânio.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para estudos futuros:

- Estudar o enriquecimento da magnetita através de estágios em série de limpeza (*cleaners*);
- Em mesa oscilatória, otimizar os testes com o magnético de baixo campo visando alcançar o máximo teor de Fe_2O_3 no denso deste equipamento;
- Explorar a concentração gravítica utilizando hidrociclones;
- Aplicar a separação magnética de alto campo após a flotação para elevar o teor do concentrado final já alcançado de 24% para valores maiores e assim agregar ainda mais valor neste concentrado;
- Reduzir o P_{80} do rejeito da flotação da flotação *scavenger* de apatita e avaliar o ganho em termos de recuperação, realizando uma avaliação econômica para verificação se o ganho em recuperação paga o investimento de uma remoagem deste rejeito;
- Reanalisar os teores dos concentrados da flotação de titânio com a curva própria;
- Estudar novo teste fatorial da flotação de titânio com pH ajustado para 8 e variar em dois níveis as dosagens de coletor carboxilato de sódio e depressor amido de mandioca;
- Estudar a aplicabilidade dos coletores propostos pela empresa Clariant para a flotação de titânio, a saber: CADM 24-031, composto por acetato de alquil amina com álcool cadeia alquil, CADM 24-032, cuja composição é alquil éter diamina e o CADM 24-033, composto por cloreto de alquil amônia com isopropanol.
- Estudar a flotação de titânio presente no magnético de alto campo, este material apresentou teores de TiO_2 em torno de 10%.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. M.; SILVA, R. T.; OLIVEIRA, P. R. **Comparative Analysis Between Mechanical Cells and Flotation Columns**. Minerals Engineering, 2015.
- AMARAL, A. J. R. **Principais Depósitos Minerais do Brasil** – Cap. 1 – Geologia do Fosfato – p. 3-15. DNPM, 2005.
- ARAUJO, A. C. Introdução. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, 11-16.
- BALTAR, C.A.M. **Flotação: em nova Abordagem**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2021.
- BARBOSA, E. S. R. et al. **Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite-carbonatite-phoscorite association, Central Brazil**. 2012. 144 p.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- BAYRAKTAR, D.; ERSAYIN, S.; GULSOY, O. Y. **Flotation Behavior of Titanium Minerals**. Minerals Engineering, 1997a.
- BAYRAKTAR, I.; ERSAYIN, S.; GULSOY, O. Y. **Upgrading titanium bearing Na-feldspar by flotation using sulphonates, succinamate and soaps vegetable oils**. Minerals Engineering, v.1, N° 12, 1997b.
- BORGES, M. E. **Modelagem geológico-geofísica da anomalia magnética de Pratinha I e suas implicações**. 2023. 115 p. Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2023.
- BROD, J. A.; Ribeiro, C. C.; Gaspar, J. C.; Junqueira-Brod, T. C.; Barbosa, E. S. R.; Riffel, B. F.; Silva, J. F.; Chaban, N.; Ferrari, A. J. D. **Excursion guide: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalinos-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba**. Sociedade Brasileira de Geologia, 2004.
- BULATOVIC, S. M. **Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and Practice: Flotation of sulfide ores**. Elsevier Science & Technology Books, Volume 1, 2007.

CALDARA, J. A.; CORREIA, J. C. G. **Abordagem sobre a aplicação da flotação em coluna em beneficiamento mineral.** In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** 3ª ed. Volume 1, São Paulo: Editora Signus, 2013.

DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. **Manual de Mineralogia.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora da Universidade de São Paulo, 1969, Volume 1.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An Introduction to the Rock-Forming Minerals.** 2ª ed. Longman, 1992.

FERREIRA, M. G.; SANTOS, L. A.; PEREIRA, V. **Column Flotation Efficiency for Fine Particle Recovery.** Minerals Engineering, 2019.

FUERSTENAU, D. W.; RAVI, V.; HO, K. **Flotation of Titanium Minerals in Alkaline Conditions.** Elsevier, 2007.

FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G. J.; YOON, R. H. **Froth Flotation: A Century of Innovation.** SME, 2007.

GILMOUR, R. **Phosphoric acid, purification, uses, technology, and economics.** Taylor & Francis Group, LLC, 2014.

GUPTA, Y.; YAN, D. **Mineral Processing Design and Operation.** Elsevier, 2006.

HU, Y. H.; HE, P.; JIN, J. **Adsorption Characteristics of Oleic Acid on Calcium-Titanium Minerals. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,** 2012.

LASKOWSKI, J. S.; WESSEL, J.; ZENG, H. **Clay Minerals and Flotation Recovery in Titanium Minerals.** International Journal of Mineral Processing, 1999.

LOUREIRO, F. E.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais – Fosfato. In: LUZ, A. B. da.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais industriais: usos e especificações.** Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 141-174.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de minérios.** 5ª edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MITCHELL, R. H. **Perovskites: Modern and Ancient.** Almaz Press, Ontario, 2002.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NUNES, D. G.; COUTO, H. J. B.; FRANÇA, S. C. A. **Aplicação da flotação em Coluna na concentração de ferro de baixo teor**. Artigo, 2009.

OLIVEIRA, M. S.; SANTANA, R. C.; ATAÍDE, C. H.; BARROZO, M. A. S. **Recovery of apatite from flotation tailings**. Separation and Purification Technology, v.79, p. 79-84, 2011.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C. **A Flotação como Operação Unitária no Tratamento de Minérios**. In: **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 2ª ed. Volume 4, São Paulo: Editora Signus, 2007, cap. 01, pp. 1-30.

REIS, A. S.; REIS, F.; ARGILEU, M.; DEMUNER, L. R.; BARROZO, M. A. S. **Effect of bubble size on the performance flotation of fine particles of a low-grade Brazilian apatite ore**. Powder Technology, v. 356, p. 884-891, 2019.

RUTTENBERG, K. C. **The global phosphorus cycle**. Treatise on Geochemistry, v. 8, p. 682, 2003.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A. **Separação magnética e eletrostática**. In: Tratamento de minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.9. p. 367-393.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. de; SILVA, C. H. Folha Araxá, SE-23-Y-C-VI, Escala 1:100.000 (mapas, relatório SIG). In: Pedrosa-Soares, A., E.; Profeta, A. (Coordenadores), **Projeto Fronteiras de Minas**. CODEMIG-FUNDEP-UFMG, Editora CODEMIG, 2015.

SEIFELNASSR, A. A. S.; MOSLIM, E. M.; ABOUZEID, A. M. **Concentration of a Sudanese low-grade iron ore**. International Journal of Mineral Processing, 2013.

SIMÕES, F. F. **Avaliação Da Concentração De Apatita Utilizando Etapas De Flotação E Separação Magnética De Alto Campo**. Dissertação de mestrado. PPGEMIN - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2023.

SEVEROV, V. V.; FILIPOVA, I. V.; FILIPOV, L. O. **Use of fatty acids with an ethoxylated alcohol for apatite flotation from old fine-grained tailings**. Minerals Engineering, v. 188, 2022.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 234 p.

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

ZHAI, J. et al. **A review of mineral processing of ilmenite by flotation.** Minerals Engineering, 2020.

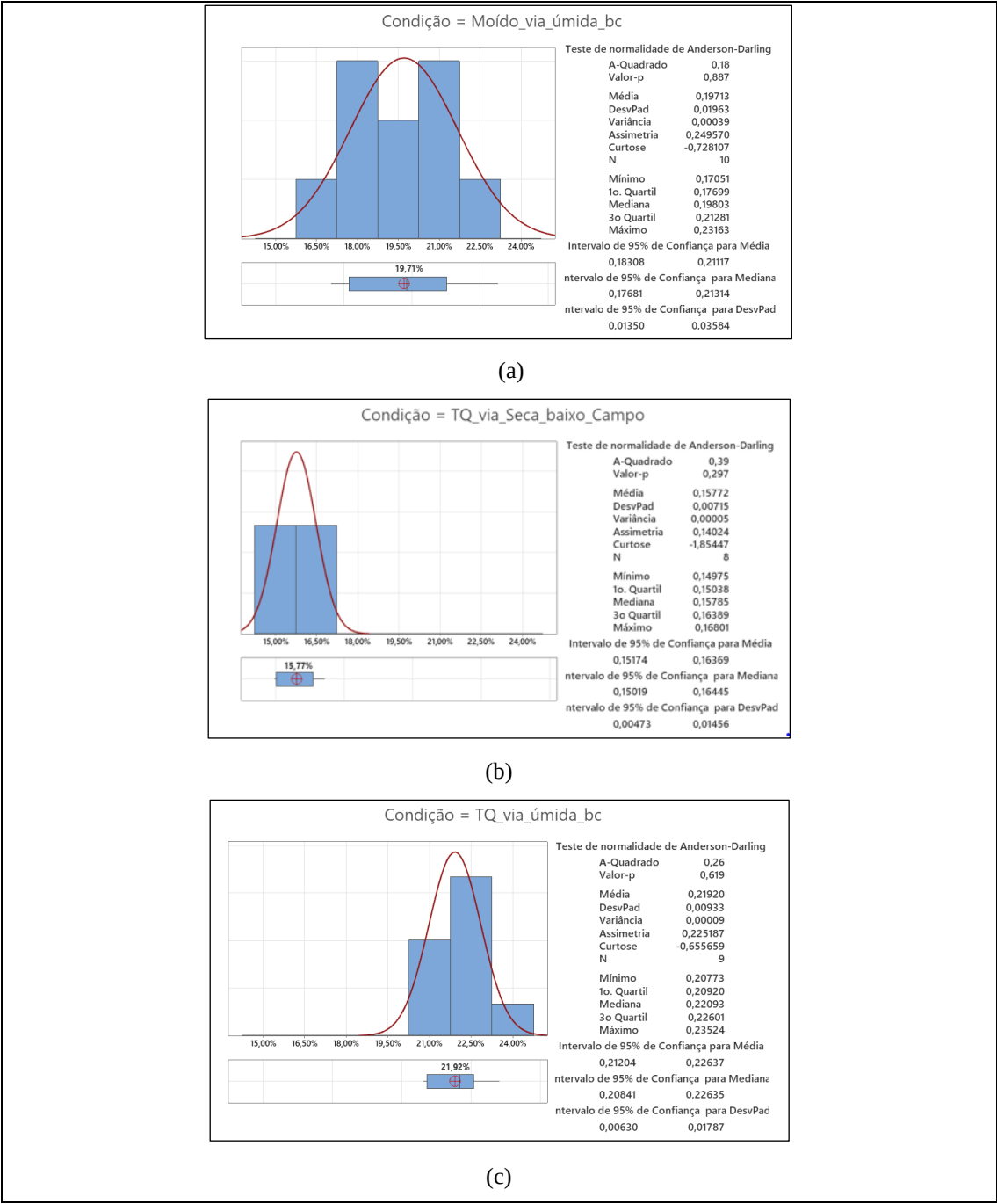
8. APÊNDICES

Apêndice 1: Composição mineralógica completa - TOTAL -0,50+0,020MM (MEV-EDS-MLA) – Rejeito Flotação

Mineral	% massa
apatita	3,8
aluminofosfatos	<0,1
monazita	<0,1
óxido-Fe	11,4
ilmenita	1,0
anatásio	1,1
goethita	0,7
óxi-hidróxidos de Mn	<0,1
perovskita	6,1
schorlomita-andradita	5,6
titanita	5,4
olivina	0,1
diopsídio	15
aegirina-augita	3,1
anfibólio-MgCaNaFeK	0,6
anfibólio-Na	0,8
hialofano	<0,1
plagioclásio	<0,1
anortoclásio	<0,1
K-feldspato	8,5
quartzo	1,8
mica-Mg (flogopita)	0,1
mica-FeMg (biotita+interestratíf)	13
muscovita	0,5
filossilicato-Fe(interestratíf)	1,6
filossilicato-MgFeAlK(interestratíf)	12,2
clorita-vermiculita	4,3
filossilicato-Mg	<0,1
filossilicato-FeMg	0,4
filossilicato-FeMgNaK	0,3
filossilicato-FeMnAl	0,1
serpentina	<0,1
caulinita	1,4
outros filossilicatos	0,1
gibbsita	<0,1
aglomerados	0,1
calcita	0,1
outros	0,1

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

Apêndice 2: Histogramas da recuperação mássica do magnético. Em (a) separação magnética de baixo campo via úmido do rejeito moído, em (b) separação magnética do rejeito sem moagem via seca e em (c) separação magnética do rejeito sem moagem via úmida.



Apêndice 3: Teste estatístico de ANOVA para avaliação da 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	162,97	81,484	43,28	0,000
Erro	24	45,19	1,883		
Total	26	208,15			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,37213	78,29%	76,48%	72,97%

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Condição	N	Média	Agrupamento
TQ_via_úmida_bc	9	21,919	A
Moído_via_úmida_bc	10	19,713	B
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	15,772	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Apêndice 4: Teste de ANOVA para os teores de Fe_2O_3 presentes no magnético de baixo campo.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2,65790	79,49%	77,78%	74,19%

Médias

Condição	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Moído_via_úmida_bc	10	48,71	3,39	(46,98; 50,45)
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	56,921	2,609	(54,982; 58,861)
TQ_via_úmida_bc	9	44,642	1,522	(42,814; 46,471)

DesvPad Combinado = 2,65790

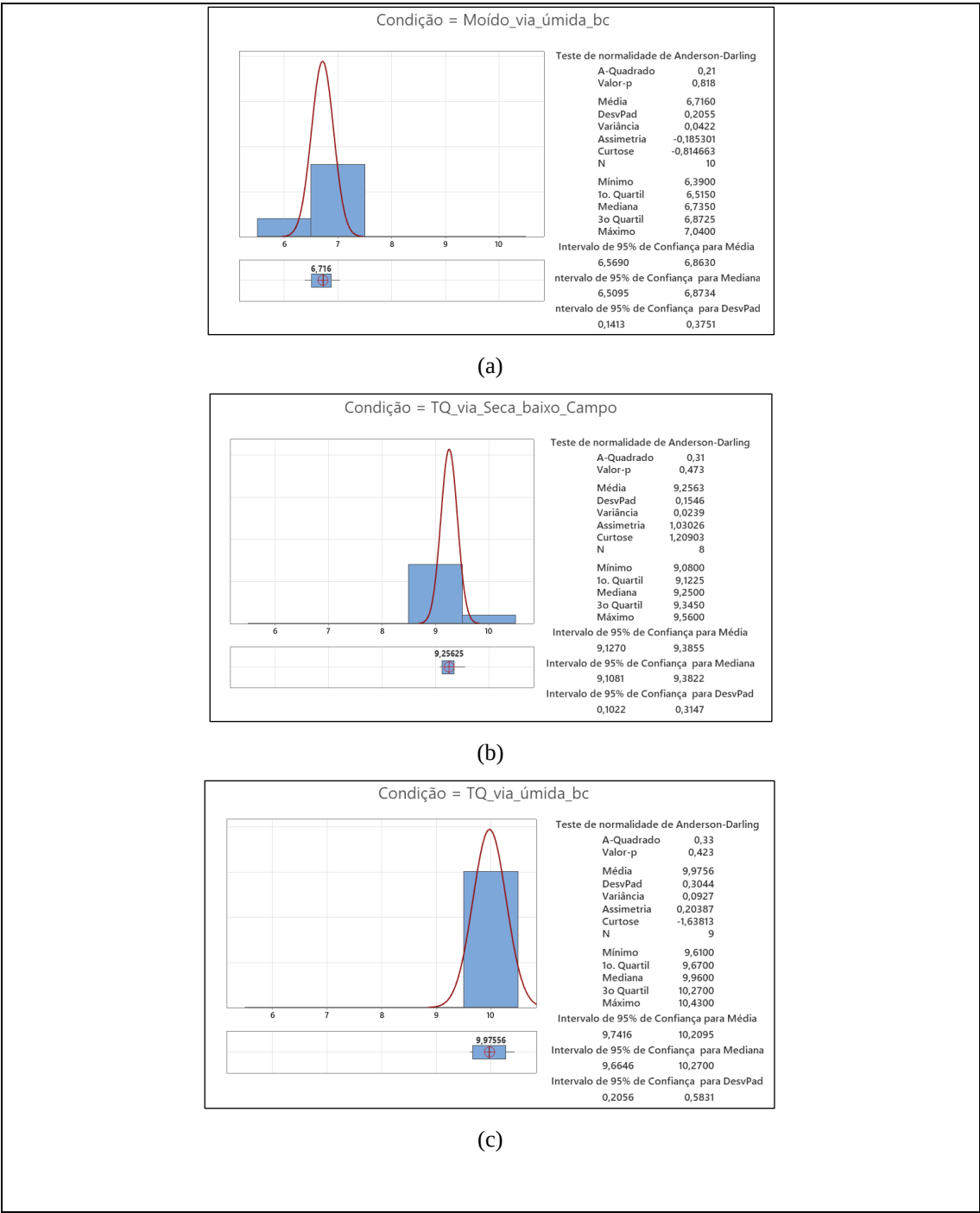
Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Condição	N	Média	Agrupamento
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	56,921	A
Moído_via_úmida_bc	10	48,71	B
TQ_via_úmida_bc	9	44,642	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Apêndice 5: Histograma teores de TiO_2 no magnético de baixo campo. Em (a) separação magnética de baixo campo via úmido do rejeito moído, em (b) separação magnética do rejeito sem moagem via seca e em (c) separação magnética do rejeito sem moagem via úmida.



Fonte: Dados da pesquisa.

Apêndice 6: Teste estatístico ANOVA para o teor de TiO_2 obtido no magnético de baixo campo.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,231719	97,75%	97,56%	97,16%

Médias

Condição	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Molido_via_úmida_bc	10	6,7160	0,2055	(6,5648; 6,8672)
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	9,2563	0,1546	(9,0872; 9,4253)
TQ_via_úmida_bc	9	9,976	0,304	(9,816; 10,135)

DesvPad Combinado = 0,231719

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Condição	N	Média	Agrupamento
TQ_via_úmida_bc	9	9,976	A
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	9,2563	B
Molido_via_úmida_bc	10	6,7160	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Apêndice 7: Teste de ANOVA para os teores de P_2O_5 presentes no magnético de baixo campo.

Sumário do Modelo

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

Médias

Condição	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Molido_via_úmida_bc	10	1,1370	0,0948	(1,0666; 1,2074)
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	1,3938	0,1090	(1,3150; 1,4725)
TQ_via_úmida_bc	9	1,7567	0,1201	(1,6824; 1,8309)

DesvPad Combinado = 0,107896

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e 95% de Confiança

Condição	N	Média	Agrupamento
TQ_via_úmida_bc	9	1,7567	A
TQ_via_Seca_baixo_Campo	8	1,3938	B
Molido_via_úmida_bc	10	1,1370	C

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Apêndice 8: Análise estatística do experimento fatorial para a resposta recuperação mássica da separação magnética de alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R ²	R ² (aj)	PRESQ	R ² (pred)	AICc	BIC	
0,973601	93,81%	88,31%	29,6156	78,52%	89,07	66,55	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	129,314	93,81%	129,314	16,164	17,05	0,000
Linear	3	124,117	90,04%	124,117	41,372	43,65	0,000
A	1	118,245	85,78%	118,245	118,245	124,74	0,000
B	1	0,874	0,63%	0,874	0,874	0,92	0,362
C	1	4,999	3,63%	4,999	4,999	5,27	0,047
Interações de 2 fatores	3	4,975	3,61%	4,975	1,658	1,75	0,226
A*B	1	0,503	0,36%	0,503	0,503	0,53	0,485
A*C	1	4,471	3,24%	4,471	4,471	4,72	0,058
B*C	1	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00	0,989
Interações de 3 fatores	1	0,050	0,04%	0,050	0,050	0,05	0,823
A*B*C	1	0,050	0,04%	0,050	0,050	0,05	0,823
Curvatura	1	0,172	0,12%	0,172	0,172	0,18	0,680
Erro	9	8,531	6,19%	8,531	0,948		
Falta de ajuste	1	0,154	0,11%	0,154	0,154	0,15	0,711
Erro Puro	8	8,377	6,08%	8,377	1,047		
Total	17	137,845	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas							
Rec. Mássica Magnético	=	10,00 - 6,27 A - 0,035 B - 0,00645 C + 0,049 A*B + 0,00789 A*C + 0,000004 B*C - 0,000064 A*B*C - 0,197 Pt Ct					

Apêndice 9: Análise estatística do experimento fatorial para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto magnético da separação magnética de alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
1,47978	95,10%	90,74%	257,456	35,93%	104,14	81,62	
Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	382,154	95,10%	382,154	47,769	21,81	0,000
Linear	3	370,893	92,29%	370,893	123,631	56,46	0,000
A	1	358,495	89,21%	358,495	358,495	163,71	0,000
B	1	0,171	0,04%	0,171	0,171	0,08	0,786
C	1	12,227	3,04%	12,227	12,227	5,58	0,042
Interações de 2 fatores	3	8,874	2,21%	8,874	2,958	1,35	0,318
A*B	1	7,940	1,98%	7,940	7,940	3,63	0,089
A*C	1	0,763	0,19%	0,763	0,763	0,35	0,570
B*C	1	0,171	0,04%	0,171	0,171	0,08	0,786
Interações de 3 fatores	1	0,208	0,05%	0,208	0,208	0,09	0,765
A*B*C	1	0,208	0,05%	0,208	0,208	0,09	0,765
Curvatura	1	2,179	0,54%	2,179	2,179	1,00	0,345
Erro	9	19,708	4,90%	19,708	2,190		
Falta de ajuste	1	2,009	0,50%	2,009	2,009	0,91	0,369
Erro Puro	8	17,699	4,40%	17,699	2,212		
Total	17	401,862	100,00%				

Apêndice 10: Análise estatística do experimento fatorial para a resposta recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético da separação magnética de alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
1,27484	93,33%	87,39%	20,9947	90,42%	98,78	76,25	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	204,531	93,33%	204,531	25,566	15,73	0,000
Linear	3	197,328	90,04%	197,328	65,776	40,47	0,000
A	1	190,713	87,02%	190,713	190,713	117,35	0,000
B	1	1,760	0,80%	1,760	1,760	1,08	0,325
C	1	4,855	2,22%	4,855	4,855	2,99	0,118
Interações de 2 fatores	3	6,413	2,93%	6,413	2,138	1,32	0,329
A*B	1	0,008	0,00%	0,008	0,008	0,01	0,945
A*C	1	6,288	2,87%	6,288	6,288	3,87	0,081
B*C	1	0,118	0,05%	0,118	0,118	0,07	0,794
Interações de 3 fatores	1	0,063	0,03%	0,063	0,063	0,04	0,848
A*B*C	1	0,063	0,03%	0,063	0,063	0,04	0,848
Curvatura	1	0,726	0,33%	0,726	0,726	0,45	0,521
Erro	9	14,627	6,67%	14,627	1,625		
Falta de ajuste	1	0,004	0,00%	0,004	0,004	0,00	0,963
Erro Puro	8	14,623	6,67%	14,623	1,828		
Total	17	219,158	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

(%) Rec. Fe_2O_3 Mag = 14,44 - 6,81 A - 0,011 B - 0,0033 C + 0,030 A*B + 0,0092 A*C - 0,000097 B*C - 0,000071 A*B*C - 0,404 Pt Ct

Apêndice 11: Análise estatística do experimento para a resposta teor de Fe_2O_3 no produto não magnético de alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
0,0643450	98,96%	98,04%	0,631511	82,43%	-8,73	-31,26	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	3,55614	98,96%	3,55614	0,44452	107,36	0,000
Linear	3	3,51912	97,93%	3,51912	1,17304	283,32	0,000
A	1	3,48480	96,98%	3,48480	3,48480	841,68	0,000
B	1	0,01531	0,43%	0,01531	0,01531	3,70	0,087
C	1	0,01901	0,53%	0,01901	0,01901	4,59	0,061
Interações de 2 fatores	3	0,01114	0,31%	0,01114	0,00371	0,90	0,480
A*B	1	0,00001	0,00%	0,00001	0,00001	0,00	0,957
A*C	1	0,00661	0,18%	0,00661	0,00661	1,60	0,238
B*C	1	0,00451	0,13%	0,00451	0,00451	1,09	0,324
Interações de 3 fatores	1	0,01531	0,43%	0,01531	0,01531	3,70	0,087
A*B*C	1	0,01531	0,43%	0,01531	0,01531	3,70	0,087
Curvatura	1	0,01056	0,29%	0,01056	0,01056	2,55	0,145
Erro	9	0,03726	1,04%	0,03726	0,00414		
Falta de ajuste	1	0,00506	0,14%	0,00506	0,00506	1,26	0,295
Erro Puro	8	0,03220	0,90%	0,03220	0,00402		
Total	17	3,59340	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

Fe_2O_3 _Não_Mag = 15,260 + 0,129 A - 0,00275 B - 0,000180 C + 0,01325 A*B + 0,000820 A*C + 0,000019 B*C - 0,000035 A*B*C - 0,0487 Pt Ct

Apêndice 12: Análise estatística do experimento para a resposta teor de TiO_2 no produto não magnético de alto campo.

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,260393	97,27%	94,84%	1,67964	92,48%	41,59	19,07

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	21,7236	97,27%	21,7236	2,7154	40,05	0,000
Linear	3	21,1791	94,83%	21,1791	7,0597	104,12	0,000
A	1	20,6510	92,47%	20,6510	20,6510	304,57	0,000
B	1	0,0028	0,01%	0,0028	0,0028	0,04	0,843
C	1	0,5253	2,35%	0,5253	0,5253	7,75	0,021
Interações de 2 fatores	3	0,4978	2,23%	0,4978	0,1659	2,45	0,131
A*B	1	0,0741	0,33%	0,0741	0,0741	1,09	0,323
A*C	1	0,3741	1,68%	0,3741	0,3741	5,52	0,043
B*C	1	0,0496	0,22%	0,0496	0,0496	0,73	0,415
Interações de 3 fatores	1	0,0325	0,15%	0,0325	0,0325	0,48	0,506
A*B*C	1	0,0325	0,15%	0,0325	0,0325	0,48	0,506
Curvatura	1	0,0141	0,06%	0,0141	0,0141	0,21	0,660
Erro	9	0,6102	2,73%	0,6102	0,0678		
Falta de ajuste	1	0,0072	0,03%	0,0072	0,0072	0,10	0,765
Erro Puro	8	0,6030	2,70%	0,6030	0,0754		
Total	17	22,3338	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\text{TiO}_2\text{Mag} = 9,575 - 0,707 A - 0,0255 B + 0,00016 C + 0,0095 A*B - 0,00020 A*C + 0,000063 B*C - 0,000051 A*B*C + 0,056 \text{ Pt Ct}$$

Apêndice 13: Análise estatística da recuperação mássica obtida a partir do modelo gerado por meio do teste fatorial de flotação da apatita, utilizando o rejeito tal qual coletado.

Sumário do Modelo							
S	R ²	R ² (aj)	PRESQ	R ² (pred)	AICc	BIC	
1,98067	94,52%	92,03%	110,154	86,01%	90,52	83,91	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	744,237	94,52%	744,237	148,847	37,94	0,000
Linear	2	720,712	91,53%	720,712	360,356	91,86	0,000
Depressor	1	39,397	5,00%	39,397	39,397	10,04	0,009
Coletor	1	681,314	86,53%	681,314	681,314	173,67	0,000
Quadrado	2	11,965	1,52%	11,965	5,982	1,52	0,260
Depressor*Depressor	1	11,954	1,52%	11,953	11,953	3,05	0,109
Coletor*Coletor	1	0,011	0,00%	0,011	0,011	0,00	0,959
Interação com 2 Fatores	1	11,560	1,47%	11,560	11,560	2,95	0,114
Depressor*Coletor	1	11,560	1,47%	11,560	11,560	2,95	0,114
Erro	11	43,154	5,48%	43,154	3,923		
Falta de ajuste	3	21,211	2,69%	21,211	7,070	2,58	0,126
Erro puro	8	21,943	2,79%	21,943	2,743	*	*
Total	16	787,390	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

(%)Rec_Mássica = 10,8 - 0,145 Depressor + 0,0666 Coletor + 0,000225 Depressor*Depressor + 0,000001 Coletor*Coletor - 0,000080 Depressor*Coletor

Apêndice 14: Análise estatística da recuperação metalúrgica obtida a partir do modelo gerado por meio do teste fatorial de flotação da apatita, utilizando o rejeito tal qual coletado.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
4,03564	88,81%	83,73%	511,690	68,05%	114,72	108,11	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1422,14	88,81%	1422,14	284,43	17,46	0,000
Linear	2	1278,84	79,86%	1278,84	639,42	39,26	0,000
A (g/t)	1	30,16	1,88%	30,16	30,16	1,85	0,201
B (g/t)	1	1248,69	77,98%	1248,69	1248,69	76,67	0,000
Quadrado	2	139,84	8,73%	139,84	69,92	4,29	0,042
A (g/t)*A (g/t)	1	8,84	0,55%	5,07	5,07	0,31	0,588
B (g/t)*B (g/t)	1	131,00	8,18%	131,00	131,00	8,04	0,016
Interação com 2 Fatores	1	3,45	0,22%	3,45	3,45	0,21	0,654
A (g/t)*B (g/t)	1	3,45	0,22%	3,45	3,45	0,21	0,654
Erro	11	179,15	11,19%	179,15	16,29		
Falta de ajuste	3	115,19	7,19%	115,19	38,40	4,80	0,034
Erro puro	8	63,96	3,99%	63,96	7,99	*	*
Total	16	1601,29	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$(\%)_{\text{Rec_P2O5}} = 19,8 - 0,157 A \text{ (g/t)} + 0,1599 B \text{ (g/t)} + 0,000146 A \text{ (g/t)} * A \text{ (g/t)} \\ - 0,000104 B \text{ (g/t)} * B \text{ (g/t)} + 0,000044 A \text{ (g/t)} * B \text{ (g/t)}$$

Apêndice 15: Análise estatística do teor de P₂O₅ no concentrado final obtida a partir do modelo gerado por meio do teste fatorial de flotação da apatita, utilizando o rejeito tal qual coletado.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
2,39738	93,24%	90,16%	200,463	78,56%	97,02	90,40	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	871,607	93,24%	871,607	174,321	30,33	0,000
Linear	2	774,545	82,85%	774,545	387,273	67,38	0,000
A (g/t)	1	12,312	1,32%	12,312	12,312	2,14	0,171
B (g/t)	1	762,233	81,54%	762,233	762,233	132,62	0,000
Quadrado	2	96,451	10,32%	96,451	48,225	8,39	0,006
A (g/t)*A (g/t)	1	0,049	0,01%	0,695	0,695	0,12	0,735
B (g/t)*B (g/t)	1	96,402	10,31%	96,402	96,402	16,77	0,002
Interação com 2 Fatores	1	0,611	0,07%	0,611	0,611	0,11	0,751
A (g/t)*B (g/t)	1	0,611	0,07%	0,611	0,611	0,11	0,751
Erro	11	63,222	6,76%	63,222	5,747		
Falta de ajuste	3	51,706	5,53%	51,706	17,235	11,97	0,003
Erro puro	8	11,516	1,23%	11,516	1,439	*	*
Total	16	934,828	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$P_2O_5_{CF} = 64,2 - 0,016 A \text{ (g/t)} - 0,1404 B \text{ (g/t)} + 0,000054 A \text{ (g/t)} * A \text{ (g/t)} \\ + 0,000090 B \text{ (g/t)} * B \text{ (g/t)} - 0,000018 A \text{ (g/t)} * B \text{ (g/t)}$$

Apêndice 16: Teste de hipótese para o teor de P_2O_5 no concentrado final comparando com e sem o uso do depressor na flotação de apatita realizada no rejeito da flotação *scavenger* tal qual coletado industrialmente.

Método

μ_1 : média de população de P_2O_5 -CF quando Condição = Com Depressor

μ_2 : média de população de $P_2O_5_CF$ quando Condição = Sem Depressor

Diferença: $\mu_1 - \mu_2$

Não assumiu-se igualdade de variâncias para esta análise.

Estatísticas Descritivas: P₂O₅_CF

Condição	N	Média	DesvPad	EP Média
Com Depressor	5	9,65	1,67	0,75
Sem Depressor	5	3,5300	0,0308	0,014

Estimativa da diferença

Diferença	IC de 95% para a Diferença
6,116	(4,045; 8,187)

Teste

Hipótese nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótese alternativa $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor-T	GL	Valor-p
8,20	4	0,001

Apêndice 17: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita após a separação magnética de baixo campo.

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1.73060	95.83%	92.86%	45.7788	90.90%	79.51	61.06

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	482,301	95,83%	482,301	96,460	32,21	0,000
Linear	2	445,945	88,61%	445,945	222,973	74,45	0,000
Depressor	1	70,621	14,03%	70,621	70,621	23,58	0,002
Coletor	1	375,325	74,58%	375,325	375,325	125,32	0,000
Quadrado	2	4,514	0,90%	4,514	2,257	0,75	0,505
Depressor*Depressor	1	1,559	0,31%	2,138	2,138	0,71	0,426
Coletor*Coletor	1	2,955	0,59%	2,955	2,955	0,99	0,354
Interação com 2 Fatores	1	31,842	6,33%	31,842	31,842	10,63	0,014
Depressor*Coletor	1	31,842	6,33%	31,842	31,842	10,63	0,014
Erro	7	20,965	4,17%	20,965	2,995		
Falta de ajuste	3	2,347	0,47%	2,347	0,782	0,17	0,913
Erro puro	4	18,618	3,70%	18,618	4,655	*	*
Total	12	503,266	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} (\%) \text{ Rec. Mássica} = & -18,8 - 0,0007 \text{ Depressor} + 0,0852 \text{ Coletor} + 0,000099 \text{ Depressor} * \text{Depressor} \\ & + 0,000016 \text{ Coletor} * \text{Coletor} - 0,000188 \text{ Depressor} * \text{Coletor} \end{aligned}$$

Apêndice 18: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita após ter sido submetido a separação magnética de baixo campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
2,76465	95,76%	92,73%	260,437	79,36%	91,68	73,24	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1208,40	95,76%	1208,40	241,68	31,62	0,000
Linear	2	1047,67	83,02%	1047,67	523,84	68,54	0,000
Depressor	1	15,52	1,23%	15,52	15,52	2,03	0,197
Coletor	1	1032,16	81,79%	1032,16	1032,16	135,04	0,000
Quadrado	2	159,86	12,67%	159,86	79,93	10,46	0,008
Depressor*Depressor	1	6,96	0,55%	1,01	1,01	0,13	0,727
Coletor*Coletor	1	152,89	12,12%	152,89	152,89	20,00	0,003
Interação com 2 Fatores	1	0,87	0,07%	0,87	0,87	0,11	0,746
Depressor*Coletor	1	0,87	0,07%	0,87	0,87	0,11	0,746
Erro	7	53,50	4,24%	53,50	7,64		
Falta de ajuste	3	31,87	2,53%	31,87	10,62	1,96	0,261
Erro puro	4	21,63	1,71%	21,63	5,41	*	*
Total	12	1261,90	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

(%) Rec. P2O5 = 2,8 - 0,088 Depressor + 0,1858 Coletor + 0,000068 Depressor*Depressor
 - 0,000117 Coletor*Coletor + 0,000031 Depressor*Coletor

Apêndice 19: Análise estatística da resposta teor de P₂O₅ no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação após ter sido submetido a separação magnética de baixo campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
2,53447	94,68%	90,87%	181,490	78,51%	89,42	70,98	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	799,462	94,68%	799,462	159,892	24,89	0,000
Linear	2	713,582	84,50%	713,582	356,791	55,54	0,000
Depressor	1	36,993	4,38%	36,993	36,993	5,76	0,047
Coletor	1	676,589	80,12%	676,589	676,589	105,33	0,000
Quadrado	2	79,975	9,47%	79,975	39,988	6,23	0,028
Depressor*Depressor	1	0,142	0,02%	0,627	0,627	0,10	0,764
Coletor*Coletor	1	79,833	9,45%	79,833	79,833	12,43	0,010
Interação com 2 Fatores	1	5,905	0,70%	5,905	5,905	0,92	0,370
Depressor*Coletor	1	5,905	0,70%	5,905	5,905	0,92	0,370
Erro	7	44,965	5,32%	44,965	6,424		
Falta de ajuste	3	20,047	2,37%	20,047	6,682	1,07	0,455
Erro puro	4	24,918	2,95%	24,918	6,229	*	*
Total	12	844,427	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

P₂O₅_CF = 86,5 - 0,060 Depressor - 0,1780 Coletor + 0,000053 Depressor*Depressor
 + 0,000085 Coletor*Coletor + 0,000081 Depressor*Coletor

Apêndice 20: Análise estatística da resposta recuperação mássica do modelo gerado a partir do teste fatorial da flotação de apatita após a separação magnética de baixo e alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
0,959939	98,11%	96,77%	19,5568	94,28%	64,18	45,74	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	335,371	98,11%	335,371	67,074	72,79	0,000
Linear	2	325,262	95,16%	325,262	162,631	176,49	0,000
Depressor	1	29,448	8,61%	29,448	29,448	31,96	0,001
Coletor	1	295,814	86,54%	295,814	295,814	321,02	0,000
Quadrado	2	3,164	0,93%	3,164	1,582	1,72	0,247
Depressor*Depressor	1	2,935	0,86%	3,101	3,101	3,37	0,109
Coletor*Coletor	1	0,229	0,07%	0,229	0,229	0,25	0,633
Interação com 2 Fatores	1	6,945	2,03%	6,945	6,945	7,54	0,029
Depressor*Coletor	1	6,945	2,03%	6,945	6,945	7,54	0,029
Erro	7	6,450	1,89%	6,450	0,921		
Falta de ajuste	3	1,708	0,50%	1,708	0,569	0,48	0,713
Erro puro	4	4,742	1,39%	4,742	1,186	*	*
Total	12	341,821	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

(%) Rec. Mássica = -0,6 - 0,0619 Depressor + 0,0579 Coletor + 0,000119 Depressor*Depressor + 0,000005 Coletor*Coletor - 0,000088 Depressor*Coletor

Apêndice 21: Análise estatística da resposta recuperação metalúrgica do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação de apatita após as separações magnéticas de baixo e alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
3,19163	95,67%	92,58%	349,386	78,80%	95,42	76,97	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1577,13	95,67%	1577,13	315,43	30,97	0,000
Linear	2	1251,94	75,95%	1251,94	625,97	61,45	0,000
Depressor	1	62,44	3,79%	62,44	62,44	6,13	0,042
Coletor	1	1189,51	72,16%	1189,51	1189,51	116,77	0,000
Quadrado	2	319,93	19,41%	319,93	159,97	15,70	0,003
Depressor*Depressor	1	9,65	0,59%	0,61	0,61	0,06	0,813
Coletor*Coletor	1	310,28	18,82%	310,28	310,28	30,46	0,001
Interação com 2 Fatores	1	5,25	0,32%	5,25	5,25	0,52	0,496
Depressor*Coletor	1	5,25	0,32%	5,25	5,25	0,52	0,496
Erro	7	71,31	4,33%	71,31	10,19		
Falta de ajuste	3	42,89	2,60%	42,89	14,30	2,01	0,255
Erro puro	4	28,42	1,72%	28,42	7,10	*	*
Total	12	1648,43	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

(%) Rec. P2O5 = -31,9 - 0,031 Depressor + 0,2900 Coletor + 0,000053 Depressor*Depressor - 0,000167 Coletor*Coletor - 0,000076 Depressor*Coletor

Apêndice 22: Análise estatística da resposta teor de P_2O_5 no concentrado final do modelo gerado a partir do teste fatorial de flotação após as separações magnéticas de baixo e alto campo.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
1,28010	98,26%	97,02%	50,1481	92,41%	71,67	53,22	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	649,010	98,26%	649,010	129,802	79,21	0,000
Linear	2	570,912	86,44%	570,912	285,456	174,20	0,000
Depressor	1	16,179	2,45%	16,179	16,179	9,87	0,016
Coletor	1	554,733	83,99%	554,733	554,733	338,53	0,000
Quadrado	2	78,031	11,81%	78,031	39,015	23,81	0,001
Depressor*Depressor	1	4,020	0,61%	0,750	0,750	0,46	0,521
Coletor*Coletor	1	74,011	11,21%	74,011	74,011	45,17	0,000
Interação com 2 Fatores	1	0,068	0,01%	0,068	0,068	0,04	0,845
Depressor*Coletor	1	0,068	0,01%	0,068	0,068	0,04	0,845
Erro	7	11,471	1,74%	11,471	1,639		
Falta de ajuste	3	5,808	0,88%	5,808	1,936	1,37	0,373
Erro puro	4	5,663	0,86%	5,663	1,416	*	*
Total	12	660,480	100,00%				

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$P_2O_5_{CF} = 54,8 + 0,0575 \text{ Depressor} - 0,1427 \text{ Coletor} - 0,000058 \text{ Depressor*Depressor} + 0,000082 \text{ Coletor*Coletor} + 0,000009 \text{ Depressor*Coletor}$$

Apêndice 23: Análise estatística da resposta de recuperação mássica, obtida a partir dos ensaios de flotação de titânio conduzidos segundo um delineamento fatorial.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
5,33612	94,09%	89,88%	665,173	80,29%	108,78	90,34	

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	3175,49	94,09%	3175,49	635,10	22,30	0,000
Linear	2	2660,59	78,84%	2660,59	1330,30	46,72	0,000
Coletor g/t	1	247,78	7,34%	247,78	247,78	8,70	0,021
pH	1	2412,81	71,49%	2412,81	2412,81	84,74	0,000
Quadrado	2	394,13	11,68%	394,13	197,06	6,92	0,022
Coletor g/t*Coletor g/t	1	110,31	3,27%	159,03	159,03	5,59	0,050
pH*pH	1	283,82	8,41%	283,82	283,82	9,97	0,016
Interação com 2 Fatores	1	120,77	3,58%	120,77	120,77	4,24	0,078
Coletor g/t*pH	1	120,77	3,58%	120,77	120,77	4,24	0,078
Erro	7	199,32	5,91%	199,32	28,47		
Falta de ajuste	3	63,75	1,89%	63,75	21,25	0,63	0,635
Erro puro	4	135,57	4,02%	135,57	33,89	*	*
Total	12	3374,81	100,00%				

Apêndice 24: Análise estatística da resposta de recuperação metalúrgica de TiO_2 , obtida a partir dos ensaios de flotação de titânio conduzidos segundo um delineamento fatorial.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
8,89393	95,05%	91,51%	2618,48	76,59%	122,06	103,62	
Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	10631,7	95,05%	10631,7	2126,33	26,88	0,000
Linear	2	7857,5	70,25%	7857,5	3928,76	49,67	0,000
Coletor g/t	1	1147,9	10,26%	1147,9	1147,94	14,51	0,007
pH	1	6709,6	59,99%	6709,6	6709,59	84,82	0,000
Quadrado	2	2429,9	21,72%	2429,9	1214,93	15,36	0,003
Coletor g/t*Coletor g/t	1	523,5	4,68%	805,4	805,43	10,18	0,015
pH*pH	1	1906,3	17,04%	1906,3	1906,35	24,10	0,002
Interação com 2 Fatores	1	344,3	3,08%	344,3	344,26	4,35	0,075
Coletor g/t*pH	1	344,3	3,08%	344,3	344,26	4,35	0,075
Erro	7	553,7	4,95%	553,7	79,10		
Falta de ajuste	3	316,0	2,83%	316,0	105,33	1,77	0,291
Erro puro	4	237,7	2,13%	237,7	59,43	*	*
Total	12	11185,4	100,00%				

Apêndice 25: Análise estatística da resposta de teor de TiO_2 , obtida a partir dos ensaios de flotação de titânio conduzidos segundo um delineamento fatorial.

Sumário do Modelo							
S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC	
2,38178	91,39%	85,24%	258,635	43,93%	87,81	69,36	
Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	421,585	91,39%	421,585	84,317	14,86	0,001
Linear	2	225,077	48,79%	225,077	112,538	19,84	0,001
Coletor g/t	1	3,610	0,78%	3,610	3,610	0,64	0,451
pH	1	221,467	48,01%	221,467	221,467	39,04	0,000
Quadrado	2	196,508	42,60%	196,508	98,254	17,32	0,002
Coletor g/t*Coletor g/t	1	5,608	1,22%	17,224	17,224	3,04	0,125
pH*pH	1	190,900	41,38%	190,900	190,900	33,65	0,001
Interação com 2 Fatores	1	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00	1,000
Coletor g/t*pH	1	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00	1,000
Erro	7	39,710	8,61%	39,710	5,673		
Falta de ajuste	3	35,430	7,68%	35,430	11,810	11,04	0,021
Erro puro	4	4,280	0,93%	4,280	1,070	*	*
Total	12	461,296	100,00%				